



Universidad  
Carlos III de Madrid  
[www.uc3m.es](http://www.uc3m.es)

## **TESIS DOCTORAL**

# **CONSIDERACIONES ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DE ARROLLAMIENTOS DE ESTABILIZACIÓN EN TRANSFORMADORES ESTRELLA-ESTRELLA**

Autor:

**Ángel Ramos Gómez**

Director:

**Juan Carlos Burgos Díaz**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Leganés, Octubre de 2015





## TESIS DOCTORAL

# CONSIDERACIONES ACERCA DE LA UTILIZACIÓN DE ARROLLAMIENTOS DE ESTABILIZACIÓN EN TRANSFORMADORES ESTRELLA-ESTRELLA

Autor: **Ángel Ramos Gómez**

Director: **Juan Carlos Burgos Díaz**

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: **José Jesús Fraile Mora**

---

Vocal: **Xose Manuel López Fernández**

---

Secretario: **Felipe Córcoles López**

---

Calificación:

Leganés, 11 de enero de 2016



## Agradecimientos

Culminar el desarrollo de una tesis doctoral es labor ardua y exigente que, cuando ha de compaginarse con el desempeño profesional en la empresa, no es posible desarrollar sin el apoyo de diversas personas en diferentes ámbitos. A todos ellos, por su contribución a diferentes niveles, van dedicadas estas líneas de sincero reconocimiento y gratitud.

A Juan Carlos Burgos, por ser mucho más que un director de la tesis. Gracias a su apoyo, a su trabajo, a su ánimo y a su empeño, esta tesis ha podido llegar a su conclusión. En 1994, y como consecuencia de su excelente labor docente, se despertó en mí un gran interés sobre el mundo de los transformadores. Más de veinte años después, ambos seguimos dedicando gustosamente parte de nuestro tiempo a profundizar sobre el comportamiento de estas máquinas eléctricas.

A Miguel Ángel Cardiel, por su colaboración en los cálculos de los modelos de circuito equivalente a secuencia homopolar, y a Samuel Fernández y Alejandro Moreno por su ayuda en la ejecución de las simulaciones.

A mis padres, mi primera y principal referencia en la vida, porque a ellos les debo la esencia de lo que soy, a partir de los valores que me han enseñado a través de su dedicación, de su ejemplo y de su cariño.

A Liliana y a mis hijos Ángel y Alba, que constituyen el combustible principal del que se alimentan mi vida y mis ilusiones. Su paciencia y comprensión con el tiempo que he invertido en el desarrollo de esta tesis no tienen precio, pero trataré de compensarlo con toda la dedicación que ellos merecen y yo anhelo.



## Resumen

El uso de los arrollamientos de estabilización se introdujo desde el comienzo de los sistemas eléctricos de potencia trifásicos con el objetivo de evitar algunos problemas detectados en la operación de transformadores y autotransformadores con conexión en estrella. La utilización de los arrollamientos de estabilización llegó incluso a convertirse en un requerimiento obligatorio en algunas legislaciones locales, al tiempo que aplicaciones auxiliares adicionales se encontraron para estos arrollamientos.

A pesar de que desde hace mucho tiempo se ha señalado la necesidad de un análisis crítico respecto a la necesidad y la conveniencia de utilizar los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella, especialmente en los diseños de núcleos trifásicos de tres columnas, sigue constituyendo una práctica muy habitual que muchas empresas eléctricas incorporen estos arrollamientos en las especificaciones de los transformadores estrella-estrella en base a la tradición, sin cuestionarse la necesidad real de los mismos. No se trata de una cuestión menor dado que la incorporación de los arrollamientos de estabilización, además de suponer un mayor coste económico del transformador, incorpora una mayor complejidad en el diseño y un mayor riesgo de fallo del equipo, especialmente como consecuencia del comportamiento electrodinámico del mismo ante cortocircuitos asimétricos. La literatura y normativa técnica disponible en la actualidad no aporta conclusiones claras y concretas, existiendo argumentos contrapuestos en algunas cuestiones y falta de detenimiento en otras.

La presente tesis doctoral tiene como principal objetivo definir y aplicar una metodología que permita determinar la necesidad real de utilizar arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas mediante un análisis global y detallado de los distintos factores que intervienen en la evaluación de dicha necesidad, cubriendo la carencia que, en este sentido, existe en la literatura y normativa técnica de los transformadores.

Una correcta toma de decisión respecto a la necesidad de los arrollamientos de estabilización requiere un detallado entendimiento del comportamiento ante secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella, dado que la presencia o ausencia de dichos arrollamientos tiene un impacto muy significativo sobre las características homopolares del transformador. Por este motivo, en la tesis doctoral se intenta avanzar en la identificación de los modelos de circuito equivalente y los ensayos necesarios para disponer de una representación del comportamiento de estos transformadores ante secuencia homopolar que conjuguen una precisión razonable con una aplicación sencilla.

La adecuada comprensión del problema requiere considerar en el análisis otros aspectos de gran relevancia, no abordados suficientemente en la literatura técnica, como la forma de conexión a tierra de los neutros de los arrollamientos primario y secundario de los

transformadores estrella-estrella (puestos a tierra o aislados), la influencia de las pantallas magnéticas o la disposición interna de los arrollamientos.

La posibilidad de prescindir del arrollamiento de estabilización en los transformadores estrella-estrella requiere analizar cuidadosamente el funcionamiento del transformador respecto a los terceros armónicos de corriente y de tensión derivados del comportamiento no lineal de la corriente de magnetización, valorar el riesgo de calentamiento de la cuba en situaciones de desequilibrio de las corrientes circulantes por el transformador y evaluar el impacto de la disminución de la impedancia homopolar en el conjunto de la red eléctrica de cara a garantizar la detección y eliminación eficaz de las corrientes de falta durante cortocircuitos asimétricos y el mantenimiento de un sistema eficazmente puesto a tierra. Todos estos aspectos, junto con la cuantificación del incremento de las corrientes de cortocircuito que tienen lugar como consecuencia de la presencia de los arrollamientos de estabilización, se han analizado en el curso de los trabajos de investigación desarrollados en la presente tesis doctoral mediante ensayos experimentales y simulaciones. Estos ensayos y simulaciones se han realizado en el contexto real de una empresa de distribución de electricidad, en base a su normalización de red y de transformadores. Sin embargo, la metodología general propuesta, así como la amplia casuística de situaciones estudiadas, permite generalizar su uso a redes eléctricas diferentes de las consideradas en la presente tesis y aplicar las conclusiones extraídas a la toma de decisión respecto a la necesidad y conveniencia de utilizar arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas.

# Abstract

Delta stabilizing windings have been used since early electric power system development to avoid some of the network operation drawbacks of using wye connections in power transformers and autotransformers. Utilization of stabilizing windings even became mandatory under some local regulations, and other auxiliary applications were also found for these windings.

Although the need for critical analysis of the decision to include a stabilizing winding in wye-wye connected transformers, particularly in relation to three-phase three-legged transformers, was pointed out many years ago, many power companies still maintain this practice for reasons of tradition without analyzing the decision. This is not a minor issue as stabilizing windings utilization, in addition to involve a higher economic cost of the transformer, suppose a more complex design and a higher failure probability for the equipment, especially due to the electrodynamic behavior under asymmetric short-circuits. The currently available technical bibliography and standards of transformers do not provide clear and specific conclusions, with conflicting arguments in some issues and lack of depth in others.

The main objective of this PhD dissertation is to conduct a comprehensive and detailed analysis of the factors that determine the actual need for stabilization windings in three-phase three-legged wye-wye transformers, covering the lack about this aspect that exists in the technical bibliography and standards of transformers.

The main objective of this PhD dissertation is to conduct a comprehensive and detailed analysis of the factors that determine the actual need for stabilization windings in three-phase three-legged wye-wye transformers, covering the lack about this aspect that exists in the technical bibliography and standards of transformers.

Making an appropriate decision about the need for stabilizing windings requires deep understanding of the wye-wye transformer's zero-sequence performance, since the presence or absence of such windings has a very significant impact on zero-sequence characteristics. For this reason, this PhD dissertation paid special attention to the identification of the equivalent circuit models and the tests necessary to achieve a reliable representation of the zero-sequence behavior of these transformers, combining a reasonable accuracy with a simple application.

Besides the effect of stabilizing windings, a proper understanding of this problem must take into account other relevant aspects as the means of grounding of the primary and secondary neutrals of the wye-wye transformers, the influence of magnetic shunts or the internal arrangement of windings.

The omission of stabilizing windings in wye-wye transformers requires careful analysis of third-harmonics in currents and voltages derived from non-linear behavior of magnetizing currents, assess tank overheating hazard in the event of unbalanced load conditions and evaluate the

impact of decreasing the zero-sequence impedance in the whole grid in order to maintain an effectively grounded system and to guarantee effective detection and removal of fault currents in the event of asymmetric short-circuits. All these aspects, along with the quantification of the increase in short-circuit currents which occur due to the presence of the stabilizing windings, have been analyzed in the course of the research work carried out in this PhD dissertation by means of experimental tests and simulations. These tests and simulations were performed in the actual context of a power utility, based on its own network and transformer standardization. Nevertheless, the proposed overall methodology based on the results obtained in the research work and the wide casuistry of studied situations, may be generalize and apply to the appropriate decision-making about the need and convenience of using stabilizing windings in three-legged wye-wye transformers.

# Índice General

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>i</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice general.....</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema: antecedentes y motivación .....	1
1.2. Objetivos de la tesis .....	3
1.3. Estructura de la tesis .....	4
<b>2. Consideraciones generales sobre los arrollamientos de estabilización: estado del arte.....</b>	<b>7</b>
2.1. El origen de los arrollamientos terciarios.....	7
2.2. El cuestionamiento de la necesidad universal de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella .....	14
2.3. Los arrollamientos de estabilización en la actualidad .....	18
2.3.1. Normativa técnica aplicable .....	19
2.3.2. Libros especializados de transformadores .....	23
2.3.3. Experiencias actuales en la especificación técnica de transformadores estrella-estrella.....	28
2.3.4. Referencias más recientes en revistas y congresos en relación al funcionamiento de los transformadores estrella-estrella y los arrollamientos de estabilización .....	29
2.4. Resumen del capítulo .....	32
<b>3. Planteamiento experimental de la tesis y transformadores objeto de estudio .....</b>	<b>33</b>
3.1. Aspectos a evaluar mediante ensayos y simulaciones .....	34
3.2. Normalización de la red y de los transformadores .....	35
3.3. Características de los transformadores objeto de estudio .....	39
3.4. Resumen del capítulo .....	41

<b>4.</b>	<b>Representación del comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante secuencia homopolar.....</b>	<b>43</b>
4.1.	Estado del arte de los modelos de circuito equivalente ante secuencia homopolar.....	44
4.1.1.	Representación circuital de los transformadores .....	44
4.1.2.	Estado del arte en la caracterización del comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante secuencia homopolar .....	45
4.1.3.	Ensayos de determinación de la impedancia homopolar .....	49
4.2.	Estudio experimental sobre la representación del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella.....	55
4.2.1.	Ensayos para la medida de las impedancias homopolares de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización .....	56
4.2.2.	Modelos circuitales para la caracterización del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.....	69
4.2.3.	Análisis de los resultados experimentales del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.....	80
4.3.	Resumen del capítulo .....	83
<b>5.</b>	<b>Análisis del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella .....</b>	<b>85</b>
5.1.	Análisis cualitativo del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella.....	86
5.1.1.	Funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización .....	86
5.1.2.	Funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización .....	89
5.2.	Análisis cuantitativo de la magnitud de la corriente de vacío y su contenido armónico	90
5.3.	Estudio experimental sobre la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento en vacío de un transformador estrella-estrella.....	93
5.3.1.	Ensayos con el neutro del transformador puesto a tierra .....	94
5.3.2.	Ensayos con el neutro del transformador aislado de tierra .....	101
5.3.3.	Análisis de los resultados de los ensayos .....	107
5.4.	Resumen del capítulo .....	111
<b>6.</b>	<b>Influencia de los arrollamientos de estabilización en el calentamiento de la cuba ante cargas desequilibradas de los transformadores estrella-estrella .....</b>	<b>113</b>
6.1.	Análisis cualitativo del comportamiento ante cargas desequilibradas de los transformadores estrella-estrella.....	114
6.2.	Calentamiento de la cuba por circulación de flujos homopolares .....	118
6.3.	Análisis del balance de amperios-vuelta y las trayectorias de flujo homopolar .....	121
6.4.	Ensayos de calentamiento con alimentación homopolar .....	125

---

6.4.1.	Ensayo de calentamiento con alimentación homopolar en transformador estrella-estrella de tipología #1.....	125
6.4.2.	Ensayo de calentamiento con alimentación homopolar en transformador estrella-estrella de tipología #2.....	141
6.5.	Metodología de evaluación del riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores estrella-estrella .....	149
6.6.	Resumen del capítulo.....	150
<b>7.</b>	<b>Influencia de los arrollamientos de estabilización en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuito .....</b>	<b>153</b>
7.1.	Problemática de los arrollamientos de estabilización en su comportamiento ante cortocircuitos.....	154
7.2.	Simulaciones del comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuito .....	156
7.2.1.	Transformadores, escenarios y modelos considerados en las simulaciones .	156
7.2.2.	Corrientes de cortocircuito obtenidas en las simulaciones .....	163
7.2.3.	Tensiones de cortocircuito obtenidas en las simulaciones .....	173
7.3.	Resumen del capítulo.....	175
<b>8.</b>	<b>Influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de la red ante faltas asimétricas .....</b>	<b>177</b>
8.1.	Planteamiento del problema.....	178
8.2.	Relación entre los parámetros del circuito equivalente de un transformador estrella-estrella ante secuencia homopolar y ante secuencia directa .....	179
8.2.1.	Estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado .....	182
8.2.2.	Estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto .....	184
8.3.	Simulación de escenarios de explotación de red ante faltas asimétricas .....	187
8.3.1.	Análisis de escenarios de red rural.....	190
8.3.2.	Análisis de escenarios de red urbana .....	201
8.4.	Resumen del capítulo.....	211
<b>9.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>213</b>
9.1.	Resumen y conclusiones .....	213
9.1.1.	Metodología general de análisis de la necesidad de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella .....	214

9.1.2.	Conclusiones respecto a la necesidad de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella a partir del trabajo de investigación realizado.....	215
9.2.	Principales aportaciones de la tesis .....	217
9.3.	Líneas de trabajo futuras.....	218
9.4.	Publicaciones en revistas.....	219
9.5.	Financiación de los trabajos de investigación .....	220
 <b>Apéndices</b>		
<b>A.</b>	<b>Patente de los arrollamientos terciarios.....</b>	<b>223</b>
<b>B.</b>	<b>Ensayos de obtención de la impedancia homopolar en un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización .....</b>	<b>227</b>
<b>C.</b>	<b>Proceso de optimización numérica para la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos.....</b>	<b>237</b>
C.1.	Metodología de resolución del problema de optimización numérica .....	238
C.2.	Particularidades del proceso de resolución de las ecuaciones de los modelos .....	244
C.2.1.	Resolución de las ecuaciones del modelo B.....	244
C.2.2.	Resolución de las ecuaciones del modelo C.....	246
C.2.3.	Resolución de las ecuaciones del modelo D.....	248
C.3.	Resultados obtenidos en el cálculo de los parámetros de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos .....	251
C.3.1.	Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #1 .....	251
C.3.2.	Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #2 .....	254
C.3.3.	Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #3 .....	256
C.4.	Capacidad de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos para representar el comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella .....	259
C.4.1.	Precisión en la predicción de las impedancias homopolares.....	260
C.4.2.	Precisión en la predicción de las corrientes circulantes por los arrollamientos .....	262
<b>D.</b>	<b>Análisis cualitativo de las trayectorias de flujo homopolar de los transformadores estrella-estrella .....</b>	<b>269</b>
D.1.	Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #1 .....	269
D.1.1.	Configuración de funcionamiento A0A .....	271
D.1.2.	Configuración de funcionamiento A0C .....	271
D.1.3.	Configuración de funcionamiento A1A .....	273
D.1.4.	Configuración de funcionamiento A1C .....	274

---

D.1.5.	Configuración de funcionamiento B0A .....	275
D.1.6.	Configuración de funcionamiento B0C.....	276
D.1.7.	Configuración de funcionamiento B1A .....	277
D.1.8.	Configuración de funcionamiento B1C.....	278
D.2.	Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #2 .....	279
D.2.1.	Configuración de funcionamiento A0A .....	279
D.2.2.	Configuración de funcionamiento A0C .....	280
D.2.3.	Configuración de funcionamiento A1A .....	281
D.2.4.	Configuración de funcionamiento A1C .....	282
D.2.5.	Configuración de funcionamiento B0A .....	283
D.2.6.	Configuración de funcionamiento B0C.....	284
D.2.7.	Configuración de funcionamiento B1A .....	285
D.2.8.	Configuración de funcionamiento B1C.....	286
D.3.	Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #3 .....	287
D.3.1.	Configuración de funcionamiento A0A .....	288
D.3.2.	Configuración de funcionamiento A0C .....	289
D.3.3.	Configuración de funcionamiento A1A .....	290
D.3.4.	Configuración de funcionamiento A1C .....	291
D.3.5.	Configuración de funcionamiento B0A .....	292
D.3.6.	Configuración de funcionamiento B0C.....	293
D.3.7.	Configuración de funcionamiento B1A .....	294
D.3.8.	Configuración de funcionamiento B1C.....	295
<b>E.</b>	<b>Simulaciones de las corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella .....</b>	<b>297</b>
E.1.	Corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado.....	297
E.1.1.	Influencia del tipo de falta y la conexión del neutro en relación con la tipología constructiva de los transformadores .....	298
E.1.2.	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red.....	302
E.1.3.	Influencia de la relación $Z_0 / Z_1$ de la red .....	308
E.1.4.	Influencia de la posición del cambiador de tomas en carga del transformador .....	312
E.2.	Corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto .....	316
E.2.1.	Influencia del tipo de falta y la conexión del neutro en relación con la tipología constructiva de los transformadores .....	317

E.2.2.	Influencia de la potencia de cortocircuito de la red.....	320
E.2.3.	Influencia de la relación $Z_0 / Z_1$ de la red.....	324
E.2.4.	Influencia de la posición del cambiador de tomas en carga del transformador .....	328
<b>F.</b>	<b>Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella.....</b>	<b>333</b>
F.1.	Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización .....	333
F.2.	Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización	338
F.2.1.	Influencia del reparto porcentual de las impedancias de la rama serie .....	339
F.2.2.	Influencia de la impedancia magnetizante de la rama paralelo.....	342
<b>G.</b>	<b>Resultados por nodo de la simulación de escenarios de explotación de red ante faltas asimétricas .....</b>	<b>349</b>
G.1.	Escenarios de explotación de red rural .....	350
G.1.1.	Resultados por nodo de la simulación de la red rural en estado de explotación normal y configuración mallada.....	351
G.1.2.	Resultados por nodo de la simulación de la red rural en estado de explotación normal y configuración desmallada .....	354
G.1.3.	Resultados por nodo de la simulación de la red rural en estado de explotación ante contingencia y configuración desmallada .....	357
G.2.	Escenarios de explotación de red urbana .....	360
G.2.1.	Resultados por nodo de la simulación de la red urbana en estado de explotación normal y configuración mallada .....	362
G.2.2.	Resultados por nodo de la simulación de la red urbana en estado de explotación normal y configuración desmallada.....	367
G.2.3.	Resultados por nodo de la simulación de la red urbana en estado de explotación ante contingencia y configuración desmallada .....	372
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>379</b>

# Capítulo 1

## Introducción

La problemática asociada a los arrollamientos de estabilización o arrollamientos terciarios<sup>1</sup> en transformadores de potencia con grupo de conexión estrella-estrella está frecuentemente teñida de mitos y decisiones basadas en la “práctica habitual”. En muchas ocasiones, no son bien conocidas ni correctamente evaluadas todas las implicaciones que tiene la incorporación de un arrollamiento de estabilización, tanto para los propios transformadores como para las redes eléctricas en las que éstos operan. Ello no es de extrañar, ya que la literatura técnica no ha abordado de una forma completa y exhaustiva los diferentes aspectos que determinan la necesidad de incluir arrollamientos de estabilización.

El entorno socioeconómico en el que actualmente está inmerso el sector eléctrico ejerce una fuerte presión sobre la maximización de la fiabilidad de los equipos para garantizar la continuidad del suministro eléctrico y sobre la minimización de los costes. En este sentido, los arrollamientos de estabilización conllevan un sobrecoste en los transformadores de potencia estrella-estrella y suponen un riesgo adicional que eleva la probabilidad de fallo del equipo. Por tanto, especificar su incorporación en los transformadores debe estar suficientemente justificado.

En este capítulo introductorio se va a situar el contexto que dio origen a los arrollamientos de estabilización así como los usos y funciones que han ido desempeñando a lo largo de la evolución de los sistemas eléctricos de potencia y los que desempeñan en las redes eléctricas actuales. A partir de estas primeras indicaciones, se presentan los objetivos de la tesis y la estructura del documento.

### 1.1. Planteamiento del problema: antecedentes y motivación

En el comienzo de los sistemas eléctricos trifásicos, las subestaciones transformadoras disponían de bancos de transformación compuestos por unidades monofásicas en los que había que decidir la mejor forma de conexión. A pesar de las ventajas que condujeron a una tendencia a utilizar la conexión estrella, pronto fueron reportados problemas asociados a esta conexión relacionados fundamentalmente con sobretensiones que dañaban los aislamientos, inadecuado funcionamiento con cargas desequilibradas e interferencias en las líneas telefónicas cercanas causadas por la circulación de terceros armónicos de corriente.

---

<sup>1</sup> Ambas acepciones son utilizadas frecuentemente de forma indistinta si bien, como se verá más adelante, por el tipo de uso habitual de estos arrollamientos en la actualidad es más rigurosa la denominación arrollamientos de estabilización, obediendo la de arrollamientos terciarios a usos adicionales que suponían una utilización de estos arrollamientos para alimentar circuitos auxiliares o para conectarse a otros equipos, como si de un arrollamiento secundario adicional se tratara.

Con relativa rapidez, se comprobó que la inclusión de un arrollamiento adicional conectado en triángulo dotaba de una solución global a la mayoría de dichos problemas, por lo que se estandarizó dicha solución para los grupos de transformación estrella-estrella.

A medida que se fueron introduciendo unidades de transformación de núcleos trifásicos, la práctica siguió realizándose sin apenas cuestionamiento de la necesidad del arrollamiento de estabilización, a pesar de la introducción de diferentes tipos de construcción, cuyas características diferenciales no eran todavía bien conocidas.

Así pues, la solución de incluir un arrollamiento de estabilización en todos los transformadores estrella-estrella fue adoptada de forma generalizada convirtiéndose en práctica universal.

A finales de los años 50, con el mayor conocimiento de los fenómenos involucrados en la problemática de la transformación estrella-estrella y la evolución de los sistemas eléctricos y de la tecnología de los equipos, diversos autores advirtieron de la conveniencia de evaluar de forma crítica la necesidad de los arrollamientos de estabilización.

A pesar de ello, aunque algunas compañías eléctricas han tomado la decisión de prescindir de estos arrollamientos, en la actualidad sigue siendo una práctica muy generalizada la especificación técnica de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización bajo justificaciones más basadas en la perpetuación de políticas históricas y en prejuicios sobre determinados riesgos que en argumentos sólidos, actuales y constatables. Una de las principales causas de ello es la ausencia en la literatura y normativa técnica actual de documentos que analicen de forma exhaustiva todos los aspectos que están involucrados en la toma de decisión respecto a la necesidad de los arrollamientos de estabilización.

A modo de resumen, se indican a continuación las funciones que actualmente suelen desempeñar los arrollamientos de estabilización o arrollamientos terciarios:

- En relación al comportamiento de los transformadores estrella-estrella:
  - Minimiza la generación de armónicos de tensión y corriente de orden 3 por el comportamiento no lineal del núcleo.
  - Estabiliza las tensiones homopolares de frecuencia fundamental, limitando los desplazamientos de neutro y la circulación de flujos homopolares por la cuba y otros elementos estructurales.
  - Disminuye la impedancia homopolar del transformador.
- En relación al comportamiento del sistema eléctrico:
  - Filtra los armónicos de corriente homopolares (entre los cuales es preponderante el de orden 3) que puedan circular por las líneas de transmisión o los circuitos de tierra.
  - Facilita los requerimientos homopolares de la red para conseguir un sistema eficazmente puesto a tierra, limitando por tanto las sobretensiones que en él pueden aparecer.
- En relación a otros usos adicionales:
  - Supone un punto de conexión adecuado para elementos de compensación de potencia reactiva y control de tensión de la red (reactancias y condensadores).
  - Puede actuar como fuente de alimentación auxiliar dentro de la subestación.

En el desempeño de estas funciones, el dimensionamiento térmico de los arrollamientos de estabilización suele requerir sólo una parte de la potencia asignada al resto de los arrollamientos del transformador. Ello suele implicar unos conductores de menor sección y convierte a los arrollamientos de estabilización en un elemento especialmente sensible a los esfuerzos electrodinámicos.

A la hora de conjugar los requerimientos que se les atribuyen junto con los riesgos añadidos que aportan, y en un contexto en el que debe optimizarse la fiabilidad y el coste del equipamiento de las redes eléctricas en general y de los transformadores de potencia en particular, cobra plena vigencia la necesidad de un análisis crítico de la utilidad y conveniencia de los arrollamientos de estabilización en los transformadores, estableciendo una metodología rigurosa y detallada que guíe a los usuarios de los equipos en la toma de decisión sobre su especificación.

## 1.2. Objetivos de la tesis

En base a lo indicado en el apartado anterior, el principal objetivo de la tesis es realizar un análisis completo y exhaustivo de los diferentes factores que inciden en la necesidad real de utilizar arrollamientos de estabilización en transformadores de potencia estrella-estrella, a partir del cual formular una metodología que permita valorar en qué casos debe especificarse y en qué casos podría o incluso deberías evitarse.

Como se estudiará a lo largo de la tesis, entre estos factores es de especial relevancia el tipo de circuito magnético usado en la construcción del transformador. Según se trate de transformadores de flujos libres o independientes (bancos de transformación formados por unidades monofásicas, transformadores trifásicos acorazados y de cinco columnas) o de transformadores de flujos ligados o dependientes (transformadores trifásicos de tres columnas), a pesar de que algunos fenómenos puedan ser conceptualmente análogos, su comportamiento puede diferir notablemente desde un punto de vista cuantitativo.

Asimismo, la presencia o ausencia de dichos arrollamientos tiene efectos significativos sobre las características de secuencia homopolar y armónicos de frecuencia triple de las redes eléctricas, así como sobre todos los fenómenos influenciados por éstas. Por ello, junto con las características constructivas del núcleo magnético, las diferentes posibilidades de conexión de los neutros de los transformadores estrella-estrella determinarán en buena medida aspectos del comportamiento del transformador y su influencia en la red de gran relevancia de cara a valorar la necesidad de los arrollamientos de estabilización.

Así pues, los aspectos clave que se analizarán de forma detallada a lo largo de la tesis son:

- La necesidad real del uso de los arrollamientos de estabilización en función del tipo de construcción del núcleo magnético.
- La necesidad real del uso de los arrollamientos de estabilización en función del régimen de neutro de las redes que interconecta.
- Las ventajas e inconvenientes que conlleva la existencia de dichos arrollamientos en diferentes aspectos del comportamiento del transformador y de su impacto en las redes eléctricas.

Mediante la consecución de los objetivos anteriores, las conclusiones obtenidas en la tesis deben permitir establecer una metodología para facilitar una toma de decisión global respecto

---

a la inclusión de arrollamientos de estabilización para aquellos gestores de redes eléctricas en las que existen transformadores de potencia estrella-estrella.

### 1.3. Estructura de la tesis

La tesis se estructura en nueve capítulos, que se complementan con siete apéndices.

En este primer capítulo introductorio se ha situado el contexto en el que se originó la necesidad de utilización de arrollamientos de estabilización y los principales usos que, a lo largo de la evolución de los sistemas eléctricos, se les fueron asignando. Asimismo, se han expuesto algunos riesgos asociados a su utilización y los principales aspectos cuyo análisis constituyen los objetivos de la tesis.

En el segundo capítulo se presentan consideraciones generales sobre los arrollamientos de estabilización a lo largo de la historia de los sistemas eléctricos trifásicos, a partir de una detallada revisión bibliográfica sobre la utilización de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella. Para ello se realiza un recorrido por la literatura técnica sobre esta cuestión que empieza en los inicios de las redes trifásicas donde se comienzan a utilizar y finaliza con la normativa técnica y estado del arte actual, incluyendo los autores y empresas o países que, en algún momento, se cuestionaron su utilización.

El tercer capítulo detalla el conjunto de aspectos que se han de evaluar de cara a tomar una decisión justificada sobre la necesidad del arrollamiento de estabilización en los transformadores estrella-estrella. En este capítulo se resumen las características funcionales y constructivas de los transformadores que serán objeto de análisis y estudios experimentales a lo largo de la tesis, así como el contexto real de red en el que se enmarca esta tesis.

El cuarto capítulo aborda en profundidad el comportamiento homopolar del transformador estrella-estrella y los modelos de circuito equivalente que pueden representar con precisión dicho comportamiento. Por otro lado, se identifican los ensayos que son necesarios para obtener los parámetros y verificar experimentalmente la validez de dichos modelos, mostrándose los resultados obtenidos en algunos de los transformadores objeto de estudio experimental.

En el capítulo quinto se estudia el impacto del contenido armónico de los transformadores estrella-estrella actuales derivado de su funcionamiento en vacío, con especial énfasis en los terceros armónicos de corriente y tensión que constituyeron una de las causas raíz de la introducción de los arrollamientos de estabilización. En este sentido, se realizará un análisis cuantitativo de la magnitud de la corriente de magnetización y su contenido armónico en los distintos transformadores objeto de estudio de la tesis, que será complementado con un estudio experimental detallado sobre la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento armónico en vacío de uno de estos transformadores a partir de medidas obtenidas en distintas configuraciones de ensayo.

Por su parte, el sexto capítulo aborda la problemática asociada al funcionamiento ante cargas desequilibradas de los transformadores estrella-estrella. En él se analiza en detalle el calentamiento potencialmente peligroso que se puede producir en elementos metálicos como la cuba u otros elementos estructurales del transformador debido al incremento en la circulación de flujos homopolares no compensados durante escenarios de explotación desequilibrados. Para ello se estudiará la magnitud de los desbalances de amperios-vuelta que

se producen en diferentes tipologías constructivas de transformadores en diferentes configuraciones de funcionamiento identificando situaciones de riesgo potencial, que serán contrastadas experimentalmente mediante ensayos de calentamiento ante alimentación homopolar.

En el capítulo séptimo se realiza un análisis detallado de la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuitos en la red eléctrica con el objetivo de valorar en qué medida y en qué casos la presencia de los arrollamientos de estabilización incrementa el riesgo de fallo de los transformadores estrella-estrella ante dichos cortocircuitos. Al no ser viable una evaluación experimental basada en ensayos de cortocircuito reales, se han realizado diversas simulaciones que permitirán detallar cuantitativamente la influencia de los diferentes aspectos que intervienen en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella.

El capítulo octavo complementa al anterior adoptando la perspectiva de la red, y no la del transformador, a la hora de valorar la influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de una red eléctrica con transformadores estrella-estrella ante cortocircuitos. Para ello se presentarán diversas simulaciones en varios escenarios reales de red que permitirán valorar dicha influencia. Para la consecución de este objetivo, y dada la habitual ausencia de ensayos que caractericen el comportamiento homopolar de transformadores en servicio, se realizará previamente un análisis detallado de la relación entre los parámetros de los circuitos equivalentes a secuencia directa y a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella que han sido objeto de estudio. A partir de este análisis, se establecerán reglas de estimación de los parámetros de secuencia homopolar para aquellos casos en los que únicamente se dispone de información de impedancias ante secuencia directa.

Por último, en el noveno capítulo se presentan las principales conclusiones del trabajo y se señalan las aportaciones originales que se han realizado durante su ejecución. También se apuntan algunas líneas de investigación futura que podrían dar continuidad al trabajo desarrollado en la tesis. Finalmente, se enumeran los artículos que se han publicado a partir de los resultados obtenidos durante la realización de la tesis y se menciona la financiación que ha facilitado el desarrollo de alguno de los ensayos efectuados.

Como complemento del cuerpo principal de algunos capítulos de la tesis se han realizado siete apéndices, en los que se presenta información complementaria o se ofrecen detalles de los estudios experimentales y simulaciones realizados.

El trabajo finaliza con la bibliografía consultada para el desarrollo de la tesis.



## Capítulo 2

# Consideraciones generales sobre los arrollamientos de estabilización: estado del arte

En este capítulo se realiza un amplio análisis bibliográfico sobre el funcionamiento de los transformadores estrella-estrella y la utilización de los arrollamientos de estabilización. Algunos aspectos más específicos relacionados con el estado del arte serán también presentados en los apartados introductorios de los capítulos en los que dichos aspectos se abordan en detalle.

En el apartado 2.1 se analizan los motivos que determinaron el origen de los arrollamientos terciarios en los incipientes sistemas eléctricos trifásicos de comienzos del siglo XX tratando de ponerlos en el contexto en el que encuadran dichos motivos.

Cinco décadas después del inicio de la utilización de los arrollamientos terciarios, estando su uso totalmente generalizado en todas las tipologías de transformadores estrella-estrella, varios autores reparan en la conveniencia de cuestionarse de forma crítica la necesidad de estos arrollamientos en el caso de disponerse de diseños de núcleos magnéticos de tres columnas. A ello se dedica el apartado 2.2 dónde se explica en detalle la política seguida a este respecto en algunos países.

Finalmente, en el apartado 2.3 se presentan las principales referencias respecto a los arrollamientos de estabilización disponibles en la actualidad de cara a especificar técnicamente los transformadores. En ese sentido se analiza la normativa técnica vigente, los principales libros especializados de transformadores, artículos publicados en revistas y congresos, así como experiencias disponibles de diversas compañías eléctricas a lo largo del mundo.

### 2.1. El origen de los arrollamientos terciarios

A principios del siglo XX, tal y como expone Blackwell en [1], en cada nueva instalación trifásica existía una discusión entre los ingenieros de la época sobre la mejor alternativa a la hora de definir la conexión, en estrella o en triángulo, de la transformación de potencia (constituidos por bancos de transformadores monofásicos conectados entre sí). Otro punto de debate permanente era la conveniencia de conectar o no a tierra el punto neutro en caso de configuraciones en estrella. En [1] se exponen algunas ventajas e inconvenientes de ambas alternativas, recomendándose la conexión en triángulo cuando existen posibles desequilibrios en la carga, como consecuencia de los problemas de desplazamiento de neutro que en estas circunstancias tienen lugar en casos de conexión en estrella. En esa misma línea, Rushmore [2] analiza las alternativas de conexión sobre la base del coste y la satisfactoria operación de la

instalación. A su juicio, se establece una preponderancia en la transmisión en alta tensión con utilización de la conexión en estrella puesta a tierra y conexión en triángulo para la baja tensión. También menciona el uso de diferentes opciones en la transformación de sistemas trifásicos, ya sea mediante bancos de unidades monofásicas o unidades trifásicas.

La elección de transformadores trifásicos o bancos de transformación constituidos por unidades monofásicas es otra de las cuestiones en debate en aquella época. En [3], Peck enumera diversas ventajas e inconvenientes relacionadas con ambas configuraciones. Concluye que, en general, las ventajas de un transformador trifásico frente a un banco de transformadores monofásicos superan a los inconvenientes, esencialmente ligados a situaciones (inusuales) de avería donde los bancos ofrecen mayor versatilidad. Manifiesta su creencia de que esta configuración se irá imponiendo en América y Gran Bretaña, como ocurre en el Continente (Europa), previendo un rápido incremento en los años siguientes. De la misma forma plantea la evolución de la construcción de núcleos magnéticos de columnas frente a soluciones acorazadas, por ofrecer prestaciones tan buenas o mejores con un menor coste. En el mismo sentido, Tobey [4] indica una progresiva tendencia hacia un uso creciente de transformadores trifásicos frente a bancos de unidades monofásicas, si bien existe un sentimiento fuerte de muchos ingenieros americanos a favor a las unidades monofásicas debido a sus ventajas en la gestión de averías y de repuestos.

Unos años más tarde, en 1914 Blume [5] presenta un extenso análisis del funcionamiento de diversos tipos de conexión, fundamentalmente orientado a evaluar el comportamiento del aislamiento ante cortocircuitos en la red en bancos de transformación con conexiones en triángulo o en estrella, con el neutro puesto a tierra o aislado. Se indica en la introducción que la mayor parte de los sistemas trifásicos en aquella época utilizaban transformadores en conexión triángulo-triángulo o triángulo-estrella. Se realiza un estudio detallado de bancos de autotransformadores conectados en estrella alertando del riesgo de elevado estrés dieléctrico por desplazamiento de neutro en caso de disponerse del neutro conectado a tierra a través de resistencia o aislado (a menos que el sistema entero está aislado). Por otro lado, advierte del peligro de operar los autotransformadores en estrella con neutro puesto a tierra a menos que la tensión armónica de orden 3 fase-neutro se elimine o se mantenga suficientemente reducida. Ello, indica Blume, puede ser conseguido con transformadores trifásicos de columnas.

Un año antes, en julio de 1913, el propio Blume presenta la propuesta de patente "*US Patent 1,173,094 - Tertiary winding*" [6]. El objetivo de la patente es aportar mejoras para un adecuado balance de las fuerzas electromotrices de las fases cuando los arrollamientos primarios y secundarios están respectivamente conectados en estrella. Indica Blume en su exposición inicial que es frecuentemente deseable disponer los arrollamientos primarios y secundarios de los sistemas trifásicos en estrella pero que estas conexiones tienen una considerable tendencia a tener tensiones desequilibradas como consecuencia de desbalances en la carga. Esto se ha tratado de corregir con arrollamientos auxiliares conectados en triángulo adicionales a los arrollamientos primario y secundario muy acoplados inductivamente que, en caso de cortocircuitos, tendían a ser destruidos provocando la destrucción completa del transformador. La propuesta de Blume (arrollamientos terciarios) supone añadir arrollamientos adicionales con un menor acoplamiento inductivo hacia los arrollamientos primario y secundario, al final de las columnas del circuito magnético (no es por tanto concéntrico como posteriormente lo sería) conectados en triángulo entre sí. La patente, aprobada en febrero de 1916, y cuyo texto original se reproduce íntegramente en el apéndice A, constituye por tanto el nacimiento oficial de los arrollamientos terciarios.

Simultáneamente con la aparición de los arrollamientos terciarios, en la segunda mitad de aquella década se pone de manifiesto un conocimiento más profundo de los fenómenos asociados al funcionamiento de los transformadores en conexión estrella.

En [7] Peters realiza un análisis de las causas y consecuencias de los armónicos en la corriente de magnetización de los transformadores. Presenta como un hecho bien conocido que, bajo ciertas condiciones de operación (operación estrella-estrella), los armónicos de la corriente de magnetización provocan ondas de tensión fuertemente distorsionadas. El análisis se centra mayoritariamente en los bancos de unidades monofásicas, pero dedica en la parte final una breve referencia a analizar los transformadores trifásicos de tres columnas, indicando que el hecho de que el tercer armónico de flujo deba retornar por un camino de alta reluctancia provoca que sea de un valor muy reducido.

Un análisis muy detallado de la problemática de los transformadores con conexión estrella es realizado por Robinson [8][9]. En el primero de sus artículos reporta la existencia de sobretensiones con consecuencias destructivas en bancos de transformadores estrella (neutro aislado) – estrella (neutro a tierra) y postula que la causa de ello puede deberse a armónicos pares más que al tercer armónico frecuentemente señalado como el causante. Indica en las conclusiones que el uso de bancos de transformadores en la configuración mencionada o de autotransformadores en estrella con neutro puesto a tierra es una práctica peligrosa a menos que se utilicen arrollamientos terciarios en triángulo como consecuencia de la inestabilidad del neutro. Esta inestabilidad la atribuye en cierta medida a armónicos de orden 2 de las fuerzas electromotrices. En la discusión de este artículo Jollyman cuestiona las afirmaciones genéricas relacionadas con la inestabilidad de autotransformadores sin terciario afirmando que existen ejemplos de empleo satisfactorio de esta conexión. Considera que la inestabilidad se produce esencialmente en bancos de transformadores. También en la discusión, Brand advierte de que un uso seguro de los arrollamientos terciarios requiere de un fuerte dimensionamiento de los mismos para evitar problemas, lo que en última instancia cuestiona su idoneidad. Considera que la única forma económicamente viable y probablemente segura de conexión estrella-estrella son los transformadores trifásicos de columnas.

En el segundo de sus artículos, Robinson completa los análisis realizados en el artículo anterior respecto a fenómenos magnéticos que conducen a fuertes sobretensiones provocadas por armónicos de orden par en bancos de transformación estrella-estrella. En la introducción aflora la controversia existente sobre el uso de bancos de transformación estrella-estrella que indica que en general se considera una mala práctica, de forma que los casos de aparentemente satisfactoria utilización se deben considerar más bien la excepción, normalmente sobre la base de precauciones especiales que evitan la inestabilidad del sistema. Se presenta también una recopilación de la problemática de fenómenos de tercer armónico en bancos de transformación estrella-estrella con diferentes configuraciones de neutro.

Desde comienzos de la década de 1920 se puede considerar generalizada la práctica de utilizar configuraciones en estrella en la transformación acompañadas por arrollamientos terciarios en triángulo. En ese sentido, el artículo de Peters y Skinner [10] comienza justificando la necesidad de mantener coherencia en el desfase de la transformación y que, siendo la condición más habitual un desfase cero, la alternativa más lógica es la transformación estrella-estrella básicamente por cuestiones relacionadas con el coste y por la posibilidad de poner a tierra el neutro. Refieren el uso necesario de un arrollamiento terciario en triángulo en las conexiones estrella-estrella para una adecuada operación. En el caso de bancos monofásicos o transformadores acorazados se justifica por la inestabilidad de neutro motivada por los

armónicos de tercer orden. En el caso de transformadores trifásicos de 3 columnas, si bien no es requerido para estabilizar el neutro, si que se aconseja su uso como consecuencia de su aportación en el caso de corrientes de falta a tierra.

Por su parte, Copley [11] refiere el creciente uso de redes de mayor tensión (hasta 220 kV) en los que los transformadores han acompañado esta evolución sin grandes dificultades manteniendo similares criterios de diseño. Indica la práctica universalmente reconocida de neutros rígidamente puestos a tierra para los sistemas de 220 kV. Describiendo las prácticas de diferentes empresas eléctricas, se observa que la transformación está esencialmente constituida por transformación estrella-estrella con un arrollamiento terciario en triángulo cuya misión es manejar los fenómenos derivados de los terceros armónicos de corriente, la ocurrencia de desequilibrios de corriente por las faltas a tierra, sirviendo adicionalmente para la conexión de condensadores síncronos para la regulación de tensión en las líneas.

Hasta tal punto era aceptada la necesidad de los arrollamientos terciarios que, según citan Mini, Moore y Wilkins en [12], la Orden General publicada en 1918 por el *“Joint Committee on Inductive Interference”* de la *“California Railroad Commission”* en el que establece que las empresas eléctricas públicas deben operar bajo la siguiente premisa: “ningún transformador o autotransformador conectado en estrella empleará neutro a tierra en el lado conectado a un circuito de potencia trifásico a menos que se usen arrollamientos secundarios en triángulo o arrollamientos terciarios de baja impedancia, con el objeto de suprimir componentes armónicos de tercer orden y corrientes y tensiones residuales introducidos en el transformador”. Como consecuencia derivada del cumplimiento de esta Orden, con el objetivo de reducir costes muchas empresas usaron arrollamientos terciarios de menor capacidad de la nominal del transformador. Al mismo tiempo, la mayoría de las compañías adoptaron una política de puesta a tierra permanente del neutro de alta tensión. Todo ello deriva en un problema en la operación sobre cuándo y cómo proteger al arrollamiento terciario frente a cortocircuitos en las líneas. En ese sentido, el artículo presenta también diversas consideraciones relacionadas con el comportamiento ante cortocircuito de los bancos de autotransformadores con terciario en relación con las corrientes admisibles, el tiempo de actuación de las protecciones y el correcto dimensionamiento del terciario. En la discusión del artículo, Blume realiza un interesante análisis sobre los motivos que conducen a la utilización de bancos de transformadores de tres arrollamientos (estrella-estrella-triángulo) donde el triángulo se añade para corregir la debilidad inherente a la conexión estrella-estrella (sobretensiones o interferencias en líneas telefónicas). Argumenta que, si no se le va a dar al arrollamiento terciario otra aplicación (fundamentalmente conexión de condensadores síncronos), la conexión estrella-triángulo es una solución más simple y barata. Refrenda el hecho de que el dimensionamiento del arrollamiento terciario no debe realizarse en base a la capacidad de carga que debe atender sino a los requerimientos ante cortocircuito.

Cabría deducir de lo indicado anteriormente que, ya a mediados de la década de 1920, la problemática asociada a la transformación con conexión en estrella era bien conocida, y la utilización de los arrollamientos terciarios en triángulo una solución ampliamente aceptada. Sin embargo, a finales de la década un cierto número de artículos respecto a esta materia seguían aportando nuevos elementos y argumentos a la discusión. En 1927, Gould [13] analiza la inestabilidad que se produce en los transformadores estrella (neutro aislado) – estrella (neutro a tierra) y refuta en cierta medida las conclusiones presentadas por Robinson en [8]. Para ello presenta algunos ensayos que tratan de reproducir tal situación de operación. En [14] Boyajian analiza las sobretensiones que se producen cuando tienen lugar faltas a tierra en el lado

secundario de los autotransformadores cuando éste está aislado y el transformador es alimentado por un sistema puesto a tierra<sup>2</sup>. También Boyajian, esta vez junto con McCarty, presenta en [15] una explicación de que existen fenómenos más allá de los armónicos de la corriente de magnetización que generan fenómenos de inestabilidad de neutro en transformadores de potencia o de tensión en conexión estrella (neutro aislado) – estrella (neutro a tierra). Refiere dos grupos de problemas distintos: inversión de neutro y neutro oscilante.

Como colofón al recorrido histórico realizado en este apartado en relación a la problemática de conexión y operación de los transformadores durante las tres primeras décadas del siglo XX, donde encuentran su justificación y su origen los arrollamientos terciarios, Charley presenta [16] en 1931 el progreso hecho en los últimos años en el diseño de los transformadores con ejemplos que ilustran el estado del arte (como él mismo indica) en aquel momento. En la figura 2.1, Charley muestra la evolución de la capacidad de fabricación de transformadores en potencia y tensión en los últimos 25-35 años.

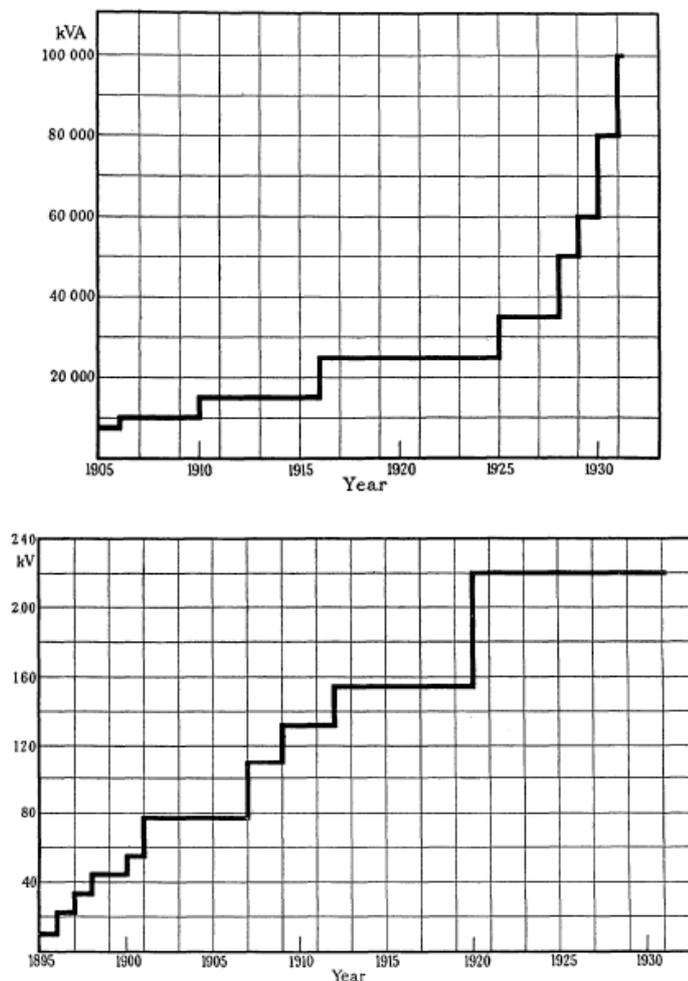


Figura 2.1. Evolución de las potencias y tensiones máximas de fabricación de los transformadores durante las tres primeras décadas del siglo XX (tomado de Charley [16]).

<sup>2</sup> Estas sobretensiones determinan el fenómeno denominado como *inversión de neutro*, dado que en las condiciones indicadas el neutro se sitúa fuera del triángulo de las tensiones de línea.

A lo largo del artículo se abordan cuestiones como la problemática del transporte de los transformadores, el uso de transformadores trifásicos o bancos de transformadores monofásicos, el diseño de los núcleos magnéticos, el sistema de refrigeración, el diseño de los depósitos conservadores de aceite, los dispositivos de protección Buchholz, el aislamiento entre espiras, transformadores “no-resonantes”, los transformadores con conexión estrella-estrella, transformadores multi-arrollamiento, el cambio de tomas en carga y las reactancias limitadoras de corriente.

Por su relación con la tesis, se detallarán las principales indicaciones en varios de los aspectos mencionados:

- Presenta como una “interesante anomalía” la práctica general en América respecto al uso mayoritario de bancos de transformación de unidades monofásicas, frente al Continente (Europa) y ahora Inglaterra, donde el uso de unidades trifásicas se ha convertido prácticamente en un estándar. Esta decisión, normalmente ligada a la consideración de la fiabilidad y la necesidad de unidades de reserva, se presenta ahora con el hecho, generalmente aceptado, de que el transformador es el elemento más fiable de un sistema de transmisión.
- Desde el comienzo de los transformadores, ha habido una cierta controversia entre los diseñadores respecto a los méritos relativos entre la construcción de los núcleos magnéticos acorazados y los diseños de columnas. El principal argumento a favor del diseño acorazado subyace en su mayor resistencia ante requerimientos mecánicos. La construcción de estos núcleos está bien resuelta en transformadores monofásicos, pero presenta importantes dificultades en transformadores trifásicos. La mayor tendencia mencionada hacia los transformadores trifásicos hace que no existan dudas respecto a la mayor utilización de diseños de núcleos magnéticos de columnas, que serán también adoptados ampliamente en unidades monofásicas.
- También en relación con los núcleos magnéticos, Charley presenta como avances recientes el dimensionamiento reducido de las columnas laterales (con una sección igual o ligeramente superior a la mitad de las columnas sobre la que están los arrollamientos). Ello tanto en las unidades monofásicas acorazadas como en los diseños trifásicos de cinco columnas. No se hace mención alguna a diseños de tres columnas, de lo que se puede deducir que este diseño no se generalizaría hasta épocas posteriores.
- Por otra parte, se menciona como un hecho bien conocido los problemas que presentan los transformadores estrella-estrella, especialmente relacionados con los armónicos de orden tres en las corrientes y tensiones, para cuya resolución se construyen con un arrollamiento terciario adicional en triángulo. Añade que el dimensionado de este arrollamiento terciario no se determina por el flujo de corrientes armónicas sino por consideraciones de resistencia ante cortocircuito (que conducen habitualmente a un dimensionado de entre el 25 % y el 35 % de la potencia asignada del transformador).
- Finalmente, destaca el hecho de que, el uso de los arrollamientos terciarios para alimentación de condensadores síncronos, presenta importantes ventajas económicas frente a alternativas de disponer de unidades separadas para este propósito<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Uno de los artículos de referencia respecto a la utilidad del uso de los arrollamientos terciarios en la planificación y explotación de las redes eléctricas mediante la conexión de condensadores síncronos para el control del factor de potencia fue escrito por Clair en 1940 [17].

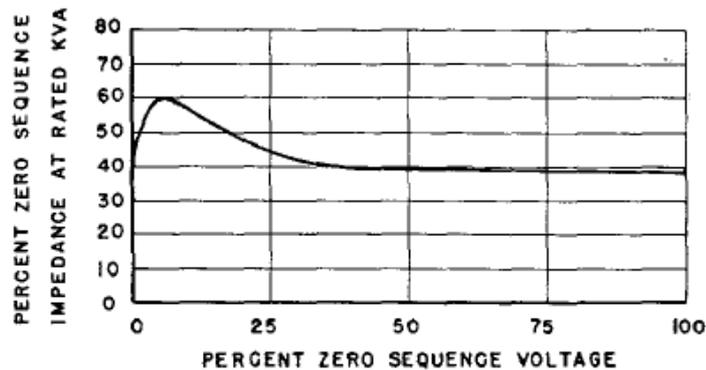
Cabe finalmente destacar en este punto, por su gran interés en el contexto de la tesis doctoral, las aportaciones de Garin en 1940 [18][19] respecto al comportamiento de los transformadores ante secuencia homopolar. La aplicación del método de las componentes simétricas (introducido por Fortescue en 1918) de gran importancia en el análisis de las redes eléctricas requiere disponer de los valores de las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar de los elementos que constituyen la red (máquinas rotativas, líneas y transformadores esencialmente). Por primera vez, Garin introduce en su artículo un estudio detallado de las impedancias a secuencia homopolar de los transformadores, que hasta ese momento habían sido consideradas indistintas de las de secuencia directa, planteando las diferencias en las impedancias homopolares en función del tipo de núcleo y del tipo de conexión del transformador, así como de la disposición de los arrollamientos.

Los planteamientos de Garin respecto a los ensayos y modelos de representación de los transformadores serán expuestos en mayor detalle en el capítulo 4.

Son adicionalmente de especial relevancia para la tesis varias indicaciones de Garin en relación al comportamiento ante secuencia homopolar de los transformadores.

Por un lado, advierte de la notable diferencia entre la impedancia a circuito abierto en transformadores de flujos ligados en caso de secuencia directa (del orden del 10.000%) y de secuencia homopolar (50-100%), así como la diferencia de estos con transformadores acorazados o de cinco columnas.

Por otro lado, muestra una curva con la variación de la impedancia homopolar de circuito abierto de un transformador de tres columnas en función de la tensión, evolucionando de forma creciente hasta aproximadamente el 10% de la tensión asignada (hasta unas 1,5 veces) y reduciéndose hasta aproximadamente el 30% de la tensión asignada, momento a partir del cual es bastante estable, según se muestra en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Impedancia homopolar de circuito abierto típica de un transformador de núcleo trifásico de tres columnas (tomado de Garin [19]).**

Asimismo, introduce el concepto de la influencia de la cuba en los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas actuando como un arrollamiento en triángulo de alta impedancia, lo que conlleva una reducción de la magnitud de la impedancia de circuito abierto, según se observa en la figura 2.3.

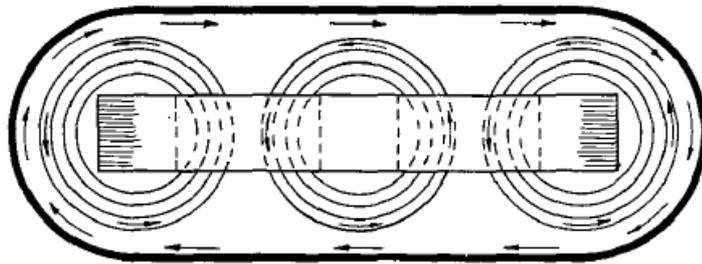


Figura 2.3. Cuba de un transformador de núcleo trifásico de tres columnas actuando como un arrollamiento conectado en triángulo (tomado de Garin [19]).

Finalmente, al realizar un pequeño análisis de la resistencia de secuencia cero, Garin indica que el núcleo y las partes estructurales pueden alcanzar mayores temperaturas que los arrollamientos y son más susceptibles de desarrollar puntos calientes locales. Indica que, en la práctica, la magnitud y la distribución de las pérdidas a secuencia cero son únicamente de importancia en casos excepcionales, cuando las corrientes de carga contienen una elevada componente homopolar o cuando ocurren faltas a tierra que no pueden ser despajadas en unos pocos segundos. Aunque se trata de una mención, más bien laxa, se advierte ya de un cierto riesgo de calentamiento de la cuba, aspecto de gran importancia en el curso de esta tesis.

## 2.2. El cuestionamiento de la necesidad universal de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella

Como se ha visto en el apartado anterior, en lo referente a la operación de los transformadores con conexión estrella-estrella y los autotransformadores en estrella, las diferencias en el comportamiento a secuencia homopolar (tanto a frecuencia industrial como en lo relacionado con los terceros armónicos) de los bancos de transformadores monofásicos y transformadores acorazados frente a los transformadores trifásicos de tres columnas fueron razonablemente bien comprendidas desde mediados de la década de 1910 [5][7]. Pese a ello, la solución que supusieron los arrollamientos terciarios a los problemas de los primitivos sistemas trifásicos configurados en estrella de principios del siglo XX, junto con su utilización para la alimentación de sistemas de compensación de potencia reactiva, consolidó su uso de forma universal durante la primera mitad del siglo.

Diferentes aspectos parecían justificar sobradamente el uso de los arrollamientos terciarios en los transformadores estrella-estrella [20][21]:

- Protección del transformador y del sistema eléctrico frente a las sobretensiones derivadas del tercer armónico.
- Prevenir interferencias en las líneas de telecomunicación como consecuencia de la circulación de las corrientes de tercer armónico.
- Mantener las tensiones en las fases dentro de un rango estrecho ante situaciones de faltas a tierra o desequilibrios en la carga, es decir, estabilizar el neutro de las tensiones.
- Permitir una corriente de falta suficientemente elevada para permitir la adecuada actuación del sistema de protección.

- Disponer de la posibilidad de acoplar los sistemas de compensación de potencia reactiva.
- Ofrecer la posibilidad de una tensión de alimentación auxiliar.

En un contexto de uso mayoritario de los transformadores trifásicos de columnas, tal y como predijo Charley [16] más de dos décadas antes, los ingenieros británicos Kapp y Pearson cuestionan en 1955 la necesidad de los arrollamientos terciarios en los transformadores de flujos ligados [22]. Argumentan que un adecuado funcionamiento de los transformadores estrella-estrella requiere en ocasiones, pero no siempre, disponer de un arrollamiento terciario en triángulo. Afirma que existe mucha confusión entre los ingenieros eléctricos sobre los motivos de disponer de tal arrollamiento y la mayor parte de los usuarios en Gran Bretaña lo especifican en todos los casos, aunque de hecho su coste adicional no está siempre justificado y su presencia es técnicamente indeseable. En cualquier caso, el dimensionamiento del terciario lo determinará su resistencia ante cortocircuitos lo que supondrá un coste significativo.

A lo largo de su artículo, analizan y cuestionan (de una manera en ocasiones excesivamente simplista) los diferentes aspectos que teóricamente justifican la necesidad de los arrollamientos de estabilización. Respecto a su necesidad para que la corriente de falta sea suficiente para su detección por el sistema de protección, se justifica de forma cualitativa (y con una aproximación semicuantitativa) que, a diferencia del caso de núcleos de flujos libres que si lo requieren, en transformadores de tres columnas, las corrientes de falta son suficientemente altas para su detección. Advierten que incluso en ocasiones, se ha solicitado un arrollamiento terciario y, por otro lado, se han instalado resistencias de puesta a tierra del neutro para limitar la corriente de falta. Respecto a las tensiones debidas al tercer armónico se indica que en el caso de transformadores de flujos libres aparecen componentes de tensión de tercer armónico de valor relevante, pero en transformadores de tres columnas sin terciario no es esperable tensiones de tercer armónico mayores a 2-3% de la componente fundamental. Por otro lado, se indica que, en caso de desequilibrios de carga de hasta el 10%, el desplazamiento de neutro es del orden del 3%. Con todo ello, se concluye que, en transformadores de tres columnas, sólo se necesitan arrollamientos terciarios en circunstancias muy excepcionales.

Varios años después, en 1959 B.A. Cogbill, ingeniero americano de General Electric, publica en esa misma línea un artículo más detallado [23] donde cuestiona justificadamente la necesidad de los arrollamientos de estabilización como práctica habitual que se ha dado durante muchos años en los transformadores estrella-estrella y los autotransformadores estrella. Esta práctica se ha seguido de forma tan cerrada que se ha dado por sentado que este arrollamiento era necesario en todos estos tipos de transformadores.

En su artículo, Cogbill hace un repaso de las características magnéticas de los transformadores en función del diseño de su núcleo magnético, diferenciando el funcionamiento a secuencia directa y a secuencia homopolar lo que se traduce en dos grupos de transformadores con un comportamiento diferencial: los transformadores de núcleo de tres columnas por un lado y el resto (transformadores con núcleo acorazado, núcleo de cinco columnas y bancos de unidades monofásicas) por otro.

A partir de este punto, realiza un detallado análisis de cada uno de estos grupos de transformadores en conexión estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización en lo que respecta a las características de impedancia homopolar y lo que respecta a las características de tercer armónico. En el comportamiento homopolar, el autor muestra el efecto de la cuba en los transformadores de tres columnas como si fuera una espira cortocircuitada acoplada

magnéticamente lo que conlleva una reducción de los valores de impedancia homopolar. En el resto de tipologías, las impedancias homopolares son mucho mayores.

En el análisis de los efectos de tercer armónico se estudian tres aspectos: las tensiones fase-neutro de tercer armónico, las corrientes de tercer armónico introducidas a la red y la posibilidad de resonancia entre la inductancia de tercer armónico del transformador, cuando es suficientemente alta, con la reactancia capacitiva de las líneas de transmisión. El funcionamiento de los diferentes tipos de transformadores, también en función de la puesta a tierra del neutro, es estudiado en detalle concluyendo que los problemas en el caso de los transformadores de tres columnas, a diferencia de los otros tipos, pueden considerarse de poca relevancia.

Con todo ello, la conclusión es que cuando el núcleo magnético es de tres columnas el arrollamiento de estabilización de un transformador puede omitirse si las características resultantes a secuencia homopolar y a tercer armónico son compatibles con la red en la que el transformador se ha de instalar. La amplia utilización de los arrollamientos de estabilización hasta ese momento se justifica por las características históricas de los sistemas eléctricos de potencia (uso de bancos monofásicos, cargas desequilibradas, circuitos telefónicos muy sensibles a las redes eléctricas, funcionamiento mejorable de los sistemas de protección). La evolución y mejora de estos aspectos, unido a una mejor comprensión de los problemas que se producen en los transformadores estrella-estrella, permiten concluir que la necesidad de utilización de arrollamientos de estabilización en todos los casos es arcaica.

En conclusión, según Cogbill es perfectamente satisfactorio omitir los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella y en los autotransformadores estrella en muchos casos cuando son construidos con núcleos de tres columnas. Ello se ha refrendado por la compra y operación de transformadores de este tipo por varias empresas eléctricas, sin que haya indicación de problemas ni en los sistemas eléctricos ni en los circuitos de comunicación.

Dentro de la literatura técnica anglosajona, otros artículos de la década de 1960 también plantean abiertamente la posibilidad de prescindir de los arrollamientos terciarios en los autotransformadores conectados en estrella.

En 1961, Farry expone en [24] que en los sistemas trifásicos los autotransformadores están habitualmente conectados en estrella y en ellos se ha convertido en axiomático añadir un arrollamiento terciario del 35% de la potencia principal. El autor se pregunta: ¿Es necesario el terciario? ¿De qué potencia ha de diseñarse? Afirma que, en ocasiones, el arrollamiento terciario no sólo no es necesario sino que incluso puede suponer un riesgo añadido.

Farry parte de que la necesidad de los arrollamientos terciarios se justifica para alimentar una carga a una tercera tensión auxiliar, estabilizar el neutro cuando hay desequilibrios con cargas monofásicas fase-neutro y suprimir tensiones de tercer armónico. Comenta que los terceros armónicos de tensión se pueden controlar satisfactoriamente sin un arrollamiento terciario con una adecuada conexión del neutro. En el caso de los núcleos de tres columnas, el tercer armónico de la corriente de excitación es suficientemente pequeño para circular por dicha conexión. Los terceros armónicos de corrientes fueron en el pasado cuestionados por su posible interferencia con circuitos de telefonía, lo cual ya no representa un problema significativo, más todavía con las bajas corrientes de excitación de los modernos núcleos laminados en frío. De todo ello se deduce que el arrollamiento terciario se puede omitir si su único propósito es la supresión de armónicos y es posible completar el circuito de neutro del autotransformador (se sobreentiende que poniéndolo a tierra).

En cuanto al dimensionamiento del terciario advierte de que la regla del 35% está sobrevalorada y puede suponer una trampa para el usuario desprevenido. El dimensionamiento del terciario debe diseñarse para soportar las corrientes de cortocircuito que puedan circular por él, tanto ante faltas trifásicas en el circuito terciario como ante faltas monofásicas a tierra en los circuitos primario y secundario (esto ya se advertía muchos años antes).

En el resto del artículo Farry muestra la manera de hacer de forma sencilla los cálculos para obtener las corrientes de cortocircuito así como las impedancias homopolares del autotransformador.

En la discusión del artículo un ingeniero de una compañía eléctrica cuestiona los postulados de Farry sobre la posible omisión de los terciarios, arguyendo que la presencia del arrollamiento terciario permite cubrir “factores desconocidos” que históricamente han supuesto un mal funcionamiento de los transformadores estrella-estrella, además de otros factores conocidos como las interferencias en la telefonía, los terceros armónicos y la inversión de neutro. Añade que siendo necesarios en ciertas circunstancias, es más flexible disponer de terciarios por posibles recolocaciones de transformadores dentro de la red.

Por su parte, Alexander y McNutt analizan en su artículo [25] en 1967 la influencia del arrollamiento terciario en los autotransformadores, así como su ubicación, el comportamiento ante cortocircuito y las corrientes de falta, su capacidad de carga, y otras cuestiones relacionadas con la explotación de los autotransformadores. Se consideran únicamente autotransformadores con el neutro puesto a tierra, lo que indican que ocurre en todos los sistemas de alta tensión. En lo relativo a la necesidad de utilizar los arrollamientos terciarios para suprimir los terceros armónicos de corriente en las líneas de transmisión y los circuitos de neutro, indica que está bastante superado por el uso de cables de pares apantallados. En cuanto a la necesidad de una baja impedancia homopolar para disponer de un sistema efectivamente puesto a tierra, lo considera un aspecto esencial para la coordinación de aislamiento y la adecuada selección de pararrayos para las condiciones que se dan en faltas fase-tierra. Para ello considera imprescindible el arrollamiento terciario en caso de bancos monofásicos. Pero en el caso de autotransformadores de tres columnas, el efecto de la ausencia de terciario sobre las sobretensiones se debe analizar con herramientas de análisis de transitorios en redes.

En línea con lo mencionado para Estados Unidos y Gran Bretaña, otros países de Europa afrontan también en la segunda mitad de los años sesenta un análisis crítico con la posibilidad de omitir los arrollamientos de estabilización en los transformadores con conexión estrella-estrella o autotransformadores en estrella de sus redes eléctricas. Especialmente conocido y documentado es el caso de Italia que se expondrá a continuación.

En 1965, Francesco Iliceto publica un artículo [26] en el que, sobre premisas muy similares a otros autores anglosajones previamente mencionados, cuestiona la necesidad universal de la incorporación de arrollamientos de estabilización, especialmente en las redes (modernas) con neutro rígidamente puesto a tierra. Tras evaluar el comportamiento homopolar, ante tercer armónico de corrientes y tensiones, el riesgo de sobretensiones resonantes de diferentes tipos de transformadores (flujos libres y ligados) y en diferentes configuraciones de puesta a tierra, concluye que la omisión de los arrollamientos de estabilización en transformadores de núcleo de tres columnas cuando se dispone el neutro puesto a tierra es especialmente oportuna por cuanto no supone inconvenientes y posee la ventaja de reducir la corriente de cortocircuito.

Referencia la experiencia favorable de transformadores trifásicos con núcleo de tres columnas sin terciario en Estados Unidos.

Por su parte, Enrico Balp presenta un artículo [27] en 1966 donde plantea el problema del comportamiento ante cortocircuito y el dimensionamiento de los arrollamientos de estabilización en los grandes autotransformadores de alta tensión. En él, cita referencias de autotransformadores en servicio sin arrollamiento terciario en América e Inglaterra, así como la existencia de dicho arrollamiento en redes de 380 kV con neutro puesto a tierra en Francia con un carácter puramente preventivo puesto que se dispone dicho arrollamiento abierto en uno de sus vértices.

Tiene también especial interés un documento de 1992 con la retrospectiva histórica de la evolución de las características de los autotransformadores de potencia de la red de muy alta tensión especificados por ENEL en Italia durante el periodo 1970-1991 [28]. Inclusive hasta la primera unificación de especificaciones técnicas realizada en 1972, todos los autotransformadores (divididos en dos grupos: 400/230 kV 400 MVA y 440-230/135-160 kV 250 MVA) disponían de arrollamiento de estabilización. A partir de 1975 se comenzaron a especificar sin él los autotransformadores de 250 MVA, manteniéndose para 400 MVA. Esta situación se mantuvo en la revisión de especificaciones técnicas de 1985, y en la revisión de 1991 se dejó la presencia del arrollamiento en triangulo para autotransformadores de 400 MVA a decisión del fabricante del equipo. A lo largo del documento se argumenta el riesgo de fallo que se produce en los arrollamientos de estabilización durante la ocurrencia de faltas a tierra en la red, arrollamientos que pueden evitarse en diseños de núcleos de tres columnas. De hecho, la única cuestión que supuso mantener dicho arrollamiento en los transformadores de 400 MVA era su necesidad para realizar los ensayos de vacío y los ensayos dieléctricos a frecuencia industrial.

### **2.3. Los arrollamientos de estabilización en la actualidad**

Las principales fuentes de las que beben los ingenieros en la actualidad de cara a especificar técnicamente los transformadores que van a ser adquiridos por sus empresas son las siguientes:

- Normativa técnica aplicable
- Libros de transformadores
- Artículos publicados en revistas y congresos
- Información disponible relacionada con las decisiones tomadas históricamente en su compañía, experiencias disponibles de otras compañías y recomendaciones de fabricantes

A continuación, se van a desarrollar dichos aspectos en relación con la presencia de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella.

### 2.3.1. Normativa técnica aplicable

En este apartado se exponen las principales indicaciones disponibles en la normativa técnica de transformadores en relación con los arrollamientos de estabilización o terciarios, así como con el comportamiento de los transformadores estrella-estrella. Como es bien sabido, la normativa técnica internacional recoge y condensa el estado de la técnica a partir de comités compuestos por expertos del ámbito académico e investigador y del ámbito industrial, tanto fabricantes de los equipos como utilizadores de los mismos.

Se analizará la normativa internacional IEC, la normativa europea (que normalmente transpone directamente la normativa internacional IEC) y la normativa americana ANSI/IEEE. En primer lugar se estudiarán las normas generalistas que aluden a los aspectos introductorios de los transformadores, para posteriormente abordar las que entran en detalles de su conexionado y características de funcionamiento.

#### Definiciones y generalidades

##### a) Normativa internacional / europea

La norma 60076-1 [29] [30] define los arrollamientos de estabilización como:

*“3.3.8. Arrollamiento de estabilización:*

*Arrollamiento suplementario en triángulo, especialmente utilizado en transformadores de acoplamiento estrella-estrella, o estrella-zig-zag, cuyo fin es reducir la impedancia homopolar del arrollamiento conectado en estrella<sup>4</sup>.*

*Nota: Un arrollamiento se denomina arrollamiento de estabilización sólo si no está destinado para su conexión polifásica a un circuito externo”.*

Resulta destacable a partir de esta definición el papel protagonista que se le otorga a la disminución de la impedancia homopolar del transformador como justificación de la presencia de arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella, más allá de las tradicionales razones indicadas anteriormente como justificación de la presencia de estos arrollamientos en relación con el comportamiento armónico o ante cargas desequilibradas.

##### b) Normativa americana

Por su parte, la norma americana IEEE Std C57.12.80 [31] indica textualmente:

*“3.419 Stabilizing Winding*

*A delta connected auxiliary winding used particularly in wye-connected three-phase transformers for such purposes as the following:*

- 1) To stabilize the neutral point of the fundamental frequency voltages*
- 2) To minimize third-harmonic voltage and the resultant effects on the system*
- 3) To mitigate telephone influence due to third-harmonic currents and voltages*
- 4) To minimize the residual direct-current magnetomotive force on the core*

---

<sup>4</sup> Siendo rigurosos, ésto sólo es cierto en el caso de que el neutro de la estrella esté conectado a tierra.

5) *To decrease the zero-sequence impedance of transformers with Y-connected windings.*

*NOTE - A winding is regarded as a stabilizing winding if its terminals are not brought out for connection to an external circuit. However, one or two points of the winding which are intended to form the same corner point of the delta may be brought out for grounding, or grounded internally to the tank. For a three-phase transformer, if other points of the winding are brought out, the winding should be regarded as a normal winding as otherwise defined."*

*"3.453 Tertiary Winding*

*An additional winding in a transformer which can be connected to a synchronous condenser, a reactor, an auxiliary circuit, etc. For transformers with wye-connected primary and secondary windings, it may also help:*

*a) to stabilize voltages to the neutral, when delta connected*

*b) to reduce the magnitude of third harmonics when delta connected*

*c) to control the value of the zero-sequence impedance*

*d) to serve load."*

Se destaca el hecho de que la normativa americana hace una referencia directa y diferenciada a los arrollamientos terciarios frente a los arrollamientos de estabilización, algo que no ocurre en la normativa europea. Ello puede ser debido a que actualmente es una práctica cada vez menos habitual la utilización de los arrollamientos de estabilización como fuente de alimentación auxiliar, fundamentalmente por el incremento que supone en la probabilidad de que se produzca un cortocircuito trifásico en dicha alimentación, con nefastas consecuencias para el transformador.

### Guía de aplicación de transformadores

#### a) Normativa internacional / europea

La norma IEC 60076-8 [32] / UNE 2017005 [33] aplica a transformadores de potencia y entre otras cosas "facilita información a los usuarios acerca de ciertas características fundamentales del funcionamiento de los diferentes modos de conexión de los transformadores y diseños de sus circuitos magnéticos, con una particular referencia a los fenómenos homopolares".

En el apartado 2.2 acerca de las propiedades características de combinaciones de conexión de transformadores, se centra en el comportamiento de las corrientes de neutro. En caso de conexión **YNyn** y **YNauto**, la corriente homopolar puede circular con amperios-vuelta equilibrados entre los arrollamientos. En **YNy** e **Yyn**, no hay amperios-vuelta equilibrados y se establece una corriente magnetizante por el núcleo (controlada por la impedancia homopolar magnetizante) que afecta a la simetría de las tensiones entre fase y neutro creando limitaciones en la corriente homopolar admisible por los calentamientos que pueden causar los flujos de dispersión homopolares. En **YNd**, **Dyn**, **YNyd** e **YNy+d** la corriente homopolar del arrollamiento en estrella con neutro a tierra provoca una circulación de corriente por el triángulo.

En el apartado 2.3.1 y 2.3.2 se describe el funcionamiento de los flujos homopolares en circuitos magnéticos de tres columnas y de cinco columnas/acorazados. En estos últimos indica

la práctica habitual de equiparlos con arrollamientos de estabilización como consecuencia de su muy elevada impedancia magnetizante.

En el apartado 4 se estudian las propiedades homopolares.

En el apartado 4.3 se presentan los circuitos unifilares equivalentes ante fenómenos homopolares que se presentarán en detalle en el capítulo 4 de la tesis.

En el apartado 4.7 se presentan las propiedades de las impedancias homopolares para diferentes conexiones, así como valores típicos de las diferentes configuraciones de conexión. Se advierte de que la presencia de los arrollamientos de estabilización reduce la impedancia homopolar, aumentando las corrientes de falta a tierra y haciendo necesario un adecuado dimensionamiento del mismo para soportar corrientes de falta en cualquiera de las redes conectadas.

Finalmente, en el apartado 4.8 se estudia la posible aplicación de una corriente permanente por el neutro:

- En transformadores **YNyn** se puede cargar con la corriente asignada a través de los neutros (si la puesta a tierra de la red lo permite).
- En transformadores **Yyn+d** se puede cargar con la corriente asignada a través del neutro, si el triángulo tiene una potencia asignada al menos igual a la tercera parte de la potencia del secundario (la corriente por fase del triángulo equilibra la corriente homopolar del secundario, que es por definición un tercio de la corriente de neutro).
- Un transformador **Yyn** no proporciona un equilibrio definido en las tensiones de fase.
- Un transformador de distribución **Yyn** de tres columnas no está en general adaptado para la aplicación de carga entre fase y neutro. El desequilibrio de tensión puede no ser aceptable si el neutro lleva más de un 10% de la corriente asignada. Por ello, se recomiendan transformadores **Dyn** o **Yzn** en transformadores de distribución que alimentan redes de 4 hilos.
- Un transformador **Yyn** de tamaño y tensión medios puede llevar aproximadamente el 25% de la corriente asignada durante un periodo de 2 horas hacia una bobina de extinción de arco, además de carga equilibrada plena, sin riesgo térmico, lo que conviene que sea confirmado específicamente.

De todo lo indicado en esta norma, cabe destacar, por un lado, que se prescribe la utilización de los arrollamientos de estabilización en los transformadores de flujos libres. Por otro lado, en los transformadores con núcleo de tres columnas, considera determinante de cara a validar su funcionamiento sin arrollamiento de estabilización el hecho de que haya un adecuado balance de amperios-vuelta. Ello sucede cuando ambos neutros están puestos a tierra y las impedancias del transformador y la red son reducidas, lo que permite un adecuado funcionamiento con circulación de corriente de neutro. Sin embargo, en caso de que un neutro esté puesto a tierra y otro no se produce un desbalance que provoca limitaciones en la corriente homopolar admisible por los calentamientos que pueden causar los flujos de dispersión homopolares. Ello se soluciona con un arrollamiento de estabilización.

**b) Normativa americana**

Por su parte, la norma IEEE Std C57.105 [34] tiene sus antecedentes en un grupo de trabajo creado en 1968 por el subcomité de “Performance Characteristics” con el objetivo de preparar una guía de usuarios para la utilización de transformadores estrella-estrella que tuviera en consideración problemas relacionados con la red, capacidades de fabricación, calentamiento de la cuba, ferresonancia e interferencias telefónicas. Finalmente, se extendió al rango completo de conexiones comúnmente utilizadas en transformadores en sistemas de distribución trifásicos (está en su alcance planteada para transformadores MT/BT y no se consideran transformadores de tres arrollamientos).

Se referencian los siguientes “problemas” para algunas conexiones:

- **Y-YG**: incapaz de ofrecer un neutro estabilizado. Su uso puede resultar en sobretensiones en una o dos columnas como consecuencia de desequilibrios fase-neutro en la carga.
- **YG-D**: actúa como transformador de puesta a tierra y no debe ser usado salvo para este servicio.
- **YG-YG**: transformadores trifásicos de tres columnas son susceptibles de calentamientos de la cuba con desbalances de carga fase-neutro o faltas a tierra.

En el apartado 3.3.3 hace un análisis del flujo homopolar que se puede producir con desbalances de carga o faltas a tierra. A falta de un camino ferromagnético, este flujo ha de retornar fuera del núcleo pudiendo causar calentamientos por corrientes parásitas en elementos estructurales, especialmente la cuba. Ello depende de la configuración del núcleo y de las conexiones de los arrollamientos. Los arrollamientos en triángulo actúan como una bobina cortocircuitada que rodea al núcleo suprimiendo la mayor parte del flujo homopolar, no requiriéndose columnas de retorno. La conexión **YG-YG** puede determinar apreciables flujos homopolares y requiere caminos de retorno. En núcleos trifásicos de tres columnas, salvo que se puedan evitar tensiones homopolares, y por tanto no se debería usar esta conexión.

En el apartado 6.3.1 se refuerza el argumento al analizar el calentamiento de cuba ante faltas a tierra secundarias en transformadores de tres columnas y conexión **YG-YG**. Se advierte del severo calentamiento que se puede producir en cualquier condición que pueda generar tensión homopolar, siendo la falta secundaria la de mayor severidad. Se advierte incluso de que añadir un arrollamiento en triángulo, si bien reduce la magnitud de la tensión homopolar, no previene completamente la circulación de flujo homopolar por la cuba. Incluso puede provocar que el transformador actúe como una fuente de corriente de neutro generando problemas en faltas a tierra primarias o interrupción de fases. Se aconseja que en caso de emplear arrollamientos terciarios, la impedancia entre los arrollamientos de alta tensión y terciario sea suficientemente pequeña como para asegurar la desconexión del sistema de protección ante condiciones anormales antes de que se produzca un daño térmico a los arrollamientos.

De lo indicado en esta norma, cuyo ámbito de aplicación se centra en los transformadores de distribución, lo más destacado a los efectos de la tesis doctoral es que desaconseja el uso de los transformadores estrella-estrella de tres columnas con ambos neutros puestos a tierra como consecuencia del riesgo de calentamiento de la cuba. Esto, aparentemente entra en contradicción con lo indicado en la norma IEC 60076-8 que advierte de riesgo cuando uno de los neutros está conectado a tierra estando el otro desconectado, pero sanciona como adecuada su utilización cuando ambos neutros están puestos a tierra.

### 2.3.2. Libros especializados de transformadores

Otro aspecto que forma parte esencial del bagaje técnico de un ingeniero sobre el que apoya sus tomas de decisión es la información recibida a lo largo de su formación académica y primeros años de desempeño profesional. En materia de transformadores es habitual que las principales referencias bibliográficas estén constituidas por libros generalistas de máquinas eléctricas en los que no suele abordarse con detalle aspectos como los relacionados con la necesidad de los arrollamientos de estabilización. Incluso en los libros especializados en transformadores, se aborda esta cuestión de forma más o menos intensiva en función del autor y de la época en la que se redactó.

A continuación se presentan los aspectos relacionados con el comportamiento de los transformadores estrella-estrella y los arrollamientos de estabilización que se analizan en los libros de transformadores que constituyen las principales referencias en la materia. Se incluirá también un análisis de libros escritos por autores españoles.

#### **“Transformer Engineering: a Treatise on the Theory, Operation and Application of Transformers” [20]**

Este libro constituye desde su primera edición en 1938 una de las primeras y más relevantes referencias por el enfoque práctico ofrecido por los ingenieros de la División de ingeniería de transformadores de la compañía General Electric. Los capítulos de mayor interés para la tesis fueron escritos por L.F. Blume y A. Boyajian, cuyas aportaciones en relación con la problemática de las conexiones de transformadores y los arrollamientos terciarios son posiblemente las de mayor interés en la materia de la primera mitad del siglo XX [5] [6] [14] [15] [21].

En el capítulo VII. “Transformer connections” se realiza un análisis pormenorizado de las diferentes tipologías de conexión en transformadores. Refiere la existencia de problemas en la operación de transformadores estrella-estrella de flujos libres en relación con la inestabilidad de neutro debido a las corrientes de magnetización, a los terceros armónicos y a los desequilibrios de carga fase-neutro, desaconsejando su uso. También indica en estos transformadores con los neutros puestos a tierra posibles problemas de resonancia. En el caso de los transformadores de columnas indica que “aunque no son completamente eliminadas, la mayoría de las desventajas de la conexión estrella-estrella se evitan con núcleos de columnas”. Asimismo justifica que, para este tipo de transformadores, la corriente de magnetización no representa un problema y ofrecen razonablemente buenos resultados con cargas desequilibradas (indica que es posible una carga moderada entre fase y neutro, hasta del 25%, sin desequilibrios indebidos de las tensiones y sin causar por tanto un excesivo desplazamiento de neutro). En cuanto a los fenómenos con terceros armónicos de tensión, indica que el neutro está apreciablemente estabilizado (tercer armónico del flujo del 2-5%). De hecho propone como uno de los métodos de eliminación de los terceros armónicos de flujo el entrelazado de los transformadores de columnas, como solución equivalente a un arrollamiento terciario en triángulo de alta impedancia.

Por otra parte, los autores enumeran los propósitos de los arrollamientos terciarios en triángulo utilizados conjuntamente con la conexión estrella-estrella. Respecto a la protección del transformador y del sistema eléctrico de los excesivos potenciales de tercer armónico afirma que el terciario no es necesario en el caso de núcleos de columnas. Sin embargo, en cuanto a las interferencias por tercer armónico de corriente indica que los transformadores de columnas, con un 3% de tensión residual, pueden producir prácticamente la mismas corrientes

circulantes por tierra que los bancos de transformadores monofásicos con más del 50% de tensión inherente de tercer armónico. Un arrollamiento terciario adecuadamente diseñado puede ser por tanto esencial para eliminar estas perturbaciones incluso en transformadores trifásicos de columnas. En este caso, las corrientes de tercer armónico por tierra no se eliminan completamente pero se dividen (en función de las impedancias relativas) entre el terciario y la red.

En lo que respecta a la estabilización del neutro, depende del propósito perseguido. Por un lado, si el arrollamiento terciario se diseña con el objetivo de estabilizar el neutro en caso de desequilibrios en la carga, si la carga desbalanceada es únicamente una pequeña fracción de la corriente nominal del transformador, un transformador de columnas se puede usar sin terciario siempre que la caída de tensión no sea excesiva. Por otro lado, si el terciario pretende ofrecer un neutro estable en un sistema aislado entonces la reactancia debe ser tan baja como sea posible y el terciario debe diseñarse con capacidad para soportar altas corrientes de cortocircuito, limitándose con ello al mínimo el desplazamiento del neutro. Sin embargo, si el terciario sólo se requiere para proporcionar suficiente corriente de cortocircuito para que puedan detectarse y despejarse corrientes de falta en la red, entonces podrá tener una mayor reactancia y una menor capacidad de resistir cortocircuitos, aunque habrá un considerable desplazamiento de neutro y elevación de las tensiones de línea frente a tierra.

Adicionalmente a alguna de las funciones anteriores, los arrollamientos terciarios se utilizan a veces para alimentar cargas como cargas capacitivas para la corrección del factor de potencia. En este caso, deben diseñarse tanto para soportar cortocircuitos en sus propios arrollamientos como en los otros.

#### **“Magnetic Circuits and Transformers” [35]**

A diferencia del caso anterior, este libro escrito por los miembros del departamento de ingeniería eléctrica del Instituto de Tecnología de Massachussetts (MIT), que también constituye una referencia importante en materia de transformadores, tiene un objetivo principalmente teórico y educativo. En lo que respecta a la materia de interés para la tesis los autores hacen un análisis esencialmente teórico de la problemática de los diferentes tipos de conexiones y sin demasiada profundidad ni indicando connotaciones prácticas.

#### **“Electrical Transmission & Distribution Reference Book” [36]**

Otra de las referencias bibliográficas de mayor prestigio en el ámbito de la ingeniería eléctrica lo constituye este libro escrito por los ingenieros del “Central Station Engineering Group” de la compañía Westinghouse Electric. El capítulo 5 está dedicado a los transformadores de potencia y fue escrito por J.E. Hobson y R.L. Witzke.

En lo relacionado con la conexión de transformadores hace un análisis de las características de las impedancias de secuencia sin aportar gran novedad a lo escrito por otros autores anteriormente. Aporta en el apéndice tablas para los circuitos equivalentes a secuencia directa y secuencia homopolar de diferentes tipologías de transformadores y autotransformadores en función de su conexión, puesta a tierra de los neutros y diseño del núcleo magnético.

Respecto a cuestiones de interés para la tesis, hace referencia a que la impedancia para el flujo de la corriente homopolar es similar a la de secuencia directa en transformadores acorazados pero es menor en unidades de núcleo de columnas (la sitúa en el rango 30-300%,

correspondiendo los valores mayores a mayores potencias). Afirma que para las unidades de columnas de menor potencia esta característica es particularmente efectiva y puede utilizarse para reemplazar al arrollamiento terciario para la estabilización del neutro y los terceros armónicos de excitación. También hace referencia a la participación de la cuba, que actúa como un arrollamiento cortocircuitado a la secuencia homopolar, tendiendo a limitar el camino de retorno del flujo entre la cuba y los arrollamientos. Indica que estas características diferenciales en la impedancia de excitación homopolar entre los transformadores compuestos por unidades monofásicas y los acorazados y los transformadores con núcleo de columnas hace necesario considerar (no despreciar) la impedancia de excitación homopolar en estos últimos.

### **“The J&P Transformer Book” [37]**

Esta es otra de las referencias bibliográficas clásicas de los transformadores que, a lo largo de sus múltiples ediciones ha sido adaptada y actualizada por diferentes autores, desde la primera edición escrita en 1925 por H. Morgan Lacey.

En el apartado relativo a los transformadores de múltiples arrollamientos, el autor indica que es deseable que un transformador trifásico disponga de un arrollamiento en triángulo para disponer de un camino de baja impedancia para las corrientes de tercer armónico, el cual también permite la circulación de corriente en el caso de desequilibrio de cargas. Se considera justificada la necesidad del arrollamiento terciario, estén los neutros puestos a tierra o no lo estén, sin referir diferencias según el tipo de construcción del núcleo. Indica que el arrollamiento terciario se debe dimensionar para ser suficientemente robusto mecánicamente, cumplir los requisitos de capacidad térmica y disponer de suficiente impedancia como para que no haya caídas de tensión anormales en caso de cargas desequilibradas trabajando durante tiempos prolongados. Matiza posteriormente que el uso de los arrollamientos terciarios se prescribía cuando los núcleos eran de acero laminado en caliente con corrientes de magnetización del 5%. Actualmente, con núcleos de acero laminado en frío y corrientes por debajo del 0,5%, los efectos de la distorsión armónica son mucho menos significativos. En estos casos, disponer o no de terciario es más una cuestión de requerimientos del sistema.

Hace referencia al diseño por parte de la empresa eléctrica CEGB del Reino Unido de la subestación Littlebrook “D” a mediados de los años 1970 con un transformador 132/11 kV 60 MVA sin arrollamiento terciario, práctica que por aquella época se seguía con cierta frecuencia en transformadores 33/11 kV.

En el análisis de la operación de los transformadores en condiciones anormales, realiza una explicación del efecto asfixia<sup>5</sup> con desplazamiento de neutro, como un fenómeno relevante para transformadores acorazados y bancos monofásicos pero no tanto para transformadores de flujos ligados.

Se realiza también un análisis detallado de la influencia de la conexión del transformador en el comportamiento armónico enumerando los clásicos efectos indeseables de los terceros armónicos de corriente (calentamiento de arrollamientos y de la carga, perturbaciones en telefonía y equipos de protección y mayores pérdidas en el hierro) y de los terceros armónicos de tensión (mayor estrés dieléctrico al aislamiento, carga electrostática a líneas eléctricas y telefónicas adyacentes y posible resonancia de tercer armónico de frecuencia entre la

---

<sup>5</sup> El efecto asfixia (*choking effect*) se explica en detalle en el apartado 6.1.1.b del capítulo 6.

inductancia del transformador y la capacidad de las líneas, que los factores de amortiguamiento en las redes malladas actuales hacen inocuas estas alteraciones).

También en relación con el comportamiento armónico, explica que si bien es conocido que para transformadores monofásicos y acorazados se debe evitar la conexión estrella-estrella debido a las sobretensiones de tercer armónico (con neutro aislado), no son tan conocidos los problemas de sobrecalentamiento severo en el núcleo que se pueden producir en determinadas ocasiones (con el neutro secundario conectado a tierra y cierta capacidad electrostática de las líneas conectadas). Este riesgo, producido por fenómenos de resonancia, son improbables, pero el autor recomienda evitar esta conexión en transformadores de flujos libres (hace referencia a casos reales ocurridos). En el caso de transformadores de tres columnas, la situación es teóricamente la misma si bien al ser los terceros armónicos muy inferiores, el riesgo es también muy inferior. En todo caso, termina por recomendar evitar esta conexión si los neutros están puestos a tierra.

#### **“Transformer Engineering: Design and Practice” [38]**

En cuanto a libros de más reciente publicación sobre transformadores, el escrito por Kulkarni y Khaparde es uno de los que goza en la actualidad de más prestigio.

En relación con la influencia del tipo de construcción del núcleo y la conexión de los arrollamientos señala la conveniencia de no usar la conexión estrella-estrella con neutro aislado en transformadores de flujos libres como consecuencia de las sobretensiones de tercer armónico. Estas desventajas están en gran medida superadas para transformadores de tres columnas. Por esta misma razón, una carga monofásica moderada puede ser manejada en transformadores de tres columnas sin desequilibrios indebidos en las tensiones de fase. La desventaja, sin embargo, es que el retorno del flujo homopolar fuera del núcleo puede causar pérdidas adicionales en elementos estructurales. Todo ello se soluciona en ocasiones disponiendo de un arrollamiento terciario en triángulo.

En el caso de transformadores con conexión estrella-estrella con neutros conectados a tierra, los terceros armónicos de tensión prácticamente desaparecen. La principal desventaja es que los terceros armónicos de corriente causan interferencias en los circuitos de comunicación que discurren en paralelo con las líneas eléctricas. Al disponer de un arrollamiento terciario en triángulo los terceros armónicos de las corrientes se reducen aunque no se eliminan completamente, de forma que el reparto de las corrientes entre las líneas y el arrollamiento terciario depende de las impedancias relativas ofrecidas por los dos caminos.

En el análisis de la reactancia homopolar a circuito abierto, el autor explica el funcionamiento de la cuba como un arrollamiento en triángulo equivalente. La saturación del material de la cuba (acero dulce) provoca un comportamiento de la reactancia homopolar en vacío variable según la tensión aplicada. En el caso frecuente de que los transformadores de potencia lleven en las paredes internas de la cuba pantallas magnéticas para reducir las pérdidas por flujos de dispersión, estas pantallas suponen una menor reluctancia para el flujo y reducen el efecto de la cuba como triángulo equivalente.

En relación con los arrollamientos terciarios para estabilización, los autores (referenciando el artículo escrito por Cogbill [23]) expresan las dudas acerca de su necesidad en transformadores estrella-estrella (o autotransformadores estrella) de tres columnas con los neutros conectados a tierra. Indican que la decisión depende principalmente de si las características de secuencia homopolar y de terceros armónicos son compatibles con la red en la que el transformador va a

ser instalado. Si estos dos aspectos no se ven afectados, se puede omitir. Advierte además de que los arrollamientos terciarios dimensionados para no estar cargados se convierten en un punto débil ante faltas asimétricas en la red. Por otro lado, en transformadores de flujos libres, las consecuencias de omitir el terciario sí que son significativas.

Finalmente, en el capítulo dedicado a los esfuerzos de cortocircuito, se insiste en el hecho de que en los transformadores de menor potencia de conexión estrella-estrella con ambos neutros a tierra el arrollamiento terciario se puede evitar. Para estos transformadores la ausencia del terciario no reduce sustancialmente la corriente de falta y puede ser detectada sin problemas por las protecciones. Con ello se elimina un punto débil del transformador y se reducen las corrientes de falta, lo que supone menos estrés mecánico para el transformador y el resto de equipos. Por tanto, se concluye, la necesidad del terciario debe revisarse de forma crítica si se permite por consideraciones de las características armónicas y los requerimientos de protección.

### **“Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección” [39]**

Desde su primera edición en 1969, el libro de transformadores de Enrique Ras fue posiblemente la principal referencia bibliográfica especializada en transformadores en una buena parte de las escuelas de ingeniería en España.

En el estudio de los transformadores trifásicos estrella-estrella con cargas desequilibradas en equipos con núcleo trifásico se concluye que se recomienda evitar esta configuración con desequilibrios superiores al 10%. Aunque no se indica explícitamente, se ha partido de una configuración con neutro primario aislado. Por otro lado, se justifica que con los devanados terciarios desaparecen los inconvenientes de las cargas fase-neutro en todos los transformadores estrella-estrella. Más adelante se cita textualmente: “Conclusión: Tan sólo los grupos de conexión **Yy** son inadecuados ante cargas desequilibradas. Si se agrega un devanado terciario son adecuados”. Y en el resumen de propiedades de diversos grupos de conexión se indica que los transformadores estrella-estrella “Solamente se emplearán cuando no se prevean grandes desequilibrios fase-neutro en las cargas (10% máximo, en transformadores con núcleo trifásico; proscritas las cargas desequilibradas fase-neutro con transformadores monofásicos)”.

### **Otros libros generalistas de máquinas eléctricas**

Finalmente, cabe señalar que es frecuente que, en las escuelas de ingeniería, los alumnos se enfrenten al estudio de los transformadores con el apoyo de libros generalistas de máquinas eléctricas. En ellos, el estudio de la problemática detallada de los transformadores según la tipología de sus núcleos magnéticos, las configuraciones de conexión de los arrollamientos y de la puesta a tierra de los neutros suele abordarse (lógicamente) de una manera superficial.

Por citar algunos ejemplos de reconocido prestigio en España, en el libro de Fraile Mora [40], en el estudio de los armónicos en las corrientes de excitación de transformadores trifásicos, al analizar los transformadores de núcleo trifásico se evidencia el menor impacto de los armónicos por la mayor reluctancia del camino de retorno. “La consecuencia de orden práctico, es que las tensiones simples secundarias no presentan terceros armónicos de gran consideración [...]”. En todo en caso, se manifiesta que la manera de “borrar” los flujos armónicos es dotar “al transformador estrella-estrella de arrollamientos de compensación o terciarios”. Por otra parte, en relación con las conexiones de los transformadores trifásicos

respecto a la conexión estrella-estrella se manifiestan dos inconvenientes graves: el desequilibrio de las tensiones simples cuando las cargas son desequilibradas y los terceros armónicos de tensión. Para ello se apuntan dos soluciones: Conectar rígidamente a tierra los neutros de los transformadores, lo que no es del todo conveniente ya que permite que circulen los armónicos de la corriente de vacío; o bien añadir un tercer devanado (terciario) conectado en triángulo.

Por su parte, en el libro de Sanz Feito [41] se advierte que la conexión estrella-estrella es “solamente admisible cuando la carga a alimentar sea equilibrada”. Mientras que la conexión estrella-estrella-triángulo pese a su mayor coste “permite todo tipo de desequilibrios y puestas a tierra del neutro, tanto en alta como en baja tensión. Se utiliza fundamentalmente para los puntos de interconexión de redes de A.T.”.

### 2.3.3. Experiencias actuales en la especificación técnica de transformadores estrella-estrella

La información relacionada con las especificaciones técnicas de los transformadores de potencia se enmarca dentro de la normalización técnica interna de cada compañía utilizadora de estos equipos y es trasladada a los fabricantes de transformadores en los procesos de licitación y adquisición de los mismos. Por tanto, el carácter confidencial de esta documentación dificulta notablemente la disponibilidad de información completa y estructurada de las decisiones en materia de presencia o ausencia de arrollamientos de estabilización en los diferentes países y compañías eléctricas. No obstante, dado que normalmente esta materia no es considerada altamente sensible, de cara al desarrollo de esta tesis se ha podido obtener información respecto a las políticas de especificación de transformadores de potencia estrella-estrella en diversas compañías a lo largo del mundo. No pretende ser esta información, por imposibilidad, una radiografía exacta de las decisiones adoptadas en esta cuestión en diferentes lugares y empresas, con la motivación y el contexto por las que han sido tomadas.

A continuación se presenta en la tabla 2.1 un resumen de las políticas seguidas por las compañías eléctricas de diferentes países. Esta información ha sido obtenida a través de diversos tipos de interlocutores: personal de compañías eléctricas, fabricantes de transformadores, consultores y personal de universidades.

Criterios de especificación de los transformadores estrella-estrella		
Sin arrollamiento de estabilización	Con arrollamiento de estabilización (mayoritariamente)	Con arrollamiento de estabilización (sistemáticamente)
Italia, Turquía, (Grecia)	Estados Unidos, Reino Unido, Francia	España, Portugal, Eslovenia, Rusia, Canadá, India, Sudáfrica, México, Colombia, Costa Rica, Argelia, Marruecos

**Tabla 2.1. Resumen de políticas respecto a los arrollamientos de estabilización seguidas por diversas compañías eléctricas en diferentes países del mundo**

Como se indicó anteriormente, la información presentada anteriormente no debe ser considerada una visión completa, exhaustiva y justificada de las políticas de especificación de transformadores de potencia estrella-estrella y la utilización de arrollamientos de estabilización en diversas compañías a lo largo del mundo.

Sin embargo, nos permite concluir que, a lo largo del mundo, únicamente existe una referencia clara, conocida y documentada de decisión de supresión de todos los arrollamientos de estabilización: Italia. También parece constatada la decisión de prescindir de estos arrollamientos en el caso de Turquía [47] y, lo mismo parece intuirse de Grecia en base a [52].

En otros países como Estados Unidos, Francia o Reino Unido se dispone de referencias a transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización (siempre con diseños de núcleos de tres columnas), si bien no se ha podido constatar una decisión generalizada en este sentido. De hecho, en el caso de Francia y Reino Unido, ha sido confirmado que las especificaciones técnicas siguen requiriendo la presencia de los arrollamientos de estabilización.

En el resto de países comentados, la práctica habitual sigue siendo requerir los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella, independientemente del diseño del núcleo magnético. La argumentación habitual que justifica esta decisión es mayoritariamente conseguir la compensación debida a desequilibrios en la red, la supresión de terceros armónicos (sorprendentemente) y, en ocasiones, la utilización de estos arrollamientos para alimentación auxiliar dentro de la subestación. Debe mencionarse, que varias compañías eléctricas, al ser consultadas sobre esta materia han reportado estar planteándose la posibilidad de especificar transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización.

En resumen, a pesar de lo indicado en el apartado 2.2, la práctica mayoritaria de las compañías eléctricas a lo largo del mundo consiste en especificar los transformadores de potencia estrella-estrella con arrollamiento de estabilización. En la mayor parte de los casos, la justificación de esta decisión tiene como principales argumentos técnicos los expresados a lo largo del apartado 2.1 y, en un número no despreciable de situaciones, mantener la coherencia con la decisión "histórica" en la compañía a este respecto o por analogía con la práctica habitual en otros países vecinos.

#### **2.3.4. Referencias más recientes en revistas y congresos en relación al funcionamiento de los transformadores estrella-estrella y los arrollamientos de estabilización**

A lo largo de los apartados 2.1 y 2.2 se referenciaron y describieron numerosos artículos relacionados con el funcionamiento de los transformadores estrella-estrella y los arrollamientos de estabilización enmarcando el conocimiento científico y tecnológico de esta materia durante más de 50 años, esencialmente en la primera mitad del siglo XX.

Como se ha visto hasta este momento en el apartado 2.3, la necesidad de utilización de los arrollamientos de estabilización, lejos de ser un tema resuelto, sigue suscitando diferentes interpretaciones y aproximaciones en la normativa y la literatura técnica, así como decisiones empresariales en sentidos distintos.

De cara a completar la visión actual sobre el estado del arte respecto a esta cuestión, se muestran a continuación las referencias más recientes publicadas en revistas y congresos, así como algunos trabajos en marcha en esta materia.

Ya se ha referenciado anteriormente la influencia del arrollamiento de estabilización en las sobretensiones que se pueden producir en la red y en el propio transformador, cuestión conocida y analizada desde principios del siglo XX. Diferentes tipologías de sobretensiones en relación con la presencia y la ausencia de arrollamientos de estabilización han sido objeto de atención desde aquellos momentos hasta épocas más recientes. Las sobretensiones transferidas de forma electrostática y electromagnética en transformadores de tres arrollamientos fueron descritas en 1954 por Abetti y Davis [42]. En ese sentido, problemas relacionados con las sobretensiones transferidas provocando cebado de arcos entre las bornas del terciario y la cuba fueron reportados por Smith y Swanson posteriormente [43]. La existencia de sobretensiones oscilantes en transformadores estrella-estrella con reactancias conectadas en arrollamientos terciarios se presentó en [44]. El menor riesgo de que se produzcan sobretensiones ferresonantes en transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización es tratado por Rush y Good [45] y Daay [46]. De todo ello se podría concluir, con carácter general, que los fenómenos de sobretensiones son menos proclives de producirse en transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización.

También ha sido tratado de forma intensiva el hecho de que la presencia del arrollamiento de estabilización reduce la impedancia homopolar que presenta el transformador provocando unas mayores corrientes de cortocircuito. Como especialmente relevantes se han señalado las corrientes de cortocircuito circulantes por el propio arrollamiento de estabilización, dado que su menor dimensionamiento en potencia asignada le convierte en un candidato a ser más vulnerable en el caso de esfuerzos de cortocircuito. Esta cuestión ha sido puesta de manifiesto en el año 2000 por varios autores italianos y turcos [47] en base a los resultados de una encuesta internacional sobre los fallos en transformadores debidos a cortocircuitos [48]. Entre otros elementos se señala la presencia (innecesaria) de los arrollamientos de estabilización como uno de los aspectos que se pueden variar en aras a reducir la tasa de fallo de los transformadores como consecuencia de cortocircuitos. Se muestran experiencias exitosas en esta línea una vez tomada la decisión de suprimir los arrollamientos de estabilización en los transformadores de columnas en Italia (en los años setenta) y de Turquía (en los años ochenta).

Como se puede comprobar en los apartados 2.1 y 2.2, una cuestión apenas tratada con una mínima profundidad en el análisis del funcionamiento de los transformadores estrella-estrella es la relacionada con el calentamiento de la cuba como consecuencia de la circulación de flujos homopolares a través de la misma. En un artículo escrito por Descans en 1969 sobre los transformadores estrella-estrella [49] en el marco de la revista ACEC Charleroi de dicho fabricante, se mencionan los calentamientos que se producen para desequilibrios de carga en transformadores de tres columnas con cargas monofásicas superiores al 10%. Se concluye con la necesidad de utilizar triángulos de compensación en todos los casos en unidades monofásicas y transformadores acorazados así como en transformadores de tres columnas con potencias superiores a 10 MVA.

En 1995, Ngneueu, Maillot y Munar presentan [50] un modelo de elementos finitos para el cálculo de la reactancia homopolar en transformadores trifásicos de tres columnas, así como un modelo simplificado para evaluar el punto más caliente de la cuba. El modelo es aplicado a un transformador de 500 kVA evaluando el efecto de la cuba como triángulo virtual, así como el diferente calentamiento que se produce en la misma considerando la presencia o no de

pantallas de aluminio junto a la cuba. El resultado muestra como en ausencia de pantallas, se produce un elevado calentamiento de la cuba, mientras que con pantallas la cuba no se calienta.

Salvo las escasas referencias indicadas sobre esta cuestión, en el artículo recopilatorio realizado por Kulkarni y Khaparde sobre las pérdidas provocadas por los flujos de dispersión [51], se evidencia que no ha existido una inquietud relevante durante el siglo XX sobre el posible calentamiento de la cuba como consecuencia de la circulación de flujos homopolares.

Sin embargo, en el año 2004, los griegos Tsili y Papathanassiou establecen en su artículo [52] un circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador **YNyn0** de tres columnas, en el que recalcan la importancia de considerar la impedancia de magnetización a secuencia homopolar y las configuraciones de puesta a tierra de los neutros del transformador. Lo hacen como hecho crucial para una adecuada representación del transformador en operación desequilibrada, para la correcta selección y ajuste del sistema de protección de la red y del transformador. Indican que normalmente si bien los equivalentes de secuencia de los transformadores están ampliamente estudiados en la literatura, no se suele prestar la atención debida a las características del núcleo magnético y de las configuraciones de puesta a tierra de los neutros. El artículo tiene su motivación en la necesidad de una adecuada detección de condiciones de flujo homopolar ante faltas asimétricas que queden indetectadas por el sistema de protección y que, en un caso, provocaron un severo calentamiento de la cuba del transformador como consecuencia de una falta combinada (monofásica a tierra y fase abierta). Los mismos autores complementan en 2006 el artículo anterior con un nuevo artículo [53] ofreciendo directrices para la selección de protecciones capaces de detectar condiciones peligrosas de flujo homopolar potencialmente nocivas en cuanto al calentamiento de la cuba. Indican que en un transformador estrella-estrella sin terciario se estipulan corrientes de neutro inferiores a 0,3 pu. Proponen implementar esquemas de protección basados en la estimación del flujo homopolar (a partir de las corrientes primaria y secundaria y la impedancia (reactancia) homopolar), si bien no recomiendan que se active con corrientes por debajo de 0,2 pu.

De forma más reciente, en 2012 Penabad, López y Alvarez-Mariño [54][55] muestran que se mantiene de actualidad el asunto de los arrollamientos de estabilización en la comunidad científica. En el primero de los artículos se ofrecen indicaciones sobre el dimensionamiento de la potencia aparente de los arrollamientos de estabilización mediante dos métodos: uno basado en el uso de un circuito equivalente y otro basado en el método de elementos finitos. Estos resultados se comparan con la tradicional regla del 35% de la potencia de los arrollamientos principales. Por su parte, en el segundo de los artículos, se realiza una evaluación del riesgo de calentamiento de las paredes de la cuba considerando la presencia y la ausencia de arrollamientos de estabilización. El cálculo del flujo homopolar y las pérdidas se realiza por medio de dos metodologías: el método de redes de reluctancia (desarrollado por el profesor Turowski) y el método de elementos finitos obteniéndose valores muy similares. El cálculo del calentamiento en las paredes de la cuba se realiza con este último método. Los resultados obtenidos en una transformador **YNyn0+d1** (224,25/24,9/13,8 kV 45 MVA) muestran un calentamiento excesivo en ausencia de arrollamiento de estabilización cuando se simula una carga monofásica a corriente nominal en el arrollamiento secundario. Se observa una discontinuidad muy acusada como consecuencia de la presencia de pantallas magnéticas, así como el efecto pelicular en las paredes de la cuba.

Finalmente, resulta de interés mencionar que el Comité de Transformadores del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) está trabajando en una guía normativa para la aplicación de arrollamientos terciarios y de estabilización en transformadores de potencia (**IEEE Std PC57.158/Draft “Guide for the Application of Tertiary and Stabilizing Windings on Power Transformers”**). El objetivo de esta guía es establecer un marco conceptual y recomendaciones para la especificación, aplicación y evaluación de las prestaciones de los arrollamientos terciarios y de estabilización, evaluando su necesidad o conveniencia de uso. En la indicación del propósito de la guía se indica que “Hay un gran interés en la industria en el desarrollo de una guía de aplicación para los arrollamientos terciarios y de estabilización. Esta propuesta de documento intenta rellenar un hueco en la literatura técnica actual disponible respecto a la orientación en la necesidad de los arrollamientos de estabilización en transformadores o autotransformadores estrella-estrella, así como en la determinación de la potencia nominal de dicho arrollamiento. El impacto potencial de la ambigüedad actualmente presente en la práctica de la industria es un sobre coste innecesario y/o complejidad de componentes”. El desarrollo de esta tesis doctoral tiene totalmente alineados sus objetivos en este sentido.

## 2.4. Resumen del capítulo

A lo largo del capítulo 2 se ha realizado un recorrido de más de 100 años por el funcionamiento de los transformadores estrella-estrella y por los arrollamientos de estabilización, por la problemática que presentan y que resuelven, por los aspectos que pueden determinar la necesidad de utilizarlos y por la conveniencia de dejar de hacerlo en determinadas circunstancias.

Al final de este largo recorrido, que incluye las actuales referencias e indicaciones respecto a los arrollamientos terciarios y de estabilización en la normativa técnica vigente así como en libros especializados en transformadores de amplio uso y gran solvencia, se ha podido constatar que no existe una determinación clara sobre la necesidad o no de utilizar arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella en diseños de tres columnas. Este hecho se confirma por la mayoritaria utilización de estos arrollamientos más de 50 años después de ser cuestionado su uso y aún a pesar de existir experiencias favorables en las que se ha prescindido de ellos.

Por todo ello, en los restantes capítulos de esta tesis se abordarán, tanto desde un punto de vista conceptual como, especialmente, desde un punto de vista práctico y aplicado, las principales cuestiones que se han identificado en el análisis del estado del arte como determinantes a la hora de evaluar la necesidad de utilizar arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella con núcleos magnéticos de tres columnas:

- Efectos perniciosos de los terceros armónicos de corriente y tensión en el funcionamiento en vacío del transformador.
- Posible calentamiento de la cuba ante situaciones de desequilibrio en las cargas.
- Magnitud de las corrientes de cortocircuito circulantes por el transformador ante faltas asimétricas en la red.
- Diferencias en la explotación de la red (corrientes de cortocircuito y sobretensiones) ante faltas asimétricas, con posibles dificultades en el funcionamiento del sistema de protección o en la coordinación de aislamiento.

## Capítulo 3

# Planteamiento experimental de la tesis y transformadores objeto de estudio

En el capítulo 2 se ha presentado el estado del arte sobre los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella, mostrándose diferentes consideraciones sobre su necesidad y su utilización. Desde el punto de vista de una empresa eléctrica que quiera plantearse la decisión de especificar sus transformadores estrella-estrella con o sin arrollamiento de estabilización, como se ha podido comprobar, la literatura técnica disponible ofrece justificaciones de su necesidad suficientemente claras y contrastadas para el caso de transformadores de flujos libres (bancos de transformación monofásicos, transformadores trifásicos de núcleo acorazado o de cinco columnas) sin que las mismas hayan sido puestas en cuestión. Sin embargo, en el caso más frecuente de transformadores de núcleo trifásico de tres columnas, las conclusiones no son tan claras y, si bien se cuestiona su necesidad universal en algunos libros y artículos como se vio en el capítulo 2, la práctica mayoritaria en la actualidad sigue considerando su utilización, ocurriendo además que no se dispone de una guía detallada y completa de los aspectos a considerar a la hora de evaluar la necesidad de los arrollamientos de estabilización.

El principal objetivo de este capítulo es detallar el conjunto de aspectos que se han de valorar de cara a tomar una decisión justificada sobre la necesidad del arrollamiento de estabilización en los transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas.

Dado que los aspectos que conforman dicha decisión tienen que considerar tanto las repercusiones propias en los transformadores como las repercusiones para el conjunto de las redes eléctricas en las que están instalados dichos transformadores, se presentará también el contexto de red en el que se debe enmarcar el estudio experimental realizado esta tesis.

Finalmente, se detallarán las características funcionales y constructivas de los transformadores que serán objeto de análisis y estudios experimentales a lo largo de la tesis.

### 3.1. Aspectos a evaluar mediante ensayos y simulaciones

A modo de resumen de los principales problemas de los transformadores estrella-estrella que son normalmente corregidos mediante la utilización de arrollamientos de estabilización se pueden citar los siguientes<sup>6</sup>:

- Excesiva presencia de armónicos de orden 3 en las corrientes y/o tensiones debidas a la corriente de magnetización del transformador.
- Sobretensiones por desplazamiento del neutro del transformador y calentamientos excesivos de la cuba en el funcionamiento con cargas desequilibradas.
- Elevada impedancia de secuencia homopolar en la red, lo que pone en cuestión que pueda ser considerada una red efectivamente puesta a tierra, provocando tensiones elevadas en caso de faltas asimétricas y complicando la detección y eliminación de las corrientes de falta por parte de los sistemas de protección.

En definitiva, la posibilidad de prescindir del arrollamiento de estabilización en un transformador estrella-estrella vendrá esencialmente determinada por la capacidad, tanto del propio transformador como de la red eléctrica en la que vaya a instalarse, de garantizar un adecuado funcionamiento en lo que respecta a las implicaciones relacionadas con sus características de funcionamiento homopolar y ante armónicos homopolares.

Con el objetivo de evaluar cualitativa y, sobre todo, cuantitativamente las cuestiones anteriores, se presentan a continuación de forma resumida los aspectos que serán objeto de estudios y simulaciones experimentales a lo largo de la tesis:

#### a) Representación del comportamiento homopolar del transformador

Como se ha indicado a lo largo del capítulo 2, el arrollamiento de estabilización de un transformador estrella-estrella esencialmente tiene afección en los aspectos relacionados con el comportamiento homopolar del transformador.

Se pretende, por tanto, realizar un análisis experimental que permita caracterizar el comportamiento homopolar del transformador y establecer modelos circuitales que posibiliten el estudio del funcionamiento homopolar del mismo, definiendo en detalle los ensayos necesarios para la obtención de los parámetros de los modelos.

Una adecuada comprensión del comportamiento homopolar de un transformador estrella-estrella con y sin arrollamiento de estabilización será esencial en el resto de aspectos a estudiar.

#### b) Comportamiento en vacío del transformador

Mediante ensayos del funcionamiento en vacío del transformador en presencia de arrollamiento de estabilización y sin él, se buscará valorar el impacto de la corriente de magnetización y su contenido armónico, así como las sobretensiones producidas por el desplazamiento del neutro consecuencia del fenómeno de “neutro inquieto” (que se describirá en el apartado 5.1.1).

---

<sup>6</sup> Se omite la clásica referencia a las interferencias con las líneas telefónicas causadas por los armónicos de orden 3 ya que la tecnología actual de las telecomunicaciones y los equipos electrónicos de protección y control de las redes eléctricas han superado estas cuestiones.

**c) Comportamiento ante cargas desequilibradas del transformador**

Posiblemente los mayores riesgos a los que se ven sometidos los transformadores estrella-estrella en su funcionamiento sin arrollamiento de estabilización son los derivados del calentamiento de la cuba y otros elementos metálicos estructurales del transformador durante su operación ante cargas desequilibradas.

La aparición de flujos homopolares que se cierran por trayectos fuera del núcleo magnético, consecuencia de la existencia de corrientes homopolares, pueden generar calentamientos indeseados que deben ser evaluados.

**d) Comportamiento ante faltas asimétricas del transformador**

En sentido contrario, durante la ocurrencia de faltas asimétricas en la red, la presencia del arrollamiento de estabilización en un transformador estrella-estrella supone unas mayores corrientes de cortocircuito en el transformador, que pueden ser especialmente nocivas para el propio arrollamiento de estabilización.

Por medio de un conjunto de simulaciones, se intentará valorar el mayor riesgo de fallo que esto supone, que en no pocas ocasiones se ha materializado con consecuencias muy perniciosas para el transformador y la subestación transformadora en su conjunto.

**e) Comportamiento de la red ante secuencia homopolar**

Finalmente, se realizarán estudios y simulaciones en la explotación de una red eléctrica con transformadores estrella-estrella que permitan evaluar el impacto diferencial que tiene la presencia o la ausencia de arrollamientos de estabilización en el comportamiento homopolar de la red en su conjunto, a través de las corrientes y tensiones de cortocircuito en los nudos de la red durante faltas asimétricas, garantizando el régimen de neutro estipulado para ella.

Para ello, previamente se deberán establecer pautas de modelado del comportamiento homopolar de los transformadores cuando no se dispone de ensayos que caractericen dicho comportamiento, situación muy frecuente en muchos de los transformadores actualmente instalados en las redes eléctricas.

**3.2. Normalización de la red y de los transformadores**

Los ensayos y las simulaciones mencionados anteriormente están lógicamente acotados al estudio del comportamiento de los transformadores estrella-estrella con núcleo trifásico de tres columnas. Se establecerán diferentes configuraciones en dichos ensayos y simulaciones de forma que, en la mayor parte de ellos, no habrá pérdida de generalidad en las conclusiones extraídas.

No obstante, tanto los transformadores que serán objeto de ensayos y simulaciones como la propia red eléctrica en la que están instalados, están sometidos a una normalización específica de sus características funcionales y constructivas. En este sentido, para un adecuado entendimiento del contexto en el que se plantea la tesis, tiene interés conocer los parámetros y características principales de la normalización de red en la que se basarán los equipos, ensayos y simulaciones realizados. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros principales de diseño de

red que caracterizan la red de Unión Fenosa Distribución. En base a ellos se realiza la selección de equipos y materiales, así como el diseño del sistema de protección de la red.

Datos red	Nivel de tensión de la red					
	220 kV	132 kV	66 kV	45 kV	20 kV	15 kV
Frecuencia	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz
Tensión asignada	220 kV	132 kV	66 kV	45 kV	20 kV	15 kV
Tensión máxima de servicio	245 kV	145 kV	72,5 kV	52 kV	24 kV	17,5 kV
Intensidad simétrica de cortocircuito	50 kA	31,5 kA	31,5 kA	31,5 kA	25 kA	25 kA
Potencia de c.c. a tensión asignada	19 GVA	7,2 GVA	3,6 GVA	2,5 GVA	865 MVA	650 MVA
Relación $X_0/X$	< 3	< 3	< 3	< 3	Infinito	Infinito
Relación $X/R$	> 14	> 14	> 14	> 14	> 14	> 14
Régimen de neutro	Puesto a tierra	Puesto a tierra	Puesto a tierra	Puesto a tierra	Aislado	Aislado

**Tabla 3.1. Parámetros de diseño de la red.**

Entre los equipos y componentes que conforman las instalaciones de toda red eléctrica, los elementos de mayor relevancia y coste unitario son los transformadores de potencia, que permiten realizar los trasvases de energía entre los diferentes niveles de tensión de la red de alta tensión. De la misma forma que en el caso de la red, resulta necesario establecer las principales características funcionales normalizadas que deben satisfacer los transformadores de cara a una adecuada interoperabilidad de los mismos dentro de la red. En la tabla 3.2 se muestran la normalización de las principales características de los transformadores de potencia de Unión Fenosa Distribución.

Estas características, junto con otros aspectos, son incluidas en las especificaciones técnicas de homologación y adquisición de transformadores. Como se puede observar en la tabla, la práctica totalidad de los transformadores normalizados son transformadores trifásicos de dos arrollamientos (primario y secundario) con una configuración estrella-estrella y un arrollamiento de estabilización en triángulo. Las únicas excepciones a esta situación se tienen, por un lado, en el caso de la transformación 220/132 kV, se especifican autotransformadores trifásicos. Por otro lado, en la transformación directa entre la red de 220 kV y las redes de media tensión (20 kV o 15 kV) se especifican transformadores con doble arrollamiento secundario. Finalmente, existe una parte residual de la red de 15 kV que se explota con un cierto desfase respecto a las redes de tensiones superiores mediante transformadores de grupo de conexión **YNd11**.

Aunque no aparece reflejado en la tabla, en todos los casos la especificación técnica establece que la construcción del núcleo magnético se debe realizar, salvo indicación o justificación expresa en otro sentido, mediante un diseño de tres columnas (como consecuencia de su menor coste).

Nivel de transformación	Características funcionales de los transformadores normalizados						
	U1±Regulación (kV y %)	U2 (kV)	S (MVA)	Ucc % max-cen-min	Grupo Conexión	Conexión neutro primario	Conexión neutro secundario
220 / 132 kV	230 ± 10x3,45 (15%)	138	240	14,2-14-14,5 %	YNa0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
	230 ± 10x3,45 (15%)	138	120	14,2-14-14,5 %	YNa0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
220 / 66 kV	230 ± 10x3,45 (15%)	66	150	14 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
	230 ± 10x3,45 (15%)	66	75	12,5 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
220 / 45 kV	230 ± 10x3,45 (15%)	45	120	14 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
	230 ± 10x3,45 (15%)	45	60	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
220 / 20 kV 220 / 15 kV	230 ± 10x3,45 (15%)	15,75	60-(30+30)	14 ± 0,5 %	YNd11	Rig. a tierra	(Aislado)
	230 ± 10x3,45 (15%)	21	60-(30+30)	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
	230 ± 10x3,45 (15%)	16,05	60-(30+30)	14 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
132 / 66 kV	136 ± 10x1,632 (12%)	66	80	12,5 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
	136 ± 10x1,632 (12%)	66	40	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
132 / 45 kV	132 ± 10x1,584 (12%)	45	60	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
	132 ± 10x1,584 (12%)	45	30	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Rig. a tierra
132 / 20 kV 132 / 15 kV	136 ± 10x1,632 (12%)	15,75	30	14 ± 0,5 %	YNd11	Rig. a tierra	(Aislado)
	136 ± 10x1,632 (12%)	21	30	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
	132 ± 10x1,584 (12%)	16,05	30	14 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
	136 ± 10x1,632 (12%)	15,75	15	11 ± 0,5 %	YNd11	Rig. a tierra	(Aislado)
	136 ± 10x1,632 (12%)	21	15	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
	132 ± 10x1,584 (12%)	16,05	15	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Rig. a tierra	Aislado
66 / 20 kV 66 / 15 kV	66 ± 10x0,66 (10%)	15,75	25	11 ± 0,5 %	YNd11	Aislado	(Aislado)
	66 ± 10x0,66 (10%)	21	25	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
	66 ± 10x0,66 (10%)	16,05	25	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
	66 ± 10x0,66 (10%)	15,75	15	11 ± 0,5 %	YNd11	Aislado	(Aislado)
	66 ± 10x0,66 (10%)	21	15	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
	66 ± 10x0,66 (10%)	16,05	15	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
45 / 15 kV	45 ± 10x0,63 (14%)	16,05	25	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
	45 ± 10x0,63 (14%)	16,05	15	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado
	45 ± 10x0,63 (14%)	16,05	5	11 ± 0,5 %	YNyn0(d11)	Aislado	Aislado

Tabla 3.2. Parámetros de normalización de los transformadores de potencia de la red.

Un aspecto que se puede deducir de las tablas 3.1 y 3.2 y que, como se verá a lo largo de la tesis, tiene una gran relevancia de cara al análisis de las implicaciones de los arrollamientos de estabilización, es la política de neutro normalizada para los diferentes niveles de tensión de la red.

Como se estudiará más adelante<sup>7</sup>, el comportamiento homopolar de las redes y los valores de las corrientes y tensiones que pueden aparecer como consecuencia de faltas asimétricas está fuertemente determinado por la política de neutro adoptada.

Tal y como suele suceder en la mayor parte de las redes de alta tensión, las redes de 220 kV, 132 kV, 66 kV y 45 kV de la red de Unión Fenosa Distribución están diseñados para tener un régimen de neutro efectivamente puesto a tierra. Para conseguirlo, con carácter general se disponen los neutros de los transformadores de interconexión (220/132 kV, 220/66 kV, 220/45 kV, 132/66 kV y 132/45 kV) con ambos neutros rígidamente puestos a tierra.

Respecto al régimen de neutro de las redes de media tensión, existe una mayor disparidad en las decisiones adoptadas por parte de las compañías eléctricas que van desde el caso de neutro rígidamente puesto a tierra hasta el caso de neutro aislado de tierra o neutro resonante, pasando por neutros puestos a tierra a través de impedancias de diferente magnitud. En el caso de Unión Fenosa Distribución, la política de neutro de media tensión (20 kV y 15 kV) adoptada consiste en mantener un régimen de neutro aislado, lo que exige que los arrollamientos en estrella de estos niveles de tensión tengan el neutro flotante.

La política de neutro del arrollamiento primario de los transformadores de potencia de distribución (también conocidos como transformadores de mercado) dependerá del nivel de tensión. En el caso de 220 kV y 132 kV, dadas las mayores exigencias dieléctricas sobre el aislamiento del arrollamiento primario, se establece la conexión rígidamente puesta a tierra del neutro. En el caso de los mucho más numerosos transformadores de mercado con arrollamiento primario de 66 kV o 45 kV, con el objetivo de reducir las corrientes de cortocircuito ante faltas asimétricas de la red en estos niveles de tensión, se prescribe una política de neutro aislado en dichos arrollamientos.

Por tanto, la configuración de los neutros en los transformadores normalizados se establece de la siguiente forma:

- Ambos neutros rígidamente puestos a tierra en transformadores 220/132 kV, 220/66 kV, 220/45 kV, 132/66 kV y 132/45 kV.
- Neutro del arrollamiento primario rígidamente puesto a tierra y neutro del arrollamiento secundario aislado de tierra en transformadores 220/20 kV, 220/15 kV, 132/20 kV y 132/15 kV.
- Ambos neutros aislados de tierra en transformadores 66/20 kV, 66/15 kV y 45/15 kV.

Con carácter excepcional, y ante determinadas circunstancias que así lo aconsejen, se admite la desconexión de tierra del neutro del arrollamiento de 132 kV de los transformadores 132/66 kV, 132/45 kV, 132/20 kV y 132/15 kV.

Igualmente, y también de forma excepcional y ante situaciones que lo requieran, se admite una puesta rígida a tierra en los neutros de los arrollamientos primarios de los transformadores 66/20 kV, 66/15 kV y 45/15 kV.

---

<sup>7</sup> Una explicación detallada de esta cuestión será realizada en el capítulo 8 (apartado 8.1).

### 3.3. Características de los transformadores objeto de estudio

De cara a realizar el análisis de los aspectos mencionados en el apartado 3.1 en el contexto de la normalización de la red de Unión Fenosa Distribución descrita en el apartado 3.2, resulta necesario efectuar diversos ensayos experimentales y simulaciones.

Para la ejecución de dichos ensayos y simulaciones se ha buscado disponer de un conjunto de equipos que representen al conjunto de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y núcleo trifásico de tres columnas que puedan ser instalados en la red, en el contexto de normalización mostrado.

Además del conjunto de características funcionales normalizadas de los transformadores, básicamente relacionadas con las tensiones y potencias asignadas, existen varias características constructivas de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y núcleo trifásico de tres columnas que pueden determinar un comportamiento diferencial:

- Autotransformadores frente a transformadores con arrollamientos primarios y secundarios separados.
- Transformadores con dos arrollamientos secundarios.
- Ubicación interna o externa del arrollamiento de estabilización.
- Presencia de pantallas magnéticas para mejorar los efectos del flujo de dispersión.

Los dos primeros aspectos corresponden a un colectivo minoritario de transformadores en la red, lo que dificulta disponer de equipos en fábrica e instalados en campo sobre los que realizar los ensayos necesarios para comprender adecuadamente las implicaciones de los arrollamientos de estabilización en ellos. Tratándose, como se ha indicado, de un colectivo pequeño y no habiéndose podido disponer de ensayos, el estudio de estas tipologías de transformadores no será considerado en la tesis. Quedará pendiente para futuros trabajos en los que, utilizando la misma metodología empleada, se pueda contrastar la validez de los resultados y conclusiones obtenidos en la tesis para el resto de transformadores.

En el análisis de las características constructivas de los transformadores instalados en la red de Unión Fenosa Distribución, se ha visto que un porcentaje relevante de los transformadores de mayores tensiones (220/66 kV y 220/45 kV) y potencias asignadas (> 100 MVA) eran diseñados por el fabricante ubicando el arrollamiento de estabilización de forma externa a los arrollamientos primario y secundario (siendo por tanto el arrollamiento secundario el más próximo al núcleo magnético). En el resto de casos, el arrollamiento de estabilización es el arrollamiento más interno, siendo el arrollamiento primario el más externo.

Por otro lado, sin existir una regla generalizable, en los transformadores de potencias asignadas a partir de 30-40 MVA es frecuente encontrar la presencia de pantallas magnéticas adosadas a la cuba como elemento de control del flujo de dispersión. A partir de 60 MVA, la presencia de estos elementos está presente en todos los diseños constructivos analizados, salvo que existan arrollamientos de estabilización externos.

Por lo indicado anteriormente, los transformadores que serán objeto de estudio en esta tesis serán clasificados, en relación con sus características constructivas, según las tipologías mostradas en la tabla 3.3 y en la figura 3.1.

Parámetro Constructivo	Tipologías constructivas		
	#1	#2	#3
Potencia asignada	Pequeña-Media	Media-Alta	Alta
Núcleo magnético	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas
Arrollam. Estabilización	Interno	Interno	Externo
Pantallas Magnéticas	NO	SI	NO

Tabla 3.3. Principales características diferenciales en las tipologías constructivas analizadas de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.

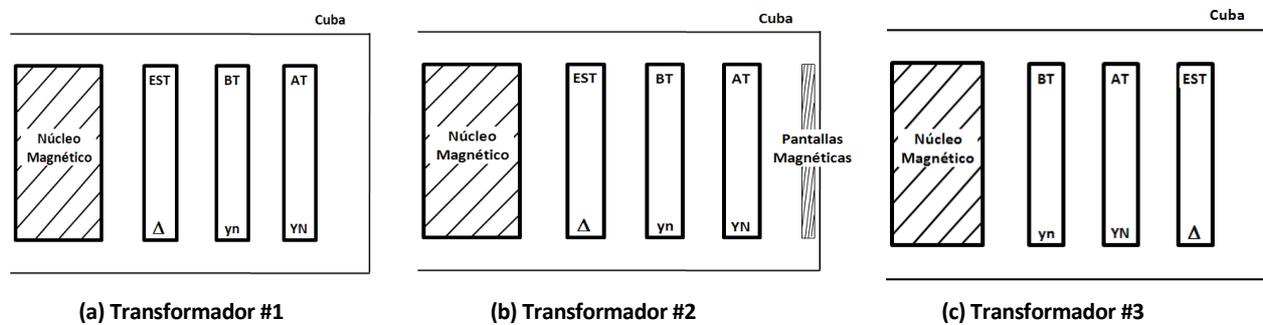


Figura 3.1. Disposición de los arrollamientos y las pantallas magnéticas en las tipologías constructivas analizadas de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.

Con el objetivo de cubrir todo el rango de transformadores normalizados, a lo largo de los diferentes ensayos y simulaciones se ha trabajado con un amplio abanico de transformadores reales. Como consecuencia de las restricciones impuestas por la disponibilidad de equipos a la hora de realizar los ensayos necesarios en fábrica o en campo, así como por limitaciones presupuestarias o de tiempo, no siempre ha sido posible disponer de ensayos realizados sobre todos los transformadores que hubiera sido deseable o con el alcance que hubiera sido deseable. No obstante, el conjunto de ensayos realizados representa un conjunto experimental suficientemente amplio como para disponer de la información necesaria de cara a una adecuada validación de los análisis previstos en cada momento. En todo caso, se reflejarán aquellos trabajos experimentales futuros que puedan ayudar a complementar aspectos insuficientemente cubiertos.

En la tabla 3.4 se resumen las principales características constructivas de los transformadores reales que han sido objeto de ensayos y simulaciones a lo largo de la tesis. Como se puede observar, en el caso de los transformadores #B y #B2 sus características constructivas son bastante similares. Esta situación responde al hecho de que, tratándose de equipos realizados por fabricantes distintos, se han efectuado distintos ensayos sobre ellos en momentos diferentes de la tesis. De la forma parecida, los transformadores #C y #C2 realizados por el mismo fabricante y con un diseño constructivo prácticamente semejante, han sido objeto de distintas tipologías de ensayos.

Parámetros Constructivos	Identificación de los transformadores objeto de ensayos y simulaciones								
	#A	#B	#B2	#C	#C2	#D	#E	#F	#G
Potencia asignada (MVA)	15/15/5	25/25/8,33	25/25/8,33	30/30/10	30/30/10	30/30/10	60/60/20	75/75/25	150/150/50
Tensiones asignadas (kV)	45/16,05/10	45/16,05/10	45/16,05/3	132/16,05/10	136/21/10	132/46/20	132/45/10	220/71/10	230/71/20
Grupo de Conexión	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11
Núcleo magnético	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas
Arrollam. Estabiliz.	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Externo
Pantallas Magnéticas	NO	NO	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO
Tensión cortocircuito (%)	11,2	10,8	10,7	13,9	10,9	10,9	11,0	14,3	14,1
Regulación en carga (lado/tipo)	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Fina-gruesa	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor
Tipología constructiva (según tabla 3.3)	# 1	# 1	# 1	# 2	# 2	# 1	# 2	# 2	# 3

Tabla 3.4. Principales características constructivas de los transformadores reales objeto de ensayos experimentales y simulaciones a lo largo de la tesis.

### 3.4. Resumen del capítulo

En relación con las cuestiones más relevantes relacionadas con los arrollamientos de estabilización estudiadas en el capítulo 2, en el apartado 3.1 se han indicado de forma resumida los aspectos que deben ser analizados de forma detallada mediante ensayos y simulaciones experimentales para establecer los criterios que permitan una toma de decisión rigurosa y justificada sobre la necesidad de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas. En este sentido, se ha esbozado la conveniencia de realizar un estudio detallado sobre el comportamiento homopolar de los transformadores, el análisis de su funcionamiento en vacío, antes cargas desequilibradas y ante faltas asimétricas, así como el estudio del comportamiento homopolar de la red a partir del análisis de su explotación en caso de faltas asimétricas.

El estudio de dichos aspectos debe entenderse en el contexto de escenarios reales derivados de unos criterios de normalización. En el apartado 3.2 se han descrito los parámetros de diseño de red y las características funcionales de los transformadores que constituyen la normalización de Unión Fenosa Distribución, bajo cuyo ámbito se desarrollan los objetivos de esta tesis. Se han reflejado con especial detenimiento los criterios empleados para definir el régimen de neutro

de los diferentes niveles de tensión, ya que tendrá una especial relevancia en el desarrollo de algunos aspectos de la tesis.

Finalmente, en el apartado 3.3 se han descrito las principales características constructivas de los transformadores reales que serán objeto de ensayos experimentales y simulaciones a lo largo de la tesis. En su conjunto cubren suficientemente los principales grupos de transformación normalizados, con algunas salvedades minoritarias que deberán ser objeto de trabajos futuros que permitan constatar o complementar las conclusiones y resultados obtenidos en la tesis. Para una mejor comprensión y agregación de los diferentes análisis, ensayos y simulaciones realizados se han descrito las tres tipologías constructivas que podrán tener un comportamiento diferencial en lo que respecta al arrollamiento de estabilización.

## Capítulo 4

# Representación del comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante secuencia homopolar

La presencia del arrollamiento de estabilización en los transformadores estrella-estrella incide extraordinariamente en el comportamiento homopolar del equipo, lo que repercute no sólo en el propio transformador sino en la red eléctrica en su conjunto. Por ello, de cara a realizar un estudio detallado de los diferentes aspectos en los que influiría una eventual decisión de prescindir del arrollamiento de estabilización es de gran importancia establecer las bases de una representación suficientemente precisa del comportamiento homopolar de un transformador estrella-estrella.

En este capítulo se van a analizar diferentes modelos de circuito equivalente con el objetivo de valorar si permiten describir adecuadamente el comportamiento del transformador ante secuencia homopolar.

Para ello, previamente, se identificarán los tipos de ensayos que permiten determinar los parámetros de dichos circuitos equivalentes. La medida de la impedancia homopolar es un ensayo que en muchas ocasiones no forma parte de los ensayos de recepción técnica del transformador en fábrica por lo que se propondrá una metodología de realización de estos ensayos en campo en baja tensión y se contrastará su validez. A partir de los ensayos realizados en varios transformadores, se calcularán los parámetros de diferentes modelos circuitales contrastando su validez en la representación del comportamiento homopolar del transformador.

Con el objetivo de comparar las prestaciones de los diferentes modelos en relación con la complejidad de su obtención, finalmente se presentará el grado de precisión que aportan cada uno de ellos a partir de la predicción que harían los modelos de las impedancias homopolares y las corrientes circulantes por cada uno de los arrollamientos del transformador.

## 4.1. Estado del arte de los modelos de circuito equivalente ante secuencia homopolar

Para la realización de cálculos de tensiones y corrientes en los sistemas eléctricos, los principales elementos de dichos sistemas (fundamentalmente generadores, líneas y transformadores) se representan por medio de circuitos equivalentes que tienen en cuenta los distintos fenómenos físicos que tienen lugar en su funcionamiento.

En este apartado se presentarán los aspectos fundamentales y las principales referencias bibliográficas relacionadas con la representación circuital de los transformadores, la caracterización de su comportamiento homopolar y los ensayos necesarios para el cálculo de los parámetros de los circuitos equivalentes.

### 4.1.1. Representación circuital de los transformadores

Está perfectamente descrito en cualquier libro de transformadores, por ejemplo en las clásicas referencias [20] [35] [36] [37], la representación del circuito equivalente a secuencia directa de los transformadores monofásicos o trifásicos de dos arrollamientos por medio de un circuito en estrella o “en T” según se indica en la figura 4.1, donde  $R_1$  y  $R_2$  representan el efecto de las pérdidas óhmicas y adicionales de los arrollamientos primario y secundario,  $X_1$  y  $X_2$  las reactancias debidas a los flujos de dispersión,  $R_{Fe}$  las pérdidas en el núcleo ferromagnético por histéresis y corrientes de Foucault y  $X_m$  la reactancia de magnetización debida al flujo común.

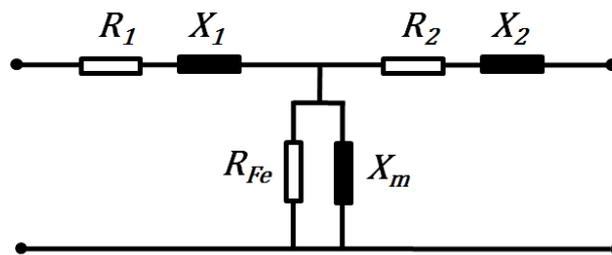


Figura 4.1. Circuito equivalente a secuencia directa de un transformador de dos arrollamientos.

A efectos de los cálculos de tensiones y corrientes que se realizan en los sistemas eléctricos, se acepta comúnmente el hecho de que la rama paralelo que representan  $R_{Fe}$  y  $X_m$  puede ser omitida por tener dichos parámetros un elevado valor y por tanto una influencia despreciable en los cálculos. De la misma forma también se acepta el valor despreciable de las resistencias frente a las reactancias de dispersión<sup>8</sup>.

En el caso de transformadores de tres arrollamientos, la representación del circuito equivalente a secuencia directa se suele realizar de forma análoga mediante un circuito en estrella con una rama adicional en la que hay que tener en cuenta que, en el caso que principalmente nos ocupa, es decir, un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización, la rama que representa al arrollamiento de estabilización estará siempre a circuito abierto al tratarse de un arrollamiento en triángulo sin carga conectada.

<sup>8</sup> En secuencia directa, la rama paralelo tiene una impedancia tres órdenes de magnitud superior a la rama serie (aproximadamente 10.000 % frente a 10-15 %).

La representación del funcionamiento de los transformadores mediante circuitos eléctricos equivalentes tiene su origen desde los incipientes sistemas eléctricos de comienzos del siglo XX. Se cita como primera referencia en este sentido un artículo presentado por Campbell en 1911<sup>9</sup>. No obstante, las principales referencias históricas de la representación circuital de los transformadores de dos y tres arrollamientos, donde se analiza el funcionamiento de los transformadores, la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes y los cálculos que se pueden derivar de dichos circuitos se deben a Boyajian [56], Estwick [57], Starr [58] [59] y Hobson y Lewis [60], introduciendo estos últimos los aspectos necesarios para tomar en consideración las diferentes tomas de regulación de un transformador.

A pesar de haberse sentado las bases de la representación circuital de los transformadores en las décadas de los años veinte y treinta, con la llegada de las herramientas informáticas de análisis de redes para estudios en régimen permanente y en régimen transitorio, nuevos avances en la materia fueron necesarios. En este aspecto, destacan las aportaciones en 1982 de Brandwajn, Dommel y Dommel en su artículo [63], referencia principal de algunos programas de análisis de red.

La creciente potencia computacional de las citadas herramientas permite un análisis cada vez más detallado de los fenómenos transitorios de los transformadores y las redes. En ese sentido, se mantiene vigente en la actualidad un cierto interés por el refinamiento de los modelos de circuito equivalente utilizados, así como la precisión en el cálculo de los parámetros que los constituyen. En este sentido, se pueden encontrar diversas y recientes publicaciones en esta materia, entre otras [64] - [74], destacando incluso la constitución de un grupo de trabajo en IEEE que materializó diferentes cuestiones en relación con la determinación de parámetros para el modelado de transformadores [69]<sup>10</sup>.

En todo caso, como se verá a lo largo del presente capítulo, la consideración detallada de fenómenos transitorios y no lineales no será necesaria a los efectos de los objetivos de la tesis doctoral, por lo que será suficiente con tener en cuenta una representación clásica de los circuitos equivalentes de los transformadores.

#### **4.1.2. Estado del arte en la caracterización del comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante secuencia homopolar**

El comportamiento de los transformadores ante secuencia homopolar puede diferir significativamente del comportamiento ante secuencia directa, en función de aspectos como por ejemplo el tipo de núcleo magnético, la conexión de los neutros y la disposición de los arrollamientos, tal y como se puso de manifiesto en el capítulo 2.

En línea con los objetivos de la tesis doctoral, en este apartado se analizarán las principales consideraciones y referencias bibliográficas relacionadas con la caracterización del comportamiento a secuencia homopolar en transformadores estrella-estrella con ausencia y con presencia de arrollamientos de estabilización, esencialmente en lo referente a los circuitos equivalentes y ensayos necesarios para realizar dicha caracterización de forma adecuada.

---

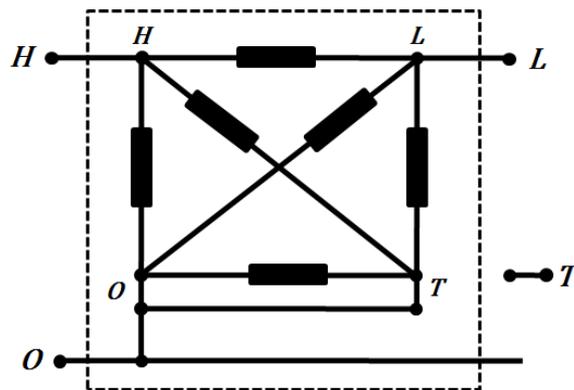
<sup>9</sup> Según referencia Starr en [58], el primer circuito equivalente de un transformador de dos arrollamientos lo presenta A. Campbell en su artículo *Cisoidal Oscillations* (Proc. A.I.E.E., 1911).

<sup>10</sup> IEEE PES Task Force on Data for Modeling System Transients of IEEE PES Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation (General Systems Subcommittee).

Como ya se indicó en el capítulo 2, una de las primeras y más detalladas exposiciones respecto al comportamiento de los transformadores ante secuencia homopolar se debe a Garin [18] [19]. El segundo de los mencionados artículos se centra precisamente en su forma de representarlo mediante circuitos equivalentes. En este sentido, Garin separa los circuitos equivalentes “completos” (que permiten una representación del transformador tanto a efectos internos como externos) de los circuitos equivalentes “abreviados” (que representan al transformador de forma precisa únicamente a efectos externos, desde el punto de vista del sistema del que el transformador forma parte).

En el caso de transformadores estrella-estrella de dos arrollamientos, la representación completa se puede realizar mediante el circuito equivalente clásico de tres impedancias en T, idéntica a la mostrada para la representación a secuencia directa. A diferencia de ésta, en los transformadores de flujos ligados la rama magnetizante no es del orden del 10.000 % y debe ser tenida en consideración, especialmente en configuraciones de circuito abierto [82].

Por su parte, para transformadores estrella-estrella con un tercer arrollamiento en triángulo Garin plantea que el número mínimo de ramas necesarias para una representación completa es seis, según se indica en la figura 4.2. Sí que admite Garin una representación abreviada con un circuito equivalente de tres ramas, válido para cálculos respecto a la red pero insuficiente para el cálculo de la corriente circulante por dentro del triángulo y para determinar cambios en las impedancias cuando el triángulo está abierto o cuando se conectan impedancias adicionales en él.



**Figura 4.2. Circuito equivalente “completo” a secuencia homopolar para un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización [19].**

Durante los años sesenta, se produjeron diversas aportaciones en materia de la representación del comportamiento homopolar de los transformadores. En buena medida tienen su base en los estudios y las publicaciones de Schlosser [75] [76] respecto al cálculo de las impedancias homopolares, los diagramas de amperios-vuelta y los circuitos equivalentes a secuencia homopolar en transformadores de dos y más arrollamientos.

Por otra parte, Christoffel aporta en [77] diferentes medidas de la impedancia homopolar realizadas sobre transformadores reales. Trata en detalle el funcionamiento de la cuba como triángulo virtual (aspecto ya tratado por Garin) y los dos aspectos contrapuestos que supone: el aumento de la reactancia por una menor reluctancia del trayecto del flujo homopolar y la disminución de la reactancia por la circulación de corrientes que se oponen a la excitación,

predominando este último efecto, de forma que la impedancia homopolar es un 50% menor con la cuba que sin ella.

En relación con la representación circuital del comportamiento homopolar, a partir de los trabajos de Schlosser y Christoffel, destaca el circuito planteado por Oels [78] que se muestra en la figura 4.3, basado en las impedancias de secuencia directa corregidas mediante factores multiplicadores dependientes de la potencia del transformador (figura 4.4).

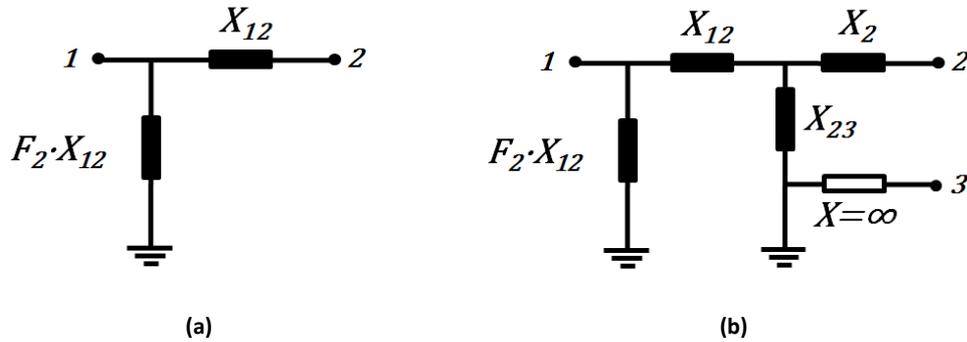


Figura 4.3. Circuitos equivalentes a secuencia homopolar de transformadores de flujos ligados (a) transformadores de dos arrollamientos (estrella-estrella) (b) transformadores de tres arrollamientos (estrella-estrella-triángulo) [78]

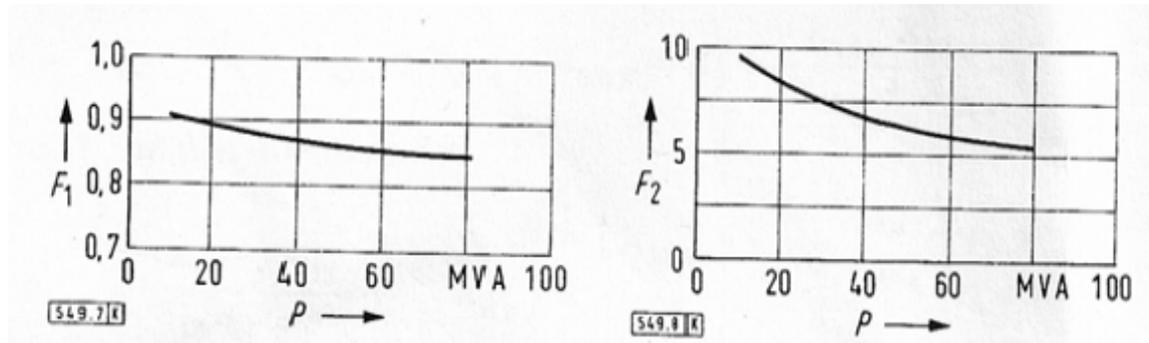


Figura 4.4. Factores multiplicadores de las impedancias de los circuitos equivalentes de la figura 4.3, en función de la potencia del transformador (tomado de [78]).

Para los transformadores de dos arrollamientos las impedancias homopolares vistas desde el lado primario resultarían  $F_1 \cdot X_{12}$  para la impedancia homopolar en cortocircuito y  $F_2 \cdot X_{12}$  para la impedancia homopolar en vacío, siendo  $X_{12}$  la impedancia a secuencia directa entre los arrollamientos primario y secundario, de forma que la relación entre ambos factores multiplicadores sería  $F_1 = F_2 / (1 + F_2)$ . De forma análoga, se derivarían el resto de las impedancias homopolares en vacío y en cortocircuito para los transformadores estrella-estrella de dos y tres arrollamientos a partir de los circuitos equivalentes de la figura 4.3, tomando como base las impedancias de secuencia directa.

Utilizando los trabajos de Christoffel y Oels para la determinación de las impedancias homopolares en transformadores de dos y tres arrollamientos, el italiano Coppadoro desarrolla en [79] una metodología para su aplicación al cálculo de las corrientes de cortocircuito en faltas

monofásicas en las redes primaria y secundaria. En esta misma línea se sitúa también el trabajo de Arturi en [80].

Resulta finalmente de interés reseñar las tabulaciones y orientaciones cualitativas expuestas en la norma IEC 60076-8 [32] respecto a los valores típicos que presentan las impedancias homopolares obtenidas en los diferentes ensayos en función de la tipología constructiva y la configuración empleada. En las tablas 4.1 (para transformadores de dos arrollamientos) y 4.2 (para transformadores de tres arrollamientos) se resumen las indicaciones para transformadores de arrollamientos concéntricos de [32] donde:

- La disposición relativa de los arrollamientos se indica como **Int** para el arrollamiento interno más próximo al núcleo, **Ext** como el más alejado del núcleo y **Med** como el arrollamiento intermedio. Con carácter general, en los arrollamientos en estrella el arrollamiento primario es más externo al arrollamiento secundario.
- Las impedancias  $z_{12}$ ,  $z_{13}$  y  $z_{23}$  representan las impedancias de secuencia directa de cortocircuito en valores porcentuales entre los arrollamientos primario y secundario, primario y estabilización y secundario y estabilización, respectivamente.

Consideraciones adicionales para el caso de transformadores de dos arrollamientos (tabla 4.1) serían:

- Para desglosar dicha impedancia en las impedancias de cada rama de un circuito en T, se considera que  $z_1$  es la impedancia de la rama que representa al arrollamiento primario y  $z_2$  la impedancia de la rama que representa al arrollamiento secundario. Como se indica en [32] el reparto entre dichas impedancias es arbitrario. Se puede asumir a los efectos del análisis realizado que  $z_1 = z_2 = z_{12} / 2$ .
- En la rama vertical del circuito en T, la impedancia  $z_m$  representa la impedancia de magnetización.
- Los factores  $a_1$  y  $a_2$  son factores multiplicadores comprendidos en el rango:  $0,8 < a_1 < a_2 < 1$ . Estos factores incluyen el efecto del tipo de núcleo magnético en cuanto a la mayor o menor relevancia del valor de la impedancia magnetizante, así como la disposición relativa entre los arrollamientos.

Ubicación y tipología de los arrollamientos		Impedancia homopolar (%)			
		Arrollamiento excitado (circuito magnético de tres columnas)		Arrollamiento excitado (circuito magnético de flujos libres)	
Ext	Int	Ext	Int	Ext	Int
YN	yn	$a_1 \cdot z_{12}$	$a_2 \cdot z_{12}$	$z_{12}$	$z_{12}$
YN	y	$z_1 + z_m$ ( $\approx 50 - 100$ )	-	$z_1 + z_m$ ( $\approx 10^4 - 10^5$ )	-
Y	yn	-	$z_2 + z_m$ ( $\approx 60 - 120$ )	-	$z_2 + z_m$ ( $\approx 10^4 - 10^5$ )
Y	y	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

Tabla 4.1. Resumen de las impedancias homopolares típicas de los transformadores de dos arrollamientos concéntricos [32]

Por su parte, consideraciones adicionales para el caso de transformadores de tres arrollamientos (tabla 4.2) serían:

- Para desglosar dichas impedancias en las impedancias de cada rama de un circuito en T, se considera que:
  - $z_1 = (z_{12} + z_{13} - z_{23}) / 2$ , siendo  $z_1$  la impedancia de la rama que representa al arrollamiento primario.
  - $z_2 = (z_{12} + z_{23} - z_{13}) / 2$ , siendo  $z_2$  la impedancia de la rama que representa al arrollamiento secundario.
  - $z_3 = (z_{13} + z_{23} - z_{12}) / 2$ , siendo  $z_3$  la impedancia de la rama que representa al arrollamiento de estabilización.
- La indicación  $z_1//z_2$  representa el paralelo de las impedancias  $z_1$  y  $z_2$ . Idem  $z_1//z_3$  y  $z_2//z_3$ .
- Los factores  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son factores multiplicadores comprendidos en el rango:  $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$ . Estos factores incluyen el efecto del tipo de núcleo magnético en cuanto a la mayor o menor relevancia del valor de la impedancia magnetizante, así como la disposición relativa entre los arrollamientos.

Ubicación y tipología de los arrollamientos			Impedancia homopolar (%)					
			Arrollamiento excitado (circuito magnético de tres columnas)			Arrollamiento excitado (circuito magnético de flujos libres)		
Ext	Med	Int	Ext	Med	Int	Ext	Med	Int
YN	yn	d	$a_1 \cdot (z_1 + z_2 // z_3)$	$a_2 \cdot (z_2 + z_1 // z_3)$	-	$z_1 + z_2 // z_3$	$z_2 + z_1 // z_3$	-
d	YN	yn	-	$a_2 \cdot (z_1 + z_2 // z_3)$	$a_3 \cdot (z_2 + z_1 // z_3)$	-	$z_1 + z_2 // z_3$	$z_2 + z_1 // z_3$
YN	y	d	$a_1 \cdot z_{13}$	-	-	$z_{13}$	-	-
d	YN	y	-	$a_2 \cdot z_{13}$	-	-	$z_{13}$	-
Y	yn	d	-	$a_2 \cdot z_{23}$	-	-	$z_{23}$	-
d	Y	yn	-	-	$a_3 \cdot z_{23}$	-	-	$z_{23}$
Y	y	d	$\infty$	$\infty$	-	$\infty$	$\infty$	-
d	Y	y	-	$\infty$	$\infty$	-	$\infty$	$\infty$

Tabla 4.2. Resumen de las impedancias homopolares típicas de los transformadores de tres arrollamientos concéntricos [32]

#### 4.1.3. Ensayos de determinación de la impedancia homopolar

En la literatura técnica, por ejemplo [38][67][71][81], se pueden encontrar métodos analíticos y numéricos de cálculo de la impedancia homopolar en determinadas configuraciones. Dichos métodos requieren siempre de un elevado detalle en el conocimiento del diseño constructivo interno del transformador. Dicho detalle no es normalmente trasladado por el fabricante al usuario del transformador y, adicionalmente, la fiabilidad que arroja el cálculo analítico de la impedancia homopolar no es habitualmente demasiado buena. Por ello, de la misma forma que los parámetros del circuito equivalente a secuencia directa de un transformador se calculan a

partir de los ensayos de vacío y de cortocircuito, la obtención de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar requiere de la realización de ensayos.

En este apartado se revisan los aspectos y metodologías que se pueden encontrar en la literatura técnica, especialmente en la normativa técnica, para la realización de ensayos de impedancia homopolar.

La medida de la impedancia homopolar de un transformador no reviste ninguna dificultad considerando que se trata (según definición de la norma IEC 60076-1 [29]) de “la impedancia (expresada en ohmios/fase) a la frecuencia asignada entre los bornes de línea de un arrollamiento trifásico en estrella o zig-zag conectados juntos, y su borne de neutro.”, lo que se podría representar mediante el esquema de la figura 4.5.

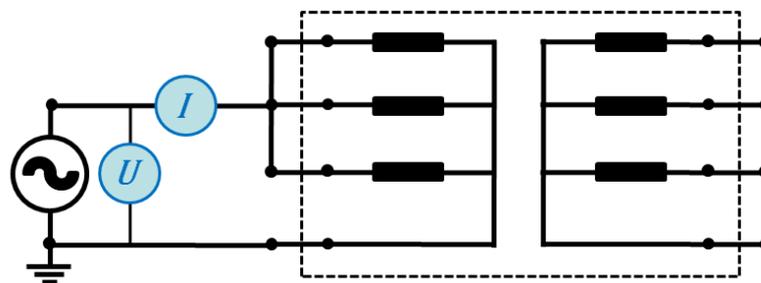


Figura 4.5. Esquema de medida de la impedancia homopolar de un transformador estrella-estrella (vista desde lado primario y configuración en cortocircuito).

Así pues, para el circuito de la figura 4.5, se deduce fácilmente que la impedancia homopolar por fase  $Z_0$  vista desde el lado alimentado del transformador como:

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad (4.1)$$

Donde:

$U$  es la tensión aplicada entre los terminales de fase cortocircuitados entre sí y el neutro.

$I$  es la corriente aportada por la fuente de alimentación (y de retorno por el neutro del transformador).

Al igual que en el caso de los circuitos equivalentes a secuencia homopolar, destacan las aportaciones iniciales de Garin en 1940 [18] respecto a los ensayos a realizar para la obtención de las impedancias de un transformador expuestas en la figura 4.6. De cara a estos ensayos el autor destaca que la aplicación de una fuente trifásica de secuencia directa conduce a impedancias de secuencia directa y la de una fuente de secuencia homopolar conduce a la obtención de impedancias homopolares.

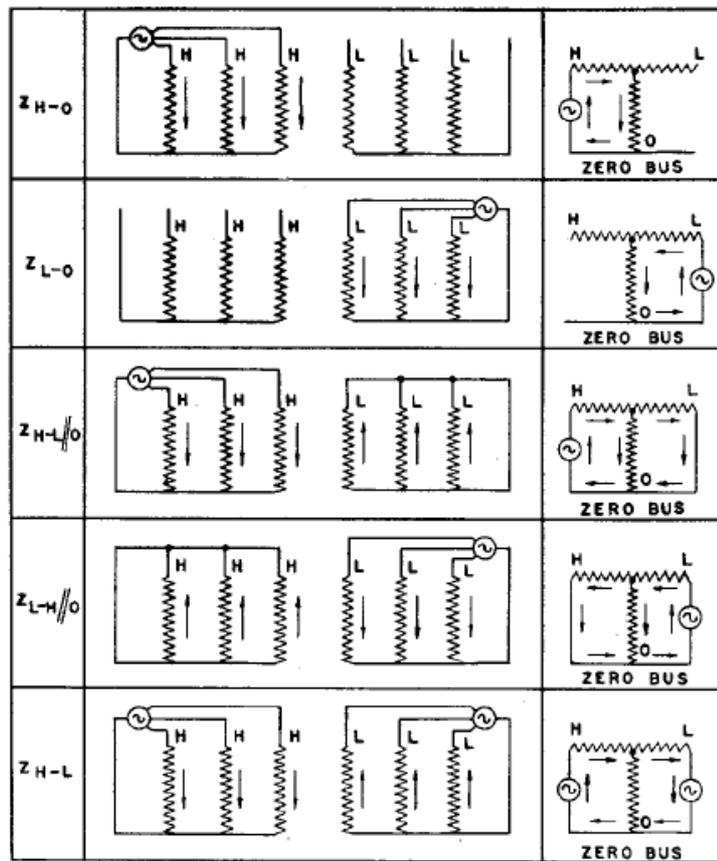


Figura 4.6. Ensayos de medida de la impedancia y circuitos equivalentes de medida para un transformador trifásico de dos arrollamientos (tomado de [18]).

Dado que la principal referencia a la hora de realizar ensayos en equipos eléctricos que verifiquen la integridad y adecuación de su diseño y fabricación, así como sus características funcionales, es la derivada de la normativa técnica referente a dichos equipos, a continuación se van presentar las consideraciones de las normas IEC e IEEE en relación a los ensayos de impedancia homopolar en transformadores de potencia.

**Los ensayos de impedancia homopolar en las normas IEC**

La norma IEC 60076-1 [29], en su apartado 10.7, indica que la impedancia homopolar de un arrollamiento conectado en estrella se mide aplicando tensión entre los bornes de línea conectados entre sí y el borne de neutro, calculando la impedancia homopolar por fase según la expresión (4.1) expuesta anteriormente.

Esta norma no especifica el conjunto de ensayos necesarios para realizar una determinación más completa de la impedancia homopolar, como sería el caso de la obtención de un circuito equivalente a secuencia homopolar, advirtiendo, no obstante, que “en caso de transformadores con más de un arrollamiento en estrella con neutro accesible, la impedancia

homopolar depende de las conexiones<sup>11</sup>, y los ensayos a efectuar serán objeto de acuerdo entre el fabricante y el comprador”.

A pesar de quedar tan abierta la metodología de realización de los ensayos de impedancia homopolar para caracterizar el circuito equivalente, la norma IEC pone de manifiesto una serie de aspectos a tener en cuenta:

- Se debe asegurar que la corriente de conexión de neutro es compatible con la capacidad de carga de dicha conexión.
- En el caso de un transformador con un arrollamiento adicional en triángulo, el valor de la corriente de ensayo será tal que la corriente en el arrollamiento en triángulo no sea excesiva, teniendo en cuenta el tiempo de aplicación.
- Si no hay amperios-vuelta de equilibrado en el sistema homopolar, por ejemplo en un transformador estrella-estrella sin arrollamiento conectado en triángulo, la tensión aplicada no debe exceder de la tensión fase-neutro correspondiente al servicio normal. La corriente en el neutro y el tiempo de aplicación se limitarán para evitar temperaturas excesivas en las partes metálicas.
- Cuando no hay amperios-vuelta de equilibrado, la relación entre tensión y corriente no es, generalmente, lineal. En tal caso, puede ser útil realizar varias medidas con distintos valores de la corriente.
- La impedancia homopolar depende de la disposición física de los arrollamientos y de las partes magnéticas y, por lo tanto, las medidas en diferentes arrollamientos pueden no concordar.

#### **Los ensayos de impedancia homopolar en las normas IEEE**

Por su parte, la norma IEEE C57.12.90 [83] dedica el apartado 9.5 a los ensayos de determinación de la impedancia homopolar de un transformador trifásico. Lógicamente, el esquema de ensayo y la ecuación de determinación de la impedancia a partir de los valores medidos de tensión y corriente no difieren de lo planteado en la norma IEC 60076-1.

Dicha norma IEEE indica que la tensión y la corriente de alimentación se establecerán de la siguiente forma:

- Si el transformador no dispone de ningún arrollamiento con conexión triángulo, la tensión aplicada al arrollamiento energizado no debe exceder el 30 % de la tensión asignada fase-neutro ni la corriente por fase debe exceder su valor asignado.
- Si el transformador dispone de algún arrollamiento con conexión triángulo, la tensión aplicada debe ser tal que no se sobrepase la corriente asignada por fase del arrollamiento en triángulo.

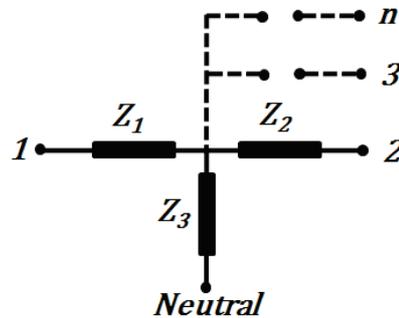
En línea con lo indicado en la normativa IEC, la norma IEEE también indica que la duración de los ensayos de impedancia homopolar estará limitada de tal forma que no se supere el límite térmico de ninguna de las partes del transformador.

Sin embargo, a diferencia de la norma IEC, en el caso de la norma IEEE se detalla de una forma más exhaustiva los ensayos necesarios para determinar los parámetros del circuito equivalente

---

<sup>11</sup> Es decir, de si los arrollamientos no energizados están a circuito abierto o cortocircuitados.

a secuencia homopolar. En esta norma se propone un circuito equivalente a secuencia homopolar en estrella según se reproduce en la figura 4.7, donde los arrollamientos 1 y 2 son arrollamientos en estrella con neutros accesibles y el resto de arrollamientos (3,.., n) no disponen de neutro accesible.



**Figura 4.7. Circuito equivalente a secuencia homopolar para transformadores con dos neutros accesibles en los arrollamientos 1 y 2, y neutros no accesibles en el resto de arrollamientos. [83]**

Para la determinación de los parámetros de dicho circuito equivalente, se propone la realización de cuatro ensayos, uno de los cuales es redundante:

- **Ensayo 1:** Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 1 entre los terminales de línea conectados entre sí y el neutro, dejando el resto de los arrollamientos a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es denotada como  $Z_{1N0}$ .
- **Ensayo 2:** Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 1 entre los terminales de línea conectados entre sí y su neutro. El arrollamiento 2 estará cortocircuitado entre los terminales de línea y su neutro, y el resto de arrollamientos pueden estar cortocircuitados o a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es denotada como  $Z_{1NS}$ .
- **Ensayo 3:** Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 2 entre los terminales de línea conectados entre sí y el neutro, permaneciendo el resto de los arrollamientos a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es denotada como  $Z_{2N0}$ .
- **Ensayo 4:** Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 2 entre los terminales de línea conectados entre sí y su neutro. Se cortocircuitan los terminales de línea y el neutro del arrollamiento 1 mientras que el resto de arrollamientos se dejan a circuito abierto o se cortocircuitan. La impedancia de secuencia homopolar medida es denotada como  $Z_{2NS}$ .

Todas las impedancias homopolares medidas se deben expresar en valores porcentuales o, al menos referirlas a una potencia base común. A partir de estas medidas, y mediante unos sencillos cálculos a partir de la observación del circuito equivalente de la figura 4.7, se deduce que las impedancias  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$  de dicho circuito equivalente se calcularían como:

$$Z_3 = +\sqrt{Z_{2N0} \cdot (Z_{1N0} - Z_{1NS})} = +\sqrt{Z_{1N0} \cdot (Z_{2N0} - Z_{2NS})} \quad (4.2)$$

$$Z_2 = Z_{2N0} - Z_3 \quad (4.3)$$

$$Z_1 = Z_{1N0} - Z_3 \quad (4.4)$$

Tal y como se mencionó anteriormente, se observa de las ecuaciones anteriores que los ensayos 2 y 4 resultan redundantes. No obstante, realizar ambos resulta de utilidad como comprobación de las medidas obtenidas.

#### **Otras referencias bibliográficas sobre los ensayos de impedancia homopolar**

Como se ha indicado anteriormente, la principal referencia utilizada por los fabricantes de transformadores para la realización de los ensayos de impedancia homopolar es la contenida en la normativa técnica aplicable que se ha presentado.

No existe mucha bibliografía adicional sobre este asunto si bien se pueden mencionar algunas referencias. El fabricante ABB dispone de una amplia guía técnica [84] relacionada con el conjunto de los ensayos a realizar en los transformadores. En ella se dedica un capítulo a la medida de impedancia homopolar en la que, además de describir la base teórica del ensayo y los procedimientos y esquemas de medida, incorpora ejemplos de aplicación y una interesante descripción conceptual de los fundamentos físicos y la influencia de la conexión de los arrollamientos y la construcción del núcleo magnético en los valores de la impedancia homopolar.

Resulta también de interés la aproximación realizada por Rosselli [85] para el cálculo de la impedancia homopolar a partir de ensayos realizados con una fuente trifásica de baja tensión por medio de cortocircuitos monofásicos a tierra y mediante el uso de la metodología de componentes simétricas.

Una aproximación más ortodoxa para la determinación de las impedancias homopolares de un transformador de tres arrollamientos (dos arrollamientos principales estrella-estrella con un arrollamiento en triángulo de estabilización) es expuesta por Meng [86]. En realidad no hay ninguna aportación conceptual relevante pero expone con detalle y claridad los diferentes ensayos y configuraciones, en especial para tener en cuenta la conexión o no de los neutros primario y secundario a tierra.

En la misma línea que Meng, Penabad, López y Álvarez [54] ofrecen una aplicación clara del cálculo de las impedancias homopolares de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.

No obstante, ni en la normativa técnica ni en otras referencias bibliográficas analizadas existe una metodología completa que permita determinar con precisión el conjunto de impedancias homopolares necesarias para describir el funcionamiento a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella tanto con el arrollamiento de estabilización cerrado como abierto<sup>12</sup>. Esta carencia se intentará resolver en el presente capítulo de la tesis doctoral.

---

<sup>12</sup> En la práctica profesional en sus funciones dentro de Unión Fenosa Distribución, el autor de la tesis ha podido constatar como, en el intento de describir las impedancias homopolares de un transformador con arrollamiento de estabilización cerrado y abierto, diferentes fabricantes de transformadores aplican configuraciones dispares de ensayo que no conducen a disponer de una adecuada representación del comportamiento homopolar del equipo.

## 4.2. Estudio experimental sobre la representación del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella

El análisis de la influencia de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella, tanto en aspectos internos sobre el propio transformador como en aspectos externos sobre la red, requiere de un conocimiento detallado del comportamiento homopolar en diferentes escenarios de funcionamiento del transformador. En aras a obtener dicho conocimiento, el estado del arte actual, expuesto en el apartado anterior, si bien presenta múltiples cuestiones relativas a la representación del comportamiento de los transformadores frente a secuencia homopolar, adolece de una metodología clara y completa que permita contrastar experimentalmente la influencia de los arrollamientos de estabilización.

Por ello, en este apartado se pretende desarrollar una metodología que permita un análisis integral del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella en presencia y en ausencia de arrollamientos de estabilización. Para conseguir dicha meta, se buscará alcanzar los siguientes objetivos:

- Detallar con precisión el conjunto de ensayos que deben efectuarse para realizar una adecuada caracterización del comportamiento homopolar de transformadores estrella-estrella.
- Identificar los circuitos equivalentes que permiten modelar de forma precisa el funcionamiento del transformador ante secuencia homopolar.
- Analizar la precisión con la que dichos modelos reproducen el comportamiento homopolar del transformador, identificando los modelos y condiciones de ensayo y modelado que aportan mayor sencillez y precisión en la consecución de los objetivos.

Para la consecución de dichos objetivos se realizará un estudio experimental sobre tres transformadores estrella-estrella de tres columnas con arrollamiento de estabilización que representan las diferentes tipologías constructivas de transformadores que se expusieron en el capítulo 3, que son las que mayoritariamente están presentes en las redes eléctricas de distribución<sup>13</sup>. Las principales características constructivas de estas tipologías constructivas de transformadores fueron expuestas en la tabla 3.3 y la figura 3.1. Asimismo, en la tabla 3.4 se identificaron en detalle las características de los transformadores que serían objeto de estudios experimentales a lo largo de la tesis con el objetivo de analizar el comportamiento en diferentes ámbitos de las citadas tipologías constructivas.

En la tabla 4.3 se reproducen de nuevo las características principales de los tres transformadores que serán objeto de estudio experimental durante el capítulo 4 para la validación de la metodología de representación del comportamiento homopolar de las tres tipologías constructivas identificadas.

---

<sup>13</sup> Del análisis realizado sobre los transformadores de la red de Unión Fenosa Distribución, así como de consultas realizadas a fabricantes, se puede extrapolar el hecho de que los transformadores de potencia estrella-estrella con núcleo magnéticos de tres columnas responden esencialmente a las tres tipologías de diseño constructivo expuestas en el capítulo 3.

Parámetro Constructivo	Transformadores objeto de estudio experimental para la representación del comportamiento homopolar		
	Tipología #1 (representado por #B)	Tipología #2 (representado por #F)	Tipología #3 (representado por #G)
MVA	25 / 25 / 8,33	75 / 75 / 25	150 / 150 / 50
kV	45 / 16,05 / 10	220 / 71 / 10	230 / 71 / 20
Grupo de Conexión	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11
Núcleo magnético	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas
Arrollamiento Estabiliz.	Interno	Interno	Externo
Pantallas Magnéticas	NO	SI	NO
Tensión cortocircuito (%)	10,8	14,3	14,1
Regulación en carga (lado/tipo)	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor

Tabla 4.3. Principales características constructivas de los transformadores objeto de estudio experimental en el capítulo 4.

#### 4.2.1. Ensayos para la medida de las impedancias homopolares de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

Como se indicó en el apartado 4.1, los ensayos de caracterización de la impedancia homopolar de un transformador pueden ser realizados como parte de los ensayos de recepción técnica del transformador en fábrica. Asimismo se expuso que la norma IEC 60076-1 [29] y la norma IEEE C57.12.90 [83] establecen, con diferente grado de detalle, algunas consideraciones para realizar estos ensayos como parte de los ensayos de fábrica. No obstante, en ambos casos, tanto en la normativa IEC como en la normativa IEEE se identifica el ensayo de medida de la impedancia homopolar como un ensayo especial<sup>14</sup> que debe ser especificado por el comprador.

Por ello, lo más frecuente es encontrar transformadores de potencia en servicio de los que no se dispone de un conjunto adecuado de ensayos de impedancia homopolar, ni para ellos ni para unidades gemelas cuyos resultados se pudieran extrapolar a ellos<sup>15</sup>. Para estos casos se hace por tanto necesario verificar la posibilidad de realizar ensayos en campo, en las propias subestaciones en las que se encuentran los transformadores en explotación.

La ejecución de medidas de impedancia homopolar en campo mediante fuentes de alimentación de baja tensión y potencia reducida se planteará mediante una filosofía similar a la propuesta por Lachman y Shafir [88]-[91] para la medida de la reactancia de dispersión en campo mediante ensayos en baja tensión, contrastando su validez en comparación con las medidas realizadas en fábrica en los ensayos de cortocircuito.

<sup>14</sup> En la norma IEEE Std. C57.12.00-2010 [87] se indica que el ensayo se clasifica como "Other tests", equivalente a la definición "Ensayos especiales" de la norma IEC 60076-1 [29].

<sup>15</sup> Ello es debido a que normalmente en la especificación técnica de compra no se incluye un conjunto adecuado de ensayos de impedancia homopolar. Incluso aunque así fuera, por la evolución histórica de las empresas eléctricas, sería habitual encontrar transformadores en servicio adquiridos sin dichos ensayos.

En la elaboración de una metodología de ensayos para la medida de las impedancias homopolares de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización se perseguirán por tanto dos objetivos fundamentales:

- Establecer el conjunto de ensayos de medida de la impedancia homopolar y las características de los mismos que permiten una caracterización completa y precisa del comportamiento homopolar de estos transformadores.
- Verificar la coherencia, y por tanto posible extrapolación, entre las medidas de impedancia homopolar realizadas en los laboratorios de alta tensión de los fabricantes y las medidas realizadas mediante equipos de ensayo en baja tensión en campo.

#### Conjunto de ensayos a realizar y metodología de ejecución

Para realizar una caracterización completa de las impedancias homopolares de los transformadores en todas las posibles configuraciones de explotación, se realizarán ensayos alimentando a secuencia homopolar los arrollamientos en estrella con una fuente de alimentación monofásica. Los arrollamientos no alimentados se dispondrán en todas las configuraciones posibles.

Para una mayor sencillez en su identificación, la codificación de los ensayos se realizará a partir de la siguiente nomenclatura de tres caracteres:

- El primer carácter determina el arrollamiento estrella alimentado (A, en caso de alimentar el arrollamiento primario o de alta tensión; B, en caso de alimentar el arrollamiento secundario o de baja tensión).
- El segundo carácter determina la situación del arrollamiento estrella no alimentado (0, en caso de disponer el arrollamiento en vacío; 1, en caso de disponer el arrollamiento en cortocircuito).
- El tercer carácter determina la conexión del arrollamiento de estabilización (A, en caso de disponer el triángulo abierto; C, en caso de disponer el triángulo cerrado).

A continuación se muestra en la tabla 4.4 el conjunto de ensayos de impedancia homopolar, que, como se verá más adelante, permite la caracterización del comportamiento homopolar del transformador, señalando la codificación que los identifica. La ejecución de las medidas propuestas en la tabla 4.4 se realizará conforme a los esquemas de ensayo definidos en la figura 4.8.

Identificador del ensayo	Situación de los diferentes arrollamientos durante los ensayos de medida de la impedancia homopolar		
	Arrollamiento primario	Arrollamiento secundario	Arrollamiento estabilización
A0A	Energizado	En vacío	Abierto
A0C	Energizado	En vacío	Cerrado
A1A	Energizado	Cortocircuitado	Abierto
A1C	Energizado	Cortocircuitado	Cerrado
B0A	En vacío	Energizado	Abierto
B0C	En vacío	Energizado	Cerrado
B1A	Cortocircuitado	Energizado	Abierto
B1C	Cortocircuitado	Energizado	Cerrado

Tabla 4.4. Codificación de los ensayos y disposición de los arrollamientos en los mismos.

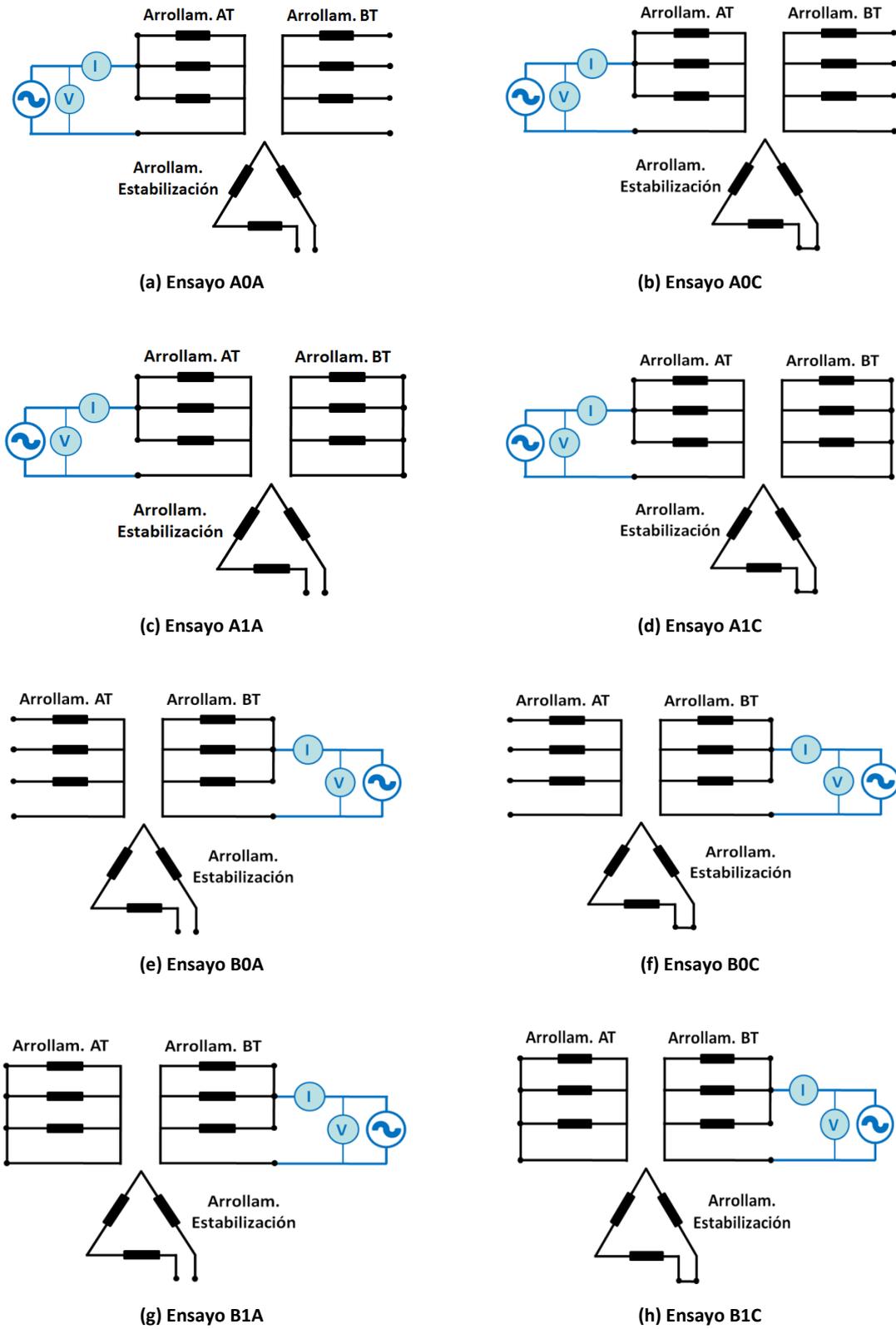


Figura 4.8. Configuraciones de ensayo para las diferentes medidas de impedancia homopolar expuestas en la tabla 4.4.

En la realización de los ensayos se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones adicionales que permitirán obtener diversas conclusiones que se irán desarrollando a lo largo de la tesis:

- En los ensayos de vacío (ensayos A0A y B0A) se aplicarán, cuando sea posible, tres o cuatro valores de tensión de cara a valorar efectos no lineales.
- En los ensayos que implican circulación de corriente por el arrollamiento primario<sup>16</sup> (ensayos A0A, A0C, A1A, A1C, B1A y B1C) se realizarán medidas con el regulador de tensión en la posición central y en las posiciones extremas.
- Se medirán la tensión, corriente y potencia activa en el arrollamiento energizado, así como, cuando proceda, las corrientes en los arrollamientos no energizados.

### **Relación entre los ensayos propuestos y las condiciones reales de operación de los transformadores**

A la hora de extrapolar los resultados obtenidos en determinadas configuraciones de ensayo a situaciones reales de funcionamiento de los transformadores resulta de gran importancia entender adecuadamente la relación entre los mismos, así como las limitaciones, si las hubiera, en dicha extrapolación.

En el caso de los clásicos ensayos de vacío o de cortocircuito con alimentación trifásica de secuencia directa la relación entre los mismos y las situaciones reales de funcionamiento resultan bastante evidentes:

- Los ensayos de vacío se corresponden con la alimentación de uno de los arrollamientos del transformador a la tensión asignada de dicho arrollamiento con el resto de arrollamientos en vacío. Esta configuración es claramente análoga al funcionamiento en vacío en servicio de un transformador con un arrollamiento energizado por la red, normalmente el arrollamiento primario, y el resto de arrollamientos sin carga conectada.
- En el caso del ensayo de cortocircuito, utilizado para la medida de las impedancias de cortocircuito y las pérdidas debidas a la carga, la alimentación trifásica se reduce a un pequeño porcentaje (alrededor del 10 %) de la tensión asignada del arrollamiento energizado manteniendo el otro arrollamiento en cortocircuito hasta conseguir en él una corriente igual a la asignada. Esta situación sería extrapolable en la operación real a un cortocircuito trifásico en el que, estando el transformador alimentado a la tensión asignada, las corrientes circulantes serán varias veces superior a la corriente asignada.

Estas correspondencias bien conocidas para los ensayos trifásicos mencionados, no resultan tan evidentes en el caso de los ensayos de alimentación homopolar propuestos. Por ello, de cara a una correcta interpretación de los resultados que se presentarán en este y en futuros capítulos de la tesis, se indica a continuación la relación entre los ensayos y las situaciones reales de funcionamiento en explotación de un transformador estrella-estrella. Debe tenerse siempre presente que en aquellos ensayos en los que intervienen fenómenos no lineales relacionados con de elementos ferromagnéticos, ha de considerarse la posible saturación de dichos elementos.

---

<sup>16</sup> En caso de que el regulador de tensión estuviera en el arrollamiento secundario lógicamente los ensayos en los que se repetirían las medidas serían aquellas en las que circula corriente por dicho arrollamiento.

En los ensayos con el arrollamiento de estabilización abierto, el ensayo A0A es asimilable a una configuración real de funcionamiento en la que por el arrollamiento primario circula una corriente homopolar (lo que requiere que el neutro primario esté conectado a tierra) y por el arrollamiento secundario no haya circulación de corriente homopolar (normalmente por estar el neutro secundario aislado de tierra). Esta situación se da por ejemplo en el funcionamiento con un cortocircuito o desbalance asimétrico en el lado primario de un transformador **YN-y**. De la misma forma, el ensayo B0A sería asimilable al funcionamiento ante cortocircuitos o desbalances asimétricos en el lado secundario de un transformador **Y-yn**.

Por su parte, el ensayo A1A se corresponde a una situación real de cortocircuito o desbalance asimétrico en el lado primario de un transformador **YN-yn** en el que ambos neutros están conectados a tierra. Y el ensayo B1A equivaldría de igual manera a un cortocircuito o desbalance asimétrico en el lado secundario de un transformador **YN-yn**.

En el caso de disponerse de un arrollamiento de estabilización cerrado, los ensayos A0C se corresponden con el funcionamiento de un transformador **YN-y-d** en el caso de cortocircuitos o desbalances asimétricos en el lado primario y los ensayos B0C en caso de transformadores **Y-yn-d** con cortocircuitos o desbalances asimétricos en el lado secundario.

Finalmente, los ensayos A1C y B1C se corresponden a configuraciones de funcionamiento de un transformador **YN-yn-d** ante cortocircuitos o desbalances asimétricos en el lado primario y secundario respectivamente.

#### Ensayos en campo en baja tensión

Los ensayos indicados en la tabla 4.4, con los esquemas de medida de la figura 4.8 y conforme a la metodología propuesta, fueron realizados sobre los tres transformadores de la tabla 4.3 objeto del estudio experimental. Las medidas obtenidas en los ensayos en campo se presentan en detalle en el apéndice B (tablas B.1 a B.3), mostrándose en las tablas 4.5, 4.6 y 4.7 un resumen de las mismas. Para los ensayos de vacío (ensayos A0A y B0A), se indican también los valores promedio de las impedancias homopolares obtenidas. Por simplicidad en la exposición, sólo se refleja en dichas tablas los principales resultados obtenidos para la toma de tensión asignada primaria, es decir para la posición central del cambiador de tomas en carga. La influencia de la posición del regulador de tensión en la representación del comportamiento homopolar de los transformadores se puede ver en el apéndice C.

Los valores de los módulos de impedancia homopolar<sup>17</sup> de las tablas 4.5 a 4.7 se obtienen a partir de los valores eficaces de tensión e intensidad de los instrumentos de medida representados en la figura 4.8 y teniendo en cuenta la expresión (4.5) donde (ABC) es el código del ensayo correspondiente (por ejemplo, A0A para la figura 4.8.a).

$$Z_{0(ABC)} = \frac{V}{I/3} \quad (4.5)$$

Por su parte, el ángulo de la impedancia homopolar se determina a partir de la expresión (4.6).

$$\Phi_{0(ABC)} = \text{Arc cos} \left[ \frac{P}{V \bullet (I/3)} \right] \quad (4.6)$$

<sup>17</sup> Por simplicidad se expresarán en términos porcentuales respecto de la impedancia base obtenida utilizando la potencia aparente asignada del arrollamiento primario del transformador como potencia base y la tensión asignada primaria de la toma en la que se realiza el ensayo como tensión base.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (W)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
AOA	0,397	0,526	166,9	75,45	71,35
	0,801	0,980	702,7	81,74	69,04
	0,950	1,141	989,8	83,28	68,59
	-	-	-	80,14	69,60
AOC	0,249	1,581	112,5	15,76	83,44
A1A	0,150	1,590	51,63	9,43	85,03
A1C	0,145	1,555	88,94	9,35	80,95
BOA	0,149	0,186	17,07	80,09	75,77
	0,649	0,737	352,8	88,11	72,84
	0,805	0,893	554	90,17	72,05
	-	-	-	86,09	73,47
BOC	0,033	0,599	9,35	5,58	79,25
B1A	0,054	0,507	3,55	10,76	87,05
B1C	0,019	0,587	4,99	3,29	79,86

Tabla 4.5. Resumen ensayos de impedancia homopolar en campo del transformador #1.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (W)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
AOA	0,100	0,075	2,80	133,62	81,37
	0,161	0,117	7,27	136,96	81,10
	-	-	-	135,29	81,24
AOC	0,136	0,699	9,63	19,41	87,67
A1A	0,171	1,258	20,19	13,63	87,85
A1C	0,110	0,821	11,09	13,45	87,20
BOA	0,154	0,110	6,54	139,62	81,21
	0,255	0,180	18,20	141,70	80,86
	0,314	0,220	27,80	142,64	80,74
	0,522	0,360	79,02	145,23	80,30
	-	-	-	142,30	80,77
BOC	0,055	1,171	21,11	4,68	82,44
B1A	0,115	0,839	8,56	13,76	87,97
B1C	0,039	1,218	17,06	3,24	81,83

Tabla 4.6. Resumen ensayos de impedancia homopolar en campo del transformador #2.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (W)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
AOA	0,041	0,048	1,80	85,89	79,56
	0,075	0,085	5,98	88,04	79,11
	0,102	0,115	11,36	88,80	78,85
	0,122	0,137	16,44	89,18	78,70
	-	-	-	87,98	79,05
AOC	0,045	0,265	3,00	16,85	87,08
A1A	0,109	0,896	29,91	12,17	86,49
A1C	0,062	0,897	14,20	6,90	87,06
BOA	0,108	0,105	9,59	103,11	80,23
	0,167	0,160	23,01	104,18	80,04
	0,219	0,209	40,56	104,53	79,81
	0,274	0,261	64,74	105,27	79,57
	-	-	-	104,27	79,91
BOC	0,123	0,359	6,89	34,20	88,21
B1A	0,053	0,375	3,64	14,06	87,89
B1C	0,065	0,470	5,42	13,88	87,97

Tabla 4.7. Resumen ensayos de impedancia homopolar en campo del transformador #3.

#### Ensayos en fábrica en alta tensión<sup>18</sup>

Los laboratorios de ensayos de los fabricantes de transformadores disponen de equipos que, a diferencia de las medidas efectuadas en campo, permiten una energización a mayor tensión que en campo para realizar las medidas de impedancia homopolar.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en fábrica en las medidas de impedancia homopolar de los transformadores objeto de estudio. Tal y como se ha indicado con anterioridad, al no establecer la normativa IEC ni la normativa IEEE una metodología que defina sin ambigüedad las medidas a efectuar, quedan sujetas al acuerdo entre fabricante y usuario. Normalmente, si no existe una definición detallada por parte del usuario en su especificación técnica de adquisición, suele quedar a criterio del fabricante el alcance de las medidas a realizar.

En concreto, en el caso del transformador #1 fue solicitado al fabricante por parte de Unión Fenosa Distribución la realización del conjunto completo de ensayos definido en la tabla 4.4. Por su parte, los transformadores #2 y #3 corresponden a una época anterior en la que las medidas de impedancia homopolar, aunque también estaban especificadas como ensayo de tipo, fueron realizadas atendiendo a los criterios de los respectivos fabricantes. Aunque en estos dos últimos casos no se dispone de medidas suficientes para contrastar de forma global

<sup>18</sup> La denominación "alta tensión" se aplica por el hecho de que las medidas se realizan en los laboratorios de alta tensión de los fabricantes de transformadores, alcanzando en los ensayos de vacío valores en el rango de los miles de voltios. En general, estos ensayos reproducen de forma aproximada el rango de valores de tensión esperables en explotación, si bien pudieran existir regímenes con mayores tensiones.

los ensayos en campo presentados en el apartado anterior, al menos una validación parcial de los mismos sí que podrá ser realizada.

La totalidad de las medidas disponibles sobre los tres transformadores se exponen en el apéndice B (tablas B.4 a B.6), presentándose en las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 un resumen de las mismas.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
AOA	7,698	10,26	71,90	75,05	68,64
	8,853	12,07	84,40	73,37	71,57
	10,007	13,90	120,0	71,97	69,82
	11,162	15,81	149,5	70,62	70,19
	-	-	-	72,75	69,47
AOC	1,905	11,57	7,15	16,47	82,54
A1A	3,349	34,42	26,50	9,73	84,72
A1C	3,349	35,42	30,60	9,45	84,08
BOA	7,770	8,90	55,80	87,34	71,16
	8,741	10,14	70,32	86,19	71,50
	10,036	11,92	93,36	84,19	71,81
	11,007	13,21	110,5	83,32	72,30
	-	-	-	85,26	71,69
BOC	0,647	11,43	3,41	5,66	79,38
B1A	1,133	10,52	1,31	10,77	87,48
B1C	0,378	11,43	1,62	3,25	80,97

Tabla 4.8. Resumen ensayos de impedancia homopolar en fábrica del transformador #1.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
AOA	N/D	N/D	N/D	-	-
AOC	2,102	10,83	N/D	19,41	-
A1A	1,450	10,81	N/D	13,42	-
A1C	1,435	10,83	N/D	13,25	-
BOA	N/D	N/D	N/D	-	-
BOC	0,555	11,52	N/D	4,81	-
B1A	1,758	12,88	N/D	13,64	-
B1C	0,422	12,72	N/D	3,32	-

Tabla 4.9. Resumen ensayos de impedancia homopolar en fábrica del transformador #2.

Id. ensayo	Magnitudes medidas			Impedancia homopolar	
	Tensión (%)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
A0A	N/D	N/D	N/D	-	-
A0C	N/D	N/D	N/D	-	-
A1A	0,562	4,42	N/D	12,71	-
A1C	0,312	4,45	N/D	7,01	-
B0A	N/D	N/D	N/D	-	-
B0C	N/D	N/D	N/D	-	-
B1A	0,581	4,10	N/D	14,16	-
B1C	0,580	4,13	N/D	14,04	-

**Tabla 4.10. Resumen ensayos de impedancia homopolar en fábrica del transformador #3.**

### Comparación general entre los ensayos en campo en baja tensión y los ensayos en fábrica en alta tensión. Influencia de la no-linealidad de los ensayos de vacío

En las tablas 4.5-4.7 y 4.8-4.10 se presentan las medidas de impedancia homopolar efectuadas sobre los tres transformadores objeto de estudio en campo y en fábrica respectivamente.

Idealmente, disponer de un conjunto de medidas completo efectuadas en los laboratorios de alta tensión del fabricante, sería la situación más deseable, en la medida de que existe una mayor capacidad para reproducir las condiciones de tensión y corriente que se darían en el funcionamiento en servicio del transformador. No obstante, como ya se ha indicado, la frecuente ausencia, incompletitud o inhomogeneidad de medidas efectuadas en fábrica mediante equipos de ensayo en alta tensión, requiere la constatación de la validez de medidas de impedancia homopolar efectuadas en campo mediante equipos de baja tensión.

En la tabla 4.11 se muestran, para cada una de las configuraciones de ensayo, las diferencias entre los módulos de las impedancias homopolares obtenidas en los ensayos de campo en baja tensión y los ensayos en fábrica en alta tensión. Las diferencias están expresadas como error porcentual de los ensayos en campo respecto a los ensayos en fábrica, según la ecuación (4.7). En el mismo sentido se presentan las diferencias en grados de los argumentos de las impedancias homopolares (únicamente en el caso del transformador #1), según la ecuación (4.8). Para las impedancias obtenidas en los ensayos de vacío (ensayos A0A y B0A) se ha tomado el valor medio.

$$\Delta Z_0 (\%) = \frac{Z_{0(\text{campo})} - Z_{0(\text{fabrica})}}{Z_{0(\text{fabrica})}} \times 100 \quad (4.7)$$

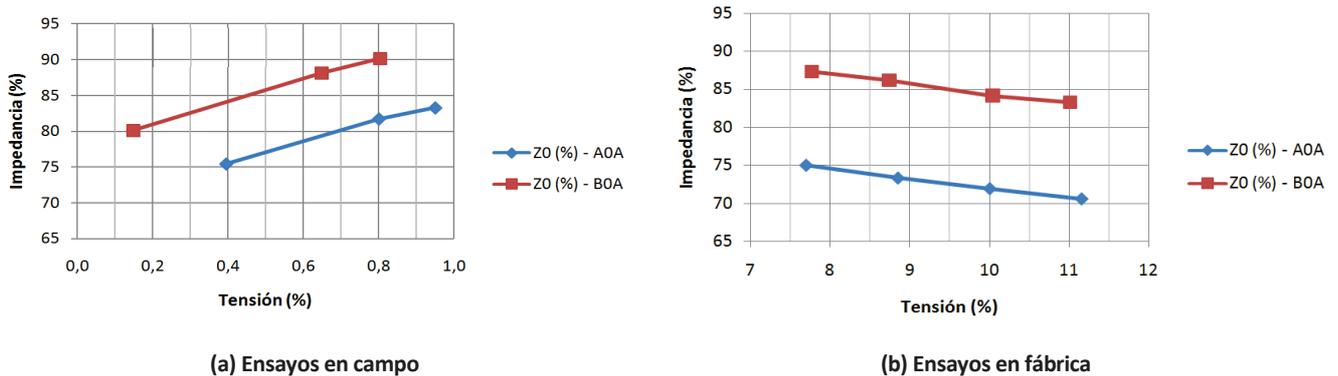
$$\Delta \Phi_0 (^\circ) = \Phi_{0(\text{campo})} - \Phi_{0(\text{fabrica})} \quad (4.8)$$

Id. ensayo	Transformador #1		Transformador #2		Transformador #3	
	$\Delta Z_0$ (% error)	$\Delta \Phi_0$ (°)	$\Delta Z_0$ (% error)	$\Delta \Phi_0$ (°)	$\Delta Z_0$ (% error)	$\Delta \Phi_0$ (°)
A0A	10,2	0,1	-	-	-	-
A0C	-4,3	0,9	0,0	-	-	-
A1A	-2,7	0,3	1,6	-	-4,2	-
A1C	-1,1	-3,1	1,5	-	-1,6	-
B0A	1,0	1,8	-	-	-	-
B0C	-1,4	-0,2	-2,7	-	-	-
B1A	-0,1	-0,5	0,9	-	-0,7	-
B1C	-0,3	-1,5	-2,4	-	-1,1	-

**Tabla 4.11. Comparación entre las impedancias homopolares obtenidas a partir de los ensayos en fábrica y los ensayos en campo.**

En la tabla 4.11 se observa una importante similitud entre los valores obtenidos en los ensayos realizados en campo en baja tensión y los de los ensayos efectuados en fábrica en alta tensión. Este era un resultado esperable ya que la mayoría de las impedancias están ampliamente dominadas por flujos de dispersión con un comportamiento lineal, lo que permite extrapolar los valores de impedancia obtenidos mediante ensayos en baja tensión a situaciones de funcionamiento con tensiones superiores<sup>19</sup>.

En el caso de las medidas en vacío, el flujo homopolar de los transformadores de tres columnas cierra su camino por el núcleo magnético hacia la cuba y partes estructurales a través del aceite. Aunque este camino de circulación del flujo magnético está linealizado significativamente debido al tránsito a través de elementos no ferromagnéticos, el efecto no-lineal de la permeabilidad magnética del hierro de la cuba y partes estructurales se puede observar en las medidas en vacío realizadas sobre el transformador #1 (ensayos A0A y B0A) mostradas en la figuras 4.9.



**Figura 4.9. Medidas en vacío (A0A y B0A) en fábrica y en campo realizadas sobre el transformador #1.**

<sup>19</sup> Como ya se indicó, la extrapolación al funcionamiento en alta tensión de las medidas en baja tensión de la impedancia de secuencia directa fue propuesta y justificada por Lachman y Shafir [88]-[91]. Sin embargo, no está reportada en la literatura técnica un comparación análoga entre las medidas en alta y en baja tensión de la impedancia homopolar, tal y como se propone en esta tesis doctoral.

Puede resultar sorprendente el hecho de que, como se observa en la figura 4.9, la impedancia homopolar crece cuando la tensión crece en el caso de los ensayos en baja tensión y sin embargo decrece cuando la tensión crece en el caso de los ensayos en alta tensión. En realidad, este comportamiento es coherente con la variación esperada de la permeabilidad magnética frente a la densidad de flujo en los materiales ferromagnéticos como muestra la figura 4.10 tomada de [38]. Ello corrobora adicionalmente la singular influencia que tiene la cuba en la respuesta homopolar del transformador.

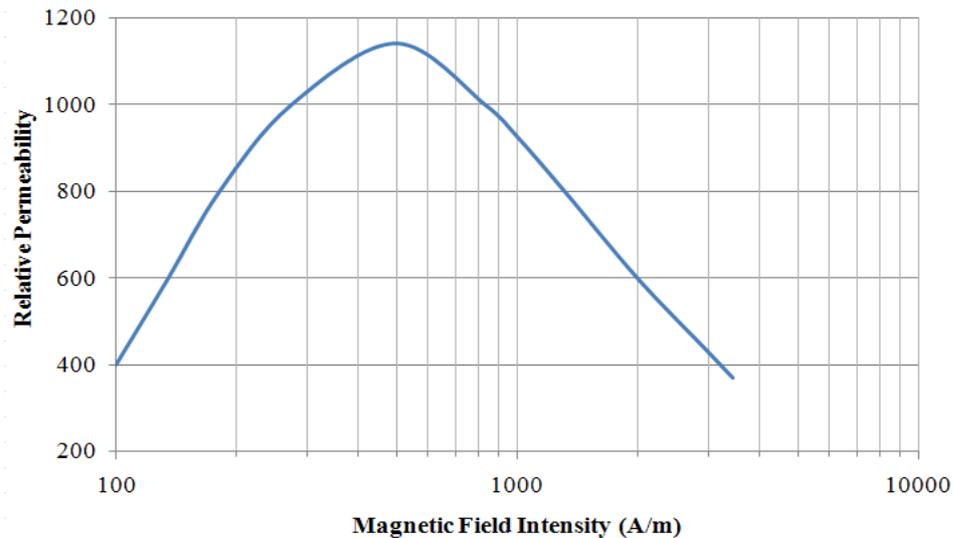


Figura 4.10. Comportamiento no-lineal de los materiales ferromagnéticos (datos tomados de [38]).

Dado que este ligero comportamiento no-lineal derivado de los ensayos de vacío puede suponer una fuente de incertidumbre y error en los modelos, es importante comprobar si esta incertidumbre causa problemas significativos a la hora de obtener una representación precisa del comportamiento homopolar de los transformadores en situaciones distintas al propio funcionamiento en vacío.

En el apartado F.2.2 del apéndice F se muestra un análisis de sensibilidad respecto a la influencia de la impedancia magnetizante en la validez del circuito equivalente en T a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización, parámetro afectado por el comportamiento no-lineal de los ensayos en vacío. De los resultados de dicho análisis se deduce que la influencia es claramente poco relevante a la hora de realizar de realizar cálculos con los modelos en un contexto distinto al funcionamiento en vacío del transformador<sup>20</sup>.

<sup>20</sup> Como se verá más adelante, el principal interés del modelado del comportamiento del transformador ante secuencia homopolar se centra en analizar su funcionamiento en lo que respecta a las corrientes y esfuerzos de cortocircuito y al calentamiento de la cuba.

### Efecto de la componente resistiva en las impedancias homopolares

Un análisis adicional que se puede realizar utilizando los ensayos efectuados sobre los tres transformadores objeto de estudio es el relativo a la conveniencia de considerar o no las dos componentes (resistiva y reactiva) de la impedancia homopolar.

Con frecuencia, los protocolos de las medidas de impedancia homopolar realizadas en los laboratorios de alta tensión de los fabricantes no presentan los valores de la potencia activa suministrada por la fuente de alimentación ni por tanto los argumentos de las impedancias homopolares obtenidas. Por otra parte, también es habitual que en las herramientas de análisis de sistemas de potencia se consideren las impedancias homopolares como si únicamente dispusieran de componente reactiva. No obstante, ¿se puede considerar esta aproximación suficientemente precisa?

A la hora de calcular las impedancias a secuencia directa, está bien demostrado y asumido que el efecto de la componente resistiva en las impedancias de cortocircuito es significativamente despreciable. Ello es debido a que la rama de magnetización paralelo es varios órdenes de magnitud mayor a la rama serie, y en dicha rama serie las resistencias de los arrollamientos son mucho menores a las reactancias de dispersión. Sin embargo, en el comportamiento homopolar de transformadores con núcleos magnéticos de tres columnas el efecto de la impedancia de magnetización es claramente más relevante, por lo que la influencia de la componente resistiva de las impedancias debe ser analizada de forma más detallada.

En las tablas 4.12 a 4.14 se muestra de forma cuantitativa la relevancia de las componentes resistiva y reactiva<sup>21</sup> en la impedancia homopolar para cada uno de los ensayos en cada uno de los transformadores. En el caso de los ensayos de vacío se ha considerado el valor promedio.

Id. ensayo	Impedancia homopolar			Componentes resistiva y reactiva		
	$Z_0$ ( $\Omega$ )	$Z_0$ (%)	$\Phi_0$ ( $^\circ$ )	$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )	$X_0 / Z_0$ (%)
AOA	64,93	80,14	69,60	22,62	60,84	93,7
A0C	12,77	15,76	83,44	1,46	12,69	99,4
A1A	7,64	9,43	85,03	0,66	7,61	99,6
A1C	7,58	9,35	80,95	1,19	7,48	98,7
BOA	8,87	86,09	73,47	2,52	8,50	95,8
B0C	0,575	5,58	79,25	0,107	0,565	98,3
B1A	1,108	10,76	87,05	0,057	1,107	99,9
B1C	0,339	3,29	79,86	0,060	0,334	98,5

**Tabla 4.12. Relevancia de las componentes resistiva y reactiva en las impedancias homopolares medidas en los ensayos efectuados sobre el transformador #1.**

<sup>21</sup> Para dichas componentes se indica en las tablas su valor en ohmios y así como el porcentaje que supone la componente reactiva respecto al módulo de la impedancia homopolar.

Id. ensayo	Impedancia homopolar			Componentes resistiva y reactiva		
	$Z_0$ ( $\Omega$ )	$Z_0$ (%)	$\Phi_0$ ( $^\circ$ )	$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )	$X_0 / Z_0$ (%)
A0A	873,05	135,29	81,24	133,03	862,85	98,8
A0C	125,25	19,41	87,67	5,09	125,14	99,9
A1A	87,93	13,63	87,85	3,29	87,87	99,9
A1C	86,79	13,45	87,20	4,24	86,69	99,8
B0A	95,64	142,30	80,77	15,34	94,40	98,7
B0C	3,147	4,68	82,44	0,41	3,120	99,1
B1A	9,248	13,76	87,97	0,327	9,242	99,9
B1C	2,176	3,24	81,83	0,309	2,154	99,0

**Tabla 4.13. Relevancia de las componentes resistiva y reactiva en las impedancias homopolares medidas en los ensayos efectuados sobre el transformador #2.**

Id. ensayo	Impedancia homopolar			Componentes resistiva y reactiva		
	$Z_0$ ( $\Omega$ )	$Z_0$ (%)	$\Phi_0$ ( $^\circ$ )	$R_0$ ( $\Omega$ )	$X_0$ ( $\Omega$ )	$X_0 / Z_0$ (%)
A0A	310,27	87,98	79,05	58,94	304,61	98,2
A0C	59,42	16,85	87,08	3,02	59,34	99,9
A1A	42,92	12,17	86,49	2,63	42,84	99,8
A1C	24,33	6,90	87,06	1,25	24,29	99,8
B0A	35,04	104,27	79,91	6,14	34,50	98,5
B0C	11,495	34,20	88,21	0,360	11,489	99,9
B1A	4,726	14,06	87,89	0,174	4,723	99,9
B1C	4,663	13,88	87,97	0,165	4,660	99,9

**Tabla 4.14. Relevancia de las componentes resistiva y reactiva en las impedancias homopolares medidas en los ensayos efectuados sobre el transformador #3.**

Como se puede observar, en las tablas 4.12 a 4.14 se ha corroborado que la componente reactiva de las impedancias homopolares medidas es, en todos los casos, prácticamente asimilable al módulo de la impedancia. Únicamente en el caso de los ensayos en vacío<sup>22</sup> del transformador #1 la componente resistiva adquiere un peso algo mayor, siendo en cualquier caso de poca relevancia.

Adicionalmente a lo indicado, un análisis riguroso de las componentes resistivas de las impedancias homopolares no sólo debería considerar el valor nominal medido sino que debería realizar una corrección por temperatura<sup>23</sup> a una temperatura de referencia.

Por último, hay que tener en cuenta que realizar unas medidas completas que consideren las componentes resistiva y reactiva de la impedancia homopolar requiere una mayor complejidad en la instrumentación a utilizar.

<sup>22</sup> En estos ensayos, el efecto de las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault pueden adquirir una cierta relevancia.

<sup>23</sup> La influencia y corrección de la temperatura en la medida de resistencias es una cuestión que establecen tanto las normas IEC como las normas IEEE. No existe, sin embargo, una influencia significativa con la temperatura en el caso de las inductancias.

Por ello, en el apartado 4.2.2 que se desarrollará a continuación se analizarán modelos de circuito equivalente considerando que el valor de la impedancia homopolar es debido únicamente a la componente reactiva. No obstante, la validez de esta hipótesis se puede contrastar también en el apéndice C, observando los resultados en los que se tiene en cuenta también la componente resistiva.

#### **4.2.2. Modelos circuitales para la caracterización del comportamiento homopolar de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización**

Los principales objetivos de este apartado son, por un lado, comprobar si el conjunto de medidas de impedancia homopolar propuestas en el apartado anterior son adecuadas para obtener una representación de su comportamiento homopolar mediante circuitos equivalentes y, por otro lado, identificar qué modelos de circuito equivalente son los más adecuados<sup>24</sup> para realizar dicha representación.

Dichos circuitos equivalentes serán el punto de partida fundamental para el análisis de la influencia del arrollamiento de estabilización en las corrientes de cortocircuito asimétricas tanto en cuanto a los efectos internos sobre el transformador (que se analizará en el capítulo 7) como en cuanto a los efectos externos sobre la red (que se analizará en el capítulo 8). En ambos casos se requiere, por tanto, una precisión significativamente alta a la hora de reproducir el comportamiento homopolar del transformador tanto en el caso de presencia como en el caso de ausencia del arrollamiento de estabilización. No obstante, existen algunos requerimientos diferenciales para ambos tipos de análisis:

- A la hora de analizar los efectos internos sobre el transformador, tal y como indicó Garin [18][19] es de gran importancia que el circuito equivalente ofrezca una representación precisa de la corriente que circula por el interior del arrollamiento de estabilización.
- Por su parte, en el análisis de los efectos externos sobre la red, se realizarán simulaciones del comportamiento de la red mediante herramientas comerciales de análisis de sistemas eléctricos. La representación de los transformadores en estas herramientas se realiza mediante circuitos equivalentes de tres impedancias en T, lo que requiere valorar la alternativa más sencilla que, con este tipo de representación, nos ofrezca una imagen precisa del comportamiento homopolar del transformador en todas las configuraciones de funcionamiento. Por sencillez en la exposición será este objetivo el primero que se abordará.

##### **Descripción de los circuitos equivalentes considerados para la caracterización del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización**

En este epígrafe se van a describir diferentes posibles modelos de circuito equivalente que permitan caracterizar el comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.

Asimismo, y a partir de los parámetros de impedancias de dichos circuitos equivalentes, se plantearán para las distintas configuraciones de ensayo:

---

<sup>24</sup> En términos de precisión (a la hora de reproducir el comportamiento del transformador) y de sencillez (tanto a la hora de obtenerlos como a la hora de utilizarlos), como se verá más adelante.

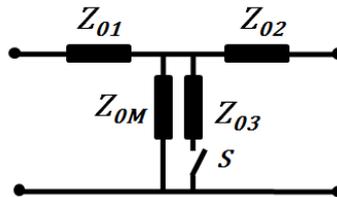
- Las ecuaciones que proporcionan la impedancia homopolar presentada por el transformador.
- Las ecuaciones que permiten calcular la intensidad que circula por los arrollamientos no energizados, conocida la tensión de alimentación del ensayo.

Se considerarán cuatro modelos de circuito equivalente:

- Modelo A: Circuito equivalente en T común para las situaciones de arrollamiento de estabilización abierto y cerrado.
- Modelo B: Circuitos equivalentes en T independientes para las situaciones de arrollamiento de estabilización abierto y cerrado.
- Modelo C: Circuito equivalente de cuatro impedancias basado en la propuesta de Oels [78].
- Modelo D: Circuito equivalente de seis impedancias basado en la propuesta de Garin [19].

a) Modelo A de circuito equivalente en T común

La primera alternativa de circuito equivalente a secuencia homopolar, representada en la figura 4.11, está basada en lo indicado en la norma IEC 60076-8 [32] y considera un único circuito equivalente en T, común a las situaciones de funcionamiento con arrollamiento de estabilización abierto y cerrado. En este modelo circuital se dispone de una primera impedancia paralelo que representa la impedancia de magnetización y una segunda impedancia en paralelo con la anterior que sólo se considera en el caso de que el arrollamiento de estabilización disponga del triángulo cerrado.



**Figura 4.11. Circuito equivalente en T – modelo A**  
(el interruptor S se considera abierto cuando el triángulo del arrollamiento de estabilización está abierto).

Las ecuaciones (4.9) a (4.16) muestran la relación entre los parámetros del circuito equivalente del modelo A y las impedancias homopolares en cada uno de los ensayos:

$$Z_{0(A0A)} = Z_{01} + Z_{0M} \tag{4.9}$$

$$Z_{0(A0C)} = Z_{01} + Z_{0M} // Z_{03} = Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}} \tag{4.10}$$

$$Z_{0(A1A)} = Z_{01} + Z_{0M} // Z_{02} = Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02}}{Z_{0M} + Z_{02}} \tag{4.11}$$

$$Z_{0(A1C)} = Z_{01} + Z_{0M} // Z_{02} // Z_{03} = Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03}} \tag{4.12}$$

$$Z_0 (B0A) = Z_{02} + Z_{0M} \quad (4.13)$$

$$Z_0 (B0C) = Z_{02} + Z_{0M} // Z_{03} = Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}} \quad (4.14)$$

$$Z_0 (B1A) = Z_{02} + Z_{0M} // Z_{01} = Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01}}{Z_{0M} + Z_{01}} \quad (4.15)$$

$$Z_0 (B1C) = Z_{02} + Z_{0M} // Z_{01} // Z_{03} = Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot Z_{03}} \quad (4.16)$$

Además de relacionar los valores de impedancia homopolar medidos en cada uno de los ensayos con los del circuito equivalente, de cara a evaluar la precisión de cada uno de los modelos, se compararán también para cada configuración de ensayo las medidas de la intensidad que circula en los arrollamientos no energizados con la intensidad que se calcularía por medio del modelo (también a partir de los parámetros del circuito equivalente y considerando la tensión de alimentación del ensayo).

Las expresiones (4.17) a (4.24) proporcionan el valor de la corriente circulante en los arrollamientos no energizados.

$$I_{terciario (A0C)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z_{0M}}{Z_{01} \cdot Z_{0M} + Z_{01} \cdot Z_{03} + Z_{03} \cdot Z_{0M}} \quad (4.17)$$

$$I_{secundario (A1A)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z_{0M}}{Z_{01} \cdot Z_{0M} + Z_{01} \cdot Z_{02} + Z_{02} \cdot Z_{0M}} \quad (4.18)$$

$$I_{secundario (A1C)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{02} \cdot (Z_{03} \cdot Z_{0M} + Z_{01} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot Z_{0M}) + Z_{03} \cdot Z_{01} \cdot Z_{0M}} \quad (4.19)$$

$$I_{terciario (A1C)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z_{0M} \cdot Z_{02}}{Z_{02} \cdot (Z_{03} \cdot Z_{0M} + Z_{01} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot Z_{0M}) + Z_{03} \cdot Z_{01} \cdot Z_{0M}} \quad (4.20)$$

$$I_{terciario (B0C)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z_{0M}}{Z_{02} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{0M} + Z_{03} \cdot Z_{0M}} \quad (4.21)$$

$$I_{primario (B1A)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z_{0M}}{Z_{01} \cdot Z_{02} + Z_{01} \cdot Z_{0M} + Z_{02} \cdot Z_{0M}} \quad (4.22)$$

$$I_{primario (B1C)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z_{03} \cdot Z_{0M}}{Z_{01} \cdot (Z_{02} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{0M} + Z_{03} \cdot Z_{0M}) + Z_{02} \cdot Z_{03} \cdot Z_{0M}} \quad (4.23)$$

$$I_{terciario (B1C)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z_{01} \cdot Z_{0M}}{Z_{01} \cdot (Z_{02} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{0M} + Z_{03} \cdot Z_{0M}) + Z_{02} \cdot Z_{03} \cdot Z_{0M}} \quad (4.24)$$

b) Modelo B de circuitos equivalentes en T independientes

Como segunda alternativa de circuito equivalente en T, que se denominará modelo B y está representada en la figura 4.12, se considerarán dos circuitos equivalentes en T, cuyos parámetros son independientes entre sí, que representan respectivamente las situaciones de funcionamiento con arrollamiento de estabilización abierto y cerrado.



(a) modelo B1: arrollam. estabilización cerrado

(b) modelo B2: arrollam. estabilización abierto

Figura 4.12. Circuitos equivalentes en T separados - modelo B.

Los parámetros  $Z'_{01}$  y  $Z'_{02}$  del modelo B1 y los parámetros  $Z''_{01}$  y  $Z''_{02}$  del modelo B2 son diferentes por lo que, en su conjunto, el modelo B consta de seis parámetros distintos que habrá que calcular a partir de las distintas ecuaciones descriptivas del mismo.

En las ecuaciones (4.25) a (4.28) se presentan las ecuaciones que relacionan los parámetros del circuito equivalente del modelo B1 con las impedancias homopolares de los ensayos en los que se dispone del arrollamiento de estabilización cerrado.

$$Z_{0(A0C)} = Z'_{01} + Z'_{03} \tag{4.25}$$

$$Z_{0(A1C)} = Z'_{01} + Z'_{02} // Z'_{03} = Z'_{01} + \frac{Z'_{02} \cdot Z'_{03}}{Z'_{02} + Z'_{03}} \tag{4.26}$$

$$Z_{0(B0C)} = Z'_{02} + Z'_{03} \tag{4.27}$$

$$Z_{0(B1C)} = Z'_{02} + Z'_{01} // Z'_{03} = Z'_{02} + \frac{Z'_{01} \cdot Z'_{03}}{Z'_{01} + Z'_{03}} \tag{4.28}$$

Por su parte, en las ecuaciones (4.29) a (4.32) se presentan las ecuaciones que relacionan los parámetros del circuito equivalente del modelo B2 con las impedancias homopolares de los ensayos en los que se dispone del arrollamiento de estabilización abierto.

$$Z_{0(A0A)} = Z''_{01} + Z''_{0M} \tag{4.29}$$

$$Z_{0(A1A)} = Z''_{01} + Z''_{0M} // Z''_{02} = Z''_{01} + \frac{Z''_{0M} \cdot Z''_{02}}{Z''_{0M} + Z''_{02}} \tag{4.30}$$

$$Z_{0(B0A)} = Z''_{02} + Z''_{0M} \tag{4.31}$$

$$Z_{0(B1A)} = Z''_{02} + Z''_{0M} // Z''_{01} = Z''_{02} + \frac{Z''_{0M} \cdot Z''_{01}}{Z''_{0M} + Z''_{01}} \quad (4.32)$$

Por lo que respecta a las ecuaciones que proporcionan la corriente circulante por los arrollamientos no energizados, se muestran en las expresiones (4.33) a (4.38) para los ensayos representados por el modelo B1 y en las ecuaciones (4.39) y (4.40) para las configuraciones propias del modelo B2.

$$I_{terciario(A0C)} = \frac{-U_{primario}}{Z'_{01} + Z'_{03}} \quad (4.33)$$

$$I_{secundario(A1C)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z'_{03}}{Z'_{01} \cdot (Z'_{02} + Z'_{03}) + Z'_{02} \cdot Z'_{03}} \quad (4.34)$$

$$I_{terciario(A1C)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z'_{02}}{Z'_{01} \cdot (Z'_{02} + Z'_{03}) + Z'_{02} \cdot Z'_{03}} \quad (4.35)$$

$$I_{terciario(B0C)} = \frac{-U_{secundario}}{Z'_{02} + Z'_{03}} \quad (4.36)$$

$$I_{primario(B1C)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z'_{03}}{Z'_{02} \cdot (Z'_{01} + Z'_{03}) + Z'_{01} \cdot Z'_{03}} \quad (4.37)$$

$$I_{terciario(B1C)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z'_{01}}{Z'_{02} \cdot (Z'_{01} + Z'_{03}) + Z'_{01} \cdot Z'_{03}} \quad (4.38)$$

$$I_{secundario(A1A)} = \frac{-U_{primario} \cdot Z''_{0M}}{Z''_{01} \cdot (Z''_{02} + Z''_{0M}) + Z''_{02} \cdot Z''_{0M}} \quad (4.39)$$

$$I_{primario(B1A)} = \frac{-U_{secundario} \cdot Z''_{0M}}{Z''_{02} \cdot (Z''_{01} + Z''_{0M}) + Z''_{01} \cdot Z''_{0M}} \quad (4.40)$$

### c) Modelo C de circuito equivalente de cuatro impedancias

El tercer modelo de circuito equivalente que se va a estudiar considera como base el modelo de cuatro impedancias propuesto por Oels en [78]. En este modelo, a diferencia del modelo A, no se considera la impedancia de magnetización pero sí una impedancia en paralelo con la red de alimentación primaria ( $Z_{00}$ ). En su versión original, como se expuso en el apartado 4.1, esta impedancia se considera una fracción de la impedancia de secuencia directa entre los arrollamientos primario y secundario ( $Z_{12}$ ). Para mayor generalidad no se aplicará esta simplificación.

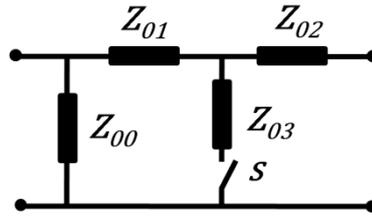


Figura 4.13. Modelo C de circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (el interruptor S se considera abierto cuando el triángulo del arrollamiento de estabilización está abierto).

De igual forma que en los circuitos equivalentes anteriores, en las ecuaciones (4.41) a (4.48) se muestran las relaciones entre los parámetros del circuito equivalente del modelo C y las impedancias homopolares de cada uno de los ensayos<sup>25</sup>:

$$Z_{0(A0A)} = Z_{00} \quad (4.41)$$

$$Z_{0(A0C)} = Z_{00} // (Z_{01} + Z_{03}) \quad (4.42)$$

$$Z_{0(A1A)} = Z_{00} // (Z_{01} + Z_{02}) \quad (4.43)$$

$$Z_{0(A1C)} = Z_{00} // [Z_{01} + (Z_{02} // Z_{03})] \quad (4.44)$$

$$Z_{0(B0A)} = Z_{00} + Z_{01} + Z_{02} \quad (4.45)$$

$$Z_{0(B0C)} = Z_{02} + [(Z_{00} + Z_{01}) // (Z_{03})] \quad (4.46)$$

$$Z_{0(B1A)} = Z_{02} + Z_{01} \quad (4.47)$$

$$Z_{0(B1C)} = Z_{02} + (Z_{01} // Z_{03}) \quad (4.48)$$

En el caso del modelo C, las ecuaciones (4.49) a (4.56) permiten calcular las corrientes en los arrollamientos no energizados:

$$I_{terciario(A0C)} = \frac{-U_{primario}}{Z_{01} + Z_{03}} \quad (4.49)$$

$$I_{secundario(A1A)} = \frac{-U_{primario}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (4.50)$$

<sup>25</sup> No se desarrollan más las expresiones por simplicidad en la redacción y la exposición.

$$I_{\text{secundario (A1C)}} = \frac{-U_{\text{primario}} \cdot Z_{03}}{Z_{01} \cdot (Z_{03} + Z_{02}) + Z_{03} \cdot Z_{02}} \quad (4.51)$$

$$I_{\text{terciario (A1C)}} = \frac{-U_{\text{primario}} \cdot Z_{02}}{Z_{01} \cdot (Z_{03} + Z_{02}) + Z_{03} \cdot Z_{02}} \quad (4.52)$$

$$I_{\text{terciario (B0C)}} = \frac{-U_{\text{secundario}} \cdot (Z_{01} + Z_{00})}{Z_{03} \cdot (Z_{01} + Z_{00}) + Z_{02} \cdot (Z_{03} + Z_{01} + Z_{00})} \quad (4.53)$$

$$I_{\text{primario (B1A)}} = \frac{-U_{\text{secundario}}}{Z_{02} + Z_{01}} \quad (4.54)$$

$$I_{\text{primario (B1C)}} = \frac{-U_{\text{secundario}} \cdot Z_{03}}{Z_{03} \cdot (Z_{02} + Z_{01}) + Z_{02} \cdot Z_{01}} \quad (4.55)$$

$$I_{\text{terciario (B1C)}} = \frac{-U_{\text{secundario}} \cdot Z_{01}}{Z_{03} \cdot (Z_{02} + Z_{01}) + Z_{02} \cdot Z_{01}} \quad (4.56)$$

d) Modelo D de circuito equivalente de seis impedancias

Según formuló Garin en [19], de cara a obtener un circuito equivalente que no sólo reproduzca el comportamiento a secuencia homopolar del transformador a efectos externos, sino que también permita estimar de forma fiable la circulación interna de corriente por el arrollamiento de estabilización, se ha de utilizar un modelo de, al menos, seis impedancias. El modelo circuital que se va a validar de cara al cumplimiento de dicho objetivo es el indicado en la figura 4.14.

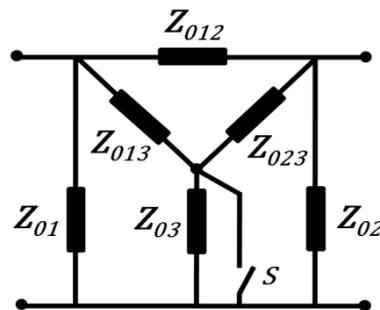


Figura 4.14. Modelo D de circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (el interruptor S se considera abierto cuando el triángulo del arrollamiento de estabilización está cerrado).

Para el modelo D, las ecuaciones que nos permiten formular la expresión de las impedancias homopolares del transformador en las diferentes configuraciones de ensayo son las siguientes<sup>26</sup>:

<sup>26</sup> No se desarrollan más las expresiones por simplicidad en la redacción y la exposición.

$$Z_{0(A0A)} = Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y} + Z_{02}) // (Z_{03Y})] \quad (4.57)$$

$$Z_{0(A0C)} = Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y} + Z_{02}) // (Z_{03Y} + Z_{03})] \quad (4.58)$$

$$Z_{0(A1A)} = Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y}) // (Z_{03Y})] \quad (4.59)$$

$$Z_{0(A1C)} = Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y}) // (Z_{03Y} + Z_{03})] \quad (4.60)$$

$$Z_{0(B0A)} = Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y} + Z_{01}) // (Z_{03Y})] \quad (4.61)$$

$$Z_{0(B0C)} = Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y} + Z_{01}) // (Z_{03Y} + Z_{03})] \quad (4.62)$$

$$Z_{0(B1A)} = Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y}) // (Z_{03Y})] \quad (4.63)$$

$$Z_{0(B1C)} = Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y}) // (Z_{03Y} + Z_{03})] \quad (4.64)$$

Donde las impedancias  $Z_{01Y}$  -  $Z_{02Y}$  -  $Z_{03Y}$  son las resultantes de la transformación triángulo a estrella de las impedancias  $Z_{012}$  -  $Z_{013}$  -  $Z_{023}$  indicadas en la figura 4.14, cuyas expresiones en función de ellas serán por tanto las indicadas a continuación.

$$Z_{01Y} = \frac{Z_{012} \cdot Z_{013}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.65)$$

$$Z_{02Y} = \frac{Z_{012} \cdot Z_{023}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.66)$$

$$Z_{03Y} = \frac{Z_{013} \cdot Z_{023}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.67)$$

Por último, se muestran a continuación las ecuaciones descriptivas de la corriente circulante en los arrollamientos no energizados en términos de las impedancias del circuito equivalente del modelo D. En este caso, estas ecuaciones son singularmente relevantes ya que, como se presentará más adelante, varias de ellas serán consideradas en el proceso de optimización numérica utilizado para el cálculo de los parámetros del circuito equivalente.

$$I_{\text{terciario (A0C)}} = -U_{\text{primario}} \cdot \left[ \frac{Z_{012} \cdot Z_{02} + Z_{012} \cdot Z_{023} + Z_{02} \cdot Z_{023} + Z_{013} \cdot Z_{02}}{Z_{013} \cdot (Z_{012} \cdot Z_{02} + Z_{012} \cdot Z_{023} + Z_{02} \cdot Z_{023})} \right] \quad (4.68)$$

$$I_{\text{secundario (A1A)}} = -U_{\text{primario}} \cdot \frac{Z_{03} \cdot (Z_{013} + Z_{012} + Z_{023}) + Z_{013} \cdot Z_{023}}{Z_{012} \cdot (Z_{013} \cdot Z_{03} + Z_{03} \cdot Z_{023} + Z_{013} \cdot Z_{023})} \quad (4.69)$$

$$I_{\text{secundario (A1C)}} = \frac{-U_{\text{primario}}}{Z_{012}} \quad (4.70)$$

$$I_{\text{terciario (A1C)}} = \frac{-U_{\text{primario}}}{Z_{013}} \quad (4.71)$$

$$I_{\text{terciario (B0C)}} = -U_{\text{secundario}} \cdot \left[ \frac{Z_{01} \cdot Z_{012} + Z_{012} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{023}}{Z_{023} \cdot (Z_{01} \cdot Z_{012} + Z_{012} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{013})} \right] \quad (4.72)$$

$$I_{\text{primario (B1A)}} = -U_{\text{secundario}} \cdot \frac{Z_{03} \cdot (Z_{013} + Z_{023} + Z_{012}) + Z_{013} \cdot Z_{023}}{Z_{012} \cdot (Z_{013} \cdot Z_{03} + Z_{023} \cdot Z_{03} + Z_{013} \cdot Z_{023})} \quad (4.73)$$

$$I_{\text{primario (B1C)}} = \frac{-U_{\text{secundario}}}{Z_{012}} \quad (4.74)$$

$$I_{\text{terciario (B1C)}} = \frac{-U_{\text{secundario}}}{Z_{023}} \quad (4.75)$$

### Cálculo de los parámetros de los modelos de circuitos equivalente

Si bien en algún caso podría optarse por métodos sencillos de resolución analítica de las ecuaciones<sup>27</sup>, de cara a abordar el problema de una forma rigurosa y homogénea, la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes se ha realizado mediante un proceso de optimización numérica de resolución de sistemas de ecuaciones no lineales.

En el caso de los modelos A, B y C, la determinación de los parámetros de los circuitos equivalentes se ha realizado a partir de las medidas de las impedancias homopolares efectuadas en los ensayos y de las ecuaciones que describen en dichos modelos el cálculo de las impedancias equivalentes de dichas configuraciones de ensayo.

Para el modelo D, dicho procedimiento fue también utilizado encontrándose problemas de inestabilidad y dispersión de las soluciones debido a la mayor complejidad del sistema de ecuaciones. Para resolver estos problemas se incorporaron seis de las ocho ecuaciones de intensidad circulante en los arrollamientos no energizados, lo que permitió conseguir soluciones estables al problema de optimización numérica.

En el apéndice C se describe en detalle la metodología utilizada para la resolución de los distintos sistemas de ecuaciones no lineales necesarios para la obtención de los parámetros óptimos de los distintos modelos. No obstante, se presenta en la tabla 4.15 un resumen de los parámetros (incógnitas), las ecuaciones y las medidas de los ensayos considerados en la resolución de cada modelo.

En las tablas 4.16 a 4.18 se presenta un resumen de las impedancias obtenidas en el proceso de optimización numérica de los distintos modelos de circuitos equivalentes de los transformadores #1, #2 y #3. Para mayor claridad, en ellas se muestran únicamente los

<sup>27</sup> En el caso del modelo B se dispone de dos sistemas independientes de 4 ecuaciones con 3 incógnitas. Para la resolución de modelos de circuitos equivalentes de tres impedancias en T (como los modelos B1 y B2), la norma IEEE C57.12.90 [83] propone calcular los parámetros de circuitos equivalentes mediante la resolución analítica de un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas y utilizar la cuarta ecuación para contrastar la bondad de la adecuación al modelo circuital.

resultados obtenidos en la toma central del cambiador de tomas en carga y considerando únicamente el módulo de las impedancias, lo que equivale a considerar las impedancias como reactancias puras, despreciando por tanto su componente resistiva<sup>28</sup>. En el apartado C.3 del apéndice se puede consultar el conjunto completo de resultados, donde se puede observar que ambas consideraciones (posición del cambiador de tomas en carga e impedancias complejas) no determinan ninguna modificación de las conclusiones que a continuación se expondrán.

Modelo	Parámetros a obtener	Ecuaciones del modelo	Medidas de los ensayos utilizadas (para cada transformador de estudio)
Modelo A	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, Z_{0M}$ (4) (Fig. 4.11)	8 ecs. impedancia: (4.9) a (4.16)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo B1	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}$ (3) (Fig. 4.12.a)	4 ecs. impedancia: (4.25) a (4.28)	$Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1C)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo B2	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{0M}$ (3) (Fig. 4.12.b)	4 ecs. impedancia: (4.29) a (4.32)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(B0A)}, Z_{0(B1A)}$
Modelo C	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, Z_{00}$ (4) (Fig. 4.13)	4 ecs. impedancia: (4.41) a (4.48)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo D	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03},$ $Z_{012}, Z_{013}, Z_{023}$ (6) (Fig. 4.14)	8 ecs. impedancia: (4.57) a (4.64) 6 ecs. intensidad: (4.68), (4.70), (4.71) (4.72), (4.74), (4.75)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$ $I_{terciario(A0C)}, I_{secundario(A1C)}, I_{terciario(A1C)}$ $I_{terciario(B0C)}, I_{primario(B1C)}, I_{terciario(B1C)}$

Tabla 4.15. Resumen de los elementos considerados en el proceso de optimización numérica.

Aunque en el apartado 4.2.3 se realizará un análisis detallado de la precisión proporcionada por cada modelo en la estimación de las impedancias homopolares, se indica adicionalmente en cada una de las tablas mencionadas el valor del error cuadrático medio (ECM) de los modelos calculado según se indica en (4.76). El error de los modelos así calculado constituye un claro indicador de la adecuación entre el modelo que representan los circuitos equivalentes y las medidas experimentales obtenidas.

$$ECM (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{\text{ensayos } (ABC)} \left[ \frac{Z_{0(ABC) \text{ calculada}} - Z_{0(ABC) \text{ medida}}}{Z_{0(ABC) \text{ medida}}} \right]^2}{N^{\circ} \text{ ensayos } (ABC)}} \quad (4.76)$$

donde  $Z_{0(ABC) \text{ calculada}}$  es el valor obtenido según las ecuaciones de cálculo de impedancias homopolares descritas para cada modelo para la impedancia  $Z_{0(ABC)}$  a partir de las impedancias del circuito equivalente resultantes del proceso de optimización numérica y  $Z_{0(ABC) \text{ medida}}$  es el valor de la impedancia homopolar obtenido en el ensayo (ABC) correspondiente indicado en las tablas 4.5-4.7<sup>29</sup>.

<sup>28</sup> El cálculo realizado en la norma IEEE C57.12.90 [83] para la obtención de las impedancias de un circuito equivalente en T mediante la resolución analítica de las ecuaciones utiliza de hecho esta aproximación simplificada.

<sup>29</sup> Para los ensayos de vacío A0A y B0A se toma el valor promedio de las impedancias homopolares obtenidas.

Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #1									
Modelo A		Modelo B1		Modelo B2		Modelo C		Modelo D	
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)
Z <sub>01</sub>	10,08	Z' <sub>01</sub>	9,79	Z'' <sub>01</sub>	1,08	Z <sub>01</sub>	12,14	Z <sub>01</sub>	73,52
Z <sub>02</sub>	-0,20	Z' <sub>02</sub>	-0,42	Z'' <sub>02</sub>	9,53	Z <sub>02</sub>	-1,35	Z <sub>02</sub>	-204,26
Z <sub>03</sub>	6,07	Z' <sub>03</sub>	5,99	-	-	Z <sub>03</sub>	7,52	Z <sub>03</sub>	229,94
Z <sub>0M</sub>	78,38	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	77,84	Z <sub>00</sub>	77,95	Z <sub>012</sub>	8,35
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>013</sub>	-39,07
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>023</sub>	5,19
ECM = 8,82 %		ECM = 0,16 %		ECM = 1,51 %		ECM = 1,53 %		ECM = 2,54 %	

Tabla 4.16. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes de los diferentes modelos calculadas para el transformador #1.

Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #2									
Modelo A		Modelo B1		Modelo B2		Modelo C		Modelo D	
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)
Z <sub>01</sub>	14,39	Z' <sub>01</sub>	14,13	Z'' <sub>01</sub>	4,96	Z <sub>01</sub>	15,93	Z <sub>01</sub>	177,07
Z <sub>02</sub>	-0,45	Z' <sub>02</sub>	-0,61	Z'' <sub>02</sub>	9,12	Z <sub>02</sub>	-1,26	Z <sub>02</sub>	-82,58
Z <sub>03</sub>	5,26	Z' <sub>03</sub>	5,28	-	-	Z <sub>03</sub>	6,23	Z <sub>03</sub>	67,49
Z <sub>0M</sub>	131,87	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	131,70	Z <sub>00</sub>	132,32	Z <sub>012</sub>	11,90
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>013</sub>	-67,78
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>023</sub>	4,31
ECM = 5,32 %		ECM = 0,15 %		ECM = 1,03 %		ECM = 3,34 %		ECM = 1,17 %	

Tabla 4.17. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes de los diferentes modelos calculadas para el transformador #2.

Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #3									
Modelo A		Modelo B1		Modelo B2		Modelo C		Modelo D	
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)
Z <sub>01</sub>	-1,54	Z' <sub>01</sub>	-1,59	Z'' <sub>01</sub>	-0,46	Z <sub>01</sub>	-1,96	Z <sub>01</sub>	834,42
Z <sub>02</sub>	15,73	Z' <sub>02</sub>	15,65	Z'' <sub>02</sub>	14,61	Z <sub>02</sub>	16,05	Z <sub>02</sub>	579,08
Z <sub>03</sub>	23,12	Z' <sub>03</sub>	18,48	-	-	Z <sub>03</sub>	22,81	Z <sub>03</sub>	102,77
Z <sub>0M</sub>	89,34	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	88,99	Z <sub>00</sub>	88,90	Z <sub>012</sub>	12,64
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>013</sub>	15,09
-	-	-	-	-	-	-	-	Z <sub>023</sub>	-107,95
ECM = 1,15 %		ECM = 0,22 %		ECM = 0,64 %		ECM = 0,60 %		ECM = 1,26 %	

Tabla 4.18. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes de los diferentes modelos calculadas para el transformador #3.

### 4.2.3. Análisis de los resultados experimentales del comportamiento homopolar de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

En este apartado se realiza un análisis detallado de los resultados experimentales obtenidos en los apartados 4.2.1 y 4.2.2. El principal objetivo es analizar en cada uno de los transformadores de estudio la precisión de los distintos modelos de circuito equivalente propuestos.

A la hora de evaluar la precisión de los distintos modelos de circuitos equivalentes en la predicción del comportamiento homopolar de los transformadores objeto de estudio, dos serán los principales aspectos a analizar: por un lado, la capacidad de los modelos de estimar las impedancias homopolares que los transformadores presentan en las distintas configuraciones de ensayo y, por otro lado, la capacidad de dichos modelos para predecir las corrientes circulantes en cada uno de los arrollamientos del transformador.

#### Precisión de los modelos de circuito equivalente en la predicción de las impedancias homopolares de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

Como se indicó en el apartado anterior, el error cuadrático medio (ECM) calculado según la ecuación (4.76) supone un interesante indicador global de la precisión con la que los diferentes modelos evalúan las impedancias homopolares del transformador en las diferentes configuraciones de ensayo. En la tabla 4.19 se puede observar el resumen comparativo de los errores de los diferentes modelos tanto en los cálculos con impedancias complejas, cuyo detalle se presenta en el apartado C.3 del apéndice C, como en el caso de considerar impedancias reales (como si fueran reactancias puras).

Modelo	Error Cuadrático Medio (ECM) en %					
	Transformador #1		Transformador #2		Transformador #3	
	$Z_0 / \Phi_0$	$X_0$	$Z_0 / \Phi_0$	$X_0$	$Z_0 / \Phi_0$	$X_0$
Modelo A	8,70 %	8,82 %	5,29 %	5,32 %	1,07 %	1,15 %
Modelo B	0,84 %	0,83 %	0,56 %	0,59 %	0,43 %	0,43 %
B1	0,17 %	0,16 %	0,10 %	0,15 %	0,22 %	0,22 %
B2	1,51 %	1,51 %	1,03 %	1,03 %	0,64 %	0,64 %
Modelo C	1,38 %	1,53 %	3,27 %	3,34 %	0,64 %	0,60 %
Modelo D	2,57 %	2,54 %	1,16 %	1,17 %	1,30 %	1,26 %

Tabla 4.19. Comparación de los errores cuadrático medios de los modelos de circuito equivalente

Los resultados agregados de la tabla anterior muestran que todos los modelos, con la excepción del modelo A, reproducen con una precisión adecuada el comportamiento de los transformadores en lo que respecta a sus impedancias homopolares. Destaca positivamente el modelo B con errores cuadráticos medios consistentemente por debajo del 1 %<sup>30</sup>. En el caso de

<sup>30</sup> Como era de esperar, las no linealidades presentes en los ensayos del modelo B2 generan un mayor ECM en la evaluación del modelo.

los modelos C y D, la precisión con la que nos permitirían estimar las impedancias es razonablemente buena en todos los transformadores, no presentando una dispersión significativa entre ellos. Por su parte, el modelo A es el que presenta una mayor dispersión en los resultados con ECM por encima del 5 % en dos de los casos, siendo por tanto el menos apto de cara a estimar las impedancias de los transformadores.

En el apartado C.4.1 del apéndice C se dispone de un mayor grado de detalle de los errores en la predicción de las impedancias en cada una de las configuraciones de ensayo, donde se puede comprobar que efectivamente el modelo A aporta errores en la predicción de las impedancias homopolares de cierta magnitud (en algún caso cercano al 20%) para ciertas configuraciones de ensayo.

#### **Precisión de los modelos de circuito equivalente en la predicción de las corrientes circulantes por los arrollamientos de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización**

Como se ha indicado anteriormente, según lo postulado por Garin [18][19], para poder predecir con precisión la corriente en cada uno de los arrollamientos de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización se requiere un modelo de circuito equivalente con al menos seis impedancias. Sin embargo, también postulaba Garin que modelos más simples, como circuitos equivalentes de tres impedancias en T, pueden ser suficientemente precisos para calcular las corrientes de línea en las redes primaria y secundaria del transformador. Esto supone, en nuestro caso, que las corrientes de los arrollamientos primario y secundario de transformador deberían poder ser calculadas con precisión por todos los modelos planteados.

A pesar de lo anterior, la práctica habitual en la industria eléctrica basa todos los cálculos que conciernen a transformadores de dos o más arrollamientos en circuitos equivalentes de tres impedancias en T.

El objetivo de este epígrafe consiste en verificar la precisión de los distintos modelos de circuito equivalente postulados, tanto a efectos de posibles cálculos externos (corrientes primaria y secundaria) como para cálculos internos (es decir, incluyendo la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización).

En ese sentido, y con el objetivo de tener una visión global resumida de la precisión ofrecida por cada uno de los modelos en la predicción de corrientes, se presenta en las tablas 4.20 y 4.21 el valor promedio y la desviación típica de los errores para los tres transformadores en estudio, discriminando las corrientes primaria y secundaria por un lado y la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización por otro. En el apartado C.4.2 del apéndice C se recoge la información detallada de los errores en la predicción de las diferentes corrientes en cada una de las configuraciones de ensayo.

Modelo	Transformador #1				Transformador #2				Transformador #3			
	Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización		Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización		Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización	
	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica
Modelo A	7,7 %	6,4 %	29,2 %	39,0 %	3,8 %	3,3 %	16,0 %	25,7 %	1,2 %	1,2 %	23,0 %	14,8 %
Modelo B	0,8 %	0,5 %	27,0 %	30,4 %	1,3 %	1,6 %	9,3 %	16,9 %	0,8 %	0,9 %	11,4 %	11,6 %
Modelo C	0,6 %	0,5 %	6,4 %	10,2 %	3,4 %	2,0 %	9,0 %	7,9 %	0,7 %	0,9 %	17,6 %	7,2 %
Modelo D	2,3 %	1,3 %	2,3 %	1,6 %	1,7 %	1,3 %	2,2 %	1,2 %	1,3 %	0,8 %	2,0 %	1,4 %

**Tabla 4.20. Valores promedio y desviación típica de los errores de los modelos de circuito equivalente en la predicción de las corrientes circulantes por el transformador (Hipótesis: impedancias reales)**

Modelo	Transformador #1				Transformador #2				Transformador #3			
	Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización		Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización		Intensidades primaria y secundaria		Intensidad arrollamiento estabilización	
	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica	Error medio	Desv. Típica
Modelo A	7,7 %	6,3 %	28,7 %	38,0 %	3,8 %	3,3 %	14,7 %	22,7 %	1,1 %	1,2 %	22,6 %	14,7 %
Modelo B	0,8 %	0,6 %	26,1 %	28,7 %	1,3 %	1,6 %	7,7 %	13,7 %	0,8 %	0,9 %	11,3 %	11,3 %
Modelo C	0,5 %	0,6 %	5,5 %	7,9 %	3,4 %	2,0 %	10,4 %	10,4 %	0,7 %	0,9 %	17,3 %	7,2 %
Modelo D	3,3 %	1,5 %	4,0 %	1,5 %	1,6 %	1,3 %	1,7 %	1,3 %	1,3 %	0,9 %	2,0 %	1,4 %

**Tabla 4.21. Valores promedio y desviación típica de los errores de los modelos de circuito equivalente en la predicción de las corrientes circulantes por el transformador (Hipótesis: impedancias complejas)**

A partir de la información reflejada en las tablas 4.20 y 4.21, complementado por el detalle aportado en las tablas C.34 a C.39, se observa que, como era de esperar, el modelo D de seis impedancias ofrece una representación fiable de las corrientes de todos los arrollamientos de una forma muy homogénea y con poca dispersión para los tres transformadores objeto de estudio y en todas las configuraciones de ensayo.

Al igual que ocurrió en la predicción de las impedancias homopolares, el modelo A es el modelo que aporta una peor precisión en la estimación de las corrientes que circulan por los arrollamientos. En el caso de las corrientes que circulan por los arrollamientos primario y secundario, la predicción es razonablemente buena en general, si bien se han dado configuraciones tanto en el transformador #1 como en el transformador #2 en el que los errores de precisión eran significativos. En la predicción de la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización, el comportamiento del modelo A es claramente insatisfactorio.

Por su parte, el modelo B se constituye como el más preciso en la estimación de las corrientes que circulan por los arrollamientos primario y secundario aportando en todos los transformadores y configuraciones de ensayo una precisión muy buena con errores siempre

por debajo del 5 %. Sin embargo, su comportamiento no es totalmente satisfactorio en la predicción de las corrientes del arrollamiento de estabilización, con errores en varios transformadores y configuraciones por encima de los que nos permitirían realizar una aproximación precisa al comportamiento homopolar del transformador.

Por último, en lo que respecta al modelo C, su comportamiento es, en término medio, bastante similar al del modelo B. Su precisión es bastante buena en las intensidades primaria y secundaria pero también insatisfactoria en algunos casos para la estimación de la corriente del arrollamiento de estabilización.

#### **Efecto de la componente resistiva en la precisión de los modelos de circuito equivalente**

Como se observó en el apartado 4.2.1, la componente reactiva de las impedancias homopolares es la que determina esencialmente el comportamiento del transformador, siendo el papel que juega la componente resistiva claramente menor. La captación de las medidas necesarias para realizar la diferenciación entre las componentes resistivas y reactivas supondría una mayor complejidad en la instrumentación requerida. Asimismo se indicó que considerar de forma rigurosa dicha componente resistiva supondría realizar correcciones a una temperatura de referencia, conllevando una mayor tiempo en la realización de los cálculos.

En las tablas 4.19 a 4.21, así como en las tablas detalladas en los apartados C.3 y C.4 del apéndice C, se muestran diferentes resultados tanto considerando las impedancias complejas como considerando únicamente las impedancias reales (suponiendo que las medidas se realizan sobre transformadores con impedancias homopolares puramente reactivas). En las diferentes tablas de resultados y cálculos realizados sobre los tres transformadores objeto de estudio se puede observar claramente la similitud en ambas situaciones.

La ejecución de los cálculos de optimización numérica considerando impedancias complejas supone una mayor dificultad en la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales en el campo complejo, habiéndose observado en algún caso ciertos problemas de inestabilidad numérica, dificultando la consecución de los parámetros óptimos.

Por todo ello, se puede concluir que, de cara a estudiar el comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización, es perfectamente válido considerar que las impedancias homopolares tienen únicamente componente reactiva, lo que permitirá simplificar las configuraciones e instrumentación de los ensayos y los procesos de cálculo y optimización sin pérdida de precisión en los resultados obtenidos.

### **4.3. Resumen del capítulo**

Disponer de modelos de circuito equivalente que permitan una representación precisa del comportamiento homopolar de un transformador estrella-estrella considerando la presencia o la ausencia del arrollamiento de estabilización constituye una piedra angular en la consecución de los objetivos de la tesis.

Se ha comenzado el capítulo con un análisis del estado del arte respecto a la representación circuital de los transformadores enfatizando en la caracterización del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella, tanto a nivel de circuitos equivalentes como a nivel de los ensayos necesarios para disponer de los parámetros de dichos circuitos. En ese sentido, se han analizado las aportaciones de diferentes autores como Garin, Schlosser u

Oels, si bien se ha hecho hincapié en las disposiciones y observaciones existentes en la normativa técnica de IEC e IEEE respecto al comportamiento homopolar y los ensayos de medida de las impedancias homopolares.

La carencia existente en la actualidad, tanto en la literatura como en la normativa técnica, de una metodología que permita una caracterización integral del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella en presencia y en ausencia de arrollamientos de estabilización se ha cubierto detallando con precisión el conjunto de ensayos que deben efectuarse. Adicionalmente, se ha validado que este conjunto de ensayos pueden realizarse en campo mediante ensayos en baja tensión (aspecto no analizado anteriormente por ningún otro autor) lo que complementa y ofrece una salida a aquellos transformadores que no han sido adecuadamente ensayados en el laboratorio de alta tensión del fabricante. Esta aportación original de la tesis ha sido objeto del artículo [92] publicado en la revista *IEEE Transactions on Power Delivery*.

En dicho artículo se aborda también lo analizado en este capítulo respecto a la mejor precisión aportada por un circuito equivalente de tres impedancias que considera de forma separada las configuraciones con arrollamiento de estabilización y sin él, así como la validez y conveniencia de considerar las impedancias homopolares como reactancias puras.

Avanzando respecto a lo anterior, en el apartado 4.2 de este capítulo se ha presentado un análisis completo de cuatro modelos de circuito equivalente, valorando la precisión con la que dichos modelos reproducen el comportamiento homopolar del transformador. Se ha identificado al modelo de tres impedancias que considera de forma separada las configuraciones con arrollamiento de estabilización y sin él como aquel que aporta una mejor combinación de sencillez y precisión en la consecución de los objetivos de representación homopolar de los transformadores estrella-estrella en presencia y en ausencia de arrollamientos de estabilización.

## Capítulo 5

# Análisis del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella

Los terceros armónicos de corriente y tensión derivados del funcionamiento en vacío<sup>31</sup> de los transformadores estrella-estrella constituyeron uno de los principales argumentos que determinaron la utilización de arrollamientos de estabilización en las máquinas de principios del siglo XX, tal y como se indicó en el capítulo 2. En aquel momento, la extensiva utilización de transformadores de flujos libres, las interferencias provocadas en las líneas telefónicas cuyo tendido se realizaba en paralelo a las líneas eléctricas, así como en los relés de protección, y el uso de chapas magnéticas laminadas en caliente provocaban en gran medida la necesidad de dichos arrollamientos.

Con el paso del tiempo, la utilización mayoritaria de transformadores de potencia con núcleos magnéticos de tres columnas construidos con chapas magnéticas de grano orientado laminadas en frío, así como redes de telecomunicación y equipos de protección y control prácticamente inmunes a las interferencias provocadas por los armónicos de las redes eléctricas, conforman un panorama radicalmente distinto al referido anteriormente.

En el capítulo 5 se pretende analizar en el contexto de los transformadores estrella-estrella de flujos ligados actuales el impacto del contenido armónico derivado de su funcionamiento en vacío.

En el primer apartado de este capítulo, a modo de estado del arte, se realizará un análisis cualitativo del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella.

A continuación, se abordará en el apartado 5.2 un análisis cuantitativo de la magnitud de la corriente de vacío y su contenido armónico en los distintos transformadores objeto de estudio de la tesis.

Finalmente, en el apartado 5.3 se efectuará un estudio experimental sobre la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento en vacío de un transformador estrella-estrella a partir de medidas obtenidas en distintas configuraciones de ensayo.

---

<sup>31</sup> En realidad, los fenómenos descritos en este capítulo son debidos al hecho de que el transformador esté energizado y no sólo están presentes en el funcionamiento en vacío sino también en el funcionamiento en carga. No obstante, en la práctica habitual es frecuente referirse al comportamiento del transformador asociado a su puesta en tensión y a las corrientes de magnetización consecuentes como funcionamiento en vacío, criterio que será también adoptado en esta tesis.

## 5.1. Análisis cualitativo del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella

En el análisis que se realizará a continuación del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella, se considera que la alimentación está situada en la red a la que se conecta el arrollamiento primario. La existencia de situaciones que alteren esta suposición, no modifica el análisis (debido al carácter reversible de los transformadores), salvo en la consideración de las conexiones de neutro. A lo largo del análisis se supondrá que el transformador está alimentado a partir de un sistema equilibrado de tensiones de secuencia directa, ya que esta es la condición normal de la red. Si bien en una red pueden ocurrir sucesos que provoquen un cierto desequilibrio en las tensiones de alimentación (por ejemplo un hueco de tensión o una falta monofásica a tierra), este tipo de fenómenos son de duración muy reducida y no suponen un problema en la práctica.

De cara a simplificar la notación de las distintas conexiones de neutro, en lo sucesivo se denominarán **YN** a los arrollamientos primarios con neutro puesto a tierra, **Y** a los arrollamientos primarios con neutro aislado, **yn** a los arrollamientos secundarios con neutro puesto a tierra e **y** a los arrollamientos secundarios con neutro aislado<sup>32</sup>.

Inicialmente se presentará el funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella en diferentes configuraciones de puesta a tierra del neutro y sin arrollamiento de estabilización. A continuación, se verá cómo la presencia de un arrollamiento de estabilización modifica el comportamiento en vacío del transformador.

### 5.1.1. Funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización

En el análisis del funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización deben considerarse dos situaciones: una en la que el neutro del lado alimentado se encuentre puesto a tierra y otra en la que se encuentre aislado de tierra.

#### a) Comportamiento en vacío de transformadores YN-yn e YN-y

La red que alimenta los arrollamientos primarios del transformador proporciona al mismo un sistema trifásico equilibrado de tensiones<sup>33</sup>, de forma que los flujos magnéticos de cada una de las fases también formarán un sistema trifásico equilibrado<sup>34</sup>.

Para la formación de dichos flujos, cada una de las fases requerirá una corriente de magnetización que, como consecuencia de la característica no lineal del núcleo ferromagnético, contendrá armónicos, cuya magnitud será tanto mayor cuanto mayor sea la saturación con la que trabaje el circuito magnético. Es decir, si la fuente de alimentación sobreexcita al

---

<sup>32</sup> En rigor, la denominación YN e yn, según la norma IEC 60076-1, indica que los neutros están accesibles, no que estén puestos a tierra.

<sup>33</sup> La red fija las tensiones de línea (tensiones compuestas o fase-fase), pero al estar conectado a tierra el neutro del transformador también fijará las tensiones de fase (tensiones simples o fase-neutro).

<sup>34</sup> Siendo rigurosos, aunque la tensión fase-neutro está fijada por la red y es, por tanto sinusoidal, la fuerza electromotriz creada por el flujo difiere de aquella por la caída de tensión provocada por la corriente de vacío en la impedancia interna del transformador (y en la impedancia Thevenin de la red primaria). Al tener armónicos la corriente de vacío, esta caída de tensión también los tendrá, y por tanto la f.e.m. no será estrictamente sinusoidal. En cualquier caso, este efecto es despreciable.

transformador, la saturación del circuito magnético será mayor y, por tanto, su efecto no lineal y el contenido armónico de la corriente de magnetización serán mayores.

En el caso de que exista simetría entre las tres fases del circuito magnético, la componente fundamental de la corriente de magnetización de cada una de las fases, así como sus armónicos de secuencia directa y de secuencia inversa, se anularán al llegar al neutro. Sin embargo, los armónicos de secuencia homopolar (de frecuencia triple y múltiplos impares de la misma) circularán por el circuito de retorno de la corriente (circuito definido por la puesta a tierra del neutro del transformador y las de las fuentes de alimentación u otros transformadores).

Por tanto, el comportamiento en vacío de transformadores **YN-yn** e **YN-y** se resume en la existencia de flujos magnéticos y tensiones fase-neutro sinusoidales tanto en el primario como en el secundario y corrientes de vacío distorsionadas por el contenido de armónicos homopolares.

Todo lo indicado es válido para los distintos tipos de construcción del núcleo magnético. Adicionalmente, en el caso de transformadores de tres columnas, la asimetría del circuito magnético de la fase central frente a las fases laterales provoca que, en la corriente de retorno por neutro, exista una cierta componente de frecuencia fundamental superpuesta a la componente homopolar. El valor de esta componente de frecuencia fundamental es habitualmente menor a la componente del armónico de orden 3.

Lo anterior hace referencia al comportamiento en vacío de un transformador **YN-yn** ante un sistema trifásico equilibrado de tensiones de alimentación. Sin embargo, si las tensiones fase neutro resultan desequilibradas (por ejemplo debido a una falta de alta resistencia en la línea de alimentación al transformador), de forma que aparezca una componente de secuencia homopolar en las tensiones simples, los flujos resultarán desequilibrados, y tendrán también dicha componente homopolar.

#### b) Comportamiento en vacío de transformadores Y-y e Y-yn

En este caso, la red que alimenta los arrollamientos primarios del transformador fija las tensiones de línea (fase-fase) pero, al no estar conectado el neutro del transformador a tierra, las tensiones simples (fase-neutro) del transformador no vienen impuestas.

Por otro lado, al estar el neutro del arrollamiento primario del transformador aislado no existe posibilidad de circulación de armónicos homopolares en la corriente de vacío.

Así pues, por la misma razón que en el apartado anterior, pero en este caso en sentido contrario, la no linealidad del circuito ferromagnético provoca que, al no disponer la corriente de vacío de armónicos homopolares, el flujo magnético quede achatado, presentando un cierto contenido armónico, siendo especialmente relevante su componente de armónico de orden 3.

Este armónico de orden 3 del flujo crea una componente armónica de orden 3 en las fuerzas electromotrices inducidas en los arrollamientos primarios y secundarios<sup>35</sup>, lo que ocasiona dos efectos:

<sup>35</sup> Es frecuente encontrar en la literatura técnica ([37], [39], [40], [41], etc.) la representación del fenómeno anterior de una forma muy gráfica.

Supóngase una situación en la que tanto las tensiones de línea como las tensiones fase-neutro sólo están formadas por la frecuencia fundamental. En este caso, se pueden representar sus fasores (en el plano de Gauss) como un triángulo en el que sus lados son las tensiones de línea y las tensiones simples se obtienen uniendo el baricentro con los vértices.

- Las tensiones simples tanto primarias como secundarias son superiores, en algunas de sus fases, a las obtenidas en el apartado anterior, lo que supone un estrés dieléctrico adicional para el aislamiento.
- El transformador se convierte en un generador de armónicos de tensión, que serán vistos por las cargas conectadas fase-neutro en la red secundaria.

Hasta aquí, la descripción cualitativa del comportamiento de los transformadores **Y-yn** e **Y-y** es común para todos los tipos de construcción del núcleo magnético. Sin embargo, cuantitativamente, el fenómeno tiene distintos órdenes de magnitud según el caso.

Para bancos de transformación trabajando con una inducción magnética de 1,65-1,7 T, la característica no lineal del núcleo provoca una componente armónica de orden 3 en el flujo del 15-20 % de la componente fundamental. Teniendo en cuenta que los armónicos de orden 3 tienen una frecuencia mayor a la de la red, las tensiones armónicas son tres veces más grandes, esto es, el armónico 3 de las tensiones simples es del 45-60 % del valor de la componente fundamental<sup>3637</sup> [21][37].

Para transformadores trifásicos acorazados, el flujo homopolar también dispone de un circuito de baja reluctancia por el que cerrarse, y por tanto, la magnitud de las sobretensiones producidas es similar al caso anterior.

En el caso de transformadores de cinco columnas, el flujo homopolar también puede circular por las columnas externas no arrolladas. No obstante, el diseño de dichas columnas, al igual que el de las culatas superior e inferior, suele ser de una sección inferior al de las columnas bobinadas. Este hecho puede provocar una mayor saturación del circuito magnético y por tanto una mayor reluctancia. Ello implica valores ligeramente inferiores en las sobretensiones.

Sin embargo, en el caso de transformadores de tres columnas, el flujo homopolar no encuentra un camino ferromagnético por el que cerrarse, por lo que debe hacerlo a través de otros elementos del transformador (aceite, estructura de apriete del núcleo, cuba, etc.). Al tratarse de un camino no ferromagnético, su reluctancia es muy superior<sup>38</sup> por lo que la magnitud del flujo homopolar será muy inferior.

---

La incorporación de un armónico de orden 3 en las tensiones simples supone que el punto de unión de las mismas deja de estar situado en el baricentro, y gira a una velocidad de 100 Hz (velocidad relativa de giro de los fasores de armónico de orden 3, 150 Hz, frente a la velocidad de giro del plano de Gauss, 50 Hz) sobre una circunferencia cuyo radio es la magnitud del armónico de orden 3, permaneciendo el conjunto de los lados del triángulo indeformado.

Por ello, suele denominarse este fenómeno como neutro inquieto u oscilante (*oscillating neutral*).

<sup>36</sup> La componente armónica de orden 3 de la f.e.m. está en fase con la componente fundamental, por lo que la interacción de ambas es aditiva, creando un apuntamiento (sobretensión) en los máximos y mínimos de la onda.

<sup>37</sup> Hay que tener en cuenta que el valor eficaz de la tensión no aumenta en esa cuantía, sino que el incremento del valor eficaz es sólo del 10-17% del que se tendría si no existieran los flujos homopolares, ya que  $U_{ef} = \sqrt{(U_1^2 + U_3^2)} = \sqrt{1^2 + (0,45 \div 0,6)^2} = 0,10 \div 0,17$  p.u.

<sup>38</sup> Según se reporta en [35], la permeabilidad magnética de los elementos ferromagnéticos es del orden de 500 ÷ 5.000 veces superior a la del resto de elementos. Por ello, la reluctancia de un circuito magnético que transcurre en parte por elementos ferromagnéticos y por elementos no ferromagnéticos, viene determinada por estos últimos, cuyo comportamiento es básicamente lineal, de forma que no existen fenómenos de saturación de relevancia. Ello explica además la aparente paradoja de que simultáneamente tanto la corriente de vacío como el flujo magnético sean esencialmente sinusoidales.

En este caso, la componente homopolar de las tensiones fase-neutro suele ser, en general, claramente inferior al 5% [21] [37], si bien algunos autores [45] documentan valores bastante superiores.

Como conclusión, el comportamiento en vacío de transformadores **Y-yn** e **Y-y** se resume en que la corriente de vacío está exenta de armónicos homopolares, pero en cambio, se generan armónicos de orden 3 en las tensiones simples de los arrollamientos primarios y secundarios. Ello ocasiona sobretensiones con valores de hasta el 50-60 % por encima del valor de la componente fundamental en el caso de transformadores con flujos libres (bancos de transformación y transformadores de núcleos acorazados y de 5 columnas), lo que no hace aceptable la explotación de dichos equipos en estas condiciones<sup>39</sup>. Sin embargo, en transformadores de flujos ligados (de núcleos trifásicos de 3 columnas) dicha sobretensión no suele suponer un valor relevante, siendo por tanto adecuado su funcionamiento.

### 5.1.2. Funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

Por simplicidad en el contexto de la tesis, se supondrá la existencia de un arrollamiento de estabilización adicional a los dos arrollamientos conectados en estrella que se han analizado en el apartado 5.1.1. No obstante, el fenómeno físico es similar en el caso de que el arrollamiento conectado en triángulo fuera el primario o el secundario (conexiones Yd o Dy).

Por definición de arrollamiento en triángulo, las tres fases del arrollamiento estarán conectadas en serie, lo que permitirá la circulación de corrientes armónicas restringidas al interior del triángulo (en concreto, nos interesarán los armónicos de corriente de orden 3).

En el caso analizado en el apartado 5.1.1.a (transformadores con arrollamiento primario **YN**), la componente homopolar de la corriente de vacío necesaria para la creación del flujo magnético es aportada por el circuito que se cierra por los neutros a tierra de la red de alimentación y del transformador, circulando por tanto por las líneas. En el supuesto de añadir un arrollamiento de estabilización en triángulo, dicha componente puede también circular por el interior de dicho arrollamiento. El reparto de la componente homopolar de la corriente de vacío entre el triángulo y la línea de alimentación depende de la impedancia homopolar de uno y otra. Si la impedancia homopolar del arrollamiento de estabilización es inferior a la impedancia homopolar de la red más la del arrollamiento en estrella, la mayoría de la componente armónica de orden 3 de la corriente de vacío será aportada por el triángulo, dejando las corrientes de línea prácticamente exentas de dicha componente tal y como se indica en [21].

En el caso analizado en el apartado 5.1.1.b (transformadores con arrollamiento primario **Y**), el flujo homopolar que circula por las columnas de las tres fases, engendra en las bobinas del triángulo una f.e.m., que, al estar cerradas sobre un circuito eléctrico, provocan la circulación de una corriente (de secuencia homopolar), que, por la ley de Faraday-Lenz, creará a su vez un flujo que tenderá a oponerse a la causa que lo ha generado. Ello se traduce, tal y como se reporta en la literatura técnica ([37], [39], [40], [41], etc.) en que el arrollamiento de estabilización reduce hasta valores despreciables los flujos homopolares, y por tanto también las componentes armónicas de orden 3 de las tensiones simples (fase-neutro).

<sup>39</sup> Una forma de reducir estos armónicos sería trabajando lejos de la zona de saturación de la característica B-H del núcleo, lo que no resultaría económicamente viable en la práctica, ya que el diseño óptimo suele requerir que el núcleo esté ligeramente saturado.

Así pues, la existencia de un arrollamiento de estabilización en triángulo elimina (o dicho con más rigor, minimiza) los armónicos homopolares de corriente y de tensión que pueden ser generados por el transformador como consecuencia del comportamiento no lineal de su núcleo magnético.

## 5.2. Análisis cuantitativo de la magnitud de la corriente de vacío y su contenido armónico

La relevancia en el funcionamiento real de los transformadores de los fenómenos descritos en el apartado anterior respecto al comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella depende esencialmente de la magnitud de la corriente de vacío respecto a la corriente nominal del transformador, así como de su contenido armónico. Ambos aspectos están directamente relacionados con la calidad de la chapa magnética que constituye el núcleo magnético del transformador así como la inducción magnética a la tensión asignada para la que se diseñe el equipo, es decir, en qué grado de saturación trabaje en funcionamiento normal.

Estas cuestiones son habitualmente referenciadas en las especificaciones técnicas de adquisición de los transformadores y, según establece la normativa [29], su comprobación forma parte de los ensayos a realizar una vez finalizada la fabricación de los equipos<sup>40</sup>.

A continuación se presentan en las tablas 5.1 y 5.2, tomados de los respectivos protocolos de recepción en fábrica, los valores obtenidos en los ensayos de la medida de la corriente de vacío y de la medida del contenido armónico de la corriente de vacío cuando se dispone del arrollamiento de estabilización cerrado en los transformadores que han sido objeto de estudio y análisis en la tesis doctoral. Al abarcar diferentes tensiones y potencias nominales, así como diferentes fabricantes, constituyen una muestra bastante representativa de las características tecnológicas y de diseño en la fabricación actual de transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas.

En la tabla 5.1 se presentan los resultados del ensayo de medida de la corriente de vacío obtenidos al alimentar uno de los arrollamientos a la tensión nominal manteniendo los arrollamientos en estrella no alimentados abiertos y el arrollamiento de estabilización cerrado. En todos los casos se disponen los neutros del transformador conectados a tierra. Se realizan también medidas en régimen de subexcitación (80 y 90 % de la tensión asignada) y en régimen de sobreexcitación (105, 110 y 115 % de la tensión asignada) del circuito magnético. Para una mayor homogeneización, se muestra el valor de la corriente de vacío expresada como porcentaje de la corriente asignada del transformador.

Por su parte, en la tabla 5.2 se reflejan los porcentajes de los diferentes armónicos de corriente respecto a la componente fundamental de los diferentes transformadores en el caso de alimentación a la tensión nominal. Se añade también en esta tabla el valor de la tasa de distorsión armónica total cuyo cálculo ha sido realizado de acuerdo a la ecuación (5.1):

---

<sup>40</sup> La norma IEC 60076-1 establece que el ensayo de pérdidas y corriente de vacío debe formar parte de los ensayos individuales o de rutina a realizar en cada unidad fabricada. Por su parte, la medida del contenido en armónicos de la corriente de vacío es considerado como ensayo especial, es decir, que su realización estará sujeta a las condiciones pactadas entre fabricante y comprador. En el caso de Unión Fenosa Distribución, el ensayo de contenido en armónicos de la corriente de vacío está especificado también como ensayo de rutina.

$$THD (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=3,5,7,\dots} [I_{0i}]^2}{[I_{01}]^2}} \quad (5.1)$$

donde  $I_{0i}$  son los valores eficaces de los armónicos de la corriente de vacío medidos en los ensayos realizados, expresados en tanto por ciento de la componente fundamental de la corriente de vacío  $I_{01}$ .

Tensión alimentación (% respecto a Un)	Valor eficaz de la intensidad de vacío (promedio entre las tres fases) en % respecto a la intensidad asignada del transformador							
	#1				#2			#3
	#A	#B	#B2	#D	#C	#E	#F	#G
80 %	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03
90 %	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06	0,04
100 %	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,10</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,08</b>	<b>0,06</b>
105 %	0,08	0,15	0,12	0,22	0,10	0,15	0,17	0,09
110 %	0,12	0,47	0,21	0,89	0,25	0,53	0,48	0,16
115 %	0,24	1,43	0,59	1,14	0,79	1,34	1,28	0,17

**Tabla 5.1. Valor eficaz de la intensidad de vacío (promedio de las tres fases, tal y como estipula la norma IEC 600076-1) en porcentaje respecto a la intensidad asignada del transformador. Información disponible en los protocolos de ensayos de recepción en fábrica de diferentes transformadores estudiados, segmentados según su tipología constructiva.**

Como se puede observar en los valores mostrados en la tabla 5.1, en todos los transformadores de potencia estudiados la magnitud de la corriente de vacío a tensión asignada se sitúa en el rango 0,06 – 0,10 % respecto a la corriente asignada del transformador. Estos valores son significativamente inferiores a algunas referencias utilizadas en cierta literatura técnica de prestigio<sup>41</sup>, lo que puede haber llevado a sobreestimar la importancia de corregir mediante un arrollamiento de estabilización los efectos derivados de los componentes del armónico de orden 3 en el comportamiento en vacío de los transformadores de potencia estrella-estrella.

En lo que respecta al comportamiento en vacío en régimen de sobreexcitación, se tiene una mayor dispersión de resultados, observándose que, mientras que algunos de los transformadores estudiados apenas incrementan significativamente la magnitud de la corriente de vacío (transformadores #A, #B2 y #G), otros fabricantes ajustan más el diseño magnético observándose una saturación relevante del circuito magnético al 115 % de la tensión asignada (transformadores #D, #E y #F). No obstante, debe tenerse en cuenta que es infrecuente que los transformadores de potencia se exploten con tensiones superiores al 5 % de la tensión asignada de la toma en la que trabajan.

<sup>41</sup> Por ejemplo, en [39] se indica que la corriente de vacío es un 0,6 - 8 % en transformadores modernos y un 4 - 14 % en transformadores antiguos. Otros valores de referencia utilizados en libros de prestigio españoles son 5 - 8 % ([40]) o 0,5 - 5 % ([41]). En la literatura técnica anglosajona generalista se encuentran valores más ajustados como 0,5 - 5 % [37] o 0,2 - 2 % [38]. Esto muestra la evolución tecnológica que experimentan algunos materiales de construcción de transformadores, lo que conlleva ciertas implicaciones en la importancia cuantitativa de algunos fenómenos ilustrados en la literatura técnica.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		#1			#2		#3
		#A	#B2	#D	#E	#F	#G
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	8,76	13,37	4,8	11,58	35,35	18,33
	V	19,13	28,52	27,2	35,57	39,77	36,86
	W	13,06	6,76	22,6	14,25	5,97	8,92
	<b>U+V+W</b>	<b>13,65</b>	<b>16,22</b>	<b>18,20</b>	<b>20,47</b>	<b>27,03</b>	<b>21,37</b>
5	U	13,96	22,31	34,5	29,32	41,92	40,92
	V	16,48	22,24	38,0	34,46	49,31	51,95
	W	17,32	18,20	34,8	34,40	41,65	39,33
	<b>U+V+W</b>	<b>15,92</b>	<b>20,92</b>	<b>35,77</b>	<b>32,73</b>	<b>44,29</b>	<b>44,07</b>
7	U	5,61	10,17	19,4	17,94	22,70	14,64
	V	7,59	10,17	21,3	21,35	25,71	16,52
	W	6,72	8,67	19,8	20,90	23,01	13,43
	<b>U+V+W</b>	<b>6,64</b>	<b>9,67</b>	<b>20,17</b>	<b>20,06</b>	<b>23,81</b>	<b>14,86</b>
9	U	0,36	0,00	0,7	2,17	6,01	0,10
	V	1,16	2,37	4,2	6,59	8,06	3,09
	W	1,33	1,25	4,3	2,27	0,46	2,04
	<b>U+V+W</b>	<b>0,95</b>	<b>1,21</b>	<b>3,07</b>	<b>3,68</b>	<b>4,84</b>	<b>1,74</b>
11	U	1,69	1,67	6,2	-	6,10	3,92
	V	1,79	2,13	6,6	-	9,01	7,18
	W	1,81	1,94	7,4	-	6,94	5,19
	<b>U+V+W</b>	<b>1,76</b>	<b>1,91</b>	<b>6,73</b>	<b>-</b>	<b>7,35</b>	<b>5,43</b>
THD (I)	U	17,50	27,99	40,51	36,34	60,17	47,33
	V	26,45	37,71	52,13	54,33	69,68	66,27
	W	22,82	21,39	46,91	42,76	48,68	42,87
	<b>U+V+W</b>	<b>22,26</b>	<b>29,03</b>	<b>46,52</b>	<b>44,48</b>	<b>59,51</b>	<b>52,16</b>

**Tabla 5.2. Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases (con alimentación al 100% de la tensión asignada) expresado en porcentaje respecto a la componente fundamental. Información disponible en los protocolos de ensayos de recepción en fábrica de diferentes transformadores estudiados, segmentados según su tipología constructiva.**

En relación con las medidas de contenido armónico de la corriente de vacío a tensión asignada de la tabla 5.2, se pueden extraer varias conclusiones de interés:

- El contenido armónico queda básicamente representado por los armónicos de orden 3, 5 y 7, pudiendo despreciarse los armónicos de orden superior.
- En promedio, el contenido armónico de los transformadores de tipología #1 es inferior al de los transformadores de tipología #2 y #3. Aunque la muestra estudiada puede no ser suficientemente amplia como para generalizar la afirmación anterior, parece lógico dicho comportamiento ya que los transformadores de menores tensiones y potencias asignadas, con arrollamiento de estabilización interno y sin pantallas magnéticas (tipología #1) presentan una mayor reluctancia al paso de los armónicos homopolares de flujo frente a los transformadores con pantallas magnéticas (tipología #2), derivándose una mayor parte del flujo por elementos no ferromagnéticos. En el caso de los transformadores con arrollamiento de estabilización externo (tipología #3), dicho arrollamiento apantalla en cierta medida el flujo homopolar hacia la cuba, primándose la circulación del mismo hacia el núcleo magnético cuya característica no lineal produce un mayor contenido armónico.
- El comportamiento diferencial entre las tres fases del transformador en el caso de los armónicos de orden 3 (y en general de aquellos de secuencia homopolar) es significativamente menos homogéneo que en el caso de los armónicos de orden 5 y 7 (y en general de aquellos de secuencia inversa y directa). Ello es debido a la mayor y más asimétrica reluctancia al paso de los armónicos homopolares de flujo<sup>42</sup>.

### 5.3. Estudio experimental sobre la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento en vacío de un transformador estrella-estrella

En el apartado anterior se ha comprobado que los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado presentan una corriente de vacío muy reducida en comparación con la intensidad asignada del transformador. También se ha podido observar que, tal y como cabría esperar de la característica no lineal del núcleo magnético, dicha corriente de vacío tiene un contenido armónico significativo y que en dicho contenido armónico la componente de orden 3 tiene una presencia relevante, a pesar de la existencia de un arrollamiento de estabilización en triángulo cerrado. Esto es así por dos razones: por una parte, el tercer armónico de corriente se reparte entre el arrollamiento primario y el arrollamiento de estabilización de forma inversamente proporcional a sus respectivas impedancias y, por otra parte, a que la asimetría del circuito magnético hace que no todos los armónicos de orden 3 sean homopolares.

¿Cuál es la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento en vacío de los transformadores observado en los ensayos del apartado 5.2? Dado que las medidas se realizaron disponiendo los neutros del transformador puestos a tierra, ¿qué diferencias cabría esperar en caso de que el neutro del arrollamiento energizado se dispusiera aislado de tierra?

Para tratar de responder a las preguntas anteriores, durante los ensayos en fábrica del transformador #A se acordó con el fabricante la realización de un conjunto más completo de medidas de las pérdidas y la corriente de vacío, así como del contenido armónico de la tensión y la corriente de alimentación. El conjunto de ensayos realizados se resume en la tabla 5.3.

---

<sup>42</sup> En [38] se presenta en el apartado 2.5.1 una interesante aproximación a los fenómenos asimétricos en la magnetización de los transformadores de núcleo trifásico de 3 columnas.

Tensión de alimentación	Disposición del neutro y del arrollamiento de estabilización			
	Neutro Puesto a Tierra		Neutro Aislado de Tierra	
	Arrollam. Estabiliz. Cerrado	Arrollam. Estabiliz. Abierto	Arrollam. Estabiliz. Cerrado	Arrollam. Estabiliz. Abierto
80 %	Ensayo # TC1	Ensayo # TA1	Ensayo # FC1	Ensayo # FA1
90 %	Ensayo # TC2	Ensayo # TA2	Ensayo # FC2	Ensayo # FA2
100 %	Ensayo # TC3	Ensayo # TA3	Ensayo # FC3	Ensayo # FA3
105 %	Ensayo # TC4	Ensayo # TA4	Ensayo # FC4	Ensayo # FA4
110 %	Ensayo # TC5	Ensayo # TA5	Ensayo # FC5	Ensayo # FA5
115 %	Ensayo # TC6	Ensayo # TA6	Ensayo # FC6	Ensayo # FA6

**Tabla 5.3. Ensayos para el análisis de la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento en vacío de un transformador estrella-estrella (realizados sobre el transformador #A).**

En línea con el planteamiento teórico presentado en el apartado 5.1 y con lo indicado anteriormente, el objetivo de los ensayos referenciados en la tabla 5.3 es, por un lado, verificar si la intensidad de vacío del transformador y/o su contenido armónico se incrementa significativamente al operar un transformador estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización abierto cuando se dispone puesto a tierra el neutro del arrollamiento del lado de alimentación. Por otro lado, se pretende también comprobar si existe un desplazamiento de neutro significativo al operar un transformador estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización abierto cuando se dispone el neutro del arrollamiento del lado de alimentación aislado de tierra. Y ambas cuestiones se estudiarán tanto con la tensión nominal del transformador como en diferentes regímenes de subexcitación y sobreexcitación del núcleo magnético.

### 5.3.1. Ensayos con el neutro del transformador puesto a tierra

En las tablas 5.4 a 5.9 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos #TC1-6 y #TA1-6, es decir, las medidas de las pérdidas y la corriente de vacío realizados con el neutro del arrollamiento de alimentación (arrollamiento secundario) puesto a tierra tanto cuando se dispone del arrollamiento de estabilización cerrado como cuando se dispone abierto. También se presentan las medidas completas realizadas del contenido armónico de las corrientes circulantes por el arrollamiento secundario y tensiones fase-neutro en el arrollamiento primario del transformador. El análisis de todos los resultados de los ensayos se realizará en el apartado 5.3.3 conjuntamente con los resultados de los ensayos realizados con el neutro aislado de tierra.

- a) Medidas del contenido armónico realizadas con el neutro del transformador puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado

Id Ensayo	Tensión alimentación	Fase	Medida de las pérdidas y corriente de vacío		
			Intensidad eficaz (A)	Intensidad eficaz (%)	Pérdidas (kW)
# TC1	80 %	U	0,2684	-	-
		V	0,1725	-	-
		W	0,2624	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2344</b>	<b>0,043</b>	<b>4,27</b>
# TC2	90 %	U	0,3216	-	-
		V	0,2072	-	-
		W	0,3050	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2779</b>	<b>0,052</b>	<b>5,49</b>
# TC3	100 %	U	0,4181	-	-
		V	0,2776	-	-
		W	0,3829	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,3595</b>	<b>0,067</b>	<b>7,11</b>
# TC4	105 %	U	0,5218	-	-
		V	0,3631	-	-
		W	0,4715	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,4521</b>	<b>0,084</b>	<b>8,20</b>
# TC5	110 %	U	0,7516	-	-
		V	0,5544	-	-
		W	0,6822	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,6628</b>	<b>0,123</b>	<b>9,74</b>
# TC6	115 %	U	1,4529	-	-
		V	1,1279	-	-
		W	1,3770	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>1,3192</b>	<b>0,244</b>	<b>12,17</b>

Tabla 5.4. Medida de las pérdidas y la corriente de vacío en las diferentes fases (y el promedio de ellas; suma en caso de las pérdidas) para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	6,78	7,96	8,76	8,98	9,83	11,75
	V	15,23	17,95	19,13	18,34	18,24	20,86
	W	8,30	10,51	13,06	13,95	15,09	17,69
	<b>U+V+W</b>	<b>10,10</b>	<b>12,14</b>	<b>13,65</b>	<b>13,76</b>	<b>14,39</b>	<b>16,77</b>
5	U	4,10	6,76	13,96	20,97	32,11	46,85
	V	3,41	7,04	16,48	25,94	37,20	50,94
	W	4,65	8,55	17,32	25,43	36,43	51,65
	<b>U+V+W</b>	<b>4,05</b>	<b>7,45</b>	<b>15,92</b>	<b>24,11</b>	<b>35,25</b>	<b>49,81</b>
7	U	0,15	1,23	5,61	10,63	18,89	30,7
	V	0,71	1,78	7,59	13,71	21,16	31,38
	W	0,42	1,76	6,72	12,31	20,74	33,93
	<b>U+V+W</b>	<b>0,43</b>	<b>1,59</b>	<b>6,64</b>	<b>12,22</b>	<b>20,26</b>	<b>32,00</b>
9	U	0,19	0,28	0,36	0,91	2,22	4,04
	V	0,35	0,74	1,16	1,72	3,63	6,98
	W	0,31	0,66	1,33	1,82	3,01	5,41
	<b>U+V+W</b>	<b>0,28</b>	<b>0,56</b>	<b>0,95</b>	<b>1,48</b>	<b>2,95</b>	<b>5,48</b>
11	U	0,11	0,25	1,69	3,51	6,71	11,84
	V	0,29	0,15	1,79	4,16	7,24	12,05
	W	0,08	0,4	1,81	3,69	6,86	12,52
	<b>U+V+W</b>	<b>0,16</b>	<b>0,27</b>	<b>1,76</b>	<b>3,79</b>	<b>6,94</b>	<b>12,14</b>
THD (I)	U	7,93	10,52	17,50	25,43	39,17	58,58
	V	15,63	19,38	26,45	34,89	47,22	64,87
	W	9,53	13,68	22,82	31,78	45,18	65,71
	<b>U+V+W</b>	<b>11,03</b>	<b>14,53</b>	<b>22,26</b>	<b>30,70</b>	<b>43,86</b>	<b>63,06</b>

Tabla 5.5. Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	0,54	0,70	0,65	0,66	0,60	0,51
	V	1,39	1,35	1,38	1,42	1,27	1,35
	W	1,17	1,22	1,21	1,19	1,43	1,25
	<b>U+V+W</b>	<b>1,03</b>	<b>1,09</b>	<b>1,08</b>	<b>1,09</b>	<b>1,10</b>	<b>1,04</b>
5	U	0,17	0,24	0,34	0,44	0,56	0,93
	V	0,40	0,50	0,55	0,60	0,71	0,95
	W	0,39	0,35	0,38	0,45	0,55	0,87
	<b>U+V+W</b>	<b>0,32</b>	<b>0,36</b>	<b>0,42</b>	<b>0,50</b>	<b>0,61</b>	<b>0,92</b>
7	U	0,86	0,89	0,85	0,84	0,72	0,44
	V	1,15	1,19	1,10	1,15	1,00	0,86
	W	1,57	1,55	1,51	1,49	1,39	1,08
	<b>U+V+W</b>	<b>1,19</b>	<b>1,21</b>	<b>1,15</b>	<b>1,16</b>	<b>1,04</b>	<b>0,79</b>
9	U	0,19	0,22	0,11	0,16	0,16	0,14
	V	1,00	0,99	0,99	0,97	0,96	0,88
	W	1,03	1,04	1,04	1,03	1,00	0,95
	<b>U+V+W</b>	<b>0,74</b>	<b>0,75</b>	<b>0,71</b>	<b>0,72</b>	<b>0,71</b>	<b>0,66</b>
11	U	0,11	0,21	0,16	0,14	0,14	0,20
	V	0,51	0,49	0,53	0,53	0,51	0,52
	W	0,45	0,41	0,45	0,47	0,51	0,67
	<b>U+V+W</b>	<b>0,36</b>	<b>0,37</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,39</b>	<b>0,46</b>
THD (U)	U	1,05	1,20	1,14	1,17	1,11	1,17
	V	2,16	2,17	2,16	2,22	2,07	2,12
	W	2,29	2,29	2,27	2,26	2,35	2,20
	<b>U+V+W</b>	<b>1,84</b>	<b>1,89</b>	<b>1,86</b>	<b>1,89</b>	<b>1,85</b>	<b>1,83</b>

Tabla 5.6. Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

b) Medidas del contenido armónico realizadas con el neutro del transformador puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización abierto

Id Ensayo	Tensión alimentación	Fase	Medida de las pérdidas y corriente de vacío		
			Intensidad eficaz (A)	Intensidad eficaz (%)	Pérdidas (kW)
# TA1	80 %	U	0,2600	-	-
		V	0,1746	-	-
		W	0,2690	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2345</b>	<b>0,043</b>	<b>4,09</b>
# TA2	90 %	U	0,3127	-	-
		V	0,2114	-	-
		W	0,3158	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2800</b>	<b>0,052</b>	<b>5,25</b>
# TA3	100 %	U	0,4086	-	-
		V	0,2896	-	-
		W	0,4006	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,3662</b>	<b>0,068</b>	<b>6,72</b>
# TA4	105 %	U	0,5001	-	-
		V	0,3734	-	-
		W	0,4829	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,4541</b>	<b>0,084</b>	<b>7,56</b>
# TA5	110 %	U	0,7401	-	-
		V	0,5888	-	-
		W	0,7073	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,6787</b>	<b>0,126</b>	<b>8,78</b>
# TA6	115 %	U	1,4467	-	-
		V	1,1725	-	-
		W	1,4073	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>1,3422</b>	<b>0,249</b>	<b>10,43</b>

Tabla 5.7. Medida de las pérdidas y la corriente de vacío en las diferentes fases (y el promedio de ellas; suma en caso de las pérdidas) para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	9,34	11,90	15,14	18,08	23,68	31,94
	V	9,88	10,46	8,40	6,70	6,00	5,34
	W	10,94	14,88	20,39	24,40	30,72	38,73
	<b>U+V+W</b>	<b>10,05</b>	<b>12,41</b>	<b>14,64</b>	<b>16,39</b>	<b>20,13</b>	<b>25,34</b>
5	U	4,16	7,37	14,51	21,41	33,19	49,01
	V	3,52	7,80	17,44	26,42	37,99	51,90
	W	4,42	8,18	15,92	23,39	36,26	50,77
	<b>U+V+W</b>	<b>4,03</b>	<b>7,78</b>	<b>15,96</b>	<b>23,74</b>	<b>35,81</b>	<b>50,56</b>
7	U	0,51	1,16	5,41	10,31	19,27	32,29
	V	0,58	1,71	7,76	13,77	21,44	31,92
	W	0,49	2,08	6,53	11,65	21,38	33,65
	<b>U+V+W</b>	<b>0,53</b>	<b>1,65</b>	<b>6,57</b>	<b>11,91</b>	<b>20,70</b>	<b>32,62</b>
9	U	0,19	0,42	1,21	2,68	5,59	10,46
	V	0,12	0,33	0,21	0,86	0,82	1,02
	W	0,37	0,90	2,24	3,62	6,89	11,98
	<b>U+V+W</b>	<b>0,23</b>	<b>0,55</b>	<b>1,22</b>	<b>2,39</b>	<b>4,43</b>	<b>7,82</b>
11	U	0,12	0,26	1,67	3,49	6,92	12,61
	V	6,01	5,42	3,88	2,56	0,76	12,04
	W	0,07	0,42	1,70	3,42	7,16	12,45
	<b>U+V+W</b>	<b>2,07</b>	<b>2,03</b>	<b>2,42</b>	<b>3,16</b>	<b>4,95</b>	<b>12,37</b>
THD (I)	U	10,24	14,05	21,76	30,18	45,97	68,80
	V	12,10	14,24	21,21	30,66	44,05	62,35
	W	11,82	17,14	26,83	36,10	53,05	74,22
	<b>U+V+W</b>	<b>11,39</b>	<b>15,14</b>	<b>23,27</b>	<b>32,31</b>	<b>47,69</b>	<b>68,45</b>

Tabla 5.8. Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	0,82	0,68	0,71	0,52	0,59	0,52
	V	1,29	1,36	1,38	1,33	1,28	1,36
	W	1,36	1,20	1,09	1,31	1,41	1,23
	<b>U+V+W</b>	<b>1,16</b>	<b>1,08</b>	<b>1,06</b>	<b>1,05</b>	<b>1,09</b>	<b>1,04</b>
5	U	0,14	0,21	0,32	0,42	0,61	0,88
	V	0,44	0,51	0,53	0,64	0,73	0,92
	W	0,26	0,31	0,39	0,42	0,56	0,83
	<b>U+V+W</b>	<b>0,28</b>	<b>0,34</b>	<b>0,41</b>	<b>0,49</b>	<b>0,63</b>	<b>0,88</b>
7	U	0,85	0,89	0,86	0,83	0,72	0,47
	V	1,22	1,23	1,17	1,17	1,00	0,91
	W	1,53	1,57	1,53	1,48	1,41	1,15
	<b>U+V+W</b>	<b>1,20</b>	<b>1,23</b>	<b>1,19</b>	<b>1,16</b>	<b>1,04</b>	<b>0,84</b>
9	U	0,04	0,05	0,15	0,16	0,17	0,14
	V	1,01	1,03	0,99	0,98	0,97	0,89
	W	1,02	1,04	1,04	1,02	1,00	1,05
	<b>U+V+W</b>	<b>0,69</b>	<b>0,71</b>	<b>0,73</b>	<b>0,72</b>	<b>0,71</b>	<b>0,69</b>
11	U	0,08	0,20	0,16	0,14	0,13	0,18
	V	0,53	0,51	0,54	0,54	0,51	0,52
	W	0,41	0,42	0,44	0,47	0,51	0,65
	<b>U+V+W</b>	<b>0,34</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,45</b>
THD (U)	U	1,19	1,16	1,18	1,09	1,13	1,15
	V	2,16	2,22	2,20	2,19	2,09	2,14
	W	2,34	2,29	2,23	2,31	2,36	2,25
	<b>U+V+W</b>	<b>1,90</b>	<b>1,89</b>	<b>1,87</b>	<b>1,86</b>	<b>1,86</b>	<b>1,85</b>

Tabla 5.9. Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado puesto a tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

### 5.3.2. Ensayos con el neutro del transformador aislado de tierra

En las tablas 5.10 a 5.15 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos #FC1-6 y #FA1-6, es decir, las medidas de las pérdidas y la corriente de vacío realizados con el neutro del arrollamiento de alimentación (arrollamiento secundario) aislado de tierra tanto cuando se dispone del arrollamiento de estabilización cerrado como cuando se dispone abierto. También se presentan las medidas completas realizadas del contenido armónico de las corrientes circulantes por el arrollamiento secundario y tensiones fase-neutro en el arrollamiento primario del transformador. El análisis de todos los resultados de los ensayos se realizará en el apartado 5.3.3 conjuntamente con los resultados de los ensayos realizados con el neutro puesto a tierra.

#### a) Medidas del contenido armónico realizadas con el neutro del transformador aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado

Id Ensayo	Tensión alimentación	Fase	Medida de las pérdidas y corriente de vacío		
			Intensidad eficaz (A)	Intensidad eficaz (%)	Pérdidas (kW)
# FC1	80 %	U	0,2306	-	-
		V	0,1637	-	-
		W	0,2531	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2158</b>	<b>0,040</b>	<b>4,24</b>
# FC2	90 %	U	0,2881	-	-
		V	0,2026	-	-
		W	0,3026	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2644</b>	<b>0,049</b>	<b>5,51</b>
# FC3	100 %	U	0,3726	-	-
		V	0,2635	-	-
		W	0,3836	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,3399</b>	<b>0,063</b>	<b>7,07</b>
# FC4	105 %	U	0,4720	-	-
		V	0,3493	-	-
		W	0,4898	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,437</b>	<b>0,080</b>	<b>8,14</b>
# FC5	110 %	U	0,7293	-	-
		V	0,5386	-	-
		W	0,6621	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,6433</b>	<b>0,119</b>	<b>9,68</b>
# FC6	115 %	U	1,3953	-	-
		V	1,0826	-	-
		W	1,3321	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>1,2700</b>	<b>0,235</b>	<b>12,22</b>

Tabla 5.10. Medida de las pérdidas y la corriente de vacío en las diferentes fases (y el promedio de ellas; suma en caso de las pérdidas) para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	5,86	6,84	7,14	7,33	7,85	8,12
	V	14,81	20,01	20,35	20,85	22,02	26,43
	W	8,83	7,56	7,53	7,61	8,34	9,76
	<b>U+V+W</b>	<b>9,83</b>	<b>11,47</b>	<b>11,67</b>	<b>11,93</b>	<b>12,74</b>	<b>14,77</b>
5	U	7,62	11,40	20,98	29,54	32,58	46,86
	V	5,25	10,10	20,32	30,96	35,76	50,25
	W	6,31	10,39	18,39	27,82	38,93	52,54
	<b>U+V+W</b>	<b>6,39</b>	<b>10,63</b>	<b>19,90</b>	<b>29,44</b>	<b>35,76</b>	<b>49,88</b>
7	U	0,00	5,21	9,13	15,35	18,19	30,71
	V	0,05	1,48	11,02	15,74	20,52	31,23
	W	0,21	2,82	7,96	13,93	22,37	34,17
	<b>U+V+W</b>	<b>0,09</b>	<b>3,17</b>	<b>9,37</b>	<b>15,01</b>	<b>20,36</b>	<b>32,04</b>
9	U	0,00	0,04	0,08	0,42	1,48	2,97
	V	0,02	0,42	1,02	2,73	4,63	8,82
	W	0,24	0,81	1,07	1,09	2,42	4,01
	<b>U+V+W</b>	<b>0,09</b>	<b>0,42</b>	<b>0,72</b>	<b>1,41</b>	<b>2,84</b>	<b>5,27</b>
11	U	0,00	0,04	0,07	3,72	6,48	9,49
	V	0,00	0,02	0,05	4,25	3,02	3,66
	W	0,00	0,34	1,26	3,39	7,44	11,60
	<b>U+V+W</b>	<b>0,00</b>	<b>0,13</b>	<b>0,46</b>	<b>3,79</b>	<b>5,65</b>	<b>8,25</b>
THD (I)	U	9,61	14,28	23,97	34,29	38,71	57,48
	V	15,71	22,47	30,81	40,82	47,07	65,50
	W	10,86	13,18	21,47	32,23	46,33	64,61
	<b>U+V+W</b>	<b>12,06</b>	<b>16,64</b>	<b>25,42</b>	<b>35,78</b>	<b>44,04</b>	<b>62,53</b>

Tabla 5.11. Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	1,46	1,31	1,28	0,59	0,63	1,60
	V	0,55	0,85	1,48	1,39	1,52	1,50
	W	1,50	1,21	1,23	1,22	1,47	1,59
	<b>U+V+W</b>	<b>1,17</b>	<b>1,12</b>	<b>1,33</b>	<b>1,07</b>	<b>1,21</b>	<b>1,56</b>
5	U	0,27	0,39	0,44	0,49	0,61	0,98
	V	0,18	0,26	0,52	0,62	0,71	1,15
	W	0,45	0,44	0,46	0,47	0,64	1,02
	<b>U+V+W</b>	<b>0,30</b>	<b>0,36</b>	<b>0,47</b>	<b>0,53</b>	<b>0,65</b>	<b>1,05</b>
7	U	1,53	1,53	0,89	0,82	0,76	0,49
	V	0,83	0,94	1,65	1,56	1,51	1,34
	W	1,14	1,09	1,19	1,49	1,43	1,26
	<b>U+V+W</b>	<b>1,17</b>	<b>1,19</b>	<b>1,24</b>	<b>1,29</b>	<b>1,23</b>	<b>1,03</b>
9	U	1,07	1,03	0,17	0,13	0,15	0,18
	V	0,15	0,15	1,08	0,99	1,09	1,05
	W	0,99	0,98	1,01	1,01	1,02	1,04
	<b>U+V+W</b>	<b>0,74</b>	<b>0,72</b>	<b>0,75</b>	<b>0,71</b>	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>
11	U	0,44	0,61	0,10	0,10	0,13	0,26
	V	0,01	0,14	0,61	0,53	0,68	0,67
	W	0,59	0,65	0,54	0,46	0,50	0,43
	<b>U+V+W</b>	<b>0,35</b>	<b>0,47</b>	<b>0,42</b>	<b>0,36</b>	<b>0,44</b>	<b>0,45</b>
THD (U)	U	2,43	2,38	1,63	1,13	1,18	1,96
	V	1,02	1,31	2,59	2,45	2,60	2,63
	W	2,25	2,06	2,11	2,27	2,43	2,53
	<b>U+V+W</b>	<b>1,90</b>	<b>1,91</b>	<b>2,11</b>	<b>1,95</b>	<b>2,07</b>	<b>2,38</b>

Tabla 5.12. Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización cerrado.

b) Medidas del contenido armónico realizadas con el neutro del transformador aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización abierto

Id Ensayo	Tensión alimentación	Fase	Medida de las pérdidas y corriente de vacío		
			Intensidad eficaz (A)	Intensidad eficaz (%)	Pérdidas (kW)
# FA1	80 %	U	0,2678	-	-
		V	0,1782	-	-
		W	0,2630	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2363</b>	<b>0,044</b>	<b>4,29</b>
# FA2	90 %	U	0,3186	-	-
		V	0,2112	-	-
		W	0,3035	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,2778</b>	<b>0,051</b>	<b>5,46</b>
# FA3	100 %	U	0,4143	-	-
		V	0,2808	-	-
		W	0,3804	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,3585</b>	<b>0,066</b>	<b>7,07</b>
# FA4	105 %	U	0,5171	-	-
		V	0,3634	-	-
		W	0,4673	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,4493</b>	<b>0,083</b>	<b>8,19</b>
# FA5	110 %	U	0,7538	-	-
		V	0,5580	-	-
		W	0,6867	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>0,6662</b>	<b>0,123</b>	<b>9,74</b>
# FA6	115 %	U	1,4142	-	-
		V	1,0945	-	-
		W	1,3532	-	-
		<b>U+V+W</b>	<b>1,2873</b>	<b>0,239</b>	<b>12,33</b>

Tabla 5.13. Medida de las pérdidas y la corriente de vacío en las diferentes fases (y el promedio de ellas; suma en caso de las pérdidas) para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	6,43	7,69	8,26	8,04	7,75	8,22
	V	15,36	18,63	20,85	21,06	22,30	26,50
	W	7,39	9,63	11,39	11,52	11,74	13,38
	<b>U+V+W</b>	<b>9,73</b>	<b>11,98</b>	<b>13,50</b>	<b>13,54</b>	<b>13,93</b>	<b>16,03</b>
5	U	3,84	6,55	13,18	20,37	31,44	46,55
	V	3,18	6,52	15,36	24,16	35,94	48,87
	W	4,71	8,56	17,60	25,90	38,60	52,60
	<b>U+V+W</b>	<b>3,91</b>	<b>7,21</b>	<b>15,38</b>	<b>23,48</b>	<b>35,33</b>	<b>49,34</b>
7	U	0,11	1,23	5,34	10,41	18,51	30,46
	V	0,81	1,65	7,15	12,80	20,57	30,16
	W	0,42	1,58	6,59	12,29	22,03	34,24
	<b>U+V+W</b>	<b>0,45</b>	<b>1,49</b>	<b>6,36</b>	<b>11,83</b>	<b>20,37</b>	<b>31,62</b>
9	U	0,15	0,28	0,25	0,48	1,52	2,97
	V	0,29	0,83	1,47	2,31	4,81	8,76
	W	0,19	0,57	1,08	1,31	2,33	4,09
	<b>U+V+W</b>	<b>0,21</b>	<b>0,56</b>	<b>0,93</b>	<b>1,37</b>	<b>2,89</b>	<b>5,27</b>
11	U	0,04	0,28	1,55	3,44	6,53	11,69
	V	5,89	5,59	4,01	2,69	0,70	2,37
	W	0,12	0,37	1,78	3,67	7,33	12,61
	<b>U+V+W</b>	<b>2,02</b>	<b>2,08</b>	<b>2,45</b>	<b>3,27</b>	<b>4,85</b>	<b>8,89</b>
THD (I)	U	7,49	10,18	16,52	24,50	37,90	57,51
	V	16,78	20,60	27,20	34,69	47,28	63,89
	W	8,78	13,00	22,07	31,14	46,61	65,53
	<b>U+V+W</b>	<b>11,02</b>	<b>14,59</b>	<b>21,93</b>	<b>30,11</b>	<b>43,93</b>	<b>62,31</b>

Tabla 5.14. Contenido armónico de la intensidad de vacío en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

Orden Armónico	Fase	Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases en % respecto a la componente fundamental					
		Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
1	U	100	100	100	100	100	100
	V	100	100	100	100	100	100
	W	100	100	100	100	100	100
	<b>U+V+W</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
3	U	1,10	0,73	0,78	0,69	0,71	0,61
	V	1,49	1,38	1,29	1,42	1,42	1,39
	W	1,28	1,18	1,44	1,17	1,20	1,17
	<b>U+V+W</b>	<b>1,29</b>	<b>1,10</b>	<b>1,17</b>	<b>1,09</b>	<b>1,11</b>	<b>1,06</b>
5	U	0,14	0,21	0,31	0,48	0,60	0,91
	V	0,37	0,48	0,53	0,62	0,72	0,95
	W	0,41	0,33	0,35	0,47	0,58	0,83
	<b>U+V+W</b>	<b>0,31</b>	<b>0,34</b>	<b>0,40</b>	<b>0,52</b>	<b>0,63</b>	<b>0,90</b>
7	U	0,85	0,89	0,86	0,85	0,73	0,50
	V	1,13	1,22	1,16	1,13	1,10	0,87
	W	1,57	1,55	1,53	1,49	1,41	1,15
	<b>U+V+W</b>	<b>1,18</b>	<b>1,22</b>	<b>1,18</b>	<b>1,16</b>	<b>1,08</b>	<b>0,84</b>
9	U	0,19	0,23	0,16	0,16	0,13	0,16
	V	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,96
	W	1,05	1,02	0,99	1,04	1,00	1,05
	<b>U+V+W</b>	<b>0,73</b>	<b>0,74</b>	<b>0,71</b>	<b>0,73</b>	<b>0,71</b>	<b>0,72</b>
11	U	0,11	0,16	0,16	0,15	0,15	0,18
	V	0,51	0,51	0,55	0,54	0,51	0,53
	W	0,45	0,43	0,45	0,48	0,52	0,65
	<b>U+V+W</b>	<b>0,36</b>	<b>0,37</b>	<b>0,39</b>	<b>0,39</b>	<b>0,39</b>	<b>0,45</b>
THD (U)	U	1,41	1,20	1,22	1,22	1,20	1,23
	V	2,19	2,20	2,14	2,22	2,23	2,19
	W	2,36	2,26	2,39	2,26	2,24	2,21
	<b>U+V+W</b>	<b>1,99</b>	<b>1,89</b>	<b>1,92</b>	<b>1,90</b>	<b>1,89</b>	<b>1,88</b>

Tabla 5.15. Contenido armónico de la tensión fase-neutro en cada una de las fases para distintas tensiones de alimentación cuando se dispone el neutro del arrollamiento alimentado aislado de tierra y el arrollamiento de estabilización abierto.

### 5.3.3. Análisis de los resultados de los ensayos

Finalmente, de cara a analizar el comportamiento en vacío del transformador #A, se presentan a continuación de forma agregada los resultados más significativos de las medidas presentadas en detalle en los apartados 5.3.1 y 5.3.2 en las diferentes configuraciones de ensayo.

Como complemento de lo anterior se mostrarán adicionalmente los resultados de la medida directa de la tensión entre el neutro de transformador y tierra realizada en los ensayos en los que el neutro del transformador se encontraba desconectado de tierra.

#### Influencia del arrollamiento de estabilización en la corriente de vacío y las pérdidas en vacío del transformador

En la tabla 5.16 se puede comprobar que, con los materiales ferromagnéticos actualmente utilizados para la construcción de los núcleos magnéticos, la corriente de vacío adopta unos valores muy reducidos en relación con la corriente nominal del transformador, incluso en regímenes de sobreexcitación intensa. El valor eficaz de la corriente de vacío se muestra prácticamente insensible tanto a la configuración adoptada en el neutro del arrollamiento energizado del transformador (puesto a tierra o aislado de tierra) como a la disposición adoptada del arrollamiento de estabilización (abierto o cerrado).

Tensión alimentación	Intensidad eficaz de la corriente de vacío (en % respecto a la intensidad nominal del transformador)			
	Neutro Puesto a Tierra		Neutro Aislado de Tierra	
	Arrollamiento Estabilización Cerrado	Arrollamiento Estabilización Abierto	Arrollamiento Estabilización Cerrado	Arrollamiento Estabilización Abierto
80 %	0,043	0,043	0,040	0,044
90 %	0,052	0,052	0,049	0,051
100 %	0,067	0,068	0,063	0,066
105 %	0,084	0,084	0,080	0,083
110 %	0,123	0,126	0,119	0,123
115 %	0,244	0,249	0,235	0,239

**Tabla 5.16. Comparación del valor eficaz promedio de la corriente de vacío (como % de la intensidad nominal del transformador) en las diferentes configuraciones de ensayo.**

De cara a analizar el contenido armónico de la corriente de vacío, se presentan en la tabla 5.17 los valores de los porcentajes de los armónicos más significativos respecto a la componente fundamental así como la tasa de distorsión armónica total en las diferentes configuraciones de ensayo. Para mayor claridad en la presentación de los resultados, se muestran únicamente los valores del contenido armónico de la corriente de vacío promedio de las tres fases.

Disposición Neutro	Arollam. Estabilización	Orden Armónico	Contenido armónico de la intensidad de vacío (en % respecto a la componente fundamental)					
			Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
Puesto a Tierra	Cerrado	3	10,10	12,14	13,65	13,76	14,39	16,77
		5	4,05	7,45	15,92	24,11	35,25	49,81
		7	0,43	1,59	6,64	12,22	20,26	32,00
		THD (I)	<b>11,03</b>	<b>14,53</b>	<b>22,26</b>	<b>30,70</b>	<b>43,86</b>	<b>63,06</b>
	Abierto	3	10,05	12,41	14,64	16,39	20,13	25,34
		5	4,03	7,78	15,96	23,74	35,81	50,56
		7	0,53	1,65	6,57	11,91	20,70	32,62
		THD (I)	<b>11,39</b>	<b>15,14</b>	<b>23,27</b>	<b>32,31</b>	<b>47,69</b>	<b>68,45</b>
Aislado de Tierra	Cerrado	3	9,83	11,47	11,67	11,93	12,74	14,77
		5	6,39	10,63	19,90	29,44	35,76	49,88
		7	0,09	3,17	9,37	15,01	20,36	32,04
		THD (I)	<b>12,06</b>	<b>16,64</b>	<b>25,42</b>	<b>35,78</b>	<b>44,04</b>	<b>62,53</b>
	Abierto	3	9,73	11,98	13,50	13,54	13,93	16,03
		5	3,91	7,21	15,38	23,48	35,33	49,34
		7	0,45	1,49	6,36	11,83	20,37	31,62
		THD (I)	<b>11,02</b>	<b>14,59</b>	<b>21,93</b>	<b>30,11</b>	<b>43,93</b>	<b>62,31</b>

Tabla 5.17. Comparación de las principales componentes del contenido armónico de la corriente de vacío (promedio de las tres fases) en las diferentes configuraciones de ensayo.

A partir de los valores mostrados en la tabla 5.17, se puede concluir que los efectos de la disposición del neutro y de la presencia del arrollamiento de estabilización son prácticamente irrelevantes en los resultados obtenidos. Como cabría esperar, la distorsión armónica total crece al aumentar la tensión de alimentación, lo que es debido al creciente grado de saturación magnética del núcleo ferromagnético.

También se puede deducir de la tabla 5.17 que el contenido del armónico de orden 3 de la corriente de vacío tiene un menor peso del que normalmente se reporta en la literatura técnica<sup>43</sup>, y que su peso relativo frente a los armónicos de orden 5 y 7 se reduce al crecer la tensión de

<sup>43</sup> Por ejemplo, en [38] se indica como referencia esperable en la corriente de vacío un contenido armónico respecto a la componente fundamental de 30-50 % (armónico de orden 3), 10-30 % (armónico de orden 5) y 4-10 % (armónico de orden 7). En referencias más antiguas como [36] o [37] o [39] se referencian porcentajes incluso superiores. En todos los casos, se sobreentiende que se trata de transformadores de flujos libres (bancos de transformación o acorazados) no habiendo referencias para transformadores de núcleo trifásico de tres columnas.

alimentación<sup>44</sup>. Cabría explicar ese comportamiento como consecuencia de la presencia de un arrollamiento en triángulo que tendiera a borrar esta componente armónica.

Pero, ¿cómo es posible que este comportamiento de la corriente de vacío se presente de forma similar cuando el arrollamiento de estabilización se encuentra abierto?. La respuesta a esta cuestión se puede encontrar en el comportamiento de la cuba de los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas como si se tratara de un arrollamiento en triángulo por el que pueden circular corrientes homopolares [19][21]. Es decir, el fenómeno frecuentemente ilustrado en la literatura técnica de “borrado” de la componente armónica de orden 3 de la corriente de vacío por parte de los arrollamientos en triángulo, se presenta en los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas tanto con la presencia de arrollamientos de estabilización como con el “triángulo virtual” que supone la cuba.

Por otro lado, también se ilustra con claridad en el análisis de la corriente de vacío que, en el caso de los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas, tanto el reparto de las componentes de secuencia como el reparto del contenido armónico se ve muy influenciado por la asimetría entre las fases extremas y la fase central. En el caso de un transformador de flujos libres, la componente homopolar y la componente armónica de orden 3 son sinónimas. Sin embargo, la asimetría de los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas determina que ni la componente de secuencia homopolar de la corriente de vacío sea exclusivamente armónica de orden 3 (de hecho es principalmente de 50 Hz), ni los armónicos de orden 3 sean exclusivamente homopolares. Esto último explica el hecho de que en caso de disponer el neutro aislado de tierra, si bien se inhibe la circulación de la componente homopolar de la corriente de vacío, sigue habiendo una presencia significativa de componentes armónicas de orden 3.

En definitiva, y volviendo a la cuestión esencial que se trataba de verificar en este apartado, la influencia del arrollamiento de estabilización en la corriente de vacío es poco relevante en un transformador estrella-estrella de núcleo trifásico. Al tener que cerrarse el flujo homopolar por trayectos no ferromagnéticos, la elevada reluctancia de los mismos hace que dicho flujo homopolar sea un porcentaje muy reducido del flujo de magnetización total. Además, se ha comprobado que, en los transformadores actuales, la corriente de vacío juega cuantitativamente un papel menor frente a la corriente asignada del transformador.

#### **Influencia del arrollamiento de estabilización en la estabilidad de la tensión fase-neutro en el funcionamiento en vacío del transformador**

Finalmente, se analizará el contenido armónico de la tensión fase-neutro en el transformador, para lo que se presentan en la tabla 5.18 los valores de los porcentajes de los armónicos más significativos respecto a la componente fundamental así como la tasa de distorsión armónica total en las diferentes configuraciones de ensayo.

De la misma forma que en el caso de la corriente de vacío, para mayor claridad en la presentación de los resultados, se muestran únicamente los valores del contenido armónico de la tensión fase-neutro promedio de las tres fases.

---

<sup>44</sup> No se debe interpretar este hecho como que los armónicos de orden 3 de la corriente de vacío se reducen en términos absolutos. Lo que disminuye es el porcentaje de estos armónicos respecto a la componente fundamental.

Disposición Neutro	Arollam. Estabilización	Orden Armónico	Contenido armónico de la tensión fase-neutro (en % respecto a la componente fundamental)					
			Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
Puesto a Tierra	Cerrado	3	1,03	1,09	1,08	1,09	1,10	1,04
		5	0,32	0,36	0,42	0,50	0,61	0,92
		7	1,19	1,21	1,15	1,16	1,04	0,79
		THD (U)	<b>1,84</b>	<b>1,89</b>	<b>1,86</b>	<b>1,89</b>	<b>1,85</b>	<b>1,83</b>
	Abierto	3	1,16	1,08	1,06	1,05	1,09	1,04
		5	0,28	0,34	0,41	0,49	0,63	0,88
		7	1,20	1,23	1,19	1,16	1,04	0,84
		THD (U)	<b>1,90</b>	<b>1,89</b>	<b>1,87</b>	<b>1,86</b>	<b>1,86</b>	<b>1,85</b>
Aislado de Tierra	Cerrado	3	1,17	1,12	1,33	1,07	1,21	1,56
		5	0,30	0,36	0,47	0,53	0,65	1,05
		7	1,17	1,19	1,24	1,29	1,23	1,03
		THD (U)	<b>1,90</b>	<b>1,91</b>	<b>2,11</b>	<b>1,95</b>	<b>2,07</b>	<b>2,38</b>
	Abierto	3	1,29	1,10	1,17	1,09	1,11	1,06
		5	0,31	0,34	0,40	0,52	0,63	0,90
		7	1,18	1,22	1,18	1,16	1,08	0,84
		THD (U)	<b>1,99</b>	<b>1,89</b>	<b>1,92</b>	<b>1,90</b>	<b>1,89</b>	<b>1,88</b>

Tabla 5.18. Comparación de las principales componentes del contenido armónico de la tensión fase-neutro (promedio de las tres fases) en las diferentes configuraciones de ensayo.

Desde un punto de vista cuantitativo, la magnitud de las sobretensiones que tiene que afrontar el aislamiento del transformador como consecuencia del contenido armónico se puede calcular por medio de la expresión (5.2):

$$U_{eficaz\ total}(\%) = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 + \dots} \tag{5.2}$$

Tomando la referencia de  $U_1 = 100\%$  y con los valores de  $U_3$ ,  $U_5$  y  $U_7$  según la tabla 5.18, resultan unas sobretensiones inferiores al 0,1% independientemente de la tensión de alimentación.

Es decir, las sobretensiones debidas al contenido armónico son, a efectos prácticos, totalmente irrelevantes incluso con altos niveles de sobreexcitación.

Como complemento de lo anterior se presentan en la tabla 5.19 los resultados de la tensión medida entre el neutro de transformador y tierra realizada en los ensayos en los que el neutro del transformador se encontraba aislado de tierra.

Disposición Neutro	Arollam. Estabilización	Orden Armónico	Medida de la tensión neutro-tierra (en V)					
			Tensión Alim. 80 %	Tensión Alim. 90 %	Tensión Alim. 100 %	Tensión Alim. 105 %	Tensión Alim. 110 %	Tensión Alim. 115 %
Aislado de Tierra	Cerrado	1	0,008	0,010	0,012	0,013	0,014	0,045
		3	0,013	0,028	0,058	0,113	0,210	0,497
		5	0,009	0,018	0,040	0,076	0,142	0,333
		7	0,004	0,005	0,009	0,043	0,090	0,226
		<b>TOTAL</b>	<b>0,078</b>	<b>0,088</b>	<b>0,111</b>	<b>0,154</b>	<b>0,249</b>	<b>0,595</b>
	Abierto	1	0,167	0,212	0,350	0,532	0,870	1,70
		3	0,561	0,970	2,02	3,43	6,50	15,36
		5	0,075	0,181	0,532	1,07	2,13	4,40
		7	0,095	0,130	0,232	0,623	1,44	3,20
		<b>TOTAL</b>	<b>2,68</b>	<b>3,02</b>	<b>3,58</b>	<b>4,45</b>	<b>6,82</b>	<b>15,2</b>

Tabla 5.19. Medida de la tensión neutro-tierra durante los ensayos con el neutro aislado de tierra.

Como se puede deducir de la tabla anterior, teniendo en cuenta que la tensión asignada del arrollamiento alimentado es 16.050 V, los valores de la tensión neutro-tierra resultan extraordinariamente reducidos incluso en el caso de disponer el arrollamiento de estabilización abierto, de forma que el fenómeno descrito como “neutro inquieto” en el apartado 5.1 puede considerarse totalmente irrelevante desde el punto de vista cuantitativo.

## 5.4. Resumen del capítulo

La problemática asociada a los terceros armónicos de intensidad y tensión en el funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella constituyó uno de los principales argumentos justificativos de la existencia de los arrollamientos de estabilización. Esta misma argumentación sigue formando parte de la literatura y normativa técnica actual, así como de los criterios de decisión de las empresas eléctricas respecto a estos arrollamientos.

En el apartado 5.1 de este capítulo se ha realizado un análisis cualitativo del comportamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella que determina las condiciones de funcionamiento en las que cabe esperar un contenido relevante de tercer armónico de corriente o de tercer armónico de tensión, en función del diseño del núcleo magnético o de las condiciones de puesta a tierra de los neutros. Una visión estrictamente teórica y cualitativa puede inducir a concluir precipitadamente la necesidad de los arrollamientos de estabilización para corregir situaciones nocivas para el transformador derivadas del comportamiento no lineal del núcleo magnético y la corriente de magnetización.

Con el objetivo de acotar cuantitativamente el peso de la corriente de magnetización y su contenido armónico en el global de la corriente asignada de un transformador actual, se han presentado en el apartado 5.2 las medidas de la intensidad de vacío y su contenido armónico en varios de los transformadores objeto de estudio experimental en la tesis. Tal y como se ha podido comprobar, los materiales con los que actualmente se construyen los núcleos magnéticos requieren de unas corrientes de magnetización muy reducidas, lo cual limita las potenciales consecuencias nocivas descritas en un plano estrictamente teórico.

Como complemento de lo anterior, se ha realizado un estudio experimental sobre uno de los transformadores en el que se han planteado cuatro configuraciones de ensayo en función de la disposición de puesta a tierra del neutro y de la presencia o no de arrollamiento de estabilización cerrado. En cada una de estas configuraciones de ensayo se han realizado medidas de la corriente de energización y su contenido armónico, así como de la tensión fase-neutro y su contenido armónico, para seis valores de la tensión de alimentación. También se ha medido el desplazamiento del neutro respecto de tierra en el caso de transformadores con el neutro aislado, obteniéndose valores inferiores al uno por mil incluso en el caso de que el arrollamiento de estabilización se encuentre abierto.

Los resultados de este estudio experimental nos han permitido comprobar que, en ninguna de las configuraciones de ensayo, los terceros armónicos de intensidad y tensión presentan valores que induzcan el más mínimo riesgo en el funcionamiento del transformador. Asimismo, se ha comprobado que el arrollamiento de estabilización juega un papel prácticamente irrelevante en el funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella.

## Capítulo 6

# **Influencia de los arrollamientos de estabilización en el calentamiento de la cuba ante cargas desequilibradas de los transformadores estrella-estrella**

Como se vio en el capítulo 2, junto con el comportamiento armónico derivado del funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella, la problemática asociada a los desequilibrios en las intensidades de las tres fases constituyó uno de los argumentos principales que condujeron a la utilización masiva de los arrollamientos de estabilización en estos transformadores. Dentro de esta problemática, las sobretensiones producidas por el desplazamiento del neutro fueron el principal riesgo a mitigar perseguido en el origen de los arrollamientos de estabilización. Y este riesgo, como se verá en detalle en este capítulo, afecta esencialmente a los transformadores de flujos libres.

Desde el punto de vista del funcionamiento ante cargas desequilibradas en transformadores estrella-estrella de flujos ligados, la principal influencia de los arrollamientos de estabilización a analizar se sitúa en el calentamiento potencialmente peligroso que se puede producir debido al incremento en la circulación de flujos homopolares no compensados durante escenarios de explotación desequilibrados en la cuba u otros elementos estructurales del transformador como, por ejemplo, las estructuras y tornillería de apriete del núcleo magnético. Por ello, el principal objetivo del capítulo 6 es valorar el riesgo de calentamiento de la cuba por la circulación de flujos homopolares.

En un primer apartado introductorio se analizará de forma cualitativa el funcionamiento en régimen de desequilibrio de carga de los transformadores estrella-estrella, en línea con lo realizado habitualmente en los libros de texto especializados y no especializados de transformadores.

En el apartado 6.2 se realizará una breve revisión bibliográfica relacionada con el calentamiento de la cuba que se puede producir como consecuencia de la circulación por la misma de flujos homopolares derivados de los desequilibrios. Esta revisión se complementará con aspectos relacionados con las medidas de control del flujo de dispersión.

En el apartado 6.3 se estudiará la magnitud de los desbalances de amperios-vuelta que se producen en diferentes tipologías constructivas de los transformadores estrella-estrella de flujos ligados durante diferentes configuraciones de funcionamiento. Ello se acompañará de un estudio cualitativo de las trayectorias de los flujos homopolares en todas las circunstancias estudiadas, cuyo detalle se desarrollará en el apéndice D.

En el apartado 6.4 se mostrarán los resultados obtenidos en diferentes ensayos de calentamiento ante alimentación homopolar con el objetivo de cuantificar el riesgo real de calentamiento de la cuba por encima de valores inadmisibles en el funcionamiento en servicio de los transformadores.

Finalmente, en el apartado 6.5 se sustanciará todo lo planteado en el capítulo estableciendo una metodología de evaluación del riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores estrella-estrella.

## 6.1. Análisis cualitativo del comportamiento ante cargas desequilibradas de los transformadores estrella-estrella

Durante su funcionamiento en la red, los transformadores se pueden ver sometidos a los siguientes desequilibrios:

- Cargas desequilibradas.
- Faltas asimétricas, principalmente cortocircuitos monofásicos a tierra y también cortocircuitos entre dos fases, a tierra o no.
- Fases interrumpidas (una o dos fases).

El primero de los casos, si bien tuvo su importancia en el origen de los sistemas eléctricos de potencia, no tiene una presencia significativa en las redes actuales de alta y media tensión.

En cuanto a las otras dos situaciones, se corresponden con perturbaciones del correcto funcionamiento del sistema eléctrico, que deben ser detectadas y eliminadas por las protecciones eléctricas con la rapidez adecuada. Así ocurre normalmente con los cortocircuitos habituales que se producen en las redes eléctricas. Sin embargo, en el caso de cortocircuitos de elevada impedancia o en el caso de fases interrumpidas, no siempre es posible garantizar una detección y despeje rápido y selectivo, con consecuencias potencialmente muy peligrosas para el transformador [52].

El comportamiento de los transformadores ante los desequilibrios mencionados se puede analizar estudiando los desequilibrios fase-fase y los desequilibrios fase-neutro.

La existencia de un desequilibrio entre fases en los arrollamientos secundarios (debido, por ejemplo, a un cortocircuito bifásico sin contacto con tierra), provoca un sistema desequilibrado en el que están presentes intensidades de secuencia directa y de secuencia inversa, pero no de secuencia homopolar<sup>45</sup>. Independientemente del grupo de conexión y del tipo de construcción del transformador, existirá un equilibrio entre las fuerzas magnetomotrices de cada columna,

---

<sup>45</sup> Ello se puede deducir fácilmente haciendo un análisis de componentes simétricas. Es importante entender que las componentes homopolares o de secuencia cero de un sistema desequilibrado de corrientes o tensiones, obtenidas típicamente mediante la aplicación de la metodología de componentes simétricas, son magnitudes fasoriales de frecuencia igual a la fundamental (50 Hz). Ello es así porque dicho sistema desequilibrado está formado por ondas sinusoidales distintas entre cada una de las fases. Sin embargo, las componentes homopolares o de secuencia cero analizadas en el funcionamiento en vacío de los transformadores, se derivan del armónico de orden 3, y sus múltiplos impares, de la descomposición armónica de ondas no sinusoidales (consecuencia del comportamiento no lineal de los núcleos magnéticos) pero iguales y desfasadas 120° para las tres fases. En este caso, la frecuencia de estas componentes homopolares es triple (150 Hz) respecto a la fundamental. Por tanto, en el plano de Gauss, las componentes homopolares del primer caso giran a la misma velocidad que las componentes fundamentales. Ello no ocurre en el segundo caso, en el que las componentes homopolares giran a una velocidad relativa de 100 Hz respecto a las componentes fundamentales. En ambos casos, las impedancias homopolares (internas del transformador o externas de la red) que gobernarán su funcionamiento tendrán un valor triple en un caso respecto a otro ( $Z=j\omega L$ ).

es decir, en cada columna, los amperios-vuelta creados por la carga secundaria quedan exactamente compensados por amperios-vuelta de reacción del primario<sup>46</sup>. Por ello, este tipo de cargas desequilibradas no produce flujos adicionales a los propios del funcionamiento normal del transformador, ni por tanto sobretensiones por desequilibrios en las tensiones simples (desplazamientos de neutro). En cuanto a las intensidades, el desequilibrio de las intensidades secundarias se transfiere a las intensidades primarias<sup>47</sup>, sin mayor trascendencia que el inadecuado aprovechamiento de la potencia del transformador.

En conclusión, los desequilibrios fase-fase no ocasionan problemas significativos en el funcionamiento de los transformadores, siendo irrelevante a estos efectos la presencia o no de arrollamientos de estabilización.

En el caso de desequilibrios entre fase y neutro en los arrollamientos secundarios (debido, por ejemplo, a un cortocircuito monofásico o bifásico a tierra o a fases interrumpidas), el sistema desequilibrado generado en las intensidades secundarias, ocasionará la presencia de componentes de secuencia directa, inversa y homopolar. Por tanto, en este caso, la presencia del arrollamiento de estabilización, así como otros aspectos que tengan influencia sobre las impedancias de secuencia homopolar del transformador, tendrán una influencia determinante en el funcionamiento del transformador ante estos desequilibrios.

A continuación, se describe el funcionamiento ante situaciones de desequilibrio fase-neutro de los transformadores estrella-estrella. En primer lugar se analizará el funcionamiento sin arrollamiento de estabilización para posteriormente estudiar la influencia del mismo. En ambos casos lógicamente los desequilibrios fase-neutro a estudiar afectarán a transformadores con grupos de conexión cuyo lado secundario disponga de un neutro puesto a tierra (por suponer la carga en este lado). Con ello se presupone, al igual que se hizo en el apartado 5.1, que la alimentación está situada en la red a la que se conecta el arrollamiento primario y la carga en la red a la que se conecta el arrollamiento secundario. El carácter reversible de los transformadores supone que el análisis realizado sea conceptualmente válido en la situación contraria.

**a) Comportamiento ante desequilibrios fase-neutro de transformadores sin arrollamiento de estabilización y el neutro del lado alimentado puesto a tierra (configuración YN-yn)**

La circulación de la corriente secundaria de desequilibrio fase-neutro, determina un sistema de corrientes de secuencia directa, inversa y homopolar (de valor igual a un tercio de la suma de las tres corrientes de línea).

Dado que el arrollamiento primario permite la circulación de corrientes homopolares (a través del circuito del neutro puesto a tierra), despreciando la reactancia de dispersión del transformador y la impedancia homopolar de la red de alimentación, cada una de las componentes de secuencia de las corrientes secundarias se transfiere al arrollamiento primario sin más diferencia que la relación de transformación<sup>48</sup>. En el fondo, en esta situación ocurre que la corriente de cada una de las fases del arrollamiento primario depende únicamente de la corriente de la fase correspondiente del arrollamiento secundario, trabajando por tanto el

<sup>46</sup> Considerando despreciable el efecto de la corriente de magnetización.

<sup>47</sup> En el caso de grupos de conexión con índice horario par (por ejemplo, Yy0), el desequilibrio producido por la circulación de corriente entre dos fases, se traduce en el primario en circulación de corriente por las dos fases homólogas. Sin embargo, en grupos de conexión con índice horario impar (por ejemplo, Yd11), el desequilibrio se traduce en el primario en circulación de corriente por las tres fases.

<sup>48</sup> Nuevamente el efecto de la corriente de magnetización se considera despreciable en el análisis.

transformador trifásico como si fueran tres transformadores monofásicos. Las fuerzas magnetomotrices de cada columna están equilibradas y los flujos en cada fase son idénticos y decalados 120°. Por el conductor de neutro del arrollamiento primario circulará una corriente igual a la suma de las tres corrientes de línea primarias.

El funcionamiento indicado en el párrafo anterior es debido a que, al disponer de neutro puesto a tierra en el arrollamiento primario, la red alimentadora (despreciando su impedancia interna) impone las tensiones de línea y también las tensiones fase-neutro, por lo que, despreciando el flujo disperso, el flujo en el núcleo (o flujo común) según la ley de Faraday también vendrá impuesto por la red y, por tanto está exento de componentes de secuencia inversa y homopolar.

En realidad, en un transformador existe una impedancia de cortocircuito (debida a las resistencias de los arrollamientos y, sobre todo, a las reactancias de dispersión), que es la suma de la impedancia del arrollamiento primario y la del secundario. Cuando por las fases del arrollamiento primario circula una corriente que tiene una cierta componente homopolar, se tiene una caída de tensión en la impedancia del arrollamiento primario. La fuerza electromotriz de una fase del primario es la resta de la tensión fase-neutro de red menos las caídas de tensión, y dado que las caídas de tensión tienen una componente homopolar las fuerzas electromotrices también la tendrán. Ello, junto con el efecto de la impedancia interna de la red, supone que en un transformador **YN-yn** con carga desequilibrada sí que haya un cierto flujo homopolar.

Sin embargo, en términos cuantitativos aproximados, la impedancia de cortocircuito de un transformador viene siendo, como mucho de un 15%. En caso de suponer que la impedancia del arrollamiento primario fuera de un 7,5%, si el valor de la componente homopolar de las intensidades fuera igual a la intensidad nominal, la componente homopolar de la caída de tensión en el arrollamiento primario sería del 7,5%<sup>49</sup>. Si, por ejemplo, la componente homopolar es del 10% de la corriente nominal, la caída de tensión en el arrollamiento primario sería de un 0,75% y el flujo homopolar correspondiente sería el 0,75% del flujo nominal. En este caso, los flujos homopolares en transformadores **YN-yn** serían por tanto reducidos.

En situaciones de desequilibrio fase-neutro debidas a cortocircuitos, la corriente homopolar puede adoptar un valor mucho más elevado, si bien el correcto funcionamiento del sistema de protección despejaría dicho funcionamiento con rapidez.

En resumen, el comportamiento de los transformadores **YN-yn** ante cargas desequilibradas fase-neutro, indistintamente de su tipo constructivo, no produce en general flujos homopolares muy significativos ni sobretensiones relevantes en las fases durante un tiempo prolongado, si bien las corrientes que circulan por las líneas de alimentación contienen una componente homopolar (de 50 Hz).

**b) Comportamiento ante desequilibrios fase-neutro de transformadores sin arrollamiento de estabilización y el neutro del lado alimentado aislado de tierra (configuración Y-yn)**

De la misma forma que en el caso anterior, la circulación de la corriente secundaria de desequilibrio fase-neutro, determina un sistema de corrientes de secuencia directa, inversa y homopolar (cuyo valor es igual a un tercio de la corriente de desequilibrio).

<sup>49</sup> Considerando que típicamente la potencia de cortocircuito de la red será al menos del orden de 25 veces la potencia del transformador, una impedancia interna de la red del 10% se convierte, en base del transformador, en un 0,4%, cuyo efecto puede considerarse despreciable en esta aproximación.

El sistema de intensidades secundarias de secuencia directa provoca que por el primario circule un sistema de intensidades también de secuencia directa que prácticamente<sup>50</sup> compensa los amperios-vuelta secundarios, de forma que la diferencia entre los amperios-vuelta primarios y secundarios es la que crea el flujo de secuencia directa en el núcleo, cuyo valor es el normal de operación del transformador.

El sistema de intensidades secundarias de secuencia inversa provoca que por el primario circule un sistema de intensidades también de secuencia inversa que compensa totalmente los amperios-vuelta secundarios, de forma que en el núcleo no existe un sistema de flujos de secuencia inversa<sup>51</sup>.

Sin embargo, en este caso el sistema de intensidades secundarias de secuencia homopolar no puede provocar la circulación por el primario de un sistema de intensidades de secuencia homopolar, ya que, al carecer el primario de conexión a tierra a través del neutro, las corrientes homopolares no disponen de camino de retorno. De esta forma, las corrientes homopolares secundarias no compensadas se convierten en corrientes de excitación, y crean tres flujos homopolares. Los flujos homopolares inducirán fuerzas electromotrices en las fases del transformador que se sumarán a las inducidas por los flujos de secuencia directa. La suma de ambas generará un desequilibrio en las tensiones simples, provocando sobretensiones en alguna de las fases (desplazamiento de neutro).

La magnitud de los flujos homopolares, y por tanto de las sobretensiones generadas, depende de la reluctancia del camino ferromagnético sobre el que se cierran:

- En el caso de transformadores de flujos ligados (núcleo magnético de tres columnas), los flujos homopolares deben cerrar su camino por el exterior del núcleo magnético (cuba, aceite, elementos de apriete, etc.), que es un circuito de alta reluctancia. Por ello, el valor de los flujos homopolares y, consecuentemente el de las sobretensiones, se verá reducido.
- En el caso de transformadores de flujos libres (resto de tipos de núcleo magnético), los flujos homopolares pueden cerrar su trayectoria por un camino ferromagnético de baja reluctancia, tomando, por tanto, un valor mucho más elevado y generando sobretensiones (y desplazamiento de neutro) importantes en las fases<sup>52</sup>.

Para transformadores de flujos libres, la sobretensión que se produce en las tensiones fase-neutro es tal que prácticamente se alcanza el valor de las tensiones de línea en caso de un cortocircuito monofásico a tierra, provocando un desplazamiento del neutro de aproximadamente el 100 % [21]. Expresado en otros términos, mantener un desplazamiento de neutro inferior al 5 % requeriría asegurar corrientes de circulación por neutro ante cargas desequilibradas inferiores al 1%.

---

<sup>50</sup> Los amperios-vuelta no compensados son debidos a la corriente de magnetización.

<sup>51</sup> No puede existir un flujo de secuencia inversa en el núcleo, pues si existiera, el sistema de fuerzas electromotrices inducidas sería tal, que proporcionaría unas tensiones de línea de secuencia inversa, lo cual es contradictorio con el punto de partida, es decir, que la red alimenta el transformador con un sistema equilibrado de tensiones de secuencia directa.

<sup>52</sup> Una forma alternativa de analizar este caso es la siguiente. La corriente secundaria fase-neutro demanda una corriente de la red, principalmente de su fase homóloga, que al no poderse cerrar por el neutro lo hace por las otras dos fases. En ellas no existe circulación por sus secundarios, por lo que sus amperios-vuelta (de un valor comparable a los nominales) no estarán equilibrados, creando un flujo muy elevado, sólo limitado por la saturación de su circuito magnético, y una sobreexcitación (sobretensiones) de gran consideración. A este fenómeno se le suele denominar como efecto asfixia (*choking effect*).

En conclusión, el comportamiento de los transformadores **Y-yn** de flujos libres ante desequilibrios fase-neutro, es claramente insatisfactorio, ya que incluso pequeños desequilibrios provocan fuertes asimetrías en las tensiones.

Para el caso de transformadores con núcleo de tres columnas, al tener una menor impedancia homopolar, el fenómeno queda bastante amortiguado. El desplazamiento de neutro queda limitado por debajo del 5 % con corrientes de neutro del orden del 25 % de la nominal [21], según la impedancia de cortocircuito. En este caso, si bien la sobretensión es moderada, existe una circulación de flujo homopolar por la cuba y los elementos estructurales que puede generar un calentamiento de los mismos de valor apreciable [19][49]. De la misma forma que se indicó anteriormente, en el caso de faltas asimétricas el valor de las corrientes y flujos homopolares así como las consecuentes sobretensiones son de mayor valor hasta la actuación de las protecciones.

**c) Comportamiento ante desequilibrios fase-neutro de transformadores con arrollamiento de estabilización**

Si en el transformador **Y-yn** analizado en el apartado anterior, ya sea en construcción de flujos libres o de flujos ligados, se dispone adicionalmente de un arrollamiento de estabilización conectado en triángulo, los flujos homopolares originados por la carga fase-neutro inducen, en cada una de las fases de dicho arrollamiento, tres fuerzas electromotrices. Al disponer el triángulo de un camino eléctrico cerrado, dichas fuerzas electromotrices crean una corriente que tenderá a oponerse a la causa que la originó. Es decir, el arrollamiento de estabilización tenderá a compensar los amperios-vuelta de las corrientes primarias y secundarias y “borrar” los flujos homopolares, disminuyendo hasta valores despreciables la magnitud de las sobretensiones producidas.

En el caso de los transformadores **YN-yn**, la menor impedancia homopolar que presenta el arrollamiento de estabilización en comparación con la que presenta el circuito de la red primaria (impedancia homopolar del arrollamiento primario en serie con la impedancia homopolar equivalente de la red), hará que una gran parte de la componente homopolar se quede dentro del triángulo, de modo que la componente homopolar de corriente en la red primaria se ve muy reducida.

Por tanto, la existencia de un arrollamiento de estabilización en triángulo elimina prácticamente los inconvenientes de los desequilibrios fase-neutro de los transformadores **YN-yn** e **Y-yn**.

## **6.2. Calentamiento de la cuba por circulación de flujos homopolares**

Del funcionamiento del transformador ante cargas desequilibradas descrito en el apartado precedente se deduce que uno de los principales riesgos en este tipo de situación a los que se ve sometido un transformador de núcleo trifásico de tres columnas sin arrollamiento de estabilización es el calentamiento excesivo de la cuba y otros elementos estructurales por la circulación de flujos homopolares.

A diferencia de la problemática asociada a la circulación del flujo de dispersión por la cuba, y las pérdidas consecuentes, que se tratan extensivamente en la literatura técnica [51], resulta en cierta medida sorprendente que el problema específico de los flujos homopolares no ha sido considerado históricamente con la profundidad que probablemente merece. En 1940, Garin sugiere de forma

bastante laxa la posibilidad de un cierto calentamiento de la cuba debido a la circulación de flujos homopolares por la misma [19]. Más adelante, Descans en la revista interna del fabricante de transformadores ACEC [49] advierte de manera más contundente que, al ocurrir cortocircuitos monofásicos, los transformadores de tres columnas, en caso de disponer de un neutro conectado a tierra y otro aislado, pueden tener un desplazamiento de neutro significativo y un calentamiento excesivo. De ello concluye la necesidad de incluir arrollamientos de compensación en triángulo para este tipo de transformadores con una potencia superior a 10 MVA.

En este mismo sentido, aunque con matices distintos, la normativa IEC [32] y la normativa IEEE [34] apuntan los peligros de un calentamiento de la cuba por la circulación de flujos homopolares. En el caso del IEEE Std. C57.105-1978 (R2008) [34], se indica que el flujo homopolar que se puede producir con desbalances de carga o faltas a tierra en caso de retorno fuera del núcleo puede causar calentamientos por corrientes parásitas en elementos estructurales, especialmente en la cuba<sup>53</sup>. Por su parte, la norma IEC 60076-8 [32] indica que en transformadores de tres columnas con conexión **YN-y** e **Y-yn** no hay amperios-vuelta equilibrados y se establecen corrientes magnetizantes que afectan a la simetría de las tensiones entre fase y neutro, creando limitaciones en la corriente homopolar admisible por los calentamientos que pueden causar los flujos homopolares.

Merecen también una especial mención el artículo de Ngneueu, Mailhot y Munar [50] en el que muestran el mayor calentamiento que se produce en la cuba en un transformador sin pantallas de aluminio frente a otro con pantallas, así como el artículo de Penabad, Alvarez y López [55] en el que realizan un exhaustivo estudio del significativo riesgo de calentamiento de la cuba de un transformador de tres columnas con pantallas magnéticas cuando no dispone de arrollamiento de estabilización frente al caso en el que sí que se dispone del mismo.

Como se indicó anteriormente, la problemática asociada a la circulación de flujos de dispersión por la cuba es una cuestión extensamente tratada en la literatura técnica. Se indican a continuación algunas consideraciones al respecto que tienen relación con el análisis que se realizará en los apartados 6.3 y 6.4 respecto a la circulación por la cuba de flujos homopolares.

La existencia de flujos de dispersión en los transformadores, además de los negativos efectos relacionados con la caída de tensión y las pérdidas, permite controlar la cuantía de las corrientes de cortocircuito. Ello supone que la normativa técnica aconseje unos valores mínimos de la impedancia de cortocircuito, mayores cuanto mayor es la potencia asignada del transformador. En el diseño de transformadores, la relación existente entre la intensidad de campo magnético y la potencia asignada del equipo determina que, en transformadores grandes (en los que ambos parámetros son proporcionales) el flujo de dispersión que circula por la cuba sea mucho mayor que en transformadores pequeños (en los que la intensidad de campo magnético es proporcional a la raíz cuarta de la potencia asignada) [93]. No obstante, es bien conocido que no todo el flujo de dispersión del arrollamiento más externo tiene su circulación por la cuba. Factores como la distancia entre la cuba y los arrollamientos, la diferencia de altura de los arrollamientos o la existencia de arrollamientos de tipo “*split-winding*” o divididos en secciones, influyen en la cuantía del flujo que circula por la cuba [94][95].

---

<sup>53</sup> Sorprendentemente, esta norma es especialmente incisiva con el peligro de calentamiento de los transformadores de tres columnas con conexión **YN-yn**. Advierte del severo calentamiento que se puede producir en cualquier condición que pueda generar tensión homopolar, en especial en faltas a tierra en la red secundaria. Sin embargo, no hace mención a configuraciones **YN-y**.

El flujo magnético que circula por la cuba provoca pérdidas por las corrientes inducidas en ella y pérdidas por histéresis. También se producen pérdidas en otros elementos metálicos estructurales [96] pero las pérdidas son mayores en los elementos de mayor área de paso del flujo. A pesar de ello, en elementos estructurales de reducidas dimensiones, como la tornillería de apriete, se pueden alcanzar temperaturas excesivas si las pérdidas por unidad de volumen son elevadas. Unas pérdidas elevadas en la cuba reducen el rendimiento del transformador y provocan calentamientos locales en la cuba que reducen la fiabilidad del transformador y acortan su vida útil [97], además de que pueden generar una descomposición del aceite con aparición de gases combustibles [98] que confundan en el diagnóstico de averías en el transformador mediante la habitual técnica de análisis de gases disueltos en el aceite.

A la hora de reducir las pérdidas causadas por los flujos magnéticos que circulan por la cuba y otros elementos estructurales cabe aplicar una o varias de las siguientes medidas [38]:

- Adecuado dimensionamiento de los elementos del transformador, como una adecuada elección de las distancias entre conductores y elementos estructurales, de la forma y dimensiones de los latiguillos, del espesor, forma y superficie de los elementos metálicos estructurales o de las dimensiones de los arrollamientos [95].
- Selección adecuada de los materiales constructivos, en especial del acero de la cuba.
- Utilización de pantallas electromagnéticas, típicamente láminas de aluminio o cobre, que presentan un peso reducido y se amoldan fácilmente al elemento a proteger, por lo que son idóneas para apantallar elementos estructurales de formas complejas.
- Utilización de pantallas magnéticas, también llamados *shunts* magnéticos, que están formadas por chapas magnéticas soldadas a la cuba que proporcionan un camino alternativo para el flujo magnético.

En resumen, los fabricantes de los transformadores deben analizar cuidadosamente su diseño para garantizar que la circulación de los flujos magnéticos por la cuba y otros elementos metálicos no provoca calentamientos inadmisibles, teniendo en cuenta la duración que puede llegar a tener esta circulación. En este sentido, el control de los flujos por la cuba requiere de un adecuado diseño y selección de materiales y, en caso de ser necesario, incorporar pantallas electromagnéticas o pantallas magnéticas adosadas a las paredes de la cuba. Es relevante señalar que la primera de las soluciones (pantallas de láminas de aluminio) tiene el efecto adicional de disminuir la impedancia homopolar del transformador, mientras que las pantallas magnéticas tienen el efecto contrario, es decir, aumentan la impedancia homopolar.

La práctica empleada habitualmente por los fabricantes de los transformadores de potencia consiste en disponer pantallas magnéticas a partir de una determinada potencia asignada del equipo<sup>54</sup>. Según se indicó en el capítulo 3, varios de los transformadores objeto de estudio experimental de la tesis disponen de pantallas magnéticas como elemento de control del flujo de dispersión, en concreto, los identificados como tipología constructiva #2.

---

<sup>54</sup> La política en este sentido de cada fabricante es heterogénea pero es frecuente que, para potencias superiores a 30-40 MVA, los transformadores dispongan de pantallas magnéticas.

### 6.3. Análisis del balance de amperios-vuelta y las trayectorias de flujo homopolar

En su funcionamiento normal, los transformadores requieren de una cierta corriente para la creación del flujo magnético, razón por la cual los amperios-vuelta de los arrollamientos primario y secundario no están exactamente compensados. No obstante, en el funcionamiento a secuencia directa el flujo se establece fundamentalmente por el núcleo magnético, lo que debido a su elevada permeabilidad magnética implica una corriente de magnetización muy reducida, conllevando unos amperios-vuelta primarios y secundarios casi idénticos.

En el caso de funcionamiento a secuencia homopolar, en los transformadores de núcleo magnético de tres columnas el flujo magnético establece parte de su trayectoria por el núcleo pero otra parte se establece por el aceite, por la cuba y por otros elementos estructurales, lo que supone que la corriente necesaria para crear el flujo magnético sea significativamente mayor. Además, la cuba actúa como una espira cerrada en cortocircuito para el flujo homopolar, de forma que en ella se engendran corrientes que también intervendrán en el balance de amperios-vuelta. Por otra parte, resulta claro que la presencia del arrollamiento de estabilización (en aquellos casos en los que el triángulo está cerrado) también jugará un papel significativo en dicho balance de amperios-vuelta.

En este apartado se va a realizar un análisis del balance de amperios-vuelta para cada una de las medidas de impedancia homopolar y para cada uno de los tres transformadores objeto de estudio del capítulo 4, dado que se registraron durante los ensayos los módulos y argumentos de las corrientes que circulaban por los arrollamientos primario y secundario y, en su caso, por el arrollamiento de estabilización. Esta información se complementará y contrastará con un análisis cualitativo de las trayectorias del flujo homopolar cuyo detalle se desarrolla en el apéndice D.

La fuerza magnetomotriz que da lugar al flujo homopolar es la suma de los amperios-vuelta homopolares creados por los arrollamientos primario y secundario, así como por el arrollamiento de estabilización en caso de que exista. Dado que la cuba del transformador constituye un camino adicional que permite la circulación de corriente homopolar, también intervendrá en el balance de amperios-vuelta<sup>55</sup>. Por tanto, el balance de los amperios-vuelta en el transformador (con una adecuada elección de las referencias) puede expresarse según la expresión (6.1), o de forma alternativa, según la expresión (6.2).

$$FMM_0 = (N \cdot I)_{AT} + (N \cdot I)_{BT} + (N \cdot I)_{EST} - (I)_{cuba} \quad (6.1)$$

$$FMM_0 + (I)_{cuba} = (N \cdot I)_{AT} + (N \cdot I)_{BT} + (N \cdot I)_{EST} \quad (6.2)$$

En base a las expresiones anteriores, se pretende identificar, a partir de un adecuado razonamiento de los desbalances de amperios-vuelta, aquellas configuraciones de funcionamiento de los transformadores estrella-estrella en las que cabría esperar un cierto riesgo de calentamiento de la cuba debido al flujo homopolar. En este aspecto, ha de recordarse la equivalencia entre los ensayos de alimentación homopolar realizados y los modos

---

<sup>55</sup> Como se ha indicado ya en capítulos anteriores, este comportamiento de la cuba se identifica también como equivalente a un arrollamiento virtual en triángulo [19] [21] [77].

de funcionamiento real de un transformador estrella-estrella según se indicó en el apartado 4.2.1.

En las tablas 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran los balances de amperios-vuelta obtenidos a partir de los diferentes ensayos de alimentación homopolar realizados sobre los transformadores de tipología constructiva #1, #2 y #3<sup>56</sup> descritos en el capítulo 4 y el apéndice B. Aunque las medidas y el cálculo según la ecuación (6.2) se han efectuado en módulo y argumento, para mayor simplicidad en la interpretación se muestran en las tablas únicamente el módulo de los amperios-vuelta expresado como porcentaje de los establecidos en el arrollamiento energizado.

Id. ensayo	Balance de amperios-vuelta - Transformador #1			
	(N·I) <sub>AT</sub>	(N·I) <sub>BT</sub>	(N·I) <sub>EST</sub>	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>cuba</sub>
A0A	100	-	-	100
A0C	100	-	78,7	21,8
A1A	100	87,2	-	12,9
A1C	100	113,5	25,1	13,1
B0A	-	100	-	100
B0C	-	100	90,9	9,1
B1A	99,1	100	-	1,0
B1C	38,3	100	61,3	0,8

**Tabla 6.1. Balance de amperios-vuelta entre los diferentes arrollamientos y la cuba (expresados en porcentaje respecto al arrollamiento energizado) obtenido en los ensayos a secuencia homopolar efectuados sobre el transformador #1.**

Id. ensayo	Balance de amperios-vuelta - Transformador #2			
	(N·I) <sub>AT</sub>	(N·I) <sub>BT</sub>	(N·I) <sub>EST</sub>	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>cuba</sub>
A0A	100	-	-	100
A0C	100	-	99,6	1,2
A1A	100	97,1	-	2,9
A1C	100	118,2	20,0	0,3
B0A	-	100	-	100
B0C	-	100	99,2	1,5
B1A	90,3	100	-	9,7
B1C	23,2	100	73,4	3,6

**Tabla 6.2. Balance de amperios-vuelta entre los diferentes arrollamientos y la cuba (expresados en porcentaje respecto al arrollamiento energizado) obtenido en los ensayos a secuencia homopolar efectuados sobre el transformador #2.**

<sup>56</sup> Se trata de los transformadores identificados respectivamente en el capítulo 3 como transformador #B (para la tipología constructiva #1), transformador #F (para la tipología constructiva #2) y transformador #G (para la tipología constructiva #3).

Id. ensayo	Balance de amperios-vuelta - Transformador #3			
	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{cuba}$
A0A	100	-	-	100
A0C	100	-	97,1	3,1
A1A	100	87,3	-	13,0
A1C	100	54,3	44,2	1,6
B0A	-	100	-	100
B0C	-	100	90,3	9,7
B1A	97,5	100	-	2,6
B1C	89,5	100	4,0	6,6

**Tabla 6.3. Balance de amperios-vuelta entre los diferentes arrollamientos y la cuba (expresados en porcentaje respecto al arrollamiento energizado) obtenido en los ensayos a secuencia homopolar efectuados sobre el transformador #3.**

A partir de la información mostrada en las tablas anteriores, complementada con el análisis detallado de las trayectorias de los flujos homopolares para cada uno de los transformadores presentado en el apéndice D, se pueden identificar aquellas situaciones en las que el flujo presenta una parte relevante de su circulación a través de la cuba, con el potencial peligro de calentamiento de ésta.

En la medida en la que la magnitud de la corriente homopolar que crea el flujo homopolar viene fijada por el propio funcionamiento en explotación real del transformador en la red (igual que queda fijada en los ensayos por el arrollamiento energizado), resultará un mayor riesgo de calentamiento de la cuba cuando el valor del desbalance sea más elevado, es decir, un mayor valor de  $FMM_0 + (I)_{cuba}$ .

En este sentido, los casos más evidentes de riesgo derivan de las condiciones de funcionamiento en las que se produce un desequilibrio importante en el lado primario o secundario de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización estando el neutro de dicho lado puesto a tierra y el neutro del otro lado aislado de tierra (configuraciones representadas en los ensayos A0A y B0A). En este caso, los amperios-vuelta homopolares creados por el desequilibrio en el arrollamiento del lado puesto a tierra no pueden ser compensados salvo por las corrientes engendradas en la cuba, que actúa como si fuera un triángulo virtual. Dichas corrientes, que se concentran en un pequeño porcentaje del espesor de la cuba por el efecto piel, pueden llegar a producir calentamientos inadmisibles de la misma si la magnitud del desequilibrio excede un cierto límite.

Sin embargo, a diferencia de la creencia comúnmente extendida respecto al papel que juega el arrollamiento de estabilización en evitar el riesgo de calentamiento de la cuba ante desequilibrios, se comprueba que ni su presencia asegura la existencia de riesgos de calentamiento de la cuba en todos los casos, ni su ausencia genera dichos riesgos en todas las situaciones. La presencia de pantallas magnéticas adosadas en la cuba, el estado de conexión de los neutros primario y secundario del transformador y la disposición relativa de los arrollamientos determinarán, además de la existencia de un arrollamiento de estabilización cerrado, diferentes escenarios de

desbalances relevantes de amperios-vuelta que generarán un mayor o menor riesgo de calentamiento de la cuba ante desequilibrios en la red primaria o secundaria.

En la tabla 6.4 se presenta un resumen de las diferentes configuraciones estudiadas y el riesgo que presentan de calentamiento de la cuba. De cara a simplificar el resumen, se ha clasificado el riesgo en función de los siguientes criterios:

- Riesgo elevado (A), sombreado en rojo: en aquellos casos en los que el desbalance de amperios-vuelta es del 100 %, con posibilidad de corrientes muy significativas por la cuba.
- Riesgo moderado-alto (B), sombreado en naranja: en aquellos casos en los que el desbalance de amperios-vuelta está en el entorno del 20 %, con posibilidad de corrientes significativas por la cuba.
- Riesgo moderado-bajo (C), sombreado en amarillo: en aquellos casos en los que el desbalance de amperios-vuelta está en el entorno del 10 %, con posibilidad de corrientes moderadas por la cuba.
- Riesgo bajo (D), sombreado en verde: en aquellos casos en los que el desbalance de amperios-vuelta está por debajo del 5 % sin posibilidad de corrientes relevantes por la cuba<sup>57</sup>.

Id. ensayo	Condiciones de funcionamiento del transformador			Riesgo de calentamiento de la cuba en función de la tipología constructiva del transformador		
	Arrollamiento de estabilización	Neutros Primario / Secundario	Desequilibrio	Tipología #1	Tipología #2	Tipología #3
A0A	Abierto	PAT / AIS	Lado primario	A	A	A
A0C	Cerrado	PAT / AIS	Lado primario	B	D	D
A1A	Abierto	PAT / PAT	Lado primario	C	D	C
A1C	Cerrado	PAT / PAT	Lado primario	C	D	D
B0A	Abierto	AIS / PAT	Lado secundario	A	A	A
B0C	Cerrado	AIS / PAT	Lado secundario	C	D	D (*)
B1A	Abierto	PAT / PAT	Lado secundario	D	D (*)	D
B1C	Cerrado	PAT / PAT	Lado secundario	D	D	D (*)

**Tabla 6.4. Riesgo de calentamiento de la cuba de los transformadores estrella-estrella en función de sus condiciones de funcionamiento y de su tipología constructiva.**

<sup>57</sup> Se incluyen en este grupo las configuraciones en las que se tenía un desbalance de amperios-vuelta superior al 5% pero sobre las que existía una sospecha justificada de que podía haber un error en las medidas. Estas situaciones se reflejan en la tabla con (\*).

## 6.4. Ensayos de calentamiento con alimentación homopolar

A lo largo del apartado anterior, y complementado en el apéndice D, se ha realizado un análisis detallado de las trayectorias del flujo homopolar y de los desbalances de amperios-vuelta que se pueden producir en las distintas configuraciones de funcionamiento de los distintos tipos constructivos de transformadores estrella-estrella, identificando los casos en los que existe un riesgo más significativo de que se produzcan calentamientos inadmisibles en la cuba.

En la práctica, incluso en aquellas configuraciones de mayor riesgo de calentamiento, la magnitud y duración de los desequilibrios está acotada por los sistemas de protección de la red, en general, y del transformador de potencia, en particular. Un valor habitual de ajuste de las protecciones del transformador limita la circulación de la corriente de neutro a la mitad de la corriente asignada del transformador (0,5 pu), o lo que sería lo mismo, se limita a un valor de 0,167 pu la corriente homopolar que puede circular por cada una de las tres fases del lado que genera el desequilibrio.

Dado que valores por encima de esta limitación supondrían la actuación del sistema de protección en tiempos inferiores a un segundo, y que los fenómenos térmicos en los transformadores que conllevan calentamientos inadmisibles requieren tiempos de permanencia de decenas de minutos u horas, las posibilidades de funcionamiento en regímenes de desequilibrio de dicha duración quedarían acotadas a desequilibrios en la carga significativos (situación extremadamente inhabitual en las redes eléctricas actuales), faltas serie (apertura accidental de una o dos fases) o faltas a tierra altamente resistivas.

Con el objetivo de valorar en qué medida estas situaciones de desequilibrio no detectado por el sistema de protección que se pueden dar en la práctica provocan desbalances de amperios-vuelta y circulación de corrientes por la cuba, se han planteado una serie de ensayos de calentamiento con alimentación homopolar en diversos transformadores que cuantifiquen el impacto de los desequilibrios en el calentamiento de la cuba.

Desafortunadamente, los ensayos de calentamiento exigen unas condiciones que únicamente es factible satisfacer en los laboratorios de alta tensión de los fabricantes, requiriéndose unos tiempos y costes que limitan la posibilidad de realizar estos ensayos.

No obstante, se han podido realizar algunos ensayos sobre un transformador de tipología #1 y sobre un transformador #2 que arrojan conclusiones experimentales significativas que se presentan a continuación. Adicionalmente, la validación realizada sobre la metodología empleada permitirá ampliar en trabajos futuros el conjunto de transformadores y condiciones de funcionamiento ensayadas.

### 6.4.1. Ensayo de calentamiento con alimentación homopolar en transformador estrella-estrella de tipología #1

Idealmente, una caracterización experimental completa que complemente el análisis de las trayectorias de flujo homopolar y los desbalances de amperios-vuelta realizado en el apartado 6.3, de cara a evaluar el comportamiento de los transformadores estrella-estrella de cada una de las tipologías constructivas en lo relativo al calentamiento de la cuba ante cargas desequilibradas, requeriría efectuar un total de 8 ensayos por cada tipología, uno por cada una de las configuraciones de funcionamiento estudiadas.

Como se ha indicado anteriormente, existen importantes restricciones al respecto en cuanto a la disponibilidad, el tiempo y el coste de estos ensayos.

En lo que respecta a los transformadores de tipología #1, se han efectuado cuatro ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #B2 descrito en el capítulo 3, cuyas principales características se reproducen de nuevo a continuación en la tabla 6.5.

Parámetros Constructivos	Valores del transformador objeto de estudio
Potencia asignada (MVA)	25/25/8,33
Tensiones asignadas (kV)	45/16,05/3
Corrientes asignadas (A)	320,75/899,30/1603,69
Grupo de Conexión	YNyn0+d11
Núcleo magnético	Tres columnas
Arrollam. Estabiliz.	Interno
Pantallas Magnéticas	NO
Tensión cortocircuito (%)	10,7

**Tabla 6.5. Principales características constructivas del transformador #B2, objeto de los ensayos de calentamiento homopolar en transformador de tipología constructiva #1.**

Los cuatro ensayos de calentamiento realizados responden a las posibles configuraciones de funcionamiento con alimentación homopolar desde el lado primario (configuraciones A0A, A0C, A1A y A1C), ya que, como se observó en el apartado anterior, es este lado el que genera en su conjunto un mayor riesgo de calentamiento de la cuba.

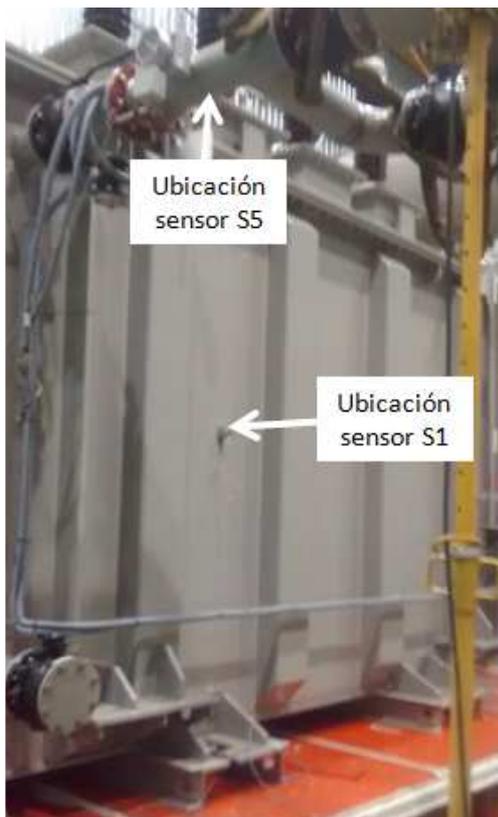
Las condiciones de ensayo y la captación de medidas con las que debe realizarse este ensayo de calentamiento homopolar no están descritas en la normativa al no tratarse de un ensayo que suela efectuarse sobre los transformadores fabricados.

Para realizar el seguimiento de la temperatura durante los ensayos se utilizaron 7 sensores PT-100 de 4 hilos que proporcionan una indicación de la temperatura en el punto en el cual se fijan a través de una señal eléctrica analógica. La ubicación de los sensores la siguiente<sup>58</sup>:

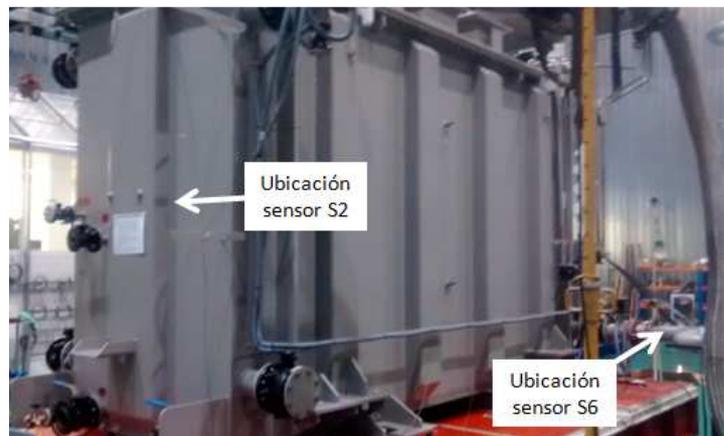
- Un medidor de temperatura (sonda S1) en la pared lateral ancha de la cuba del transformador más próxima a las bornas del arrollamiento primario, fijada a media altura (ver figura 6.1 (a)).
- Un medidor de temperatura (sonda S2) en la pared lateral estrecha de la cuba del transformador más alejada del cambiador de tomas en carga, buscando una mayor proximidad de la parte activa a la cuba, fijada a media altura (ver figura 6.1 (b)).

<sup>58</sup> La ubicación definitiva de los sensores adosados a las paredes de la cuba fue decidida tras realizar un análisis mediante cámara termográfica, de forma que se situaron en aquellos puntos que más se calentaban. Adicionalmente, se realizaron medidas de comprobación con la cámara termográfica a lo largo de los ensayos, comprobando la coherencia de los resultados obtenidos con las sondas PT-100.

- Un medidor de temperatura (sonda S3) en la pared lateral ancha de la cuba del transformador más próxima a las bornas del arrollamiento secundario, fijadas a media altura (ver figura 6.1 (c)).
- Un medidor de temperatura (sonda S4) junto al pocito de medida de temperatura de la capa superior del aceite.
- Un medidor de temperatura (sonda S5) en la tubería de salida del aceite desde la cuba del transformador hacia los aerorrefrigerantes (ver figura 6.1 (a)).
- Un medidor de temperatura (sonda S6) en la tubería de llegada del aceite desde los aerorrefrigerantes a la cuba del transformador. La temperatura medida por esta sonda se puede considerar como la temperatura del aceite en la parte inferior de los arrollamientos (ver figura 6.1 (b)).
- Una medida de la temperatura ambiente (sonda S7) situada alejada de la zona de influencia térmica del transformador.



(a) Ubicación sondas S1 y S5



(b) Ubicación sondas S2 y S6



(c) Ubicación sonda S3

Figura 6.1. Ubicación de los medidores de temperatura durante los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #1.

Todos los ensayos se realizaron alimentando el transformador por su lado primario mediante una alimentación monofásica entre las tres fases (cortocircuitadas entre sí) y el neutro, estando el cambiador de tomas en carga en la toma de tensión asignada (toma 11), con la cuba puesta a tierra y con el sistema de refrigeración en funcionamiento OFAF, tal y como estaría en su funcionamiento en servicio.

Los ensayos se realizaron de menor a mayor riesgo de calentamiento de la cuba, comenzando en primer lugar por los ensayos con el arrollamiento secundario cortocircuitado (ensayos con configuración A1C y A1A). A continuación se realizó el ensayo con configuración A0C y finalmente se realizó el ensayo con configuración A0A.

Como se ha indicado anteriormente, no existiendo una normativa respecto a las condiciones con las que efectuar estos ensayos, el aspecto más determinante consiste en definir a qué corriente debe alimentarse el transformador. Dado que estos ensayos tampoco formaban parte de las condiciones contractuales establecidas en las especificaciones técnicas de adquisición del transformador, era imprescindible un acuerdo con el fabricante de forma que se minimizara el riesgo de generar daños en el transformador, que no estarían cubiertos por las garantías pactadas en la adquisición. En este sentido, se acordó fijar una corriente para los distintos ensayos según la tabla 6.6.

Configuración de ensayo	Corriente de alimentación respecto a la corriente asignada	
	Corriente de fase (pu)	Corriente de neutro (pu)
A1C	0,40	1,20
A1A	0,40	1,20
A0C	0,33	1,00
A0A	0,10	0,30

**Tabla 6.6. Corrientes de ensayo pactadas para la ejecución de los ensayos de calentamiento homopolar en las distintas configuraciones de ensayo realizadas sobre el transformador de tipología #1.**

Cabe destacar de antemano que, según se ha indicado, los resultados obtenidos en el ensayo A0A no garantizarían la exención del riesgo de calentamiento de la cuba durante el funcionamiento real del transformador en la red dado que los sistemas de protección del transformador, como ya se indicó, están habitualmente ajustados para detectar y despejar funcionamientos con un valor de la corriente de neutro de 0,5 pu respecto a la corriente asignada del transformador.

#### a) Configuración de ensayo A1C

A continuación se muestran los resultados del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C, reflejándose en la tabla 6.7 las magnitudes eléctricas durante el ensayo y en la tabla 6.8 las medidas de las sondas de temperatura, que también han sido representadas en la figura 6.2. Como se puede observar en la tabla 6.7, la aplicación de la corriente de alimentación hasta alcanzar el valor final de ensayo se realizó de forma progresiva en varios escalones.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tensión aplicada fase-neutro (V)	Corriente de neutro primaria (A)	Corriente de neutro primaria (pu)	Corriente de neutro secundaria (A)	Corriente arrollamiento estabilización (A)	Potencia activa consumida (kW)
0:00	123,9	50,1	0,16	-	-	-
0:07	250,2	100,5	0,31	-	-	-
0:16	500,6	200,7	0,63	-	-	-
0:23	750,3	301,7	0,94	-	-	-
<b>0:34</b>	<b>953,7</b>	<b>384,6</b>	<b>1,20</b>	<b>1248,0</b>	<b>305,0</b>	<b>38,72</b>
4:27	954,2	384,0	1,20	1248,0	305,0	-

Tabla 6.7. Magnitudes eléctricas registradas durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C en el transformador de tipo #1.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tª cuba lado AT (Sonda 1) (°C)	Tª cuba lado estrecho (Sonda 2) (°C)	Tª cuba lado BT (Sonda 3) (°C)	Tª cuba superior (Sonda 4) (°C)	Tª tubería salida aceite (Sonda 5) (°C)	Tª tubería retorno aceite (Sonda 6) (°C)	Tª ambiente (Sonda 7) (°C)
0:00	21,3	20,4	22,5	22,9	21,7	21,9	20,1
0:15	21,5	21,5	24,0	22,5	21,8	22,9	20,1
0:30	22,1	23,1	26,0	29,7	22,2	25,4	20,2
0:45	31,4	35,9	36,2	46,2	22,7	32,4	20,3
1:00	38,2	45,0	42,6	46,0	30,7	27,8	20,4
1:15	39,4	46,9	43,6	47,6	31,2	29,5	20,5
1:30	39,9	47,9	44,2	48,5	31,8	30,8	20,7
1:45	40,5	48,5	44,7	49,1	32,5	31,7	20,9
2:00	41,0	49,1	46,6	50,7	33,5	32,6	21,2
2:15	42,2	49,2	48,9	52,1	35,1	32,0	21,2
2:30	41,5	47,4	52,1	53,6	36,0	30,8	21,2
2:45	41,2	47,3	51,5	55,0	36,8	29,7	21,1
3:00	42,0	47,9	52,1	55,9	37,9	28,8	21,1
3:15	42,8	48,7	52,6	57,1	37,8	36,0	21,0
3:30	43,6	51,1	50,4	55,4	37,3	35,5	21,1
3:45	43,7	51,6	50,3	55,7	37,7	36,0	21,4
3:50	43,7	51,7	50,3	59,2	32,3	36,5	21,5
3:55	43,8	51,8	50,4	60,5	32,0	37,3	21,6
4:00	43,8	51,9	50,6	56,9	32,1	36,1	21,6
4:05	44,0	51,9	50,7	56,8	32,2	36,3	21,7
4:10	44,0	52,1	50,8	57,1	32,4	36,4	21,8
4:15	44,0	52,1	50,9	57,7	32,5	36,6	21,8
4:20	44,1	52,2	51,0	58,0	32,8	40,9	21,9
4:25	44,2	52,3	51,1	57,9	32,7	33,2	22,0
4:30	44,3	52,4	51,3	58,3	32,8	33,2	22,0
<b>4:35</b>	<b>44,4</b>	<b>52,4</b>	<b>51,4</b>	<b>58,3</b>	<b>32,9</b>	<b>33,3</b>	<b>22,1</b>
4:40	43,0	48,3	47,3	33,8	32,7	32,2	22,1

Tabla 6.8. Temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C en el transformador de tipo #1.

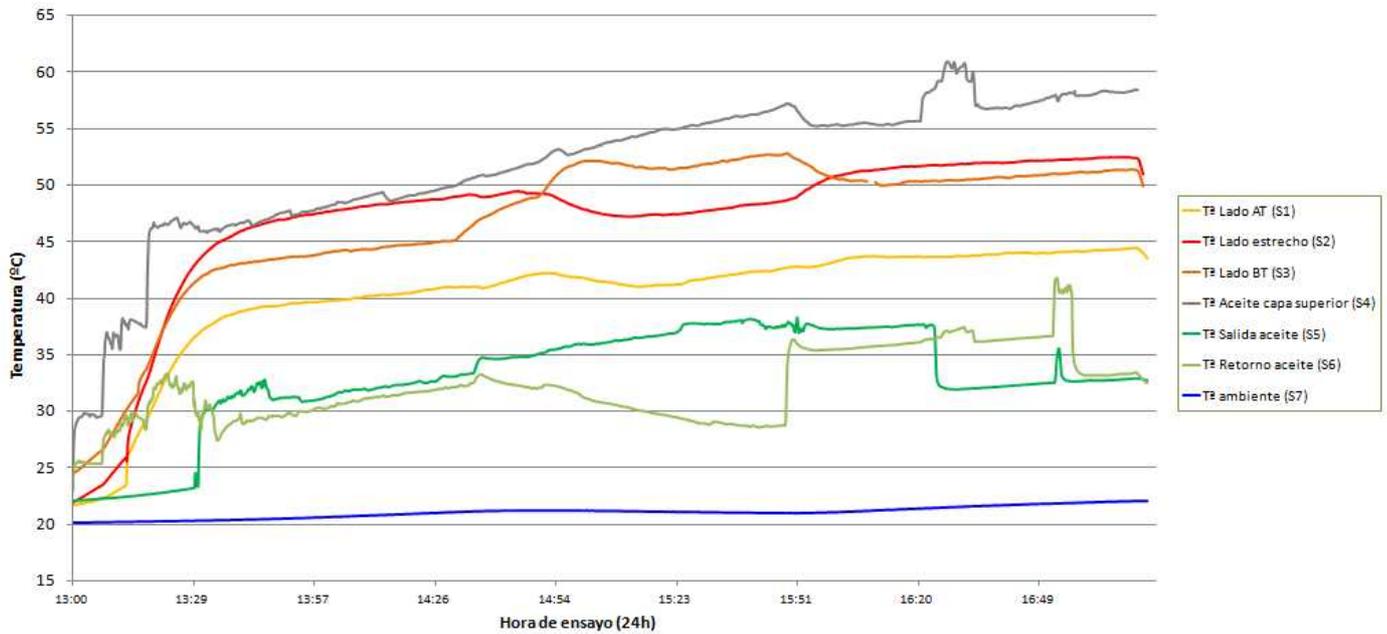


Figura 6.2. Evolución de las temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C en el transformador de tipo #1<sup>59</sup>.

Aprovechando las medidas de corriente circulante por los arrollamientos del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar se realizó, de forma análoga a lo indicado en el apartado 6.3, un análisis del desbalance de amperios-vuelta cuyo resultado se muestra en la tabla 6.9. Comparando esta tabla con la tabla 6.1 obtenida para el mismo ensayo en el transformador #B, también de tipología #1, se puede observar la gran similitud entre los resultados obtenidos.

Id. Ensayo	(N·I) <sub>AT</sub>	(N·I) <sub>BT</sub>	(N·I) <sub>EST</sub>	FMM <sub>0</sub> - (I) <sub>CUBA</sub>
A1C	100	116,0	27,5	11,6

Tabla 6.9. Balance de amperios-vuelta del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C en el transformador de tipo #1.

En la tabla 6.10 se muestran los resultados de las temperaturas finales alcanzadas por las sondas de temperatura.

<sup>59</sup> La evolución de la temperatura de la capa superior del aceite, de la tubería de salida de aceite y de la tubería de retorno de aceite muestran un comportamiento algo errático. Ello es debido a que, a diferencia del resto de sondas, estas sondas estaban metidas en una vaina metálica y durante el ensayo de calentamiento ante corriente homopolar se establecen flujos magnéticos por la cuba que alcanzan las vainas metálicas de las sondas e inducen en ellas corrientes, lo que genera una cierta inestabilidad e imprecisión en su medida. En los ensayos siguientes (A1A, A0C y A0A) se aisló térmica y eléctricamente el elemento sensor de la vaina metálica, siendo las lecturas mucho más estables.

Ubicación medida de temperatura	Sonda	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancha lado AT	S1	44,4	22,3
Pared cuba lateral estrecha (lado contrario CTC)	S2	52,4	30,3
Pared cuba lateral ancha lado BT	S3	51,4	29,3
Tapa cuba (capa superior aceite) (*)	S4	58,3	36,2
Tubería salida de aceite (*)	S5	32,9	10,8
Tubería retorno de aceite (*)	S6	33,3	11,2
Temperatura ambiente	S7	22,1	-

**Tabla 6.10. Resumen del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1C en el transformador de tipo #1.**

Nota (\*): Estas medidas no son fiables en el ensayo A1C como consecuencia de la imanación de la vaina metálica en la que estaban colocadas estas sondas.

En resumen, de los resultados obtenidos durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar, durante la configuración de funcionamiento A1C y alcanzando una corriente de neutro primaria del 120% de la corriente asignada, se observa que el calentamiento máximo que se produce en las paredes de la cuba se sitúa alrededor de los 30 °C.

Recordando el análisis realizado sobre las trayectorias de flujos homopolares y el desbalance de amperios-vuelta en un transformador de tipología constructiva #1 (en aquel caso el transformador #B), para esta configuración de ensayo se determinaba un riesgo moderado-bajo de calentamiento de la cuba.

Considerando ambos resultados, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador estrella-estrella alimentado con corrientes homopolares en el lado primario (significativamente superiores a las que el sistema de protección admitiría) estando ambos neutros puestos a tierra y con el arrollamiento de estabilización cerrado puede considerarse perfectamente admisible y exento de riesgo de calentamiento de la cuba.

#### **b) Configuración de ensayo A1A**

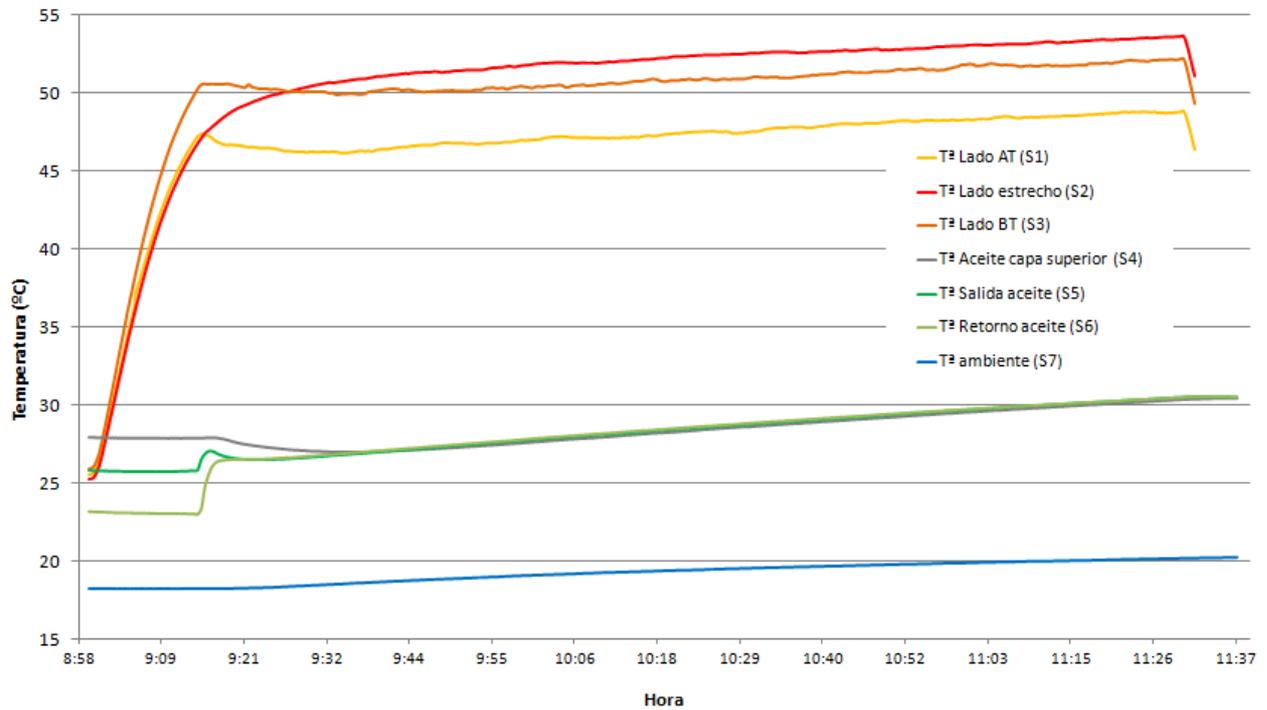
A continuación se muestran los resultados del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A, reflejándose en la tabla 6.11 las magnitudes eléctricas durante el ensayo y en la tabla 6.12 las medidas de las sondas de temperatura, que también han sido representadas en la figura 6.3. Como se puede observar en la tabla 6.11, la aplicación de la corriente de alimentación hasta alcanzar el valor final de ensayo se realizó de forma progresiva con un escalón intermedio.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tensión aplicada fase-neutro (V)	Corriente de neutro primaria (A)	Corriente de neutro primaria (pu)	Corriente de neutro secundaria (A)	Corriente arrollamiento estabilización (A)	Potencia activa consumida (kW)
0:00	242,2	94,0	0,29	-	N/A	-
1:10	986,3	384,2	1,20	958,0	N/A	33,87
3:20	986,4	383,9	1,20	958,0	N/A	-

Tabla 6.11. Magnitudes eléctricas registradas durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #1.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tª cuba lado AT (Sonda 1) (°C)	Tª cuba lado estrecho (Sonda 2) (°C)	Tª cuba lado BT (Sonda 3) (°C)	Tª cuba superior (Sonda 4) (°C)	Tª tubería salida aceite (Sonda 5) (°C)	Tª tubería retorno aceite (Sonda 6) (°C)	Tª ambiente (Sonda 7) (°C)
0:00	24,5	24,5	24,9	28,0	25,8	23,0	18,4
0:15	24,5	24,4	24,9	28,0	25,8	22,9	18,3
0:30	24,4	24,4	24,9	27,9	25,6	23,9	18,3
0:45	24,8	24,6	25,1	28,1	26,1	23,5	18,3
1:00	29,4	29,1	30,3	27,9	25,7	23,1	18,3
1:15	46,8	48,2	50,6	27,9	26,8	26,4	18,3
1:30	46,2	50,6	50,0	27,0	26,7	26,8	18,5
1:45	46,7	51,3	50,2	27,2	27,3	27,3	18,8
2:00	47,1	51,9	50,5	27,7	27,8	27,9	19,1
2:15	47,2	52,2	50,9	28,2	28,4	28,4	19,4
2:30	47,6	52,6	51,0	28,7	28,8	28,8	19,6
2:45	48,0	52,8	51,4	29,2	29,3	29,3	19,7
2:50	48,2	52,8	51,6	29,3	29,5	29,5	19,8
2:55	48,2	53,0	51,6	29,5	29,6	29,6	19,9
3:00	48,3	53,0	51,8	29,6	29,8	29,7	19,9
3:05	48,4	53,1	51,7	29,7	29,9	29,9	20,0
3:10	48,4	53,2	51,8	29,9	30,1	30,0	20,0
3:15	48,6	53,3	51,9	30,0	30,2	30,1	20,0
3:20	48,7	53,4	52,1	30,2	30,3	30,3	20,1
<b>3:25</b>	<b>48,7</b>	<b>53,5</b>	<b>52,1</b>	<b>30,3</b>	<b>30,5</b>	<b>30,4</b>	<b>20,1</b>
3:30	44,5	49,2	47,3	30,4	30,6	30,5	20,2

Tabla 6.12. Temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #1.



**Figura 6.3. Evolución de las temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #1.**

De la misma forma que en el ensayo anterior, aprovechando las medidas de corriente circulante por los arrollamientos del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar se realizó un análisis del desbalance de amperios-vuelta cuyo resultado se muestra en la tabla 6.13, similares a los obtenidos para el mismo ensayo en el transformador #B (tabla 6.1).

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 - (I)_{CUBA}$
A1A	100	89,0	-	11,0

**Tabla 6.13. Balance de amperios-vuelta del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #1.**

En la tabla 6.14 se muestran los resultados de las sondas de temperatura más representativas.

Ubicación medida de temperatura	Sonda	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancha lado AT	S1	48,7	28,6
Pared cuba lateral estrecha (lado contrario CTC)	S2	53,5	33,4
Pared cuba lateral ancha lado BT	S3	52,1	32,0
Tapa cuba (capa superior aceite)	S4	30,3	10,2
Tubería salida de aceite	S5	30,5	10,4
Tubería retorno de aceite	S6	30,4	10,3
Temperatura ambiente	S7	20,1	-

**Tabla 6.14. Resumen del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #1.**

En resumen, de los resultados obtenidos durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar, durante la configuración de funcionamiento A1A y alcanzando una corriente de neutro primaria del 120% de la corriente asignada, se observa que el calentamiento máximo que se produce en las paredes de la cuba se sitúa ligeramente por encima de los 30 °C, de forma muy similar al ensayo A1C.

Al igual que en el caso anterior, el análisis realizado sobre las trayectorias de flujos homopolares y el desbalance de amperios-vuelta en un transformador de tipología constructiva #1 también determinó para la configuración de ensayo A1A un riesgo moderado-bajo de calentamiento de la cuba.

Con todo ello, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador estrella-estrella alimentado con corrientes homopolares en el lado primario (significativamente superiores a las que el sistema de protección admitiría) estando ambos neutros puestos a tierra y con el arrollamiento de estabilización abierto puede considerarse perfectamente admisible y exento de riesgo de calentamiento de la cuba.

### c) Configuración de ensayo A0C

A continuación se muestran los resultados del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0C, reflejándose en la tabla 6.15 las magnitudes eléctricas durante el ensayo y en la tabla 6.16 las medidas de las sondas de temperatura, que también han sido representadas en la figura 6.4. En este caso, la aplicación de la corriente de alimentación hasta alcanzar el valor final de ensayo se realizó sin ningún escalón intermedio.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tensión aplicada fase-neutro (V)	Corriente de neutro primaria (A)	Corriente de neutro primaria (pu)	Corriente de neutro secundaria (A)	Corriente arrollamiento estabilización (A)	Potencia activa consumida (kW)
0:00	1250	308,9	0,96	N/A	736,0	46,92
2:36	1250	308,3	0,96	N/A	736,0	-

Tabla 6.15. Magnitudes eléctricas registradas durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0C en el transformador de tipo #1.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tª cuba lado AT (Sonda 1) (°C)	Tª cuba lado estrecho (Sonda 2) (°C)	Tª cuba lado BT (Sonda 3) (°C)	Tª cuba superior (Sonda 4) (°C)	Tª tubería salida aceite (Sonda 5) (°C)	Tª tubería retorno aceite (Sonda 6) (°C)	Tª ambiente (Sonda 7) (°C)
0:00	40,4	43,4	43,5	30,4	30,4	30,3	20,3
0:15	50,6	54,3	55,3	30,6	30,7	30,6	20,4
0:30	54,4	59,2	59,6	31,2	31,4	31,3	20,6
0:45	54,8	60,0	60,1	31,9	32,1	32,0	20,7
1:00	55,6	60,0	60,3	32,6	32,7	32,5	20,8
1:15	55,5	60,7	60,8	33,1	33,2	33,1	20,8
1:20	55,6	60,9	60,9	33,3	33,4	33,3	20,8
1:25	55,8	61,2	61,1	33,5	33,6	33,4	20,9
1:30	55,9	61,3	61,1	33,7	33,8	33,6	20,9
1:35	56,1	61,3	61,0	33,9	33,9	33,8	21,0
1:40	56,1	61,4	61,4	34,0	34,1	33,9	21,1
1:45	56,4	61,4	61,6	34,2	34,2	34,1	21,1
1:50	56,5	61,5	61,6	34,3	34,4	34,2	21,2
1:55	56,5	61,6	61,9	34,5	34,6	34,4	21,2
2:00	56,6	61,8	61,9	34,7	34,7	34,5	21,3
2:05	56,7	61,8	61,9	34,8	34,8	34,7	21,4
2:10	56,8	62,0	62,2	35,0	35,0	34,8	21,4
2:15	57,0	62,1	62,4	35,1	35,1	34,9	21,5
2:20	57,0	62,0	62,0	35,3	35,3	35,1	21,6
2:25	57,1	62,2	62,1	35,4	35,4	35,2	21,6
2:30	57,2	62,1	62,3	35,5	35,5	35,3	21,7
2:35	57,3	62,2	62,4	35,7	35,7	35,5	21,7
2:40	57,4	62,4	62,3	35,8	35,8	35,6	21,8
<b>2:45</b>	<b>57,4</b>	<b>62,3</b>	<b>62,6</b>	<b>35,9</b>	<b>35,9</b>	<b>35,7</b>	<b>21,8</b>
2:47	51,9	56,8	55,9	36,0	35,9	35,7	21,8

Tabla 6.16. Temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0C en el transformador de tipo #1.

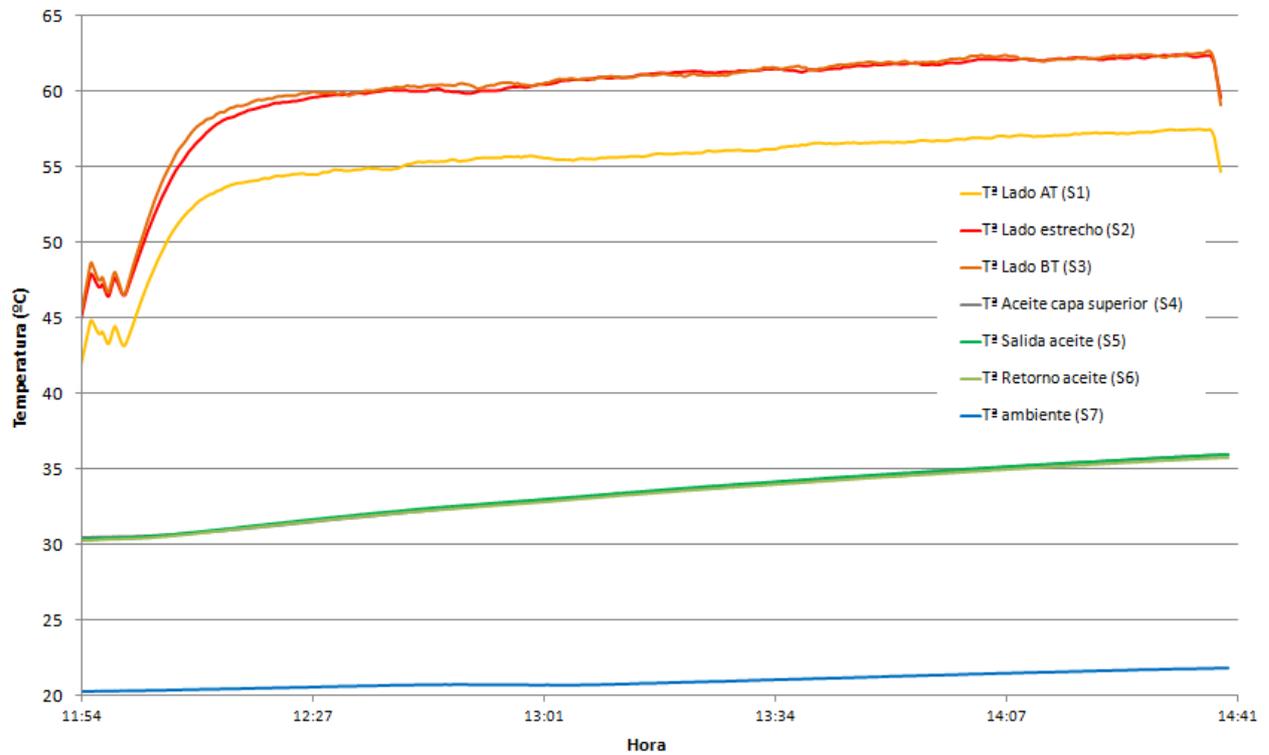


Figura 6.4. Evolución de las temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración AOC en el transformador de tipo #1.

De la misma forma que en los casos anteriores, aprovechando las medidas de corriente circulante por los arrollamientos del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar se realizó un análisis del desbalance de amperios-vuelta cuyo resultado se muestra en la tabla 6.17, obteniéndose en este caso un desbalance ligeramente inferior al obtenido para el mismo ensayo en el transformador #B (tabla 6.1).

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 - (I)_{CUBA}$
AOC	100	-	82,6	17,4

Tabla 6.17. Balance de amperios-vuelta del transformador durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración AOC en el transformador de tipo #1.

En la tabla 6.18 se muestran los resultados de las sondas de temperatura más representativas.

Ubicación medida de temperatura	Sonda	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancha lado AT	S1	57,4	35,6
Pared cuba lateral estrecha (lado contrario CTC)	S2	62,3	40,5
Pared cuba lateral ancha lado BT	S3	62,6	40,8
Tapa cuba (capa superior aceite)	S4	35,9	14,1
Tubería salida de aceite	S5	35,9	14,1
Tubería retorno de aceite	S6	35,7	13,9
Temperatura ambiente	S7	21,8	-

**Tabla 6.18. Resumen del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración AOC en el transformador de tipo #1.**

En este caso, en comparación con los dos casos anteriores (muy similares entre sí), a pesar de realizar el ensayo con una menor corriente de alimentación homopolar (corriente de neutro primaria del 96% de la corriente asignada) el calentamiento producido es algo superior, observándose calentamientos máximos en las paredes de la cuba de alrededor de 40 °C por encima de la temperatura ambiente.

Estos resultados son coherentes con la valoración realizada en el apartado anterior en base al análisis realizado sobre las trayectorias de flujos homopolares y el desbalance de amperios-vuelta en un transformador de tipología constructiva #1, que determinó para la configuración de ensayo A1A un riesgo moderado-alto de calentamiento de la cuba.

En todo caso, los calentamientos producidos, incluso con corrientes superiores a las que el sistema de protección admitiría, se sitúan holgadamente dentro del margen de lo admisible. Por todo ello, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización cerrado, alimentado con corrientes homopolares en el lado primario estando el neutro primario puesto a tierra y el neutro secundario aislado, puede considerarse perfectamente admisible y exento de riesgo de calentamiento de la cuba.

#### **d) Configuración de ensayo A0A**

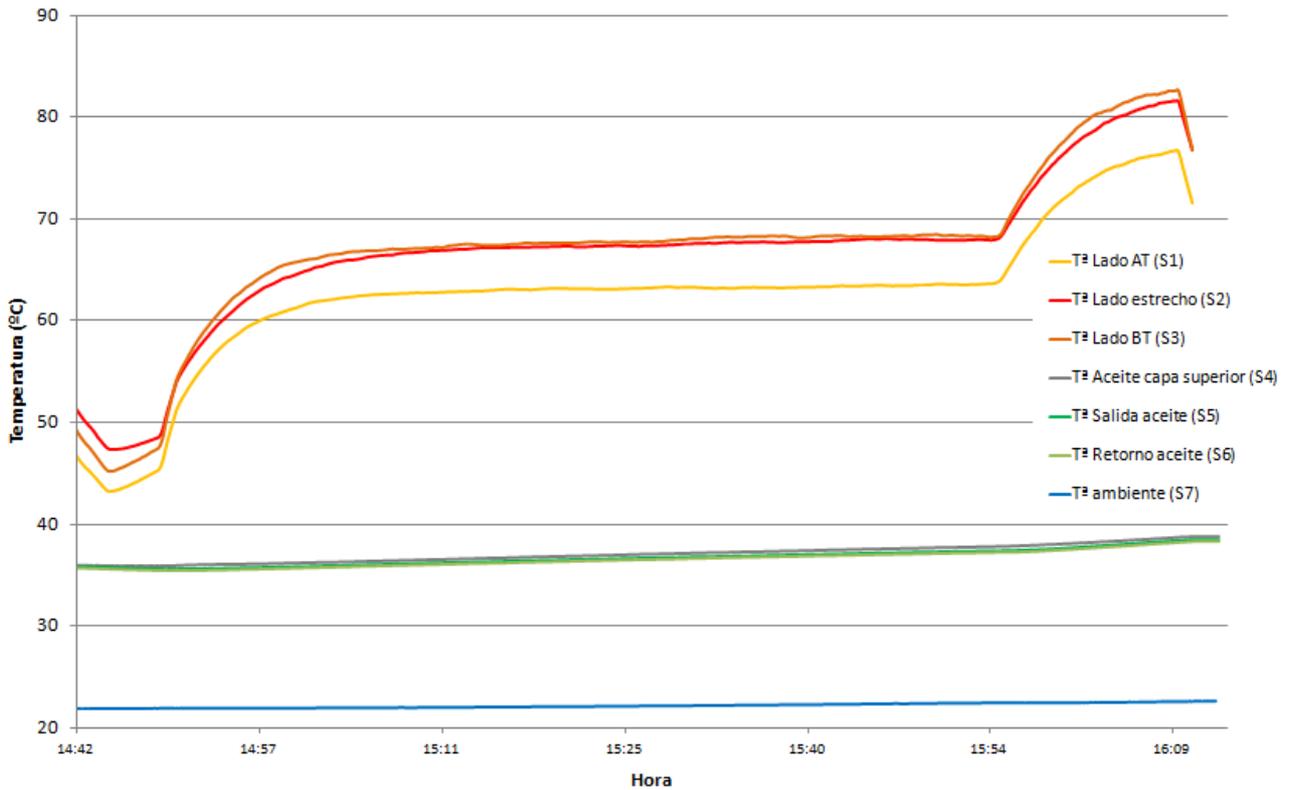
Finalmente, se presentan a continuación los resultados del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0A, reflejándose en la tabla 6.19 las magnitudes eléctricas durante el ensayo y en la tabla 6.20 las medidas de las sondas de temperatura, que también han sido representadas en la figura 6.5. Dada la mayor cautela necesaria en este ensayo, se acordó limitar la corriente de neutro al 25% de la corriente asignada y, en función de la evolución térmica, llegar hasta el 30%. Así se hizo, de forma que únicamente en los últimos 15 minutos de ensayo se alcanzó dicho valor del 30%, lo que como puede observarse en la figura 6.5, no resultó suficiente como para considerar estabilizada la temperatura final.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tensión aplicada fase-neutro (V)	Corriente de neutro primaria (A)	Corriente de neutro primaria (pu)	Corriente de neutro secundaria (A)	Corriente arrollamiento estabilización (A)	Potencia activa consumida (kW)
0:00	1090	49,7	0,15	N/A	N/A	-
0:03	1570	75,0	0,23	N/A	N/A	48,82
1:09	2023	100,1	0,31	N/A	N/A	81,16
1:22	2024	99,6	0,31	N/A	N/A	-

Tabla 6.19. Magnitudes eléctricas registradas durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0A en el transformador de tipo #1.

Tiempo de ensayo (hh:mm)	Tª cuba lado AT (Sonda 1) (°C)	Tª cuba lado estrecho (Sonda 2) (°C)	Tª cuba lado BT (Sonda 3) (°C)	Tª cuba superior (Sonda 4) (°C)	Tª tubería salida aceite (Sonda 5) (°C)	Tª tubería retorno aceite (Sonda 6) (°C)	Tª ambiente (Sonda 7) (°C)
0:00	47,9	52,5	50,8	36,0	35,9	35,7	21,9
0:05	43,9	47,6	46,1	35,9	35,7	35,5	21,9
0:10	54,3	56,9	57,7	36,0	35,7	35,4	21,9
0:15	59,9	62,8	64,2	36,1	35,8	35,6	21,9
0:20	61,9	65,3	66,3	36,2	35,9	35,7	21,9
0:25	62,5	66,4	67,0	36,4	36,1	35,9	21,9
0:30	62,8	66,9	67,4	36,5	36,2	36,0	22,0
0:35	63,1	67,2	67,6	36,7	36,4	36,2	22,0
0:40	63,1	67,2	67,7	36,9	36,5	36,3	22,1
0:45	63,1	67,2	67,8	37,0	36,7	36,5	22,1
0:50	63,2	67,5	68,1	37,2	36,8	36,6	22,1
0:55	63,2	67,7	68,4	37,3	37,0	36,7	22,2
1:00	63,3	67,7	68,4	37,5	37,1	36,9	22,3
1:05	63,4	68,0	68,4	37,6	37,2	37,0	22,3
1:10	63,5	67,8	68,4	37,7	37,3	37,1	22,4
1:15	66,9	71,1	72,0	37,9	37,5	37,2	22,4
1:20	73,4	78,0	79,5	38,2	37,8	37,6	22,4
1:25	76,0	80,9	82,2	38,5	38,2	38,0	22,5
1:27	76,7	81,6	82,7	38,7	38,4	38,1	22,5
1:30	65,7	71,0	70,1	38,8	38,5	38,3	22,5

Tabla 6.20. Temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0A en el transformador de tipo #1.



**Figura 6.5. Evolución de las temperaturas registradas en las sondas de medida durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0A en el transformador de tipo #1.**

En la tabla 6.21 se muestran los resultados de las sondas de temperatura más representativas tanto para el caso de las temperaturas estabilizadas con corriente de neutro del 23% como con temperaturas sin estabilizar con corriente de neutro del 31% de la corriente asignada.

Ubicación medida de temperatura	Sonda	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancha lado AT	S1	63,5	41,1
Pared cuba lateral estrecha (lado contrario CTC)	S2	67,8	45,4
Pared cuba lateral ancha lado BT	S3	68,4	46,0
Tapa cuba (capa superior aceite)	S4	37,7	15,3
Tubería salida de aceite	S5	37,3	14,9
Tubería retorno de aceite	S6	37,1	14,7
Temperatura ambiente	S7	22,4	-

**(a) Temperaturas (estabilizadas) con corriente de neutro primaria del 23% de la corriente asignada**

Ubicación medida de temperatura	Sonda	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancha lado AT	S1	76,7	54,2
Pared cuba lateral estrecha (lado contrario CTC)	S2	81,6	59,1
Pared cuba lateral ancha lado BT	S3	82,7	60,2
Tapa cuba (capa superior aceite)	S4	38,7	16,2
Tubería salida de aceite	S5	38,4	15,9
Tubería retorno de aceite	S6	38,1	15,6
Temperatura ambiente	S7	22,5	-

**(b) Temperaturas (sin estabilizar) con corriente de neutro primaria del 31% de la corriente asignada**

**Tabla 6.21. Resumen del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A0A en el transformador de tipo #1.**

En el análisis realizado sobre las trayectorias de flujos homopolares y el desbalance de amperios-vuelta del apartado 6.3 se concluyó que los ensayos A0A y B0A en los que los amperios-vuelta creados por el arrollamiento alimentado con corriente homopolar no podían ser compensados sino por la circulación de corriente por la cuba, generándose un riesgo elevado de calentamiento de la misma.

En el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar realizado sobre un transformador de tipología #1 en configuración A0A se ha observado que, con corrientes de neutro del 23% de la asignada, se alcanzan calentamientos máximos por encima de 45 °C y que, en el caso de elevar dicha corriente de neutro hasta el 31%, los calentamientos máximos ya superan los 60 °C sin que todavía las temperaturas se hayan estabilizado.

Teniendo en cuenta que, según los ajustes habituales del sistema de protección del transformador, podrían llegar a mantenerse corrientes de neutro hasta del 50% de la corriente asignada sin que las protecciones desconecten el transformador, y que en funcionamiento en servicio además de la componente homopolar existirán corrientes de secuencia directa e inversa que incrementarán el calentamiento, parece claro que existe un riesgo cierto de calentamientos inadmisibles en la cuba del transformador en esta configuración de funcionamiento.

En conclusión, admitir el funcionamiento de los transformadores estrella-estrella de tipología #1 sin arrollamiento de estabilización, cuando su explotación se realiza con un neutro puesto a tierra y el otro neutro aislado de tierra, requiere la realización de un ensayo de calentamiento con alimentación homopolar por el arrollamiento cuyo lado presenta el neutro conectado a tierra. La magnitud de la corriente de ensayo debe ser superior a la mínima corriente de neutro que es capaz de detectar y eliminar el sistema de protección del transformador y las temperaturas máximas alcanzadas en las paredes de la cuba deben ser inferiores a las que el fabricante identifique como las máximas admisibles sin deterioro del transformador<sup>60</sup>. De lo contrario, en las configuraciones

<sup>60</sup> No existe una referencia clara respecto a la temperatura máxima admisible en las paredes de la cuba. De la normativa IEC e IEEE [99] [100] podría deducirse como admisibles temperaturas de la cuba de 140°C (como elemento metálico). En otros casos, se indican temperaturas admisibles inferiores como

de neutro referidas se prescribiría la necesidad de un arrollamiento de estabilización cerrado para garantizar el funcionamiento del transformador exento de riesgo de calentamientos inadmisibles de la cuba.

#### 6.4.2. Ensayo de calentamiento con alimentación homopolar en transformador estrella-estrella de tipología #2

Como consecuencia de las restricciones en cuanto a la disponibilidad, tiempo y coste de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar, únicamente se han podido realizar dos ensayos en un transformador de tipología constructiva #2, en concreto sobre el transformador #C2 descrito en el capítulo 3, cuyas principales características se reproducen de nuevo a continuación en la tabla 6.22.

Parámetros Constructivos	Valores del transformador objeto de estudio
Potencia asignada (MVA)	30/30/10
Tensiones asignadas (kV)	136/21/10
Corrientes asignadas toma central (A)	127,4/824,8/577,4
Corrientes asignadas toma 1 (A)	113,7/824,8/577,4
Grupo de Conexión	YNyn0+d11
Núcleo magnético	Tres columnas
Arrollam. Estabiliz.	Interno
Pantallas Magnéticas	SI
Tensión cortocircuito (%)	10,9

**Tabla 6.22. Principales características constructivas del transformador #C, objeto de los ensayos de calentamiento homopolar en transformador de tipología constructiva #2.**

Los dos ensayos de calentamiento realizados responden a configuraciones de funcionamiento con alimentación homopolar desde el lado primario y con el arrollamiento de estabilización abierto (configuraciones A0A y A1A), con el objetivo de comprobar el calentamiento sobre la cuba sin dicho arrollamiento.

En este caso, no se pudo disponer de una monitorización continua de la temperatura durante los ensayos sino que se realizaron medidas de temperatura mediante una cámara termográfica de precisión una vez estabilizada la temperatura, aproximadamente a las dos horas del comienzo del ensayo. Adicionalmente se dispusieron diversos sensores térmicos de contacto Thermax® como comprobación adicional.

110°C en [55] referenciando a [101]. En todo caso, parece prudente evitar temperaturas superiores a 100°C y considerar las limitaciones que establezca el fabricante.

Al igual que en el caso anterior, los ensayos se realizaron alimentando el transformador por su lado primario mediante una alimentación monofásica entre las tres fases (cortocircuitadas entre sí) y el neutro, estando en este caso el cambiador de tomas en carga en la toma de máxima tensión asignada (toma 1), con la cuba puesta a tierra y con el sistema de refrigeración en funcionamiento ONAN, por tratarse de un transformador sin refrigeración forzada ni para el aceite ni para el aire.

Los ensayos se realizaron de menor a mayor riesgo de calentamiento de la cuba, comenzando en primer lugar por los ensayos con el arrollamiento secundario cortocircuitado (ensayo con configuración A1A). A continuación se realizó el ensayo con configuración A0A.

Al igual que en el transformador anterior, estos ensayos no formaban parte de las condiciones contractuales establecidas en las especificaciones técnicas de adquisición del equipo, por lo que se hubo de llegar a un acuerdo con el fabricante sobre la corriente a la que realizar los ensayos de forma que se minimizara el riesgo de generar daños en el transformador. En este caso, el fabricante adoptó una postura muy conservadora respecto al ensayo A0A, acordándose fijar una corriente para los distintos ensayos según la tabla 6.23.

Configuración de ensayo	Corriente de alimentación respecto a la corriente asignada	
	Corriente de fase (pu)	Corriente de neutro (pu)
A1A	0,43	1,30
A0A	0,067	0,20

**Tabla 6.23. Corrientes de ensayo pactadas para la ejecución de los ensayos de calentamiento homopolar en las distintas configuraciones de ensayo realizadas sobre el transformador de tipología #2.**

De la misma forma que en el caso anterior, los resultados obtenidos en el ensayo A0A no garantizarían la exención del riesgo de calentamiento de la cuba durante el funcionamiento real del transformador en la red dado que los sistemas de protección del transformador podrían no detectar y despejar funcionamientos con un valor de la corriente de neutro hasta 0,5 pu respecto a la corriente asignada del transformador.

Durante aproximadamente dos horas cada uno, con un intervalo de 3 horas entre medias, se realizaron los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A (en primer lugar) y con configuración A0A (en segundo lugar).

En ambos casos se aplicaron las tensiones e intensidades indicadas en la tabla 6.24 hasta que se consideró estabilizada la temperatura de las paredes de la cuba.

Configuración de ensayo	Duración ensayo (h)	Tensión aplicada fase-neutro (V)	Corriente de neutro primaria (A)	Corriente de neutro primaria (pu)	Potencia activa consumida (kW)
A1A	~ 2 horas	4103	147,60	1,30	27,50
A0A	~ 2 horas	6887	22,6	0,20	41,7

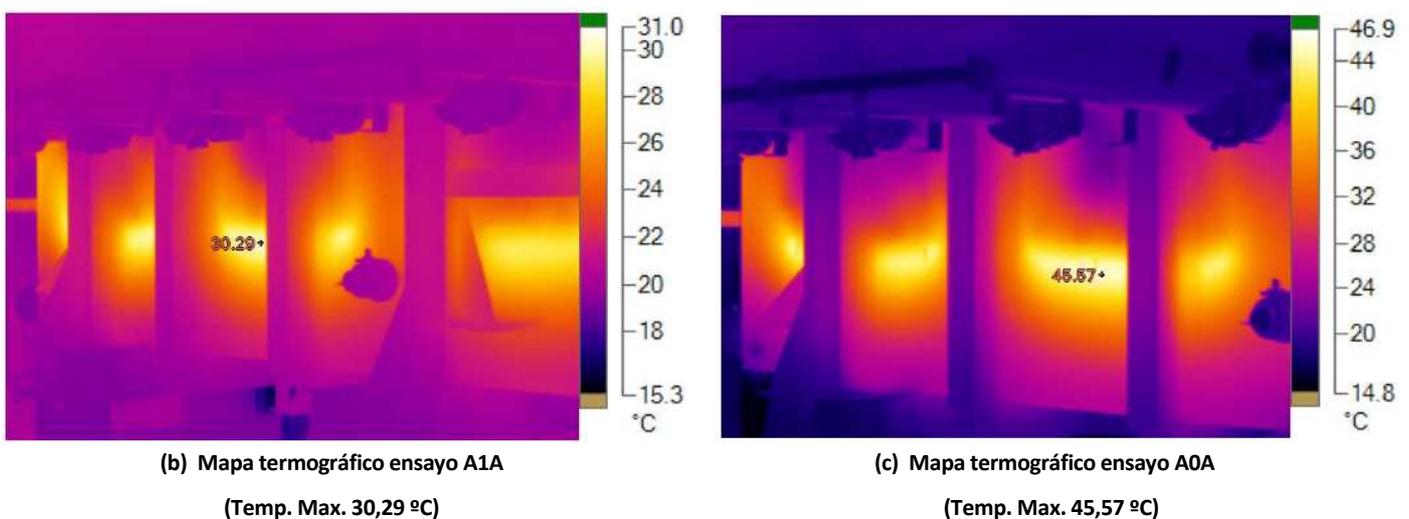
**Tabla 6.24. Magnitudes eléctricas registradas durante la realización del ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con configuración A1A en el transformador de tipo #2.**

En este caso, no se registraron las corrientes circulantes por el arrollamiento secundario y por el arrollamiento de estabilización, por lo que no es posible cotejar los balances de amperios-vuelta con los obtenidos en el apartado 6.3.2 para el transformador #F, también de tipología #2.

A continuación, se presentan en las figuras 6.6 a 6.10 los mapas termográficos obtenidos en las distintas ubicaciones de medida de temperatura para ambas configuraciones de ensayo. Como se puede observar, los puntos donde se alcanza la mayor temperatura de la cuba corresponden con las zonas donde terminan las pantallas magnéticas internas adosadas a la cuba. Este resultado se encuentra alineado con las simulaciones realizadas mediante la metodología de elementos finitos por Penabad [55].



(a) Visualización física de la zona de medida de temperatura



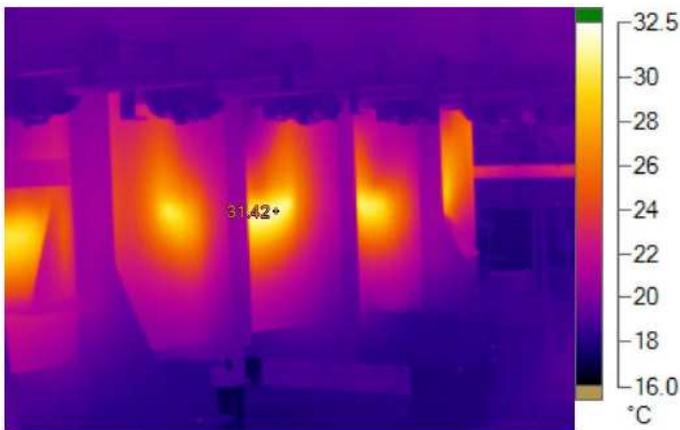
(b) Mapa termográfico ensayo A1A  
(Temp. Max. 30,29 °C)

(c) Mapa termográfico ensayo A0A  
(Temp. Max. 45,57 °C)

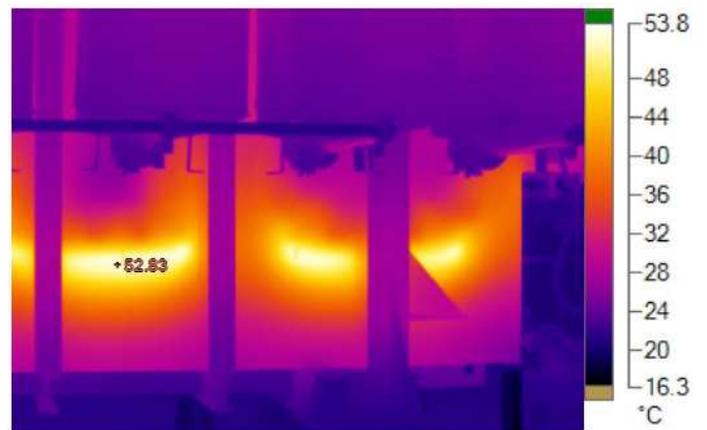
Figura 6.6. Mapas termográficos en la pared de la cuba en el lateral ancho de la extremidad inferior del lado AT a la finalización de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #2.



(a) Visualización física de la zona de medida de temperatura



(b) Mapa termográfico ensayo A1A  
(Temp. Max. 31,42 °C)

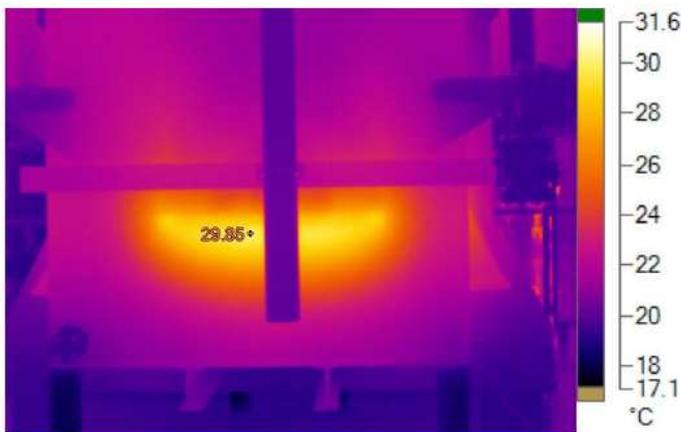


(c) Mapa termográfico ensayo A0A  
(Temp. Max. 52,83 °C)

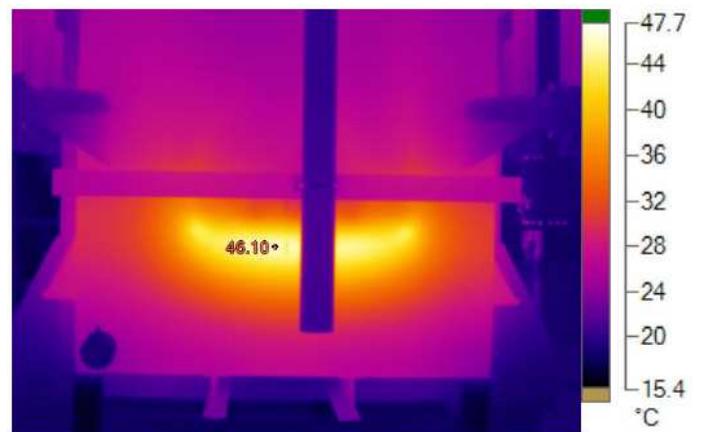
Figura 6.7. Mapas termográficos en la pared de la cuba en el lateral ancho de la extremidad inferior del lado BT a la finalización de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #2.



(a) Visualización física de la zona de medida de temperatura



(b) Mapa termográfico ensayo A1A  
(Temp. Max. 29,35 °C)

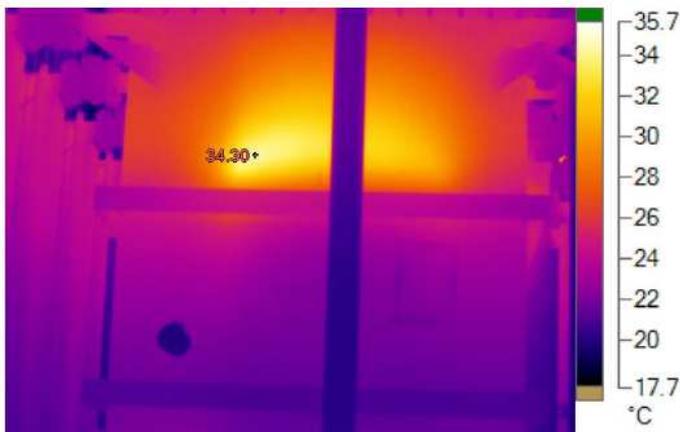


(c) Mapa termográfico ensayo A0A  
(Temp. Max. 46,10 °C)

Figura 6.8. Mapas termográficos en la pared de la cuba en el lateral estrecho de la extremidad inferior del lado contrario al CTC a la finalización de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #2.



(a) Visualización física de la zona de medida de temperatura



(b) Mapa termográfico ensayo A1A  
(Temp. Max. 34,30 °C)

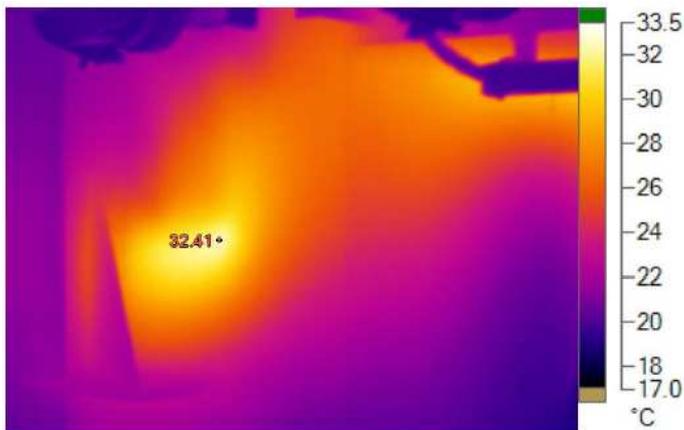


(c) Mapa termográfico ensayo A0A  
(Temp. Max. 46,15 °C)

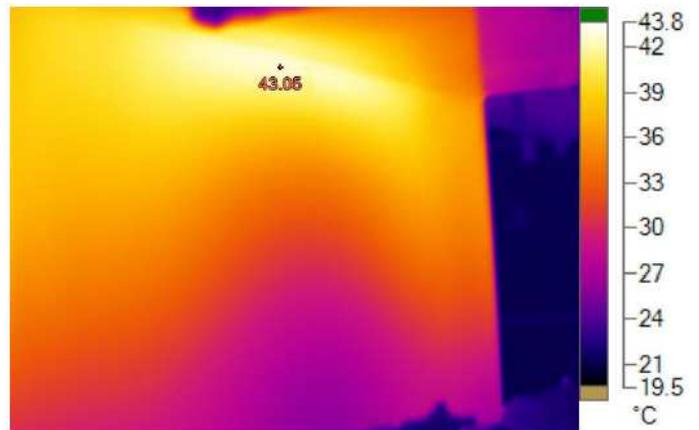
Figura 6.9. Mapas termográficos en la pared de la cuba en el lateral estrecho de la extremidad superior del lado contrario al CTC a la finalización de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #2.



(a) Visualización física de la zona de medida de temperatura



(b) Mapa termográfico ensayo A1A  
(Temp. Max. 32,41 °C)



(c) Mapa termográfico ensayo A0A  
(Temp. Max. 52,83 °C)

Figura 6.10. Mapas termográficos en la pared de la cuba en el lateral estrecho de la extremidad inferior del lado del CTC a la finalización de los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar sobre el transformador #2.

En la tabla 6.25 se muestran de forma agregada los resultados de las temperaturas finales alcanzadas en los ensayos.

Ubicación medida de temperatura	Medidas de temperatura en configuración A1A		Medidas de temperatura en configuración A0A	
	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)	Temperatura sonda final ensayo (°C)	Calentamiento respecto a temperatura ambiente (°C)
Pared cuba lateral ancho lado AT (parte inferior)	30,29	13,5	45,57	28,0
Pared cuba lateral ancho lado BT (parte inferior)	31,42	14,6	52,83	35,2
Pared cuba lateral estrecho (lado contrario CTC – parte inferior)	29,35	12,6	46,10	28,5
Pared cuba lateral estrecho (lado contrario CTC – parte superior)	34,30	17,5	46,15	28,6
Pared cuba lateral estrecho (lado CTC – parte inferior)	32,41	15,6	43,05	25,5
Temperatura capa superior aceite	23,0	6,2	31,0	13,4
Temperatura ambiente	16,8	-	17,6	-

**Tabla 6.25. Resumen de las temperaturas alcanzadas en los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar con las configuraciones A1A y A0A en el transformador de tipo #2.**

De los resultados obtenidos durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con la configuración de funcionamiento A1A y habiendo alcanzado una corriente de neutro primaria del 130% de la corriente asignada, se observa que el calentamiento máximo que se produce en las paredes de la cuba se sitúa por debajo de los 20 °C.

Estos resultados son coherentes con el análisis realizado sobre las trayectorias de flujos homopolares y el desbalance de amperios-vuelta en un transformador de tipología constructiva #2 (en aquel caso el transformador #F), en el que para esta configuración de ensayo se determinaba un riesgo bajo de calentamiento de la cuba.

Considerando ambos resultados, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador estrella-estrella con cargas desequilibradas en el lado primario (significativamente superiores a las que el sistema de protección admitiría) estando ambos neutros puestos a tierra y con el arrollamiento de estabilización abierto puede considerarse perfectamente admisible y exento de riesgo de calentamiento de la cuba.

En lo que respecta a los resultados obtenidos durante el ensayo de calentamiento con alimentación homopolar con la configuración de funcionamiento A0A, se observa un incremento relevante de la temperatura alcanzada en las paredes de la cuba, a pesar de haberse alcanzado una corriente de neutro primaria de únicamente el 20% de la corriente asignada. El calentamiento máximo de las paredes de la cuba (de alrededor de 35 °C) se encuentra, no obstante, significativamente por debajo de los valores máximos tolerables en funcionamiento normal del transformador.

Teniendo en cuenta que en la configuración A0A los amperios-vuelta creados por el arrollamiento alimentado con corriente homopolar han de ser compensados por la circulación de corriente por la cuba, y dado que la corriente del ensayo realizado es inferior a la corriente de neutro que serían capaz de detectar los sistemas de protección del transformador, los resultados obtenidos no son concluyentes, siendo posible un riesgo de calentamiento de la cuba en esta configuración de funcionamiento.

## 6.5. Metodología de evaluación del riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores estrella-estrella

Extrapolando los análisis y ensayos realizados en los apartados 6.3 y 6.4, junto con el apéndice D, se puede concluir que el riesgo de calentamiento de la cuba de un transformador estrella-estrella durante el funcionamiento en regímenes que impliquen la circulación de flujos homopolares, puede ser evaluado de forma detallada siguiendo la siguiente metodología:

1. Considerar el régimen de puesta a tierra del neutro primario y del neutro secundario.
2. Evaluar la posibilidad de ocurrencia de situaciones de desequilibrio de corriente en el lado primario y/o en el lado secundario.
3. Determinar la circulación mínima de corriente de neutro en el lado primario y/o en lado secundario que el sistema de protección del transformador es capaz de detectar y despejar.
4. A partir de lo establecido en los puntos 1 y 2, determinar las configuraciones de funcionamiento del transformador que podrían generar riesgo de calentamiento de la cuba. En este punto, resultará de utilidad realizar un análisis cualitativo de las trayectorias de flujo homopolar.
5. Sobre las configuraciones con riesgo establecidas en el punto 4, realizar ensayos de calentamiento con alimentación homopolar en los que la corriente de alimentación (corriente de neutro) sea, al menos, igual a la corriente detectada por el sistema de protección.
6. Determinar, en base a las referencias normativas [99][100] y las recomendaciones del fabricante, si la temperatura máxima alcanzada durante los ensayos del punto 5 en algún punto de la cuba supera el límite máximo admisible para un funcionamiento seguro del transformador, sin deterioro de sus elementos constructivos ni merma significativa de su vida útil y sin riesgo para las personas e instalaciones que puedan estar en contacto permanente o puntual con el transformador.
7. Mediante ensayos de alimentación homopolar para las configuraciones de funcionamiento determinadas en el punto 4 distintas a las A0A y B0A, un análisis detallado de los balances de amperios-vuelta puede arrojar resultados suficientemente concluyentes como para descartar la existencia de riesgo de calentamiento de la cuba, sin necesidad de un ensayo de calentamiento con alimentación homopolar como el indicado en el punto 5 (de mayor duración y coste).

Para mayor garantía, a la hora de establecer si se supera el límite máximo admisible indicado en el punto 6, puede sumarse, al calentamiento obtenido durante los ensayos de calentamiento con alimentación homopolar establecidos en el punto 5, el calentamiento de la cuba producido

durante el ensayo de calentamiento “normativo”, es decir, el realizado con alimentación trifásica en configuración de cortocircuito y alcanzando la corriente asignada por los arrollamientos según lo establecido en la norma IEC 60076-2 [102]. En este ensayo, los flujos de dispersión pueden llegar a producir calentamientos en la cuba. Es claro que los fenómenos térmicos no lineales que tienen lugar en ambas situaciones (funcionamiento de plena carga trifásica más funcionamiento en condiciones que generan flujos homopolares) no producen resultados que puedan ser analizados por el principio de superposición. Sin embargo, la suma de ambos calentamientos supone considerar una hipótesis conservadora respecto al riesgo de calentamiento de la cuba.

En el caso de considerar la adquisición y fabricación de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización, los aspectos descritos en este apartado deben ser cuidadosamente redactados en los pliegos técnicos donde se establezcan los requerimientos del transformador a adquirir. De esta forma, el fabricante deberá concebir desde las etapas preliminares de la ingeniería constructiva del transformador los parámetros de diseño necesarios para satisfacer adecuadamente los requerimientos establecidos por el usuario del equipo.

## 6.6. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha analizado el comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante cargas desequilibradas, así como el posible riesgo de calentamiento de la cuba y otros elementos estructurales del transformador derivado de estos desequilibrios.

En ausencia de arrollamiento de estabilización, cuando ambos neutros están conectados a tierra, el funcionamiento de los transformadores estrella-estrella no provoca la circulación de flujos homopolares significativos ni sobretensiones relevantes.

No sucede lo mismo cuando el neutro del lado por el que se alimenta el transformador está aislado de tierra (como se analizó en el apartado 6.1.b). En este caso, en los transformadores de flujos libres se producen sobretensiones muy elevadas que convierten en inadmisibles este tipo de funcionamiento. En los transformadores de núcleo magnético de tres columnas, que constituyen el objeto esencial de la tesis, también se producen ciertas sobretensiones y la circulación de flujos homopolares cuyos valores se ven reducidos por la mayor reluctancia del trayecto de dichos flujos a través de la cuba, el aceite y otros elementos estructurales del transformador.

En esta situación, dicha circulación del flujo homopolar por la cuba puede generar un cierto riesgo de calentamiento de la misma cuya magnitud es necesario evaluar. En este sentido, la literatura y la normativa técnica no es suficientemente clara, incluso en ocasiones contradictoria, y, en todo caso, no explicita en detalle en qué circunstancias es posible encontrarse ante un calentamiento inadmisibles y en cuáles no.

Con el objetivo de avanzar en el entendimiento de esta cuestión, se han analizado en detalle los balances de amperios-vuelta homopolares que tienen lugar en los transformadores estrella-estrella de las tres tipologías constructivas en todas sus posibles configuraciones de funcionamiento. Estos resultados se han complementado con un análisis cualitativo de las trayectorias de flujo homopolar desarrollado en el apéndice D.

Como conclusión de ambos análisis se han identificado como potencialmente peligrosas, de cara a un excesivo calentamiento de la cuba, aquellas configuraciones de funcionamiento de los transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización con un neutro puesto a tierra y otro aislado en situaciones de desequilibrio en el lado puesto a tierra (configuraciones de ensayo AOA y BOA). Ello para todas las tipologías constructivas #1, #2 y #3.

Adicionalmente, en los transformadores de tipología constructiva #1 debe considerarse un posible riesgo de calentamiento en su funcionamiento en configuraciones equivalentes a la de los ensayos AOC, A1A, A1C y BOC, observándose que la presencia del arrollamiento de estabilización no es garantía completa de la ausencia de los riesgos.

En el caso de los transformadores de tipologías #2 y #3 no se han encontrado riesgos significativos adicionales a los indicados, con la salvedad de la configuración de funcionamiento A1A para el transformador de tipo #3, que por la imposibilidad de haber realizado ensayos de calentamiento homopolar en un transformador de tipo #3 no ha podido ser cuantificado.

Con el objetivo de evaluar cuantitativamente los riesgos de calentamiento de la cuba identificados, se han realizado diversos ensayos de calentamiento con alimentación homopolar en dos transformadores, uno de tipología #1 y otro de tipología #2. En la tabla 6.26 se resumen los resultados de dichos ensayos de calentamiento, explicados en detalle en el apartado 6.4.

Configuración de ensayo	Ensayo de calentamiento homopolar transformador #1		Ensayo de calentamiento homopolar transformador #2	
	Corriente de neutro durante el ensayo (pu)	Calentamiento máximo de la cuba respecto al ambiente (°C)	Corriente de neutro durante el ensayo (pu)	Calentamiento máximo de la cuba respecto al ambiente (°C)
A0A	0,3	60,2	0,2	35,2
A0C	1,0	40,8	-	-
A1A	1,2	33,4	1,3	17,5
A1C	1,2	30,3	-	-

**Tabla 6.26. Resumen de resultados de los ensayos de calentamiento de alimentación homopolar efectuados sobre un transformador de tipología #1 y otro de tipología #2.**

Los resultados de estos ensayos de calentamiento nos permiten descartar riesgos de calentamiento de la cuba en configuraciones de funcionamiento distintas a las representadas por los ensayos AOA y BOA.

Dada la complejidad logística y el coste de realizar estos ensayos de calentamiento, así como las dificultades contractuales relacionadas con la intensidad máxima a la que realizar el ensayo, no ha sido posible realizar un conjunto más completo de ensayos y en unas condiciones tales que permitieran obtener resultados más concluyentes.

Por ello, se ha propuesto finalmente una metodología en la que, conjugando las condiciones reales de funcionamiento de un transformador en la red (así como las relacionadas con el sistema de protección) con las propias condiciones de diseño constructivo del transformador, se pueda disponer de una mayor garantía y generalidad en la evaluación del riesgo de calentamiento de la cuba.



## Capítulo 7

# **Influencia de los arrollamientos de estabilización en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuito**

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis detallado de la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuitos en la red eléctrica. Con ello se pretende dictaminar en qué medida y en qué casos la presencia de los arrollamientos de estabilización incrementa el riesgo de fallo de los transformadores estrella-estrella ante los cortocircuitos que, inevitablemente, se producen en las redes eléctricas.

En primer lugar, a modo de preámbulo, se presenta el contexto en el que se enmarca este capítulo y se complementa lo expuesto en el capítulo 2 con un breve resumen del estado del arte relacionado con el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores con arrollamiento de estabilización.

La aproximación práctica a la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella se abordará por medio de simulaciones ante la imposibilidad de acometer esta cuestión por medio de ensayos reales de funcionamiento ante cortocircuito.

En este sentido, se presentarán el conjunto de transformadores, escenarios y modelos sobre los que se soportarán las simulaciones, describiendo los diferentes aspectos y variables que se considerarán. Para ello se simularán muy diversos escenarios reales de funcionamiento de los diferentes tipos de transformadores estrella-estrella objeto de estudio en los que se evaluarán las corrientes de cortocircuito (permitiéndonos valorar el riesgo derivado de su comportamiento electrodinámico), así como las tensiones entre fases y tierra que se producen durante estos eventos (valorando por tanto posibles implicaciones en su comportamiento dieléctrico).

A partir de los resultados de las simulaciones que se expondrán en este capítulo, complementados con los de otras simulaciones adicionales expuestas en el apéndice E, se identificarán y cuantificarán los parámetros más relevantes y las configuraciones de funcionamiento que suponen un mayor riesgo electrodinámico en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización, no sólo para dicho arrollamiento sino para el conjunto del transformador.

## 7.1. Problemática de los arrollamientos de estabilización en su comportamiento ante cortocircuitos

En las redes eléctricas actuales, especialmente en los ámbitos urbanos, las potencias demandadas han tenido en la pasada década ritmos de crecimiento muy importantes<sup>61</sup>, por lo que se han desarrollado redes con un importante grado de mallado. A ello se ha unido un notable incremento de la generación distribuida embebida en las redes de reparto y distribución, así como una mayor deslocalización de la generación convencional con centrales de ciclo combinado. Por todo ello, las potencias de cortocircuito de las redes eléctricas han adquirido, en algunos nodos de la red valores muy elevados. En este contexto, la robustez de los equipos, y en especial la robustez electromecánica, cobra vital importancia<sup>62</sup>.

Constructivamente, la presencia de un arrollamiento de estabilización obliga normalmente a incrementar el diámetro de los otros arrollamientos<sup>63</sup> haciéndolos más vulnerables a los esfuerzos radiales, especialmente al arrollamiento secundario que sufriría esfuerzos en ambos sentidos. En cuanto a los esfuerzos axiales, prescindir del arrollamiento de estabilización permite un diseño más compacto, con una mayor rigidez en los apoyos sobre la estructura de apriete.

Por otro lado, la falta más frecuente en los sistemas eléctricos, con mucha diferencia sobre otras, es el cortocircuito monofásico a tierra. En este caso, se generan fuertes corrientes homopolares que provocan grandes sollicitaciones mecánicas sobre el transformador, especialmente sobre el propio arrollamiento de estabilización. Adicionalmente, la presencia de arrollamientos de estabilización disminuye la impedancia homopolar del transformador y, consecuentemente, aumenta el valor de las corrientes de cortocircuito de las faltas a tierra.

Por tanto, la posibilidad de prescindir de los arrollamientos de estabilización supondría eliminar un modo de fallo del transformador, simplificando y robusteciendo el diseño del mismo.

Iniciando un recorrido histórico sobre esta cuestión, la necesidad de un adecuado dimensionamiento electrodinámico de los arrollamientos terciarios, así como su mayor debilidad frente a los otros arrollamientos ante la ocurrencia de cortocircuitos en la red, fue identificada desde el inicio de su utilización tal y como se señala en la descripción de la patente de Blume [6].

Los autores Mini, Moore y Wilkins en [12] exponen que la amplia utilización de arrollamientos de estabilización durante finales de la década de 1910, obligada incluso en ocasiones por la regulación, estuvo acompañada por el deseo de las empresas eléctricas de reducir los costes de dicha política mediante el diseño de arrollamientos terciarios de menor potencia a la nominal del transformador. Al mismo tiempo, la creciente utilización de puestas a tierra permanentes en los neutros de las redes de alta tensión derivó en problemas de protección del arrollamiento terciario ante las corrientes de cortocircuito producidas por faltas en las líneas. Los propios autores advierten de la

---

<sup>61</sup> En el periodo 1997-2007, la demanda del sistema eléctrico peninsular creció anualmente todos los años por encima del 3 %, con crecimientos anuales superiores al 5% en muchos de los años de este periodo, lo que conllevó un periodo inversor muy relevante en infraestructuras eléctricas. Teniendo en cuenta que los transformadores de potencia tienen vidas útiles promedio por encima de los 40 años, es claro que, en general, se puede deducir que estos equipos se ven sometidos a requerimientos térmicos y mecánicos crecientes.

<sup>62</sup> Los factores influyentes en el diseño dieléctrico y térmico son más controlables de una forma analítica, y a través de simulaciones. Adicionalmente, los ensayos de rutina y de tipo realizados sobre los transformadores permiten un contraste de la bondad del diseño. En cambio, el diseño electrodinámico se ve influido por factores de difícil control y su validación requiere de la realización del ensayo especial de cortocircuito (con los condicionantes logísticos y económicos que conlleva).

<sup>63</sup> Así ocurre en las tipologías constructivas #1 y #2, que son las más frecuentes, y en las que el arrollamiento de estabilización habitualmente ocupa la posición más próxima al núcleo.

necesidad de un cuidadoso análisis que considere las corrientes de cortocircuito, el tiempo de actuación de las protecciones y el correcto dimensionamiento del arrollamiento terciario. En la discusión establecida en [12], el propio Blume refrenda la importancia de que el dimensionamiento del arrollamiento terciario se haga en base a los requerimientos mecánicos ante cortocircuito, más que en base a su capacidad de carga.

Esta necesidad es compañera habitual en las referencias a los arrollamientos de estabilización, como también lo son reglas numéricas sobre el porcentaje de la capacidad nominal del transformador con el que deben diseñarse estos transformadores. En su artículo sobre el estado del arte de los transformadores a comienzos de la década de los años treinta [16], Charley señala ambos aspectos y menciona el diseño con capacidades del 25% o 35% de la potencia del transformador.

Lejos de poderse considerar un criterio del pasado, la regla del 35% en la potencia del arrollamiento de estabilización sigue estando muy presente en la actualidad en las especificaciones técnicas de los transformadores de potencia de las compañías eléctricas, tal y como apuntan Penabad, López y Alvarez en [54]. Ello sin perjuicio de que la normativa técnica vigente [32] advierte de que “es importante asegurar que la capacidad de soportar cortocircuitos de un arrollamiento terciario en triángulo o de un arrollamiento de estabilización sea suficiente para la corriente homopolar inducida máxima durante una falta a tierra en cualquiera de las redes conectadas”.

Así pues, el hecho de que el dimensionamiento electrodinámico del arrollamiento de estabilización sea un requerimiento bien conocido, junto la aparentemente baja tasa de fallos producida en los transformadores de potencia como consecuencia de su comportamiento ante cortocircuito [48], podría conducir a pensar inocentemente que se trata de un problema superado o de menor entidad. Sin embargo, las fatales experiencias de Unión Fenosa Distribución, en línea con lo que exponen Bergonzi, Bertagnoli y otros en [47] demuestran que no debe tratarse esta cuestión como un tema menor. En este artículo, a partir de la información aportada por 14 laboratorios de alta potencia a lo largo del mundo se muestra que uno de cada cuatro transformadores ha fallado en el ensayo de aptitud ante cortocircuito, superándose este porcentaje por encima del 40% en el caso de transformadores de potencia mayor a 100 MVA. A partir de esta situación, los autores exponen un análisis detallado de la problemática asociada a la capacidad de los transformadores para soportar cortocircuitos, definiendo una serie de recomendaciones entre las que se encuentra tratar de evitar el uso de arrollamientos terciarios (salvo que sean estrictamente necesarios). Como refuerzo de sus argumentos, muestran la exitosa mejora conseguida en Italia y en Turquía mediante la adopción de la política propuesta.

Así pues, el objetivo principal de los apartados siguientes de este capítulo se centrará en evaluar el mayor riesgo que supone disponer de un arrollamiento de estabilización desde el punto de vista de las corrientes de cortocircuito circulantes por los diferentes arrollamientos de un transformador estrella-estrella. No se pretende establecer reglas ni directrices respecto a un adecuado diseño electrodinámico para que los arrollamientos de estabilización soporten adecuadamente los esfuerzos radiales y axiales durante un cortocircuito, lo que debe garantizarse por parte de los fabricantes de los transformadores<sup>64</sup>. Sin embargo, resulta evidente que una mayor magnitud de las corrientes de cortocircuito supondrá una mayor probabilidad de fallo como consecuencia de colapsos producidos por los esfuerzos radiales (por ejemplo, problemas de cabalgamiento o

---

<sup>64</sup> Y eventualmente, también verificarse por parte de los usuarios a partir de un riguroso proceso de revisión del diseño del transformador.

“*buckling*”) o por los esfuerzos axiales (por ejemplo, por desplazamientos de los arrollamientos o la pérdida de la estabilidad axial de los conductores o “*tilting*”) tal y como se explica en [103].

Dada la imposibilidad de evaluar en esta tesis el riesgo electrodinámico mediante un conjunto suficiente de ensayos experimentales<sup>65</sup>, se plantearán un amplio conjunto de simulaciones que representen de forma adecuada el conjunto de situaciones que se pueden dar en la práctica de una red real. Las simulaciones estarán esencialmente orientadas al cálculo de las corrientes de cortocircuito en diferentes escenarios tratando de cuantificar el mayor riesgo que supone disponer de un arrollamiento de estabilización, si bien en el apartado 7.2.3 se mostrarán algunos resultados respecto a las tensiones entre fases y tierra que se producen durante los cortocircuitos. En este último aspecto, la presencia de los arrollamientos de estabilización como consecuencia de la reducción en la impedancia homopolar que aportan, suponen una disminución de las tensiones homopolares, y consecuentemente las tensiones entre fases y tierra. Se trasladará un análisis detallado de este asunto al capítulo 8 en el que se evaluará el impacto global en la red del incremento de las tensiones fase-tierra durante los cortocircuitos, con potenciales implicaciones sobre la coordinación de aislamiento y el mantenimiento del régimen de neutro, en caso de prescindir de los arrollamientos de estabilización.

## 7.2. Simulaciones del comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuito

De cara a valorar cuantitativamente el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella, se van a realizar diferentes simulaciones sobre diferentes tipos de transformadores reales en diversos escenarios de red, también reales.

El amplio conjunto de situaciones analizadas permitirá disponer de una visión completa de la influencia de las diferentes variables que intervienen en el comportamiento de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuitos en la red.

Inicialmente se presentará un apartado introductorio describiendo las características de los transformadores, los escenarios y los modelos que intervendrán en las simulaciones para, posteriormente, mostrar los resultados obtenidos en las mismas, en lo que respecta a las corrientes de cortocircuito circulantes por los arrollamientos y las tensiones producidas.

### 7.2.1. Transformadores, escenarios y modelos considerados en las simulaciones

Para disponer de resultados completos en toda la gama de transformadores de la red de Unión Fenosa Distribución, se realizarán las simulaciones de cortocircuito sobre el conjunto de transformadores de los que se dispone de información detallada de su comportamiento homopolar. De esta forma, se dispondrá de un conjunto diverso de simulaciones de cortocircuito sobre transformadores estrella-estrella de diferente potencia y tensiones nominales, y con diferentes tipologías constructivas en lo que respecta a la ubicación del arrollamiento de

---

<sup>65</sup> El coste completo de un ensayo de aptitud ante cortocircuito de un transformador de potencia en laboratorios especializados de alta potencia puede ser del mismo orden de magnitud al coste del propio transformador, de varios cientos de miles de euros. Por ello, su realización se suele acotar a ensayar algún transformador de series normalizadas importantes a adquirir, así como máquinas de instalación en ubicaciones críticas.

estabilización y a la presencia o no de pantallas magnéticas en la cuba para control del flujo magnético.

Así pues, se considerarán todos los transformadores objeto de estudio que se identificaron en el capítulo 3, con la salvedad de no repetir aquellos (#B2 y #C2) cuyas características constructivas son similares a las de otros considerados. En la tabla 7.1, se reproducen de nuevo las características constructivas de los transformadores que se analizarán en las simulaciones.

Parámetros Constructivos	Transformadores objeto de estudio experimental para el análisis del comportamiento ante cortocircuito						
	#A	#B	#C	#D	#E	#F	#G
Potencia asignada (MVA)	15/15/5	25/25/8,33	30/30/10	30/30/10	60/60/20	75/75/25	150/150/50
Tensiones asignadas (kV)	45/16,05/ 10	45/16,05/ 10	132/16,05/10	132/46/20	132/45/10	220/71/10	230/71/20
Grupo de Conexión	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11
Núcleo magnético	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas	Tres columnas
Arrollam. Estabiliz.	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Interno	Externo
Pantallas Magnéticas	NO	NO	SI	NO	SI	SI	NO
Tensión cortocircuito (%)	11,2	10,8	13,9	10,9	11,0	14,3	14,1
Regulación en carga (lado/tipo)	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor	AT-N / Fina-gruesa	AT-N / Inversor	AT-N / Inversor
Tipología constructiva	# 1	# 1	# 2	# 1	# 2	# 2	# 3

**Tabla 7.1. Principales características constructivas de los transformadores que serán objeto de las simulaciones en el capítulo 7.**

Si bien, para mayor generalidad se realizarán todas las simulaciones de cada uno de los siete transformadores indicados, los mismos se pueden considerar agrupados en tres tipologías constructivas, lo que nos permitirá simplificar ciertos análisis y conclusiones y disponer de una mayor claridad en la exposición. En ese sentido, figuran sombreados en la tabla los tres transformadores cuyos resultados se visualizarán preferentemente representando a las tipologías constructivas #1 (representado por el transformador #B), #2 (representado por el transformador #E) y #3 (representado por el transformador #G).

Desde el punto de vista de las diferentes configuraciones de funcionamiento que pueden adoptar estos siete transformadores, para cada uno de ellos se considerará la posibilidad de que puedan ser explotados con el arrollamiento de estabilización abierto o cerrado. También se planteará la posibilidad de que los neutros primario y secundario puedan disponerse puestos a tierra o

aislados<sup>66</sup>. Asimismo, se realizarán simulaciones tanto para la toma central del cambiador de tomas en carga (que será la principalmente considerada) como para las tomas de máxima y mínima relación de transformación.

Por su parte, desde el punto de vista de los posibles escenarios de red en los que estos transformadores pueden encontrarse, se considerarán diferentes posibilidades respecto a la potencia de cortocircuito de la red. Se manejarán escenarios en los que potencia de cortocircuito de la red en los lados primario y secundario del transformador es alta (se corresponde aproximadamente con el máximo valor de diseño de la red, propio de entornos urbanos muy mallados o zonas con fuerte impacto de la generación), media (situación promedio de la red) y baja (nodos de la red débilmente mallados y sin apenas influencia de la generación), según los valores indicados en la tabla 7.2. En los circuitos de cálculo para las simulaciones se plantearán las siguientes combinaciones de las potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria, respectivamente: alta-alta, alta-media, alta-baja, media-media, media-baja y baja-baja. Es decir, se manejarán seis posibles escenarios respecto al valor de las potencias de cortocircuito.

Potencia de cortocircuito de la red (MVA)	Nivel de tensión de la red					
	220 kV	132 kV	66 kV	45 kV	20 kV	15 kV
Alta	20.000	8.000	4.000	2.500	1.000	1.000
Media	10.000	2.000	2.000	500	250	250
Baja	2.500	500	500	100	25	25

**Tabla 7.2. Potencias de cortocircuito de la red que se considerarán en las simulaciones.**

También se manejará como variable el hecho de que la relación entre la impedancia de cortocircuito de la red a secuencia homopolar y la impedancia de cortocircuito de la red a secuencia directa (obtenida a partir de la potencia de cortocircuito considerada) pueda estar en un ratio de tres (situación habitualmente considerada, propia de nudos de red alimentados mediante líneas aéreas) o de uno (situación más propia en redes urbanas con líneas subterráneas con configuraciones de pantalla de *solid bonding*).

Respecto a los tipos de cortocircuitos que se van a simular, se considerarán esencialmente los cortocircuitos monofásicos en la red primaria y los cortocircuitos monofásicos en la red secundaria. Estas dos tipologías cubren la gran mayoría de los cortocircuitos que se suelen dar en las redes eléctricas, siendo adicionalmente los resultados obtenidos suficientemente representativos de

<sup>66</sup> Esta posibilidad nos permitirá dotar de mayor generalidad al análisis realizado. No obstante, lo habitual es que los transformadores, según se indicó en el capítulo 3, tengan una configuración fija de puesta a tierra en función del nivel de tensión y la relación del transformador.

En el caso de Unión Fenosa Distribución, dichos criterios se traducen en:

- Redes de 220 y 132 kV con todos los neutros de transformadores de esta tensión puestos a tierra.
- Redes de 66 y 45 kV con los neutros de los transformadores de esta tensión puestos a tierra si son alimentadores (por ejemplo, 220/66 kV o 132/45 kV) y aislados en caso contrario (por ejemplo 45/15 kV).
- Redes de 20 y 15 kV con todos los neutros de transformadores de esta tensión aislados.

No es, sin embargo infrecuente que puedan encontrarse excepciones a estas pautas generales como consecuencia de la necesidad de incrementar o reducir las corrientes de cortocircuito de una red en zonas determinadas con problemas de selectividad de las protecciones.

todos los cortocircuitos asimétricos que se pueden dar. Como referencia de comparación, se simularán también cortocircuitos trifásicos en la red secundaria.

El cálculo de las corrientes de cortocircuito se realizará a partir de los circuitos mostrados en las figuras 7.1, 7.2 y 7.3. El modelo de secuencia homopolar del transformador será construido a partir de los parámetros de los diferentes transformadores calculados según el modelo B, explicado en el capítulo 4. Como se demostró, dicho modelo constituye la aproximación más precisa para la obtención de las corrientes circulantes por los arrollamientos primario y secundario. Adicionalmente, su sencillez permite extraer múltiples conclusiones cualitativas y cuantitativas respecto a la sensibilidad de los resultados obtenidos en las simulaciones al variar las diferentes variables que se han tenido en cuenta. Sin embargo, como se comprobó en el apartado 4.2.3, la utilización de este modelo puede conducir en algunos casos a errores de cierta consideración en cuanto a la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización. Por ello, se complementarán determinados resultados de las corrientes circulantes por los arrollamientos de estabilización mediante la utilización del modelo D para describir la secuencia homopolar del transformador, según se refleja en las figuras 7.4 y 7.5.

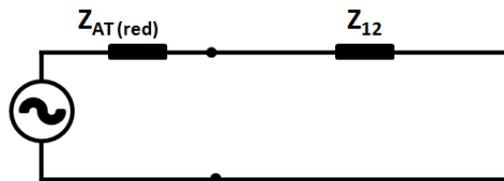


Figura 7.1. Circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de circuito en faltas trifásicas en la red del lado secundario del transformador.

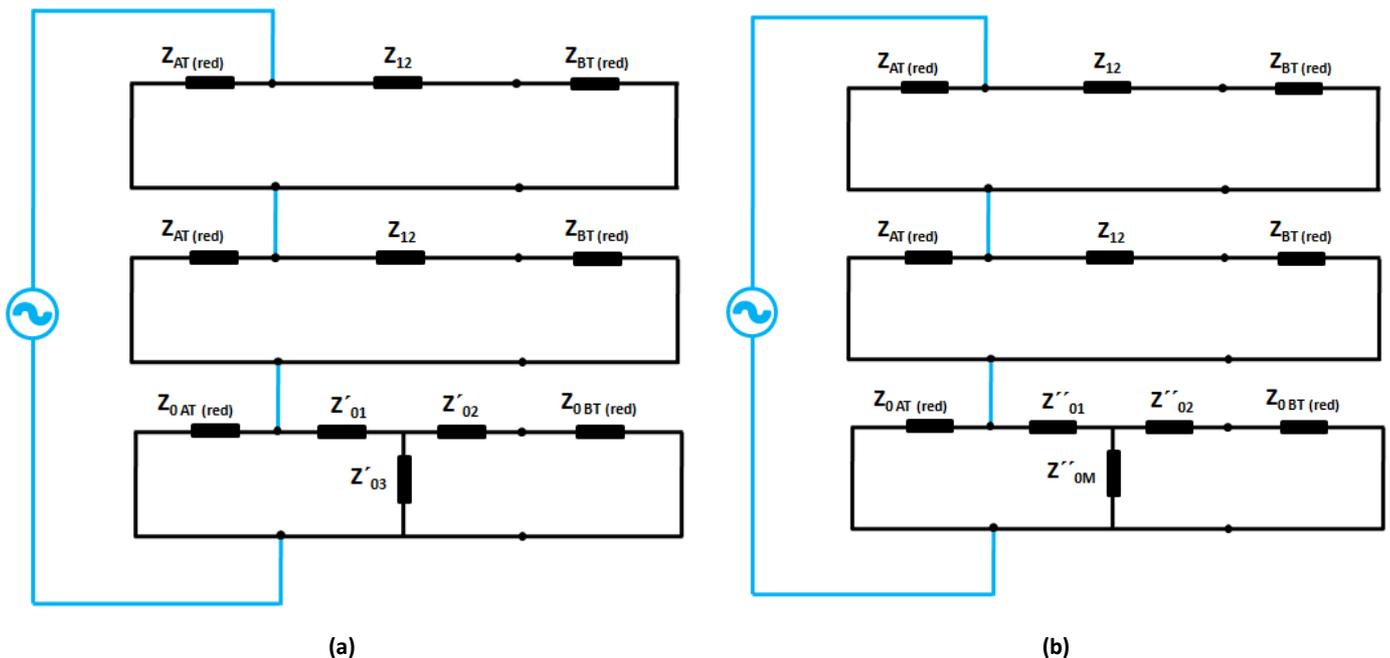


Figura 7.2. Circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de circuito en faltas monofásicas en la red del lado primario del transformador (modelo B de comportamiento homopolar del transformador).  
(a) Arrollamiento de estabilización cerrado (b) Arrollamiento de estabilización abierto.

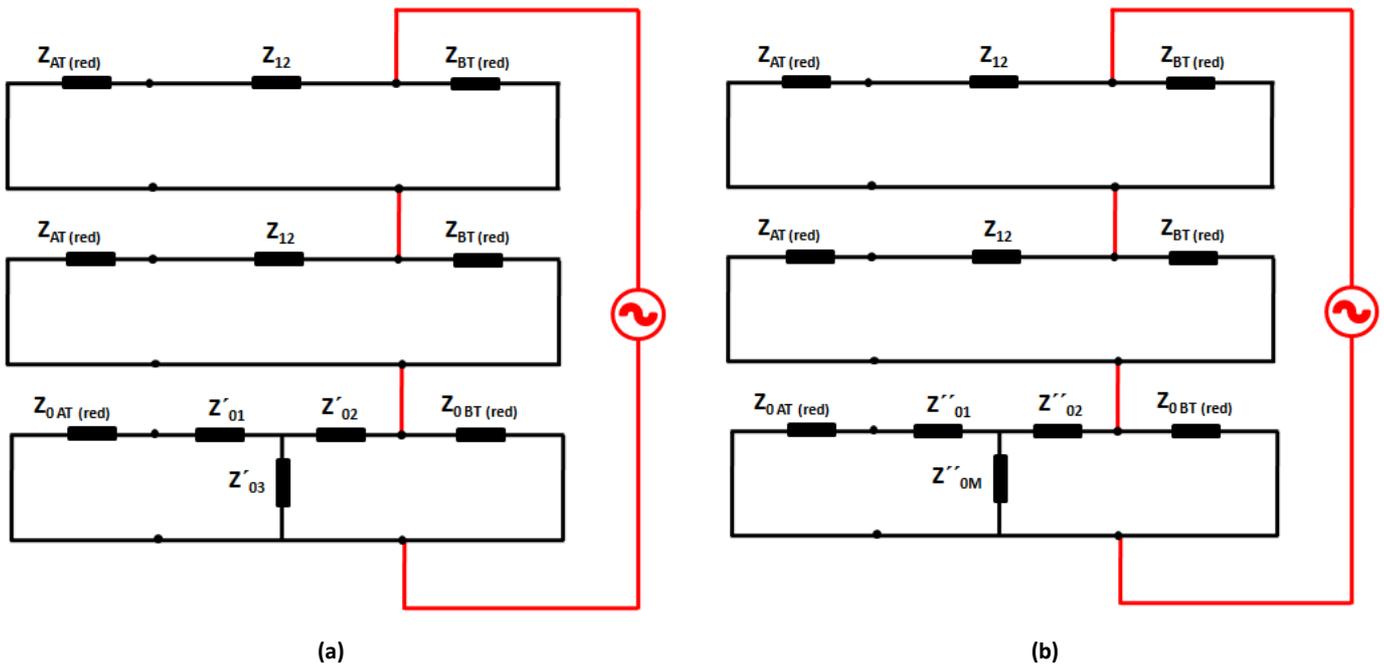


Figura 7.3. Circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de circuito en faltas monofásicas en la red del lado secundario del transformador (modelo B de comportamiento homopolar del transformador). (a) Arrollamiento de estabilización cerrado (b) Arrollamiento de estabilización abierto.

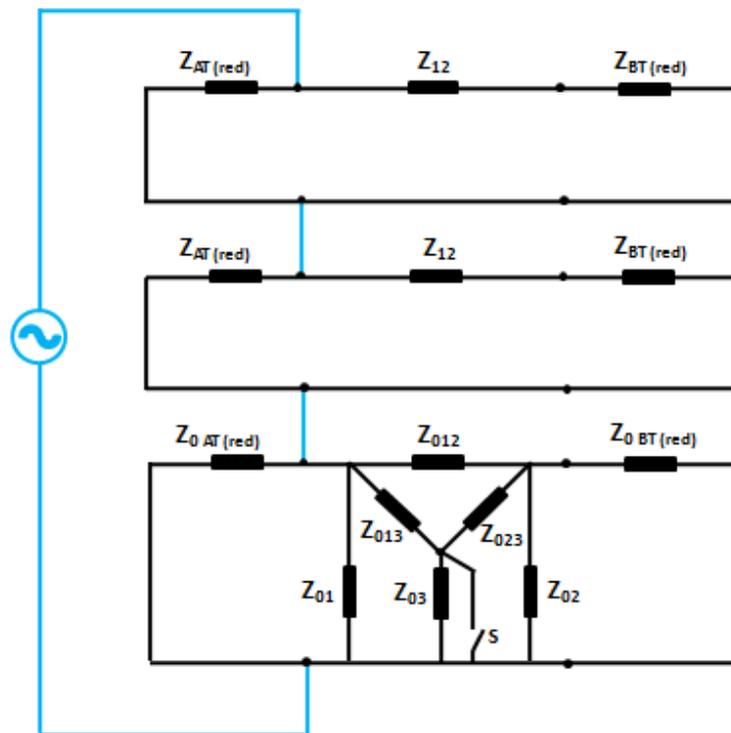


Figura 7.4. Circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de circuito en faltas monofásicas en la red del lado primario del transformador (modelo D de comportamiento homopolar del transformador).

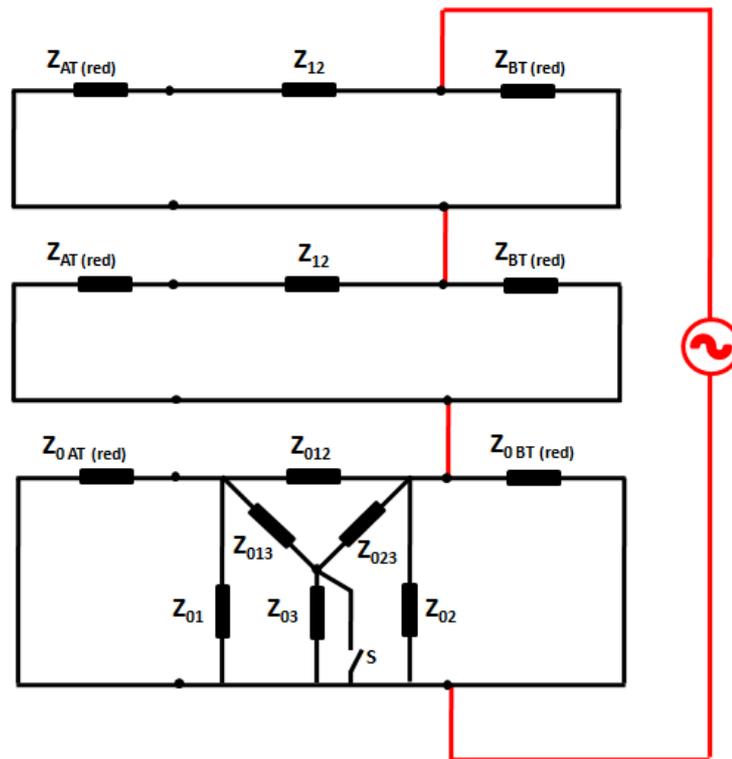


Figura 7.5. Circuito equivalente para el cálculo de las corrientes de circuito en faltas monofásicas en la red del lado secundario del transformador (modelo D de comportamiento homopolar del transformador).

Así pues, como resumen de lo indicado anteriormente, se van a realizar simulaciones de las corrientes de cortocircuito que circularían en los distintos arrollamientos de los diferentes tipos constructivos de transformadores, en función de diversas condiciones de funcionamiento (tanto propias del transformador como relativas a la red en la que se encuentre instalado) y tipología de faltas. Las variables que serán tomadas en consideración para la realización de dichas simulaciones son las siguientes:

- Tipología constructiva del transformador, principalmente en lo relativo a la ubicación del arrollamiento de estabilización (interno o externo) y a la presencia o no de pantallas magnéticas, si bien adicionalmente se considerará una amplia gama de potencias y tensiones nominales.
- Arrollamiento de estabilización abierto o cerrado.
- Conexión de los neutros primario y secundario del transformador.
- Posición del cambiador de tomas en carga, considerando la toma central y las tomas extremas.
- Potencia de cortocircuito de la redes en el lado de alta tensión y en el lado de baja tensión.
- Relación entre la impedancia de la red a secuencia homopolar y la impedancia de la red a secuencia directa.
- Tipo de falta, considerando principalmente las faltas monofásicas a tierra en el lado de alta tensión y en el lado de baja tensión<sup>67</sup>, así como la falta trifásica a modo de referencia.

<sup>67</sup> Este tipo de faltas asimétricas son las más frecuentes en las redes eléctricas y las que, en la mayoría de los casos, suponen una mayor sollicitación para los arrollamientos.

En la tabla 7.3 se muestran de forma resumida las diferentes opciones y variables que se manejarán en las simulaciones. La combinación de todas las opciones entre sí totaliza un conjunto de 9.072 escenarios de simulación.

Parámetro a considerar	Nº escenarios	Opciones a manejar	Observaciones
Características constructivas del transformador	7	- #A: 45/15 kV 15 MVA - #B: 45/15 kV 25 MVA - #C: 132/15 kV 30 MVA - #D: 132/45 kV 30 MVA - #E: 132/45 kV 60 MVA - #F: 220/66 kV 75 MVA - #G: 220/66 kV 150 MVA	Los 7 escenarios están agrupados en 3 tipologías constructivas principales (#1, #2 y #3) dependiendo de la ubicación del arrollamiento de estabilización y de la presencia de pantallas magnéticas
Estado arrollamiento de estabilización	2	- Arrollam. Estab. CERRADO - Arrollam. Estab. ABIERTO	
Conexión de los neutros del transformador	4	- PAT / PAT (1) - PAT / AIS (2) - AIS / PAT (3) - AIS / AIS (4)	(1) Propia de #D, #E, #F, #G <sup>68</sup> (2) Propia de #C (3) Excepcionalmente en #D, #E (4) Propia de #A, #B
Posición del cambiador de tomas en carga	3	- Toma central - Toma máxima - Toma mínima	Los análisis principales se realizarán con la toma nominal (central)
Potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria	6	- Alta / Alta - Alta / Media - Alta / Baja - Media / Media - Media / Baja - Baja / Baja	Valores de cada nivel de tensión según la tabla 7.2
Relación $Z_0 / Z_1$ de la red	3	- Relación $Z_0 / Z_1 = 1$ (1) - Relación $Z_0 / Z_1 = 2$ (2) - Relación $Z_0 / Z_1 = 3$ (3)	(1) Propia de redes subterráneas urbanas (2) Situación mixta (3) Propia de redes aéreas
Tipo de falta	3	- Trifásica - Monofásica a tierra lado primario - Monofásica a tierra lado secundario	

**Tabla 7.3. Parámetros que se considerarán en las simulaciones.**

En cada una de dichas simulaciones, programadas a partir de los circuitos mostrados en las figuras 7.1 a 7.3, se obtendrán los siguientes valores:

- Corriente total circulante por los arrollamientos primario y secundario
- Corriente homopolar circulante por los arrollamientos primario y secundario
- Corriente circulante por el arrollamiento de estabilización (o rama magnetizante, en caso de arrollamiento de estabilización abierto)
- Tensión en cada fase de los arrollamientos primario y secundario (aunque únicamente se mostrarán en las tablas de este capítulo la tensión en las fases sanas)
- Tensión homopolar de los arrollamientos primario y secundario

<sup>68</sup> Según los criterios de diseño de red de Unión Fenosa Distribución descritos en el capítulo 3.

Dado el volumen tan elevado de simulaciones a realizar, se ha desarrollado en el curso del presente trabajo una aplicación informática en Excel que ha permitido una mayor automatización y facilidad en el tratamiento de la información necesaria.

Las magnitudes que se indicarán para las corrientes de cortocircuito que circulan por los distintos arrollamientos serán los valores eficaces de la componente de régimen permanente y se expresarán en valores *por unidad* referenciados a la corriente asignada del arrollamiento primario o secundario correspondiente en la toma en la que se ha realizado la simulación. En el caso del arrollamiento de estabilización, dado que su potencia asignada es la tercera parte de la de los dos arrollamientos principales, dicha corriente estará referida a la corriente asignada del propio arrollamiento de estabilización. En todos los tipos de falta, se considerará que las mismas son adyacentes al transformador y que la impedancia de falta es cero.

### 7.2.2. Corrientes de cortocircuito obtenidas en las simulaciones

El objetivo principal de este apartado consiste en evaluar la influencia del arrollamiento de estabilización en las corrientes de cortocircuito que circularían por los diferentes arrollamientos de un transformador estrella-estrella. Como se ha visto en el apartado anterior, esta evaluación de la influencia del arrollamiento de estabilización se ha realizado a partir de un elevado número de simulaciones que representan a múltiples escenarios de funcionamiento en la red y a diversas variables de los transformadores.

Para valorar de una manera sencilla y comprensiva la influencia de los principales aspectos se presentarán únicamente los resultados correspondientes a tres transformadores (#B, #E y #G) representativos de las tres tipologías constructivas (#1, #2 y #3) y con aquellas variables de menor importancia que mejor representan la situación más habitual. En concreto, la potencia de cortocircuito de las redes se considerará media (lo que representa la situación promedio más probable de la red de distribución), la relación  $Z_0 / Z_1$  se considerará igual a tres (situación más habitual en las redes interurbanas y periurbanas) y la posición del cambiador de tomas en carga se considerará en la toma central.

Como complemento de estos resultados, en el apéndice E se detallan numerosas simulaciones adicionales que permiten conocer la influencia cualitativa y cuantitativa de variables como las mencionadas tanto en transformadores estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización cerrado como abierto, lo que permite profundizar en el comportamiento de los transformadores estrella-estrella en lo relativo a sus corrientes de cortocircuito.

#### **Influencia del arrollamiento de estabilización en las corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella**

A continuación, se presentan en las tablas 7.4, 7.5 y 7.6 y en las figuras 7.6, 7.7 y 7.8 los valores de las corrientes de cortocircuito circulantes por cada uno de los arrollamientos del transformador según la presencia o no del arrollamiento de estabilización para los tres tipos de falta analizados y para las diferentes configuraciones de puesta a tierra de los neutros.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización					
		Cerrado			Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,75	3,05	8,11	4,18	3,51	0,67
	PAT / AIS	5,55	2,46	9,28	2,65	1,88	0,77
	AIS / PAT	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
	AIS / AIS	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,87	10,24	13,10	4,94	5,32	0,39
	PAT / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-
	AIS / PAT	4,57	9,55	14,93	2,24	2,98	0,74
	AIS / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-

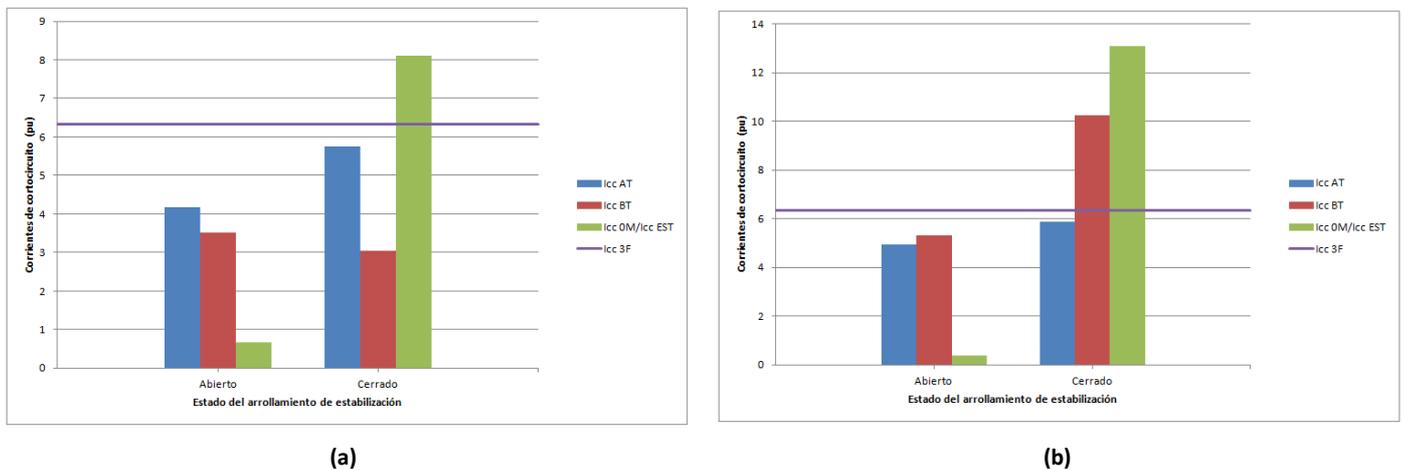
**Tabla 7.4. Corriente de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1).**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización					
		Cerrado			Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,33	2,51	8,44	3,38	3,03	0,34
	PAT / AIS	5,20	2,07	9,38	2,07	1,67	0,40
	AIS / PAT	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,88	11,33	13,33	6,00	6,20	0,20
	PAT / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	5,40	10,58	15,52	2,19	2,63	0,44
	AIS / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-

**Tabla 7.5. Corriente de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2).**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización					
		Cerrado			Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,06	3,77	9,89	4,20	3,54	0,66
	PAT / AIS	5,35	2,04	9,93	2,52	1,83	0,68
	AIS / PAT	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,59	5,96	1,12	5,80	5,91	0,12
	PAT / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	2,74	4,42	5,03	2,27	2,89	0,62
	AIS / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-

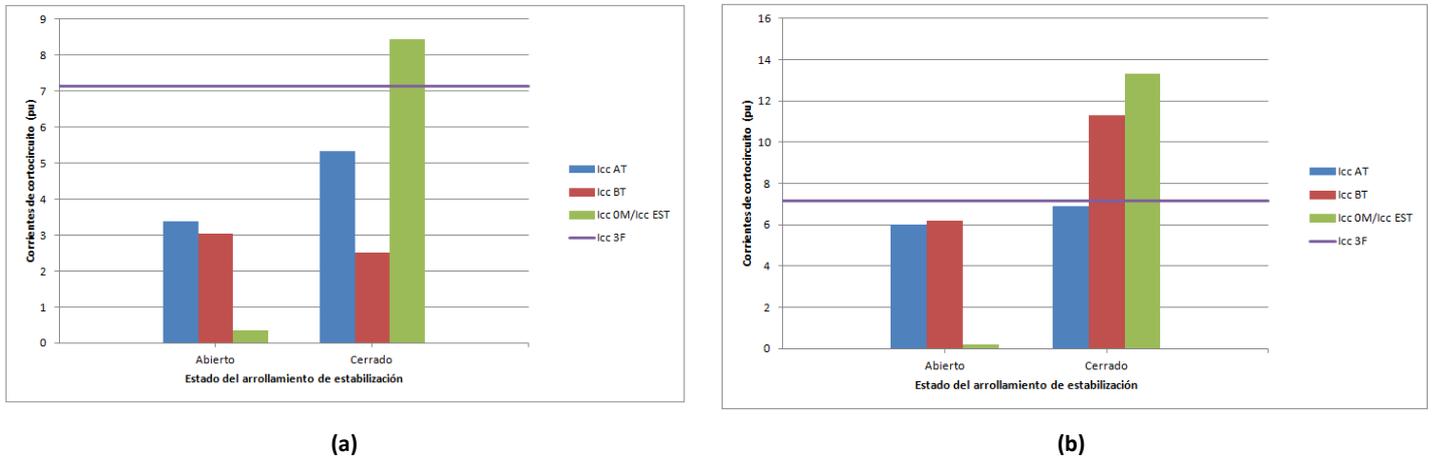
**Tabla 7.6. Corriente de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3).**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)



**Figura 7.6. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función del estado del arrollamiento de estabilización.**

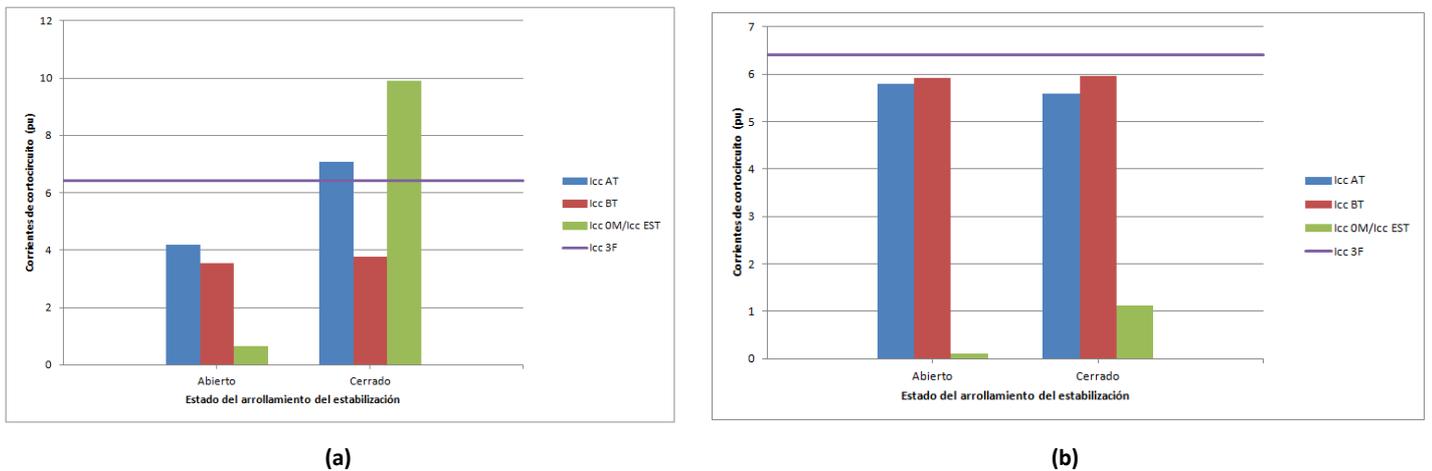
(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Posición de los CTC = Toma central)



**Figura 7.7. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función del estado del arrollamiento de estabilización.**

**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Posición de los CTC = Toma central)**



**Figura 7.8. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función del estado del arrollamiento de estabilización.**

**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Posición de los CTC = Toma central)**

Las tablas y gráficas presentadas en este apartado ofrecen una visión muy completa que muestra cuantitativamente la magnitud de las corrientes de cortocircuito que pueden llegar a producirse en los arrollamientos de estabilización de los transformadores estrella-estrella, así como en los arrollamientos principales del mismo.

La influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento ante cortocircuito de todos los transformadores con arrollamiento de estabilización interno analizados se puede resumir en las

consideraciones indicadas en la tabla 7.7 (para los transformadores de tipología #1 y #2) y 7.8 (para los transformadores de tipología #3), donde la simbología utilizada se interpreta de la siguiente forma:

- A: Corrientes muy elevadas (superiores a las de cortocircuitos trifásicos en el caso de los arrollamientos primario y secundario).
- B: Corrientes elevadas (aunque inferiores a las de cortocircuitos trifásicos en el caso de los arrollamientos primario y secundario).
- C: Corrientes moderadas (equivalentes en el caso de los arrollamientos primario y secundario a configuraciones con el neutro aislado).

Se complementan las indicaciones anteriores con los símbolos +/- para incorporar, si procede, algún matiz a la valoración realizada. En el caso del arrollamiento de estabilización abierto, también se complementan las indicaciones anteriores con los símbolos </>/~ para denotar si la variación diferencial de las corrientes de cortocircuito en los arrollamientos primario y secundario es menor (o mucho menor), mayor o aproximadamente igual respecto al caso con arrollamiento de estabilización cerrado.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización					
		Cerrado			Abierto		
		$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_{0M}$
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	B	C+	A+	C (<)	C+ (>)	C (*)
	PAT / AIS	B	C	A+	C (<<)	C (~)	C (*)
	AIS / PAT	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					
	AIS / AIS						
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	B+ (~A)	A+	A++	B+ (<~)	B+ (<<)	C- (*)
	PAT / AIS	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					
	AIS / PAT	B	A+	A++	C (<)	C (<<)	C (*)
	AIS / AIS	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					

(\*) La magnitud de la corriente  $I_{0M}$  es ligeramente superior en transformadores de tipología #1 (sin pantallas magnéticas) que en transformadores de tipología #2 (con pantallas magnéticas).

**Tabla 7.7. Evaluación de la influencia del arrollamiento de estabilización en las corrientes de cortocircuito en los transformadores de las tipologías #1 y #2.**

Se destaca el hecho de que, en todas las configuraciones en las que pueden circular corrientes de cortocircuito por los arrollamientos de estabilización, la magnitud de éstas es muy elevada, especialmente en los casos de cortocircuitos monofásicos en la red secundaria (que son los que tienen mayor probabilidad de ocurrencia). Adicionalmente, cuando se dispone de un arrollamiento de estabilización cerrado los arrollamientos principales del transformador, sobre todo los arrollamientos secundarios, se ven sometidos a la circulación de corrientes también muy

importantes (hasta 1,5 veces las que tendrían en el caso de cortocircuitos trifásicos). Todo ello conllevará solicitaciones electrodinámicas muy relevantes en el transformador.

Al disponer en estos mismos transformadores el arrollamiento de estabilización abierto, se produce una reducción significativa o muy significativa de las corrientes de cortocircuito en los arrollamientos primario y secundario<sup>69</sup>. En este caso, se producen circulaciones de corriente homopolar por la cuba y elementos estructurales del transformador (se produce el efecto de la cuba como “arrollamiento en triángulo externo”) cuya magnitud no es significativa desde el punto de vista electrodinámico del transformador. Como ya se indicó, los efectos térmicos potencialmente peligrosos de estas corrientes deben evitarse mediante una adecuada actuación de los sistemas de protección de la red.

En el caso de los transformadores que disponen de arrollamiento de estabilización externo (tipología constructiva #3), el comportamiento ante faltas monofásicas en la red primaria es igualmente muy exigente para el transformador, generándose en la configuración PAT/PAT corrientes de cortocircuito incluso ligeramente superiores en los arrollamientos primario (que superan a las del cortocircuito trifásico) y los arrollamientos de estabilización. En el caso de las faltas en la red secundaria, esta tipología de transformadores presenta un comportamiento ante cortocircuito bastante menos exigente para la integridad estructural del equipo.

Por lo que respecta al comportamiento ante cortocircuito con el arrollamiento de estabilización abierto, su funcionamiento su funcionamiento es análogo al resto de tipologías constructivas.

Como se indicó, en la tabla 7.8 se resumen las magnitudes esperables en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores con arrollamiento de estabilización externo.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización					
		Cerrado			Abierto		
		$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_1$	$I_2$	$I_{0M}$
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	A	C+	A+	C (<<)	C+ (<~)	C
	PAT / AIS	B	C	A+	C (<)	C (<~)	C
	AIS / PAT	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					
	AIS / AIS						
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	B+	B+	C	B+ (>~)	B+ (~)	C-
	PAT / AIS	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					
	AIS / PAT	C	B	B	C (<~)	C (<)	C
	AIS / AIS	El arrollamiento de estabilización no ejerce ninguna influencia (las corrientes de cortocircuito son en general reducidas)					

**Tabla 7.8. Evaluación de la influencia del arrollamiento de estabilización en las corrientes de cortocircuito en los transformadores de la tipología #3.**

<sup>69</sup> Únicamente en el caso de cortocircuitos en la red primaria y configuración PAT/PAT, la corriente secundaria incrementa ligeramente su valor, pero siempre dentro de valores moderados.

### **Comparación de los modelos B y D de representación del comportamiento homopolar en la obtención de las corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella**

En el análisis realizado en el capítulo 4 respecto a la precisión aportada por los diferentes modelos de representación del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella se observó una magnífica fiabilidad del modelo B en la predicción de las corrientes primaria y secundaria. El error aportado por este modelo en la estimación de la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización era mayor. No obstante, la sencillez en la utilización de este modelo de tres impedancias, así como su implementación habitual en las herramientas de análisis de red, le convierten en la opción más deseable para la realización de un análisis sistemático y generalizado de las corrientes de cortocircuito.

Por su parte, el modelo D de seis impedancias, si bien se mostró ligeramente menos preciso en la estimación de las corrientes primaria y secundaria, aporta una mayor estabilidad y precisión en la predicción de las corrientes circulantes internamente por el transformador, esto es, las corrientes del arrollamiento de estabilización y, en su caso, la corriente  $I_{0M}$ .

Por este motivo, se presenta a continuación, y tal como se había adelantado en el apartado 7.2.1, un estudio comparativo de las corrientes de cortocircuito obtenidas por cada uno de los modelos según los circuitos representados en las figuras 7.2 y 7.3 (para el modelo B) y las figuras 7.4 y 7.5 (para el modelo D).

Teniendo en cuenta, tal y como se estudió en el capítulo 4, la mayor precisión del modelo D en el caso de predicción de las corrientes internas circulantes por el transformador, en las tablas 7.9, 7.10 y 7.11 se puede observar que, con carácter general, el modelo B tiende a sobrestimar ligeramente la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización. Ello puede ser considerado perfectamente aceptable ya que no conduce a problemas derivados de un inadecuado dimensionamiento electrodinámico de dicho arrollamiento.

En el caso de la corriente  $I_{0M}$  existe también una cierta discrepancia entre las estimaciones arrojadas por ambos modelos. En este caso, no existe una tendencia uniforme respecto al sentido de dicha discrepancia, lo cual no genera una excesiva problemática debido al menor peso relativo de esta corriente respecto a las corrientes primaria y secundaria.

De cualquier forma, las diferencias obtenidas mediante los modelos B y D en las corrientes  $I_3$  e  $I_{0M}$  no son lo suficientemente relevantes como para restar validez a las conclusiones que, a lo largo del apartado 7.2.2, se han ido extrayendo de los diferentes análisis realizados.

Por su parte, los resultados obtenidos para las corrientes primarias y secundarias, a partir de ambos modelos de representación del comportamiento homopolar del transformador, son extraordinariamente parejos.

Por todo ello, y en base a las ventajas de mayor sencillez y estandarización derivadas de la utilización de un modelo en T de representación del transformador, se puede considerar al modelo B como la mejor opción de cara al cálculo de las corrientes y tensiones de cortocircuito, tanto en el caso del estudio realizado en el capítulo 7 sobre transformadores individuales como, especialmente, para un análisis sobre el conjunto de transformadores de una red eléctrica como el que se presentará en el capítulo 8.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO B de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu) <sup>70</sup>	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu) <sup>71</sup>
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,75	3,05	8,11	4,18	3,51	0,67
	PAT / AIS	5,55	2,46	9,28	2,65	1,88	0,77
	AIS / PAT	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
	AIS / AIS	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,87	10,24	13,10	4,94	5,32	0,39
	PAT / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-
	AIS / PAT	4,57	9,55	14,93	2,24	2,98	0,74
	AIS / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO D de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,71	3,20	5,80	4,18	3,51	0,13
	PAT / AIS	5,50	2,61	6,96	2,65	1,88	0,24
	AIS / PAT	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
	AIS / AIS	1,68	1,68	-	1,68	1,68	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,97	10,26	12,58	4,94	5,32	0,51
	PAT / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-
	AIS / PAT	4,68	9,53	13,73	2,24	2,98	1,21
	AIS / AIS	1,83	1,83	-	1,83	1,83	-

**Tabla 7.9. Comparación de las corrientes de cortocircuito obtenidas en el transformador #B (tipología constructiva #1) según el modelo comportamiento homopolar utilizado. (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)**

<sup>70</sup> Se indican valores por unidad respecto a la corriente asignada de cada arrollamiento, que en el caso de los arrollamientos de estabilización es la tercera parte de la de los arrollamientos primario y secundario.

<sup>71</sup> En el caso de las simulaciones con arrollamiento de estabilización abierto, la corriente  $I_{0M}$  se expresará en valores por unidad respecto a la potencia asignada del transformador.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO B de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,33	2,51	8,44	3,38	3,03	0,34
	PAT / AIS	5,20	2,07	9,38	2,07	1,67	0,40
	AIS / PAT	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,88	11,33	13,33	6,00	6,20	0,20
	PAT / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	5,40	10,58	15,52	2,19	2,63	0,44
	AIS / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO D de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,32	2,53	7,95	3,38	3,03	0,38
	PAT / AIS	5,19	2,09	8,91	2,07	1,67	0,54
	AIS / PAT	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	1,61	1,61	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,88	11,29	13,53	6,00	6,20	0,06
	PAT / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	5,40	10,54	15,54	2,19	2,63	0,25
	AIS / AIS	1,89	1,89	-	1,89	1,89	-

Tabla 7.10. Comparación de las corrientes de cortocircuito obtenidas en el transformador #E (tipología constructiva #2) según el modelo comportamiento homopolar utilizado.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO B de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,06	3,77	9,89	4,20	3,54	0,66
	PAT / AIS	5,35	2,04	9,93	2,52	1,83	0,68
	AIS / PAT	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,59	5,96	1,12	5,80	5,91	0,12
	PAT / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	2,74	4,42	5,03	2,27	2,89	0,62
	AIS / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	MODELO D de representación del comportamiento homopolar					
		Arrollamiento Estabilización Cerrado			Arrollamiento Estabilización Abierto		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,12	3,80	9,57	4,20	3,54	0,53
	PAT / AIS	5,40	2,09	9,41	2,52	1,83	0,51
	AIS / PAT	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	1,78	1,78	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,60	5,94	0,74	5,80	5,91	0,22
	PAT / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	2,76	4,39	4,57	2,27	2,89	0,88
	AIS / AIS	1,99	1,99	-	1,99	1,99	-

Tabla 7.11. Comparación de las corrientes de cortocircuito obtenidas en el transformador #G (tipología constructiva #3) según el modelo comportamiento homopolar utilizado.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

### 7.2.3. Tensiones de cortocircuito obtenidas en las simulaciones

Para finalizar el análisis de las simulaciones de los diversos escenarios de cortocircuito estudiados con los transformadores objeto de estudio, se muestran a continuación los valores de las tensiones durante los cortocircuitos obtenidas en algunas de dichas simulaciones.

En las tablas 7.12, 7.13 y 7.14 se presentan los valores de tensiones a tierra, tanto en el lado primario como secundario del transformador, que se producen en los cortocircuitos monofásicos en las fases sanas así como el valor de la tensión homopolar.

Como se puede observar en estas tablas, los incrementos que se producen en las tensiones en el caso de disponer el arrollamiento de estabilización abierto frente a la situación de arrollamiento cerrado son bastante reducidos.

En las configuraciones con ambos neutros puestos a tierra, se producen unos incrementos muy moderados en las tensiones que afectan en mayor grado a las tensiones de fase y homopolar en el lado secundario al producirse un cortocircuito monofásico a tierra en el lado primario.

Cabe mencionar como los casos más desfavorables, aunque dentro de valores moderados, los incrementos que se producen en las tensiones de fase y la tensión homopolar tanto del lado primario como del lado secundario para el caso de cortocircuitos en la red secundaria en la poco habitual configuración de neutro AIS / PAT.

En la configuración de neutro PAT / AIS, para los transformadores #1 y #2 también se produce un cierto incremento de las tensiones, especialmente en el lado secundario, en los cortocircuitos en la red primaria.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización							
		Cerrado				Abierto			
		$U_{fase(AT)}$ (pu)	$U_{homop.(AT)}$ (pu)	$U_{fase(BT)}$ (pu)	$U_{homop.(BT)}$ (pu)	$U_{fase(AT)}$ (pu)	$U_{homop.(AT)}$ (pu)	$U_{fase(BT)}$ (pu)	$U_{homop.(BT)}$ (pu)
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	1,13	0,48	1,02	0,16	1,19	0,55	1,17	0,40
	PAT / AIS	1,13	0,49	1,03	0,19	1,26	0,61	1,34	0,61
	AIS / PAT	0,93	-	0,96	-	0,75	-	0,88	-
	AIS / AIS	0,93	-	0,96	-	0,93	-	0,96	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	1,02	0,16	0,94	0,24	1,12	0,28	1,16	0,51
	PAT / AIS	0,98	-	0,94	-	0,98	-	0,94	-
	AIS / PAT	1,10	0,30	0,96	0,28	1,34	0,58	1,30	0,65
	AIS / AIS	0,98	-	0,94	-	0,98	-	0,94	-

**Tabla 7.12. Tensiones de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función del estado del arrollamiento de estabilización.**

**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)**

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización							
		Cerrado				Abierto			
		$U_{fase (AT)}$ (pu)	$U_{homop. (AT)}$ (pu)	$U_{fase (BT)}$ (pu)	$U_{homop. (BT)}$ (pu)	$U_{fase (AT)}$ (pu)	$U_{homop. (AT)}$ (pu)	$U_{fase (BT)}$ (pu)	$U_{homop. (BT)}$ (pu)
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	1,17	0,52	1,02	0,15	1,22	0,58	1,19	0,43
	PAT / AIS	1,17	0,52	1,02	0,17	1,27	0,62	1,32	0,60
	AIS / PAT	0,92	-	0,86	-	0,92	-	0,96	-
	AIS / AIS	0,92	-	0,96	-	0,92	-	0,96	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	1,01	0,11	0,92	0,20	1,09	0,21	1,14	0,49
	PAT / AIS	0,99	-	0,94	-	0,99	-	0,94	-
	AIS / PAT	1,11	0,28	0,94	0,24	1,42	0,66	1,35	0,69
	AIS / AIS	0,99	-	0,94	-	0,99	-	0,94	-

Tabla 7.13. Tensiones de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función del estado del arrollamiento de estabilización.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Estado Arrollamiento Estabilización							
		Cerrado				Abierto			
		$U_{fase (AT)}$ (pu)	$U_{homop. (AT)}$ (pu)	$U_{fase (BT)}$ (pu)	$U_{homop. (BT)}$ (pu)	$U_{fase (AT)}$ (pu)	$U_{homop. (AT)}$ (pu)	$U_{fase (BT)}$ (pu)	$U_{homop. (BT)}$ (pu)
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	1,18	0,53	1,16	0,36	1,22	0,58	1,17	0,36
	PAT / AIS	1,21	0,56	1,35	0,61	1,25	0,60	1,35	0,61
	AIS / PAT	0,92	-	0,97	-	0,92	-	0,97	-
	AIS / AIS	0,92	-	0,97	-	0,92	-	0,97	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	1,04	0,11	1,14	0,50	1,05	0,12	1,15	0,50
	PAT / AIS	0,99	-	0,93	-	0,99	-	0,93	-
	AIS / PAT	1,17	0,31	1,22	0,57	1,35	0,55	1,30	0,65
	AIS / AIS	0,99	-	0,93	-	0,99	-	0,93	-

Tabla 7.14. Tensiones de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función del estado del arrollamiento de estabilización.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Posición de los CTC = Toma central)

### 7.3. Resumen del capítulo

El potencial riesgo electrodinámico de los arrollamientos de estabilización ante cortocircuitos asimétricos en la red constituye, junto con el incremento de coste que supone, la principal contraindicación que presenta la incorporación de estos arrollamientos en los transformadores estrella-estrella.

En el primer apartado de este capítulo se ha podido visualizar cómo este riesgo ha estado presente en las consideraciones de fabricantes y usuarios de transformadores desde el comienzo de su utilización a comienzos del siglo XX hasta la actualidad.

Con el objetivo de evaluar de forma cuantitativa y cualitativa dicho riesgo se ha planteado un conjunto de más de nueve mil simulaciones que permiten analizar la influencia de las diferentes variables y escenarios de funcionamiento que se pueden producir durante cortocircuitos de los transformadores estrella-estrella.

De los resultados de las simulaciones que se han expuesto a lo largo del apartado 7.2, complementados con los presentados en el apéndice E, se ha podido constatar que las corrientes circulantes por el arrollamiento de estabilización pueden alcanzar en determinadas configuraciones de funcionamiento valores extraordinariamente elevados. Independientemente de las precauciones que deben tenerse en un adecuado diseño constructivo del transformador, no cabe duda que una mayor probabilidad de fallo como consecuencia de cortocircuitos se pondrá de manifiesto ante la presencia de los arrollamientos de estabilización. Esta mayor probabilidad de fallo no sólo deviene de las corrientes circulantes por el propio arrollamiento de estabilización sino que también se ve incrementada por mayores corrientes en el arrollamiento primario y, sobre todo, en el arrollamiento secundario.

Resulta especialmente destacable el riesgo añadido que supone para los transformadores con arrollamiento de estabilización interno (tipologías #1 y #2) la elevada magnitud de las corrientes circulantes por dicho arrollamiento y por el arrollamiento secundario en la habitual configuración de ambos neutros puestos a tierra y con la habitual ocurrencia de cortocircuitos monofásicos en la red secundaria.

En los resultados complementarios del apéndice E se ha analizado la sensibilidad de las corrientes de cortocircuito ante variables como el ratio  $Z_0 / Z_1$  de la red o la posición del cambiador de tomas en carga, cuya influencia es muy reducida, o la potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria, cuya influencia es lógicamente mayor pero siendo, en algunos casos concretos, en un sentido distinto al intuitivamente esperable.

En este capítulo se ha podido comprobar también que las ventajas de mayor sencillez y estandarización derivadas de la utilización de un modelo en T de representación del transformador, no se ven especialmente penalizadas por imprecisiones excesivamente elevadas en el cálculo de las corrientes internas circulantes en el transformador, validándose por tanto su utilización.

Finalmente, se han estudiado las tensiones de fase y homopolares producidas durante los cortocircuitos, observándose que las diferencias de las mismas entre las situaciones de arrollamiento de estabilización abierto y cerrado no son demasiado significativas, no pudiendo deducirse riesgos dieléctricos potencialmente peligrosos en el caso de considerar los arrollamientos de estabilización abiertos.



## Capítulo 8

# Influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de la red ante faltas asimétricas

En el capítulo 7 se realizó un análisis de la influencia del arrollamiento de estabilización en el comportamiento interno de los transformadores estrella-estrella ante cortocircuitos en la red eléctrica, con el objetivo principal de valorar la influencia del arrollamiento de estabilización en el riesgo de fallo (electrodinámico y dieléctrico) de los transformadores estrella-estrella ante los cortocircuitos. La sensibilidad del comportamiento ante cortocircuito ante diversos factores, tanto del transformador como de la red, fue analizada, pero siempre con una clara orientación hacia el funcionamiento individual interno del transformador.

De forma complementaria, en este capítulo se analiza la influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de una red eléctrica con transformadores estrella-estrella ante faltas asimétricas. En este caso, el foco no estará puesto en las implicaciones que tienen sobre el transformador las corrientes y tensiones durante un cortocircuito sino en las implicaciones que tiene en la explotación de la red de cara a una valoración global sobre la influencia de la presencia o no de arrollamientos de estabilización.

Esta cuestión constituye posiblemente el aspecto que mayor incertidumbre genera a la hora de tomar la decisión de prescindir de los arrollamientos de estabilización. Ninguna publicación en la literatura técnica aborda en profundidad este tema, lo que suele conducir a las empresas eléctricas a adoptar la decisión “conservadora” de mantener los arrollamientos de estabilización ante la posibilidad de que aparezcan problemas en la coordinación del aislamiento o en la actuación del sistema de protección.

En este capítulo, en primer lugar se hará un planteamiento introductorio del problema con el objetivo de entender las implicaciones relacionadas con el análisis de la explotación de una red ante faltas asimétricas.

En segundo lugar, se realizará un análisis detallado de la relación entre los parámetros de los circuitos equivalentes a secuencia directa y a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella que han sido objeto de estudio. A partir de este análisis, se establecerán reglas de estimación de los parámetros de secuencia homopolar en aquellos casos en los que únicamente se disponga de información de las impedancias ante secuencia directa.

Finalmente, se presentarán diversas simulaciones en varios escenarios reales de la red de Unión Fenosa Distribución que permitirán valorar la influencia de disponer o no de arrollamientos de estabilización cerrados sobre la explotación de dicha red. Con el objetivo de dotar de generalidad a las conclusiones que se extraigan, se analizará una red de tipología rural y una red de tipología urbana, estudiando en

ambos casos diferentes configuraciones de explotación mallada y desmallada, incluyendo posibles escenarios de explotación ante contingencia.

## 8.1. Planteamiento del problema

El comportamiento de la red ante las faltas asimétricas, y en especial los cortocircuitos monofásicos a tierra, constituye uno de los aspectos más relevantes que se han de considerar a la hora de diseñar, planificar y explotar las redes eléctricas. Las corrientes y tensiones que aparecen durante las faltas asimétricas que se producen en las redes definen en buena medida el dimensionamiento electrodinámico y dieléctrico de los equipos e instalaciones que conforman dichas redes.

Varios son los aspectos principales que determinan la magnitud de las corrientes y tensiones que tienen lugar durante las faltas asimétricas, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Topología de la red, considerando el grado de mallado de la misma así como la longitud de las líneas eléctricas que la constituyen.
- Generación conectada a la red.
- Impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar de los elementos de la red, principalmente líneas eléctricas y transformadores.
- Régimen de neutro adoptado en los diferentes niveles de tensión, en función de la forma de puesta a tierra de los neutros de los transformadores y elementos de control de tensión (reactancias y condensadores).

Como se ha visto en capítulos precedentes, el arrollamiento de estabilización de un transformador con conexión estrella-estrella ejerce cierta influencia sobre el comportamiento de la red ante faltas asimétricas debido a que la impedancia homopolar del transformador puede variar de forma significativa en función de la presencia o no de dicho arrollamiento. En el capítulo 7, se estudió en detalle cómo las variaciones en la impedancia homopolar del transformador afectan a las corrientes y tensiones durante un cortocircuito sobre el mismo. El efecto agregado de las variaciones en la impedancia homopolar de un conjunto de transformadores de potencia instalados en la red puede tener también una influencia sobre el régimen de neutro previsto.

Adicionalmente a las decisiones adoptadas sobre la forma de conexión de los neutros de transformadores, reactancias y condensadores, la consideración de un determinado régimen de neutro requiere que se satisfagan ciertas condiciones sobre los cocientes entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa en cualquier punto de la red. En concreto, tal y como se ha estudiado en la literatura y normativa técnica [104] [105] [106] [107] [108], para que una red pueda considerarse con un régimen de neutro efectivamente puesto a tierra se debe cumplir que el cociente entre la reactancia de secuencia homopolar y la reactancia de secuencia directa sea inferior a tres ( $X_0/X_1 < 3$ ) y el cociente entre la resistencia de secuencia homopolar y la reactancia de secuencia directa sea inferior a uno ( $R_0/X_1 < 1$ ).

Diferentes autores que se han cuestionado la necesidad de los arrollamientos de estabilización [22] [23] [25] han identificado el problema de garantizar unas corrientes de cortocircuito suficientemente altas como para su detección por los sistemas de protección y unas sobretensiones de falta a tierra suficientemente bajas para una adecuada coordinación del aislamiento como aspectos a dilucidar de cara a una eventual toma de decisión sobre el arrollamiento de estabilización. En concreto, Alexander y McNutt [25] indican explícitamente la importancia de verificar la existencia de una baja impedancia homopolar en los transformadores y autotransformadores para disponer de un sistema efectivamente puesto a tierra, lo que es

fundamental para la coordinación de aislamiento y la adecuada selección de autoválvulas. Para ello, consideran imprescindible el arrollamiento terciario en los bancos de transformadores monofásicos, mientras que en el caso de transformadores de tres columnas, el efecto de la ausencia de dicho arrollamiento debe estudiarse con herramientas de análisis de redes.

Se trata, por tanto, de verificar en qué medida la decisión de prescindir de los arrollamientos de estabilización de los transformadores puede tener una influencia relevante en la modificación de las condiciones de un sistema efectivamente puesto a tierra. Para ello, en el apartado 8.3 se estudiará dicha influencia en diferentes escenarios de explotación ante faltas asimétricas, considerando redes de tipo rural (mayor presencia de líneas aéreas) y de tipo urbano (mayor presencia de líneas subterráneas), en explotación normal y ante contingencia y configuraciones malladas y desmalladas. Con todo ello se dispondrá de una amplia perspectiva de la repercusión sobre la red de los arrollamientos de estabilización.

El análisis de estos escenarios sobre redes reales requiere de la utilización de herramientas de análisis de red en las que deben introducirse las impedancias de secuencia directa y homopolar de los diferentes elementos que constituyen la red. Como se ha indicado anteriormente en diversas ocasiones, no existe una disponibilidad completa y homogénea de medidas de impedancia homopolar realizadas en fábrica durante los ensayos de recepción de los transformadores en servicio. En el capítulo 4 se ha evaluado y justificado la factibilidad de realizar ensayos en campo en baja tensión de impedancia homopolar que permiten realizar una caracterización precisa del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella. No obstante, de cara a realizar un análisis global del funcionamiento de una red se requiere disponer de datos del modelo de funcionamiento homopolar de todos los transformadores en servicio en dicha red<sup>72</sup>, lo que, en caso de ausencia de datos de impedancia homopolar concretos de cada transformador y ante la inviabilidad de realizar un número tan grande de ensayos, implica la necesidad de realizar algún tipo de estimación. A continuación, en el apartado 8.2 se estudiará la mejor forma de realizar una estimación suficientemente precisa de la impedancia homopolar de un transformador a partir de las impedancias de secuencia directa, siempre disponibles de los ensayos en fábrica.

## **8.2. Relación entre los parámetros del circuito equivalente de un transformador estrella-estrella ante secuencia homopolar y ante secuencia directa**

La estimación de las impedancias homopolares a partir de las impedancias de cortocircuito obtenidas a secuencia directa es una práctica habitualmente seguida en las empresas eléctricas. En el caso de los bancos de transformadores monofásicos o los transformadores de construcción acorazada o con núcleos de cinco columnas, está comúnmente aceptado asignar a las impedancias a secuencia homopolar valores idénticos a los de las impedancias a secuencia directa [18] [38]. Para transformadores y autotransformadores trifásicos de tres columnas, la solución más frecuente consiste en realizar una asignación a las impedancias homopolares de los valores de secuencia directa multiplicados por un factor previamente definido. En este sentido, como se mostró en las tablas 4.1 y 4.2 del capítulo 4, la norma IEC 60076-8 [32] ofrece el rango de valores que suelen adoptar estos factores multiplicadores. No obstante, lo habitual

---

<sup>72</sup> Por ejemplo, análisis de potencias y corrientes de cortocircuito asimétricos son típicamente efectuados por los departamentos de planificación y de protecciones de las empresas eléctricas.

es que las empresas eléctricas apliquen unos factores multiplicadores concretos y constantes para todos los transformadores. No existe apenas bibliografía al respecto, de forma que la utilización de los ratios propuestos por General Electric en 1950 en el manual de su analizador de red [109], reproducidos en la tabla 8.1, son posiblemente todavía una de las referencias más comúnmente utilizadas.

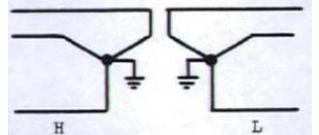
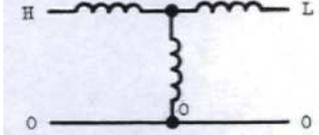
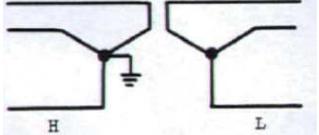
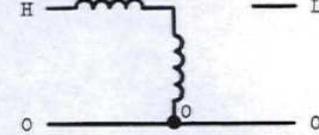
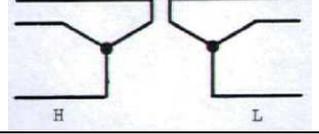
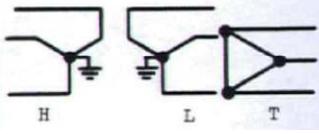
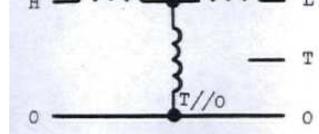
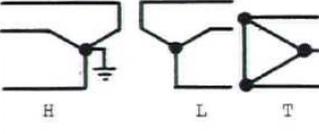
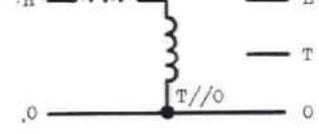
Grupo de conexión	Esquema de conexión	Circuito equivalente en T a secuencia homopolar	Impedancias homopolares aproximadas
YN-yn			$Z_{H-L} = Z_{H-L}$ $Z_{O-O} = 5 Z_{H-L}$ $Z_{L-O} = 6 Z_{H-L}$
YN-y			$Z_{H-O} = 5 Z_{H-L}$
Y-y			
YN-yn-d			$Z_{H-L} = .85 Z_{H-L}$ $Z_{O-T//O} = .75 Z_{H-T}$ $Z_{L-T//O} = .9 Z_{L-T}$
YN-y-d			$Z_{O-T//O} = .75 Z_{H-T}$

Tabla 8.1. Factores multiplicadores para la estimación de las impedancias homopolares a partir de las impedancias de cortocircuito a secuencia directa; tomado de [109]<sup>73</sup>.

¿Es correcta una aproximación generalizada de este tipo para todos los transformadores de tres columnas estrella-estrella con arrollamiento de estabilización? ¿Son los factores de la tabla 8.1 adecuados? ¿Están comprendidos los valores que presentan experimentalmente los transformadores dentro de los rangos indicados en las tablas 4.1 y 4.2 según la normativa IEC? A continuación, se trata de responder a estas preguntas a partir de los resultados experimentales obtenidos en los siete transformadores objeto de estudio.

En primer lugar, se presentan en la tabla 8.2 los resultados obtenidos en los ensayos en fábrica, para diferentes transformadores objeto de estudio experimental en la tesis, de las medidas de impedancia de cortocircuito a secuencia directa<sup>74</sup>, así como los parámetros del circuito

<sup>73</sup> En la tabla 8.1 se presentan únicamente los valores propuestos por General Electric [109] para transformadores estrella-estrella. Análisis de otras configuraciones de arrollamientos son también presentados en [109].

<sup>74</sup> A diferencia de los ensayos de impedancia homopolar, las medidas de la impedancia de cortocircuito a secuencia directa tienen una metodología perfectamente definida en las normas IEC 60076-1 e IEEE

equivalente en T de transformadores de tres arrollamientos que muy fácilmente se pueden deducir a partir de dichos ensayos.

Impedancia (en %)		Valores experimentales obtenidos en los transformadores estudiados, según tipología constructiva						
		#1			#2			#3
		#A	#B	#D	#C	#E	#F	#G
Secuencia Directa (entre arrollam)	$Z_{12}$	11,17	10,80	10,94	13,90	11,0	14,26	14,09
	$Z_{13}$	18,69	20,04	18,33	21,21	17,7	20,97	17,56
	$Z_{23}$	5,19	6,33	5,37	4,95	4,8	4,83	35,20
Secuencia Directa (en T)	$Z_1$	12,34	12,26	11,95	15,08	11,95	15,20	-1,78
	$Z_2$	-1,17	-1,46	-1,01	-1,18	-0,95	-0,94	15,87
	$Z_3$	6,36	7,79	6,38	6,13	5,75	5,77	19,34

**Tabla 8.2. Impedancias de secuencia directa medidas en fábrica y parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia directa de los transformadores estudiados.**

Por otro lado, para los citados transformadores se dispone de los parámetros del circuito equivalente en T a secuencia homopolar<sup>75</sup>, calculados con la metodología descrita en el capítulo 4 a partir de medidas de impedancia homopolar obtenidas en algunos casos de los ensayos en fábrica y en otros mediante ensayos realizados en campo. Dichos parámetros se muestran en la tabla 8.3.

Impedancia (en %)		Valores experimentales obtenidos en los transformadores estudiados, según tipología constructiva						
		#1			#2			#3
		#A	#B	#D	#C	#E	#F	#G
Secuencia Homopolar (Arrollam. Estabiliz. CERRADO)	$Z'_{01}$	10,52	9,79	10,14	13,66	11,38	14,13	-1,59
	$Z'_{02}$	-0,45	-0,42	0,31	-0,74	-0,68	-0,61	15,65
	$Z'_{03}$	5,64	5,99	5,41	5,54	5,39	5,58	18,48
Secuencia Homopolar (Arrollam. Estabiliz. ABIERTO)	$Z''_{01}$	1,26	1,08	1,02	2,6	3,87	4,96	-0,46
	$Z''_{02}$	10,20	9,53	10,06	11,53	7,27	9,12	14,61
	$Z''_{0M}$	74,46	77,84	68,59	108,69	150,27	131,7	88,99

**Tabla 8.3. Resumen de los parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelo B) obtenidos para los transformadores estudiados.**

C57.12.00 / C57.12.90. Teniendo en cuenta que adicionalmente dichas normas consideran estos ensayos como ensayos individuales o de rutina (lo que implica que deben ser efectuados sobre cada transformador fabricado), eso implica que cualquier transformador en servicio dispondrá de estas medidas obtenidas bajo una metodología clara y homogénea.

<sup>75</sup> Se utilizará el modelo B (circuitos en T diferenciados para las situaciones con arrollamiento de estabilización cerrado y abierto) según se explicó y justificó en el capítulo 4.

Una vez disponibles las impedancias de los circuitos equivalentes en T a secuencia directa y a secuencia homopolar, se van a calcular diversos factores multiplicadores entre los parámetros de dichos circuitos tanto con presencia del arrollamiento de estabilización como sin ella. El objetivo de estos cálculos será identificar posibles pautas y reglas de estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar tanto en el caso de que el arrollamiento de estabilización esté cerrado como en el caso de que esté abierto. Adicionalmente, se compararán dichos cálculos con las estimaciones genéricas previstas en el manual de General Electric [109] y en la normativa IEC, donde hay que recordar que, según establece [32], los factores  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son factores multiplicadores comprendidos en el rango  $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$ .

### 8.2.1. Estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado

En la tabla 8.4 se presentan diversas relaciones entre parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar y parámetros del circuito equivalente a secuencia directa de los transformadores estrella-estrella objeto de estudio cuando se dispone de su arrollamiento de estabilización cerrado (divididas según sus respectivas tipologías constructivas), junto con la previsión genérica que al respecto realizan la normativa IEC [32] y el manual de General Electric [109].

Ratio	Valores teóricos previstos			Valores experimentales obtenidos en los transformadores estudiados, según tipología constructiva						
				#1			#2			#3
	[IEC] <sup>76</sup>	[IEC] <sup>77</sup>	[GE]	#A	#B	#D	#C	#E	#F	#G
$(Z_{01}+Z_{02}) / (Z_1+Z_2)$	-	-	0,85	0,90	0,87	0,90	0,93	0,97	0,95	1,00
$(Z_{01}+Z_{03}) / (Z_1+Z_3)$	$a_1$	$a_2$	0,75	0,86	0,79	0,85	0,91	0,95	0,93	0,96
$(Z_{02}+Z_{03}) / (Z_2+Z_3)$	$a_2$	$a_3$	0,90	1,00	0,88	0,95	0,97	0,98	0,97	0,97
$(Z_{01}+Z_{02}/Z_{03}) / (Z_1+Z_2/Z_3)$	$a_1$	$a_2$	-	0,92	0,89	0,91	0,94	0,98	0,95	0,99
$(Z_{02}+Z_{01}/Z_{03}) / (Z_2+Z_1/Z_3)$	$a_2$	$a_3$	-	1,06	1,00	1,02	1,01	1,02	1,00	1,00

**Tabla 8.4. Factores multiplicadores entre las impedancias de secuencia homopolar y las impedancias de secuencia directa de los circuitos equivalentes en T (con arrollamiento de estabilización cerrado).**

<sup>76</sup> Para transformadores con arrollamiento de estabilización interno (#1 y #2), como en el caso de los transformadores #A, #B, #C, #D, #E y #F.

<sup>77</sup> Para transformadores con arrollamiento de estabilización externo (#3), como en el caso del transformador #G.

Como se puede observar, las estimaciones planteadas por [109] están en general por debajo de los valores experimentales obtenidos, siendo más próximos a los resultados de los transformadores de la tipología #1. Se debe recordar que se trata de un documento realizado en 1950 y que los materiales constructivos y las tecnologías de diseño y construcción de transformadores de potencia han evolucionado de forma significativa en los más de 50 años que distan desde la propuesta de General Electric y el inicio de la fabricación de los transformadores estudiados. En aquella época, las potencias de los transformadores eran en general inferiores y, previsiblemente, no dispusieran normalmente de pantallas magnéticas.

Por su parte, la orientación indicada en la norma IEC 60076-8 [32] se ve ratificada por los valores experimentales. Realmente en esta norma no se fijan unos valores propuestos concretos sino únicamente un intervalo y una ordenación respecto a las magnitudes de los factores multiplicadores.

Analizando los valores experimentales de la tabla anterior se puede observar una clara correlación entre los factores multiplicadores y la tipología constructiva de los transformadores.

En los transformadores con arrollamiento de estabilización interno (que es la ubicación más frecuente) se observa que los factores multiplicadores son más reducidos en el caso de no disponer de pantallas magnéticas (tipología #1). Cuando se dispone de pantallas magnéticas en la cuba (tipología #2), lo que suele ocurrir en transformadores con mayor potencia para mejorar el control del flujo de dispersión, los valores de los factores multiplicadores se elevan, disminuyendo la dispersión entre ellos (ya de por sí pequeña) y aproximándose a la unidad.

Por su parte, los factores multiplicadores para los transformadores con una disposición externa del arrollamiento de estabilización (tipología #3) adoptan valores muy próximos a la unidad, es decir, apenas se diferencian las impedancias entre secuencia directa y secuencia homopolar.

No obstante, en este caso la muestra de estudio consiste únicamente en el transformador #G por lo que la incertidumbre respecto a la factibilidad de extrapolar estos resultados a otros transformadores de esta tipología más atípica es algo mayor.

Una vez identificada la relación entre las impedancias a secuencia homopolar y a secuencia directa de los transformadores ensayados, se proponen a continuación en la tabla 8.5 una serie de reglas para estimar los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar a partir de las impedancias a secuencia directa (de las que siempre se dispone en los ensayos de fábrica, dado que se trata de un ensayo que las normas IEC e IEEE estipulan como ensayo de rutina individual a realizar sobre todo transformador).

La ubicación interna o externa del arrollamiento de estabilización de un transformador estrella-estrella se deduce de forma muy sencilla mediante la mera comparación de la impedancia de secuencia directa entre el arrollamiento secundario y el arrollamiento de estabilización (impedancia  $Z_{23}$ ) con la impedancia entre los arrollamientos primario y secundario (impedancia  $Z_{12}$ ), como se puede comprobar en la tabla 8.2.

Por su parte, la presencia o no de pantallas magnéticas en la cuba requerirá de una consulta al respecto al fabricante del transformador. Se podría suponer, con poco riesgo de equivocarse, que los transformadores de potencia inferior a 25 MVA no dispondrán de pantallas magnéticas y que los transformadores de potencia superior a 40 MVA si que dispondrán de ellas. En casos

intermedios, no hay una regla clara, si bien es más probable que no se disponga de las pantallas<sup>78</sup>.

Ratio	Reglas para la estimación de las impedancias homopolares en transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización CERRADO		
	Transformadores con Arrollam. Estabiliz. INTERNO		Transformadores con Arrollam. Estabiliz. EXTERNO
	SIN pantallas magnéticas	CON pantallas magnéticas	
$(Z_{01}+Z_{02}) / (Z_1+Z_2)$	0,90	0,95	1,00
$(Z_{01}+Z_{03}) / (Z_1+Z_3)$	0,85	0,93	0,95
$(Z_{02}+Z_{03}) / (Z_2+Z_3)$	0,95	0,97	1,00

**Tabla 8.5. Factores multiplicadores propuestos para estimar las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar a partir de las impedancias de secuencia directa en transformadores con arrollamiento de estabilización cerrado.**

Con el objetivo de garantizar la fiabilidad de resultados obtenidos a partir de la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar según lo indicado en la tabla 8.5, en el apartado F.1 del apéndice F se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre la influencia de estos factores multiplicadores en las corrientes de cortocircuito.

Según los resultados obtenidos en dicho análisis de sensibilidad, las reglas de estimación de las impedancias de secuencia homopolar para los transformadores estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización cerrado mostradas en la tabla 8.5 constituyen una herramienta fiable en el análisis de escenarios de red ante faltas monofásicas a tierra ya que el cálculo de las corrientes de cortocircuito en los arrollamientos es razonablemente robusto ante pequeños errores en la estimación.

En todo caso, la utilización de estas sencillas reglas aporta una mayor precisión en el análisis de los escenarios frente a las estimaciones comúnmente utilizadas en la práctica habitual, basadas en la normativa IEC [32] o en estimaciones genéricas [109].

### 8.2.2. Estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto

De forma análoga al caso anterior, en la tabla 8.6 se presentan diversas relaciones entre parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar y parámetros del circuito equivalente a secuencia directa de los transformadores estrella-estrella objeto de estudio cuando se dispone de su arrollamiento de estabilización abierto, incluyendo también las indicaciones realizadas por la normativa IEC [32] y el manual de General Electric [109].

<sup>78</sup> Lógicamente, se pueden plantear algunos ensayos en campo que permitieran identificar la presencia no de pantalla magnética. No obstante, carecería de lógica este planteamiento ya que, dispuestos a realizar ensayos en campo, se realizarían los propios ensayos de impedancia homopolar en los términos propuestos en el capítulo 4.

Además de las mismas relaciones que en el caso anterior, con la salvedad de que en este caso todos los ratios se refieren a la impedancia de cortocircuito del transformador ( $Z_{12}$ , o lo que es lo mismo,  $Z_1+Z_2$ ), se añade al final de la tabla 8.6 información relativa a la impedancia a secuencia homopolar del transformador “a circuito abierto” vista desde los lados primario y secundario, así como la proporción en la que se reparten la impedancia de la rama serie del circuito equivalente ( $Z_{012}$ ) entre sus dos componentes ( $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ ). Se justificará a continuación el motivo para ello.

Ratio	Valores teóricos previstos		Valores experimentales obtenidos en los transformadores estudiados, según tipología constructiva						
			#1			#2			#3
	[IEC]	[GE]	#A	#B	#D	#C	#E	#F	#G
$(Z_{01}+Z_{02}) / (Z_1+Z_2)$	-	1	1,03	0,98	1,01	1,02	1,01	0,99	1,00
$(Z_{01}+Z_{0M}) / (Z_1+Z_2)$	-	5	6,78	7,31	6,36	8,01	14,01	9,58	6,28
$(Z_{02}+Z_{0M}) / (Z_1+Z_2)$	-	6	7,58	8,09	7,19	8,65	14,32	9,88	7,35
$(Z_{01}+Z_{02} // Z_{0M}) / (Z_1+Z_2)$	$a_1$	-	0,92	0,89	0,90	0,94	0,98	0,95	0,86
$(Z_{02}+Z_{01} // Z_{0M}) / (Z_1+Z_2)$	$a_2$	-	1,02	0,98	1,01	1,01	1,00	0,97	1,00
$Z_{01}+Z_{0M}$	$\approx 50$	-	75,72	78,92	69,61	111,29	154,14	136,66	88,53
$Z_{02}+Z_{0M}$	$\approx 60$	-	84,66	87,37	78,65	120,22	157,54	140,82	103,60
$Z_{01} / (Z_{01}+Z_{02})$	-	-	11,0 %	10,2 %	9,2 %	18,4 %	34,7 %	35,2 %	-3,3 %
$Z_{02} / (Z_{01}+Z_{02})$	-	-	89,0 %	89,8 %	90,8 %	81,6 %	65,3 %	64,8 %	103,3 %

**Tabla 8.6. Factores multiplicadores entre las impedancias de secuencia homopolar y las impedancias de secuencia directa de los circuitos equivalentes en T con arrollamiento de estabilización abierto.**

En este caso, para establecer las reglas de estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar en transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto se hará un planteamiento ligeramente distinto al caso de arrollamiento de estabilización cerrado debido a dos factores diferenciales:

- Únicamente se dispone de una impedancia de referencia a secuencia directa, la impedancia de cortocircuito del transformador ( $Z_{12}$ ), sobre la que apoyar nuestras reglas de estimación.
- La impedancia de la rama paralelo del circuito equivalente a secuencia homopolar representa esencialmente la impedancia de magnetización a secuencia homopolar, que presenta un cierto carácter no lineal dependiente de la tensión aplicada.

Tal y como se observa en la tabla, en todos los tipos de transformadores se puede validar sin apenas error que la suma de las impedancias de la rama serie es la misma para secuencia homopolar ( $Z_{01} + Z_{02}$ ) que para secuencia directa, y por tanto igual a la impedancia de cortocircuito del transformador. Esta misma regla fue también establecida por [109].

De esta forma, la estimación de las impedancias  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  se reduce a decidir cómo se reparten entre ellas el valor total de la rama serie completa. En las dos últimas líneas de la tabla 8.6 se han indicado los valores porcentuales de cada una de las impedancias respecto a la suma de ellas obtenidos para cada uno de los transformadores estudiados. En este sentido, se observa una importante correlación con la tipología constructiva del transformador. Para los transformadores de tipología #1, el reparto  $Z_{01} - Z_{02}$  es aproximadamente 10 % / 90 %. En el caso de transformadores de tipología #2 dicho reparto se equilibra hasta 35 % / 65 %, si bien en el transformador #C el reparto es intermedio entre ambos valores. Por su parte, para el transformador #3 hay un sesgo completo hacia la impedancia  $Z_{02}$ , que se puede redondear a un reparto -5 % / 105 %.

En el apartado F.2.1 del apéndice F se presenta un análisis de sensibilidad de la influencia del reparto porcentual de las impedancias de la rama serie del circuito equivalente a secuencia homopolar en las corrientes de cortocircuito de faltas asimétricas.

Por otro lado, en lo que respecta a la impedancia paralelo del circuito equivalente a secuencia homopolar ( $Z_{0M}$ ), se observa en la tabla 8.6 que las estimaciones genéricas aportadas por la normativa IEC [32] y el manual General Electric [109] no se ajustan excesivamente bien a todos los valores experimentales obtenidos, si bien podrían ser de utilidad en una primera aproximación. Ello era esperable dada la mayor incertidumbre que incorporan al valor de esta impedancia las no linealidades de los trayectos ferromagnéticos que inciden en ella.

En el apartado F.2.2 del apéndice F se analiza en detalle la pérdida de precisión que ello supone en el funcionamiento conjunto del circuito equivalente, teniendo en cuenta que, al ser el valor de la impedancia  $Z_{0M}$  notablemente mayor que el de  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ , cualquier cálculo relacionado con faltas asimétricas vendrá mayoritariamente determinada por estas últimas. De cualquier forma, como también apuntan Wang y Lascau en [82], los valores de la impedancia  $Z_{0M}$  del circuito equivalente de transformadores estrella-estrella de tres columnas<sup>79</sup> están en un rango de 50 ÷ 150 % y no deben ser despreciados en los cálculos de faltas asimétricas por el error que ello supondría.

La influencia de las tipologías constructivas en el valor de la impedancia  $Z_{0M}$  se puede observar en la tabla 8.6. Dentro del rango mencionado anteriormente, se podría precisar que los transformadores sin pantallas magnéticas se sitúan en la parte baja del rango (alrededor de 0,75 pu respecto a la impedancia base del transformador en valores unitarios) y los transformadores con pantallas magnéticas en la parte alta (entre 1 y 1,5 pu). Ello es lógico si se tiene en cuenta que las pantallas magnéticas adosadas en la cuba reducirán la reluctancia del trayecto por el que circularán los flujos homopolares en condiciones de circuito abierto. Esta menor reluctancia, como es bien sabido, se traducirá en un incremento proporcional de la impedancia presentada por el transformador en dichas circunstancias.

Como resumen de todo lo expuesto respecto a la estimación de las impedancias del circuito equivalente a secuencia homopolar para los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto, se reflejan en la tabla 8.7 las reglas de estimación propuestas para dichas impedancias. Es importante insistir en el hecho de que como se ha visto en los análisis de sensibilidad realizados en el apéndice F, a pesar de la mayor dispersión existente en los valores experimentales obtenidos en el reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  y en el valor de la impedancia de rama paralelo  $Z_{0M}$ , el comportamiento de los transformadores con arrollamiento

<sup>79</sup> En transformadores de flujos libres, igual que sucede con la impedancia magnetizante en secuencia directa, valores del orden de  $10^4$  si que permiten que se desprecie la rama sin error apreciable.

de estabilización abierto queda fundamentalmente definido por el valor total de la rama serie (aspecto en el que apenas existe discrepancia entre la regla propuesta y los valores obtenidos en todos los transformadores estudiados).

Ratio o impedancia a estimar	Reglas para la estimación de las impedancias homopolares en transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización ABIERTO		
	Transformadores con Arrollam. Estabiliz. INTERNO		Transformadores con Arrollam. Estabiliz. EXTERNO
	SIN pantallas magnéticas	CON pantallas magnéticas	
$(Z_{01}+Z_{02}) / Z_{12}$	1,00	1,00	1,00
$Z_{01} / Z_{12}$	10 %	35 %	-5 %
$Z_{02} / Z_{12}$	90 %	65 %	105 %
$Z_{0M}^{80}$	75 %	125 %	90 %

**Tabla 8.7. Factores multiplicadores propuestos para estimar las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar a partir de las impedancias de secuencia directa en transformadores con arrollamiento de estabilización abierto.**

### 8.3. Simulación de escenarios de explotación de red ante faltas asimétricas

En este apartado se va a analizar la influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de una red eléctrica con transformadores estrella-estrella ante faltas asimétricas.

Para ello se van a realizar diversas simulaciones en diferentes escenarios reales de la red de Unión Fenosa Distribución que permitirán valorar la influencia de disponer o no de arrollamientos de estabilización cerrados en diferentes situaciones de explotación de la red.

Con carácter general, y a la luz de todo lo expuesto hasta este momento en la presente tesis doctoral, se podría indicar de forma cualitativa que, en una red con transformadores estrella-estrella disponiendo de arrollamientos de estabilización cerrados, ante faltas asimétricas se van a generar corrientes de falta asimétricas más elevadas y sobretensiones más bajas que en el caso de que se dispusieran los arrollamientos de estabilización abiertos. A lo largo del apartado 8.3 se pretende validar cuantitativa y cualitativamente dicha predicción, realizando diversos análisis en diferentes escenarios de explotación.

En cada uno de los escenarios a analizar, se pretende valorar fundamentalmente en qué medida el incremento de la impedancia homopolar ocasionado por la apertura del arrollamiento de estabilización provoca una reducción de las corrientes de cortocircuito ante faltas asimétricas y un incremento de las sobretensiones producidas en las fases sanas durante dichas faltas. Se trata por tanto de evaluar qué balance es más favorable para la red en los diferentes aspectos positivos y negativos planteados en la tabla 8.8.

<sup>80</sup> Expresada como valor porcentual respecto a la impedancia base del transformador.

Consideraciones cualitativas para la red ante faltas asimétricas <sup>81</sup>	Red con transformadores con arrollamiento de estabilización CERRADO	Red con transformadores con arrollamiento de estabilización ABIERTO
<b>Aspectos positivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menores solicitaciones dieléctricas</li> <li>- Mayor capacidad de asegurar régimen de neutro efectivamente puesto a tierra</li> <li>- Mayor sensibilidad en las protecciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menores corrientes de cortocircuito y esfuerzos electrodinámicos</li> </ul>
<b>Aspectos negativos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores corrientes de cortocircuito y esfuerzos electrodinámicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores solicitaciones dieléctricas</li> <li>- Menor capacidad de asegurar régimen de neutro efectivamente puesto a tierra</li> <li>- Menor sensibilidad en las protecciones</li> </ul>

**Tabla 8.8. Valoración cualitativa de los aspectos positivos y negativos para la explotación de la red ante faltas asimétricas en relación con la influencia de los arrollamientos de estabilización de los transformadores estrella-estrella.**

De cara a disponer de una visión completa de la influencia de los arrollamientos de estabilización, se van a manejar dos redes de distribución reales:

- Por un lado, se analizarán escenarios de explotación sobre una red de reparto de 45 kV de tipología esencialmente rural, alimentada por una red superior de 132 kV, y caracterizada por una notable dispersión de los núcleos de consumo y una alimentación a los mismos a través de líneas aéreas y con un grado de mallado pequeño.
- Por otro lado, se plantearán escenarios de explotación sobre una red de reparto de 45 kV de tipología urbana, alimentada por una red superior de 220 kV, y caracterizada por una elevada densidad de consumo, con un mayor grado de mallado y un peso muy superior de líneas subterráneas.

En general, las redes reales de distribución de electricidad están ampliamente interconectadas, es decir, no es posible disponer de zonas de red totalmente autónomas y aisladas del resto. Por ello, en las dos redes a analizar se considerará una porción de la red significativa sobre la cual se actuará, siendo razonablemente independiente del resto de la red (con la cual está interconectada).

Para toda la red de Unión Fenosa Distribución se dispone de un modelado completo de las líneas y transformadores tanto a secuencia directa como a secuencia homopolar<sup>82</sup>. Para las redes objeto de análisis, se realizará un modelado específico de los transformadores ante secuencia homopolar considerando dos posibles escenarios de situación de sus respectivos arrollamientos de estabilización: cerrado (que es su configuración habitual) o abierto. Dicho modelado a secuencia homopolar se basará en las reglas de estimación previamente definidas en los apartados 8.2.1 y 8.2.2.

<sup>81</sup> Se considera en este análisis cualitativo introductorio simplificado que los transformadores estrella-estrella disponen de ambos neutros puestos a tierra.

<sup>82</sup> En el caso de las líneas eléctricas existen en la bibliografía técnica fórmulas de cálculo fiables para la determinación de las impedancias de secuencia directa y secuencia homopolar. En el caso de los transformadores, las impedancias de secuencia directa se obtienen a partir de ensayos de fábrica pero las impedancias de secuencia homopolar se obtienen históricamente por medio de estimaciones como las indicadas en [109] u otros como [39].

Tanto para la red rural como para la red urbana se van a realizar simulaciones de red en dos estados de explotación:

- Estado normal de explotación, es decir, disponiendo de todos los elementos (transformadores y líneas) de la red.
- Red en diferentes estados de contingencia, es decir, se analizarán situaciones de red en las que algún transformador o alguna línea se encuentra indisponible<sup>83</sup>.

El escenario de red ante contingencia es especialmente relevante en el caso de disponer los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto para el análisis del régimen de neutro de la red, ya que al efecto general de aumento de la impedancia homopolar, en la consideración de dar por indisponible un transformador, se añade la pérdida de la posibilidad de aportación de corriente de neutro a través de dicho transformador.

Asimismo, y de cara a dotar de mayor amplitud al análisis realizado, se considerarán para cada uno de los estados de explotación indicados anteriormente, dos posibles configuraciones de operación de red:

- Configuración mallada, es decir, considerando todos los enlaces entre las subestaciones cerrados.
- Configuración desmallada, es decir, considerando que cada una de las subestaciones de distribución de consumo (subestaciones 45/15 kV) consideradas en la red de reparto de 45 kV son alimentadas por un único transformador 220/45 kV o 132/45 kV<sup>84</sup>.

Ambas configuraciones serán analizadas en detalle ya que son ambas perfectamente posibles en la operación de una red de reparto, siendo la elección entre una u otra una decisión basada, entre otros aspectos, en función del grado de saturación de la red, de la calidad de suministro o de la búsqueda de una mayor sencillez en la operación de la red y del sistema de protección de la misma.

Las simulaciones de red serán realizadas en la aplicación informática de análisis de red *ASPEN OneLiner*<sup>®</sup> de la compañía *Advanced Systems for Power Engineering*, de uso muy extendido en los departamentos de protecciones de las compañías eléctricas para el análisis, ajuste y configuración de los sistemas de protección de la red.

Incorporada la topología de la red en esta aplicación, así como las impedancias de las líneas y transformadores que la conforman, se pueden obtener de la aplicación las impedancias equivalentes de la red en cada nodo a secuencia directa, inversa y homopolar así como las corrientes de fase y de neutro en cada nodo de la red ante cortocircuitos trifásicos, bifásicos a tierra, bifásicos entre fases y monofásicos a tierra en dicho nodo.

A partir de estos valores aportados por la aplicación, se obtendrán mediante sencillos cálculos la máxima sobretensión producida ante faltas monofásicas en las fases sanas, y consecuentemente, el factor de defecto a tierra ( $K_{PAT}$ ) en cada nodo.

---

<sup>83</sup> Esta configuración es habitualmente conocida como N-1.

<sup>84</sup> En ocasiones, en subestaciones con dos transformadores de alimentación 220/45 kV o 132/45 kV ambos transformadores se pueden explotar en paralelo. Incluso dos transformadores de subestaciones alimentadoras también pueden explotarse en paralelo. En las redes analizadas en los apartados 8.3.1 y 8.3.2 se indicarán las configuraciones reales de operación desmallada que se realiza sobre dichas redes por parte del Centro de Operación de Red de Unión Fenosa Distribución.

Este factor de defecto a tierra será de gran relevancia en la valoración de la influencia sobre la coordinación de aislamiento del arrollamiento de estabilización de los transformadores estrella-estrella por lo que merece la pena detenerse en él. La norma IEC 60076-1 [110] lo define como “para un punto dado de una red trifásica, y para una configuración de red dada, la relación entre el máximo valor eficaz de la tensión fase-tierra a frecuencia industrial en una fase sana durante un defecto a tierra que afecta a una o varias fases en cualquier punto de la red, y el valor eficaz de la tensión a frecuencia industrial fase-tierra que se obtendría en la localización dada en ausencia de cualquier defecto”. Una definición similar (*earth-fault factor EFF*) se puede encontrar en la normativa IEEE [106]. Adicionalmente, dicha norma americana referencia otro parámetro, coeficiente de puesta a tierra (*coefficient of grounding COG*), que difiere con el anterior en un factor  $\sqrt{3}$ , por considerar en el denominador la tensión de línea en ausencia de defecto, así como referirlo a tanto por ciento.

Tal y como se indicó en el apartado 8.1, puede considerarse una red con un régimen de neutro efectivamente puesto a tierra cuando se cumpla que el cociente entre la reactancia de secuencia homopolar y la reactancia de secuencia directa sea inferior a tres ( $X_0/X_1 < 3$ ) y el cociente entre la resistencia de secuencia homopolar y la reactancia de secuencia directa sea inferior a uno ( $R_0/X_1 < 1$ ). Según se ha estudiado en la literatura técnica en esta materia por autores como Willheim y Waters [105] o Crespo [112] se pueden considerar cumplidas ambas condiciones cuando el factor de defecto a tierra es inferior a 1,4 o, lo que sería equivalente, que el coeficiente de defecto a tierra es inferior al 80 %.

En este sentido, puede ocurrir que un transformador disponga de una conexión de neutro rígidamente conectado a tierra y, sin embargo, la impedancia homopolar resultante sea lo suficientemente alta como para no cumplir la condición reseñada para un régimen de neutro efectivamente puesto a tierra. Normalmente estas situaciones se darán de forma local. En cualquier caso, la supresión de los arrollamientos de estabilización suponen un aumento de la impedancia homopolar del transformador y, por tanto, la detección de este tipo de situaciones constituye un objetivo importante dentro de la tesis, que será abordado en este apartado.

De forma análoga a lo realizado en el capítulo 7, el análisis se centrará en las corrientes y tensiones producidas ante faltas monofásicas a tierra, mostrando como referencia las corrientes ante faltas trifásicas. Se muestran a continuación los análisis realizados tanto en una red rural como en una red urbana.

### 8.3.1. Análisis de escenarios de red rural

La red rural analizada cubre la red de reparto de 45 kV de una amplia zona geográfica (equivalente a una provincia) de baja densidad de consumo eléctrico. Esta red de reparto se alimenta esencialmente por medio de una red superior de 132 kV con inyecciones a través de 8 transformadores 132/45 kV. El régimen de neutro de ambas redes se plantea como rígidamente puesto a tierra por medio de la conexión a tierra de los neutros primarios y secundarios de los transformadores 132/45 kV especificados como transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y grupo de conexión YNyn0+d11. Por su parte, la red de reparto de 45 kV alimenta subestaciones de distribución 45/15 kV que abastecen a los centros de consumo por medio de transformadores 45/15 kV especificados también como transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y grupo de conexión YNyn0+d11, si bien en este caso se

disponen ambos neutros primario y secundario aislados de tierra<sup>85</sup>. El régimen de neutro de la red de distribución de 15 kV se configura aislado de tierra.

En las figuras 8.1 y 8.2 se muestran la topología de la red rural analizada.

Como se puede observar en la figura 8.1, la red de 132 kV se alimenta desde la red de transporte por medio de dos transformadores 400/132 kV en la subestación LST.

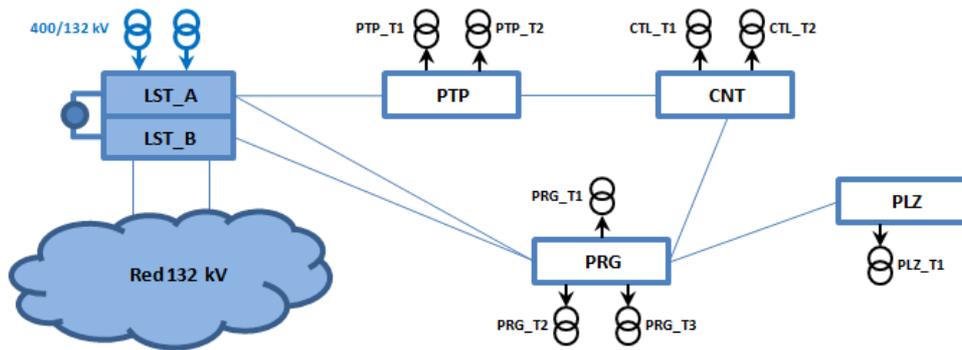


Figura 8.1. Topología de la red de alimentación de 132 kV de la red rural analizada.

La red de reparto de 45 kV se alimenta por medio de las inyecciones mencionadas de transformadores 132/45 kV. La configuración habitual en explotación normal consiste en distribuir las subestaciones entre las diferentes inyecciones de forma desmallada, según los colores de la figura 8.2. Las subestaciones en las que se realiza la alimentación desde 132 kV se representan sombreadas internamente del color identificativo de dicha inyección.

Dado que las redes de alta tensión tienen generalmente una topología mallada, los puntos en los que se realiza el desmallado de la red se representan mediante pequeños círculos con el interior sombreado en blanco. Estos puntos consisten físicamente en interruptores telecontrolados que se operan normalmente abiertos. En las subestaciones con un esquema unifilar de doble barra se representan ambas barras, así como su interruptor de acoplamiento de barras, que se identificará sombreado en color o en blanco según se opere normalmente cerrado o normalmente abierto, respectivamente.

En las simulaciones de red con configuración mallada se considerarán cerrados todos estos interruptores que se operan normalmente abiertos en configuración desmallada.

Como se puede observar, hay varias subestaciones que tienen conectada generación. Con la excepción de la subestación DDC que tiene conectada una central de cogeneración, el resto son pequeñas generaciones hidráulicas.

<sup>85</sup> Se resalta el hecho de que la política de Unión Fenosa Distribución de explotar los transformadores 45/15 kV estrella-estrella con ambos neutros aislados de tierra no es incompatible con que el régimen de neutro de la red de 45 kV sea aterrizado. Se ha demostrado suficiente con la aportación de corriente de neutro de los transformadores 132/45 kV. En casos excepcionales (subestaciones 45/15 kV lejanas alimentadas de forma radial), no obstante, se puede conectar a tierra el neutro primario de los transformadores 45/15 kV.

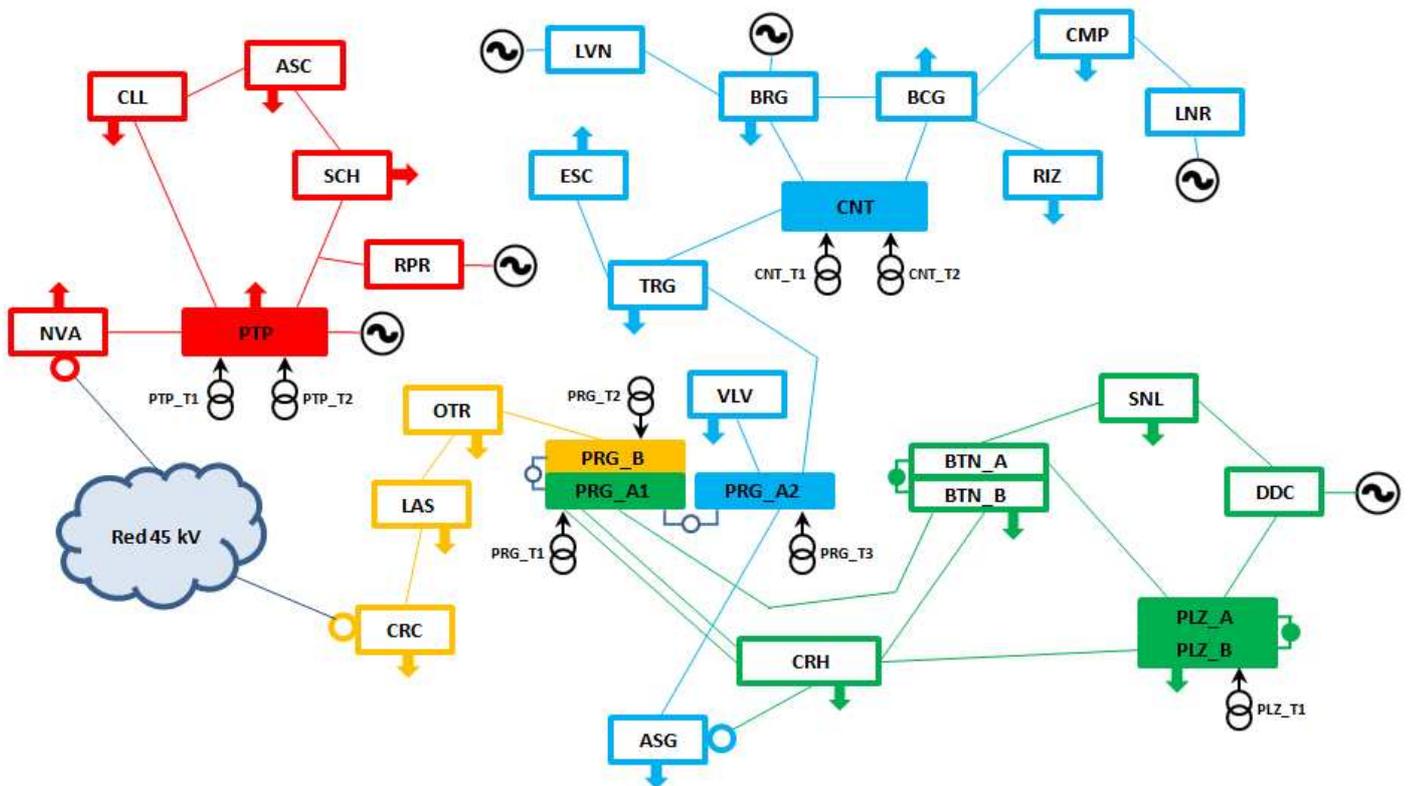


Figura 8.2. Topología de la red de reparto de 45 kV de la red rural analizada.

Los principales parámetros que caracterizan la red rural analizada son los siguientes:

Parámetros y características de la red RURAL	
Nº total suministros	~ 130.000
Potencia máxima anual de consumo (MW)	125
Superficie (km <sup>2</sup> )	~ 6.500
Densidad de consumo (kW/km <sup>2</sup> )	~ 20
Líneas 132 kV (km)	~ 160
Líneas 45 kV (km)	~ 445
% de líneas aéreas	96,8 %
Nº subestaciones 132/45 kV	4
Nº transformadores 132/45 kV	8 (2 de tipología #1, 5 de tipología #2 y 1 sin arrollamiento de estabilización)
Nº subestaciones 45/15 kV	20 (consumo) + 4 (generación)

Tabla 8.9. Principales parámetros característicos de la red rural analizada.

Como se ha indicado, los transformadores de la red analizada son transformadores estrella-estrella 132/45 kV con ambos neutros conectados rígidamente a tierra y transformadores estrella-estrella 45/15 kV con ambos neutros aislados de tierra. Como se ha visto en capítulos precedentes, en caso de disponer ambos neutros primario y secundario aislados de tierra, el papel del arrollamiento de estabilización es irrelevante a efectos externos. Por este motivo, el análisis de la influencia de los arrollamientos de estabilización en la explotación de la red se centrará en los transformadores 132/45 kV. Se presentan en la tabla 8.10 las principales características de los transformadores 132/45 kV de la red rural analizada.

Parámetros y características de los transformadores 132/45 kV de la red rural							
Subestación	Año Fabricación	Relación transformación (kV)	Potencias nominales (MVA)	Z <sub>12</sub> (%)	Z <sub>13</sub> (%)	Z <sub>23</sub> (%)	Tipología considerada <sup>86</sup>
CNT_T1	1979	130 / 46 / 15	30 / 30 / 10	11,70	17,34	4,29	#1
CNT_T2	1965	130 / 46 / 15	30 / 30 / 10	10,72	20,73	8,24	#1
PLZ_T1	2008	132 / 45 / 10	60 / 60 / 20	11,0	20,7	7,7	#2
PRG_T1	1971	130 / 46 / 20	60 / 60 / 20	12,31	20,87	6,19	#2
PRG_T2	1990	130 / 46 / 15	60 / 60 / 20	11,13	16,83	4,35	#2
PRG_T3	2002	130 / 46 / 16,05	60 / 60 / 20	12,30	31,86	17,10	#2
PTP_T1	1983	130 / 46 / 15	60 / 60 / 20	10,85	16,42	4,26	#2
PTP_T2	1945	130 / 46	30 / 30	12,0	-	-	Sin Arrollam. Estabilización

**Tabla 8.10. Principales parámetros característicos de los transformadores 132/45 kV de la red rural analizada.**

Como se indicó en la introducción del apartado 8.3, se van a plantear diversas simulaciones sobre esta red, en cada una de las cuales se valorará de forma comparativa el modelado de los transformadores de la tabla 8.10 a secuencia homopolar en caso de disponer el arrollamiento de estabilización cerrado o abierto.

Inicialmente, se analizarán los valores representativos que se producen en cada uno de los nodos de la red ante faltas monofásicas a tierra en un escenario de red en explotación normal, es decir, con todos los elementos de la red disponibles. Finalmente, se planteará un escenario representativo de explotación ante contingencia de un transformador 132/45 kV.

<sup>86</sup> Tipología constructiva considerada a efectos de estimación de las impedancias del circuito equivalente a secuencia homopolar a partir de las reglas definidas en el apartado 8.2. Se recuerda que la tipología #1 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización interno y ausencia de pantallas magnéticas, la tipología #2 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización interno y presencia de pantallas magnéticas en la cuba y la tipología #3 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización externo.

### Simulación de escenarios de red en explotación normal y configuración mallada

En las tablas 8.11 y 8.12 se presenta el resumen de los resultados de las simulaciones en el caso de disponer la red en estado normal de explotación con operación mallada (es decir, suponiendo que todos los interruptores de la red y de acoplamiento de barras se operan cerrados). Los resultados detallados para cada uno de los nodos se encuentran en el apéndice G.

Se indican, para cada uno de los nodos de la red analizada, la corriente de falta trifásica ( $I_{3\phi}$ ), así como, para las faltas monofásicas, la corriente de falta ( $I_{1\phi}$ ), el ratio de la corriente monofásica respecto a la trifásica ( $I_{1\phi}/I_{3\phi}$ ), la tensión homopolar ( $V_0$ ) y el factor de defecto a tierra  $K_{PAT}$ .

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con configuración de red MALLADA									
		Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
		$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi}/I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$	$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi}/I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	15628	17010	1,09	29,0	1,05	15628	16489	1,06	38,0	1,15
	PROMEDIO	8669	8812	1,00	25,5	1,02	8669	7689	0,85	33,0	1,09
	MÍNIMA	4738	4683	0,93	20,9	0,96	4738	4055	0,75	22,6	0,98
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	13968	18230	1,31	14,3	1,24	13968	12215	0,94	14,8	1,26
	PROMEDIO	5523	5797	0,92	10,1	1,10	5523	4402	0,77	12,7	1,17
	MÍNIMA	609	522	0,67	3,2	0,90	609	517	0,65	9,7	1,05

Tabla 8.11. Comparación de los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración MALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.

Red analizada		Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO con configuración de red MALLADA				
		$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	-3,1 %	-3,1 %	43,0 %	11,0 %
	PROMEDIO	0,0 %	-15,1 %	-15,1 %	28,5 %	7,1 %
	MÍNIMA	0,0 %	-21,7 %	-21,7 %	8,1 %	2,0 %
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,3 %	0,3 %	221,1 %	19,2 %
	PROMEDIO	0,0 %	-13,8 %	-13,8 %	52,5 %	7,2 %
	MÍNIMA	0,0 %	-33,0 %	-33,0 %	-0,1 %	0,3 %

Tabla 8.12. Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración MALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.

De las tablas anteriores, así como de los resultados detallados del apartado G.1.1 del apéndice G, se pueden extraer las siguientes conclusiones relacionadas con el efecto de explotar los transformadores 132/45 kV con el arrollamiento de estabilización abierto en las redes rurales en explotación normal con configuración mallada:

- Tanto en la red de 132 kV como en la red de 45 kV se producen reducciones significativas de las corrientes de cortocircuito ante faltas monofásicas. La reducción es más relevante en aquellos nodos más cercanos a la inyección, reduciéndose por tanto en mayor medida las corrientes de falta en las subestaciones con mayores requerimientos en este sentido. Estas reducciones, no obstante, están muy lejos de comprometer la sensibilidad en la actuación de las protecciones.
- En las subestaciones de la red de 45 kV en las que se producen las inyecciones desde la red de 132 kV, con el arrollamiento de estabilización cerrado se tienen ratios  $I_{1\phi} / I_{3\phi}$  de valor elevado que determinan situaciones más desfavorables frente a las que suponen las faltas trifásicas. En estas subestaciones dicho ratio se sitúa holgadamente por debajo de la unidad al disponer los arrollamientos de estabilización abiertos. En general, hay una reducción relevante del ratio en todos los nodos de la red tanto en 132 kV como en 45 kV.
- Las tensiones homopolares crecen de una forma moderada en la red de 132 kV (incrementos de hasta 11 kV) y en la red de 45 kV (incrementos de hasta 8 kV). Las mayores tasas de incremento se producen en las subestaciones más cercanas a la inyección, que con arrollamiento de estabilización cerrado tienen valores muy reducidos. Por tanto, aunque porcentualmente su incremento puede parecer elevado, en términos absolutos el incremento no es significativo.
- De igual forma, el factor de defecto a tierra se incrementa más en las instalaciones de 45 kV con inyección 132/45 kV, si bien dicho incremento es moderado y se mantiene siempre por debajo del valor 1,4 que determina el límite por encima del cual se puede comprometer la efectividad de la puesta a tierra de una red.

### Simulación de escenarios de red en explotación normal y configuración desmallada

En las tablas 8.13 y 8.14 se presentan los resultados de las simulaciones en caso de disponer la red en estado normal de explotación con operación desmallada (es decir, suponiendo que todos los interruptores de la red y de acoplamiento de barras se operan según lo indicado en la figura 8.2).

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con configuración de red DESMALLADA									
		Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
		$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi} / I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$	$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi} / I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	15623	16996	1,09	29,1	1,06	15623	16486	1,06	38,1	1,15
	PROMEDIO	8659	8784	1,00	25,6	1,02	8659	7678	0,85	33,0	1,09
	MÍNIMA	4731	4676	0,93	20,9	0,96	4731	4050	0,75	22,6	0,98
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	8625	10528	1,34	14,1	1,21	8625	7394	0,96	14,7	1,24
	PROMEDIO	3959	4076	0,93	9,9	1,08	3959	3238	0,79	12,3	1,15
	MÍNIMA	609	522	0,68	2,7	0,88	609	517	0,65	9,4	1,03

Tabla 8.13. Comparación de los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración DESMALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.

Red analizada		Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO con configuración de red DESMALLADA				
		$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	-3,0 %	-3,0 %	41,2 %	10,7 %
	PROMEDIO	0,0 %	-14,9 %	-14,9 %	28,0 %	7,0 %
	MÍNIMA	0,0 %	-21,2 %	-21,2 %	8,0 %	2,0 %
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,3 %	0,3 %	246,1 %	18,9 %
	PROMEDIO	0,0 %	-13,2 %	-13,2 %	47,4 %	7,0 %
	MÍNIMA	0,0 %	-30,1 %	-30,1 %	-0,1 %	0,3 %

**Tabla 8.14. Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración DESMALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.**

De igual forma que en la configuración mallada, el efecto de explotar los transformadores 132/45 kV con el arrollamiento de estabilización abierto en las redes rurales en explotación normal con configuración desmallada tiene unas implicaciones muy similares, que se pueden resumir en los mismos aspectos ya mencionados:

- Tanto en la red de 132 kV como en la red de 45 kV se producen reducciones significativas de las corrientes de cortocircuito ante faltas monofásicas. La reducción es más relevante en aquellos nodos más cercanos a la inyección, reduciéndose por tanto en mayor medida las corrientes de falta en las subestaciones con mayores requerimientos en este sentido. Esta reducción no compromete la sensibilidad en la actuación de las protecciones.
- En las subestaciones de la red de 45 kV en las que se producen las inyecciones desde la red de 132 kV, con el arrollamiento de estabilización cerrado se tienen ratios  $I_{1\phi} / I_{3\phi}$  de valor elevado que determinan situaciones más desfavorables frente a las que suponen las faltas trifásicas. En estas subestaciones dicho ratio se sitúa holgadamente por debajo de la unidad al disponer los arrollamientos de estabilización abiertos. En general, hay una reducción relevante del ratio en todos los nodos de la red tanto en 132 kV como en 45 kV.
- Las tensiones homopolares crecen de una forma moderada en la red de 132 kV (incrementos de hasta 11 kV) y en la red de 45 kV (incrementos de hasta 7 kV). Las mayores tasas de incremento se producen en las subestaciones más cercanas a la inyección, que con arrollamiento de estabilización cerrado tienen valores muy reducidos. Por tanto, aunque porcentualmente su incremento puede parecer elevado, en términos absolutos el incremento no es significativo.
- De igual forma, el factor de defecto a tierra se incrementa más en las instalaciones de 45 kV con inyección 132/45 kV, si bien dicho incremento es moderado y se mantiene siempre por debajo del valor 1,4 que determina el límite por encima del cual se puede comprometer la efectividad de la puesta a tierra de una red.

### Comparaciones de los escenarios de red en explotación normal en configuración mallada y configuración desmallada

A partir de las simulaciones realizadas con los arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV tanto cerrados como abiertos, y con las configuraciones de explotación tanto malladas como desmalladas, en este apartado se pretende valorar el impacto sobre la red (en los parámetros analizados) del hecho de realizar una explotación con configuración mallada o desmallada.

En las tablas 8.15 a 8.18 se muestran los resultados comparativos, de forma agregada para cada nivel de tensión, entre las configuraciones de explotación malladas y desmalladas, tanto para el caso de arrollamientos de estabilización cerrados como para el caso de arrollamientos de estabilización abiertos.

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con el arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV CERRADO									
		Configuración MALLADA					Configuración DESMALLADA				
		I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	15628	17010	1,09	29,0	1,05	15623	16996	1,09	29,1	1,06
	PROMEDIO	8669	8812	1,00	25,5	1,02	8659	8784	1,00	25,6	1,02
	MÍNIMA	4738	4683	0,93	20,9	0,96	4731	4676	0,93	20,9	0,96
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	13968	18230	1,31	14,31	1,24	8625	10528	1,34	14,13	1,21
	PROMEDIO	5523	5797	0,92	10,12	1,10	3959	4076	0,93	9,85	1,08
	MÍNIMA	609	522	0,67	3,24	0,90	609	522	0,68	2,70	0,88

Tabla 8.15. Comparación de los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización CERRADO.

Red analizada		Configuración MALLADA VS Configuración DESMALLADA				
		Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %	0,2 %
	PROMEDIO	-0,1 %	-0,3 %	-0,2 %	0,4 %	0,1 %
	MÍNIMA	-0,4 %	-0,7 %	-0,7 %	0,0 %	0,0 %
Red 45 kV (25 nodos)	MÁXIMA	0,1 %	0,0 %	15,5 %	73,9 %	5,2 %
	PROMEDIO	-15,7 %	-13,8 %	2,2 %	-0,6 %	-1,4 %
	MÍNIMA	-61,3 %	-62,6 %	-11,0 %	-19,9 %	-8,0 %

Tabla 8.16. Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización CERRADO.

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con el arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTO									
		Configuración MALLADA					Configuración DESMALLADA				
		I3 $\phi$ (A)	I1 $\phi$ (A)	I1 $\phi$ / I3 $\phi$	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I3 $\phi$ (A)	I1 $\phi$ (A)	I1 $\phi$ / I3 $\phi$	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	15628	16489	1,06	38,0	1,15	15623	16486	1,06	38,1	1,15
	PROMEDIO	8669	7689	0,85	33,0	1,09	8659	7678	0,85	33,0	1,09
	MÍNIMA	4738	4055	0,75	22,6	0,98	4731	4050	0,75	22,6	0,98
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	13968	12215	0,94	14,8	1,26	8625	7394	0,96	14,7	1,24
	PROMEDIO	5523	4402	0,77	12,7	1,17	3959	3238	0,79	12,3	1,15
	MÍNIMA	609	517	0,65	9,7	1,05	609	517	0,65	9,4	1,03

Tabla 8.17. Comparación de los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización ABIERTO.

Red analizada		Configuración MALLADA VS Configuración DESMALLADA				
		$\Delta$ I3 $\phi$ (%)	$\Delta$ I1 $\phi$ (%)	$\Delta$ (I1 $\phi$ / I3 $\phi$ ) (%)	$\Delta$ V <sub>0</sub> (%)	$\Delta$ K <sub>PAT</sub> (%)
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,3 %	0,2 %
	PROMEDIO	-0,1 %	-0,2 %	-0,1 %	0,0 %	0,0 %
	MÍNIMA	-0,4 %	-0,7 %	-0,3 %	0,0 %	0,0 %
Red 45 kV (25 nodos)	MÁXIMA	0,1 %	0,0 %	15,5 %	0,0 %	0,0 %
	PROMEDIO	-15,7 %	-13,5 %	3,1 %	-3,2 %	-1,5 %
	MÍNIMA	-61,3 %	-57,7 %	-0,1 %	-13,6 %	-5,3 %

Tabla 8.18. Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización ABIERTO.

En las tablas anteriores se deduce que la configuración mallada o desmallada de la red de 45 kV no tiene ninguna influencia relevante en la red de 132 kV, ni en lo que respecta a las intensidades de falta ni en lo que respecta a las tensiones homopolares o el factor de defecto a tierra.

En lo que se refiere a la red de 45 kV, la configuración desmallada reduce significativamente las corrientes de falta trifásicas y monofásicas, de forma análoga para los escenarios con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV tanto cerrados como abiertos. Se mantienen, sin embargo, en términos muy parecidos en ambas configuraciones mallada y desmallada, los ratios entre las corrientes de falta monofásica y trifásica.

Por su parte, la influencia del mallado en las tensiones homopolares y en el factor de defecto a tierra es bastante reducido en promedio, habiendo una dispersión algo superior en los escenarios con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV cerrados.

### Simulación de escenarios de red en explotación ante contingencia y configuración desmallada

En el análisis de la explotación de las redes eléctricas debe considerarse la ocurrencia de situaciones excepcionales ante fallo de elementos de la red (esencialmente líneas o transformadores) que generan escenarios que suelen denominarse “N-1”.

En el caso de la red rural analizada, habiendo analizado diversos escenarios de contingencia de transformadores y líneas de la red, se muestran los resultados de un caso representativo. Lógicamente los escenarios ante contingencia pueden ser especialmente problemáticos en caso de configuraciones desmalladas, ya que en caso de disponerse la red mallada generalmente diversas líneas y transformadores pueden cubrir de forma más efectiva el elemento que haya podido fallar.

El escenario ante contingencia que se mostrará será la situación N-1 de fallo del transformador PLZ\_T1 de 132/45 kV en configuración desmallada. Dicho transformador es la única inyección en la subestación PLZ, por lo que ante su fallo, la alimentación a la red de 45 kV de su influencia debe ser soportado por el transformador PRG\_T1.

Dado que el efecto de la pérdida de una inyección a la red de 45 kV se traducirá en una reducción de las corrientes de cortocircuito, el principal efecto desfavorable a cuantificar será la elevación de las tensiones y del factor de defecto a tierra  $K_{PAT}$ , así como la posible pérdida de efectividad en la puesta a tierra de la red. Por ello, para mayor simplicidad en la exposición de los resultados, se mostrarán únicamente los escenarios de simulación relacionados con el arrollamiento de estabilización abierto.

En el apartado G.1.3 del apéndice G se puede observar la influencia más detallada de las variaciones en las corrientes y tensiones sobre las subestaciones de la red de 132 kV y especialmente de la red de 45 kV del área de influencia (color) del transformador en contingencia

Red analizada		Estado de explotación de la red									
		Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de PLZ_T1 (N-1)				
		I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	15623	16486	1,06	38,1	1,15	15603	16436	1,05	39,2	1,16
	PROMEDIO	8659	7678	0,85	33,0	1,09	8620	7583	0,84	33,4	1,10
	MÍNIMA	4731	4050	0,75	22,6	0,98	4728	4043	0,73	22,7	0,98
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	8625	7394	0,96	14,7	1,24	6612	6094	0,96	14,7	1,24
	PROMEDIO	3959	3238	0,79	12,3	1,15	3348	2711	0,79	12,4	1,16
	MÍNIMA	609	517	0,65	9,4	1,03	609	517	0,65	9,4	1,03

**Tabla 8.19. Comparación de los escenarios de red RURAL en explotación NORMAL y ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) en configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS.**

Red analizada		Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
		$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_o$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
Red 132 kV (5 nodos)	MÁXIMA	-0,1%	-0,1%	0,0%	3,0%	1,1%
	PROMEDIO	-0,5%	-1,5%	-1,0%	1,1%	0,4%
	MÍNIMA	-2,0%	-5,0%	-3,0%	0,0%	0,0%
Red 45 kV (28 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	3,7 %	12,9 %	6,8 %
	PROMEDIO	-8,1 %	-8,5 %	-0,7 %	0,9 %	0,6 %
	MÍNIMA	-46,3 %	-51,4 %	-9,4 %	-5,2 %	-1,3 %

**Tabla 8.20. Variación relativa en la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS.**

De las tablas anteriores, complementadas por los resultados detallados del apartado G.1.3 del apéndice G, se observa que, en redes explotadas con configuración desmallada y con los arrollamientos de estabilización de los transformadores de inyección 132/45 kV abiertos, la ocurrencia de una contingencia en un transformador de inyección tiene una influencia muy limitada que se puede resumir en las siguientes consideraciones:

- En la red de 132 kV la variación de los parámetros es muy reducida.
- En las subestaciones de la red de 45 kV del área de influencia (color) del transformador en contingencia, hay un impacto muy significativo en las corrientes de falta trifásica y monofásica (con reducciones de las mismas entre el 30 % y el 50 %, suponiendo rebajas de unos 2000 A en promedio y máximas de 3000 A), pero variaciones muy reducidas en las tensiones homopolares (con un incremento promedio de 0,5 kV y máximo de 1,4 kV) y los factores de defecto a tierra (el mayor incremento de  $K_{PAT}$  es de 1,09 a 1,16).
- El resto de subestaciones de la red de 45 kV no se ven afectados por la contingencia.

### 8.3.2. Análisis de escenarios de red urbana

La red urbana analizada considera la red de reparto de 45 kV de una zona geográfica urbana y periurbana de una gran ciudad con alta densidad de consumo eléctrico. Esta red de reparto se alimenta por medio de una red superior de 220 kV con inyecciones a través de 14 transformadores 220/45 kV. El régimen de neutro de ambas redes está diseñado como rígidamente puesto a tierra por medio de la conexión a tierra de los neutros primarios y secundarios de los transformadores 220/45 kV, que están especificados como transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y grupo de conexión YNyn0+d11. Por su parte, la red de reparto de 45 kV alimenta subestaciones de distribución 45/15 kV que abastecen a los centros de consumo por medio de transformadores 45/15 kV especificados también como transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización y grupo de conexión YNyn0+d11, si bien en este caso se disponen ambos neutros primario y secundario aislados de tierra. La alimentación a los puntos de consumo se realiza también a través de transformadores 220/15-15 kV con doble arrollamiento secundario que no serán considerados en este análisis. El régimen de neutro de la red de distribución de 15 kV se plantea aislado de tierra.

En las figuras 8.3 y 8.4 se muestran la topología de la red urbana analizada.

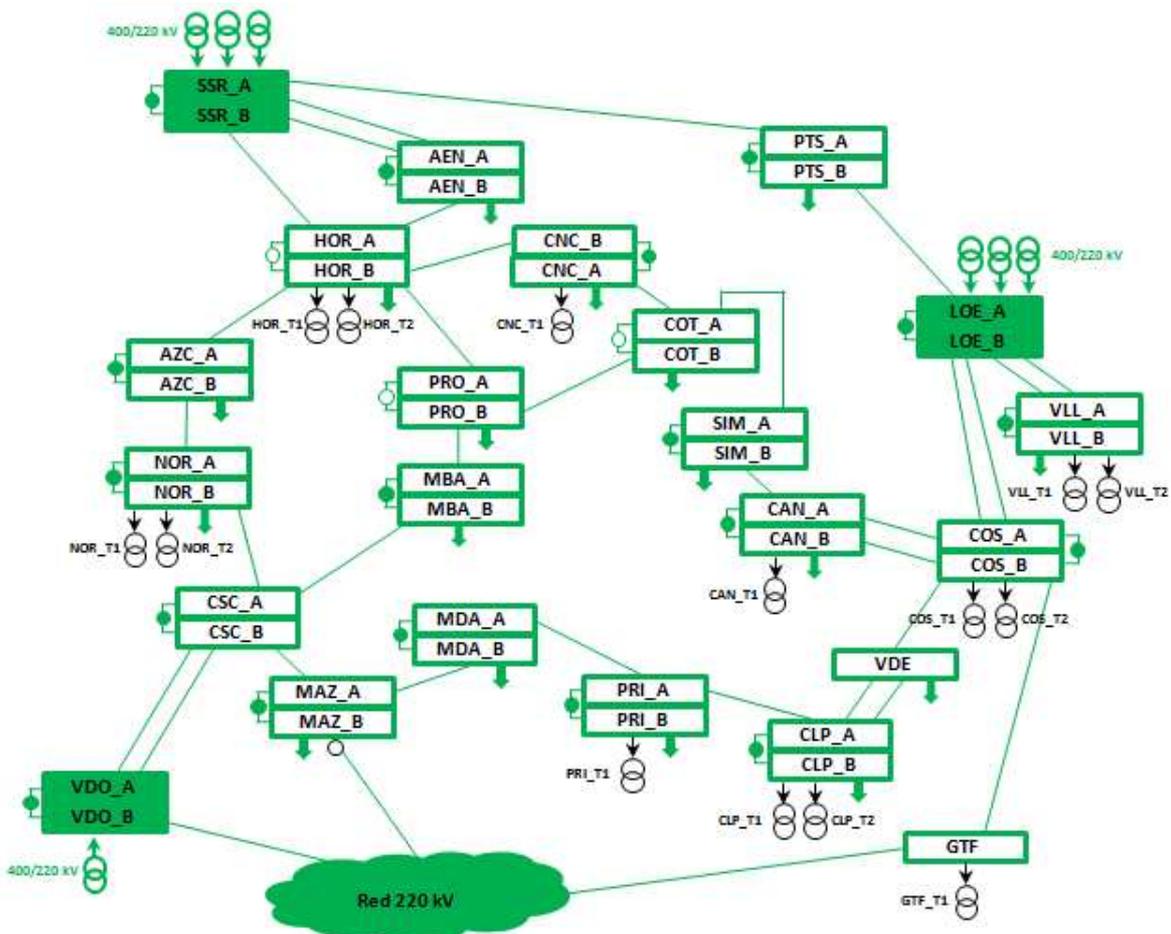


Figura 8.3. Topología de la red de alimentación de 220 kV de la red urbana analizada.

La red de 220 kV analizada se alimenta fundamentalmente por medio de las inyecciones 400/220 kV de las subestaciones SSR, LOE y VDO.

Por su parte, la red de reparto de 45 kV se alimenta por medio de inyecciones 220/45 kV. De igual manera que se explicó en la red rural, la configuración habitual en explotación normal consiste en distribuir las subestaciones entre las diferentes inyecciones de forma desmallada, según los colores de la figura 8.4. En este caso, la mayor concentración de inyecciones así como la mayor potencia de cortocircuito aportada por la red de 220 kV haría inviable en la práctica una configuración mallada, dado que las corrientes de cortocircuito circulantes excederían los límites admisibles en la aparatamenta de las subestaciones. No obstante, por homogeneidad con el análisis realizado en la red rural, se analizarán también los escenarios de red con configuración mallada, en los que se considerarán cerrados los interruptores que se operan normalmente abiertos en configuración desmallada, según lo representado en la figura 8.4.

Como se puede observar, en línea con lo que cabe esperar de una red urbana, apenas hay generación conectada a la red de reparto. Únicamente en la subestación TLS hay conectada una central de cogeneración.

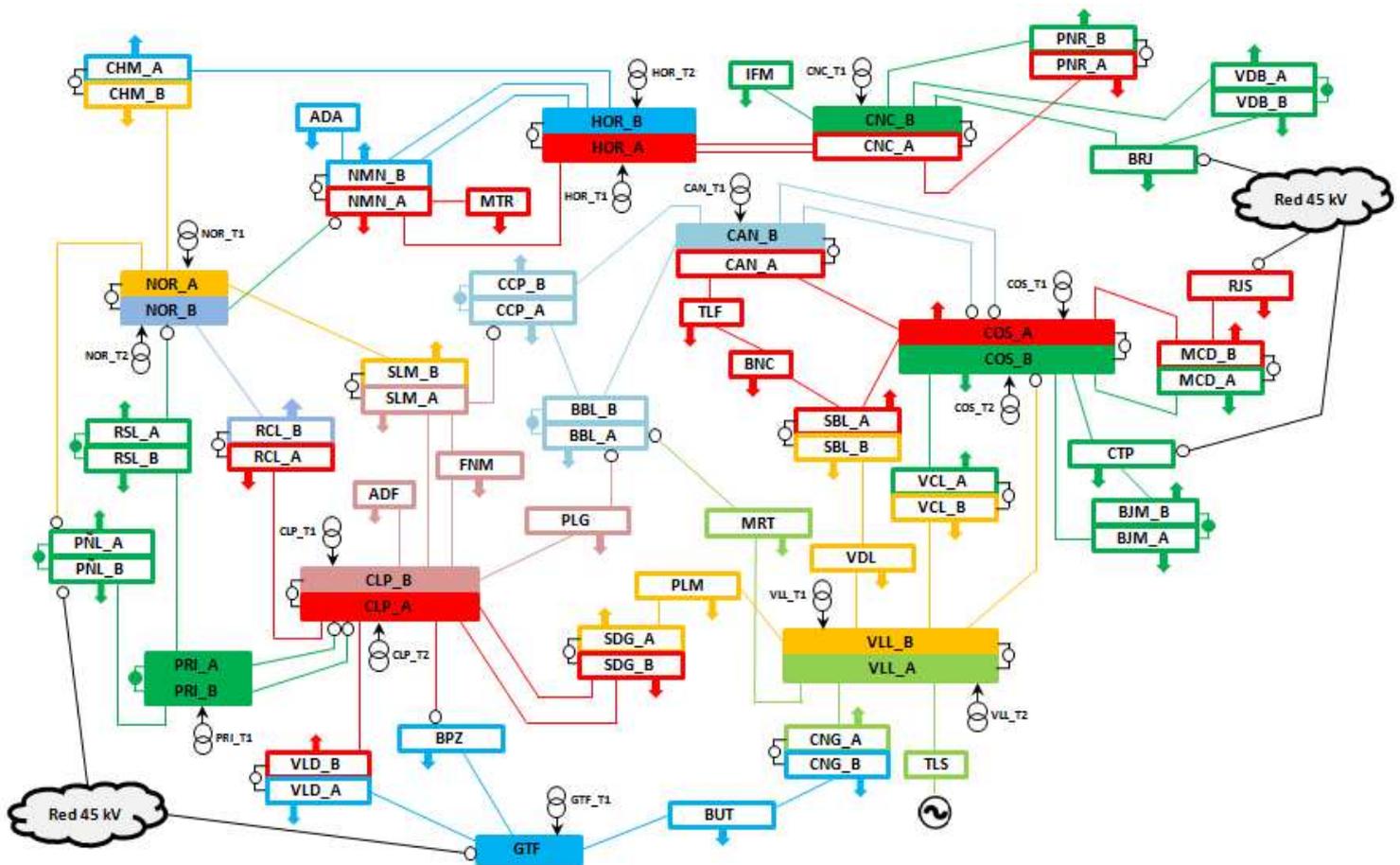


Figura 8.4. Topología de la red de reparto de 45 kV de la red urbana analizada.

Los principales parámetros que caracterizan la red urbana analizada son los siguientes:

Parámetros y características de la red URBANA	
Nº clientes	~ 450.000
Potencia máxima anual de consumo (MW)	535
Superficie (km <sup>2</sup> )	~ 260
Densidad de consumo (kW/km <sup>2</sup> )	~ 2060
Líneas 220 kV (km)	~ 190
Líneas 45 kV (km)	~ 330
% de líneas aéreas	30,2%
Nº subestaciones 220/45 kV	9
Nº transformadores 220/45 kV	14 (10 de tipología #3 y 4 acorazados)
Nº subestaciones 45/15 kV	34 (consumo) + 1 (generación)

**Tabla 8.21. Principales parámetros característicos de la red urbana analizada.**

Como se ha indicado, los transformadores de la red analizada son transformadores estrella-estrella 220/45 kV con ambos neutros conectados rígidamente a tierra y transformadores estrella-estrella 220/15-15 kV y 45/15 kV que no serán considerados a efectos de modificación del modelado de secuencia homopolar. Se presentan en la tabla 8.22 las principales características de los transformadores 220/45 kV de la red analizada.

Como se puede comprobar en la tabla 8.22, la tipología de los transformadores 220/45 kV de alimentación a la red urbana de reparto de 45 kV es muy distinta a la de los transformadores 132/45 kV de la red rural. La tipología constructiva mayoritaria de los transformadores es tipo #3, si bien se observa que los de mayor antigüedad no presentan una tipología constructiva de columnas sino acorazada. Como se estudió en capítulos anteriores, en los transformadores con tipología constructiva acorazada, al tratarse de transformadores con flujos libres no se plantea su explotación sin arrollamiento de estabilización o con dicho arrollamiento abierto. Por ello, en las todas las simulaciones estos transformadores se considerarán siempre con el arrollamiento de estabilización cerrado.

Parámetros y características de los transformadores 220/45 kV de la red urbana							
Subestación	Año Fabricación	Relación transformación (kV)	Potencias nominales (MVA)	Z <sub>12</sub> (%)	Z <sub>13</sub> (%)	Z <sub>23</sub> (%)	Tipología considerada <sup>87</sup>
CAN_T1	2010	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,13	21,54	39,72	#3
CLP_T1	2006	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,62	21,51	40,11	#3
CLP_T2	2006	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,67	21,39	40,11	#3
CNC_T1	2007	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,40	21,24	39,72	#3
COS_T1	1974	220 / 46 / 15	120 / 120 / 40	19,51	28,74	6,72	ACORAZADO
COS_T2	1977	220 / 46 / 15	120 / 120 / 40	19,44	28,92	6,75	ACORAZADO
GTF_T1	2005	230 / 45 / 10	120 / 120 / 40	13,94	22,41	40,65	#3
HOR_T1	2005	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,66	21,27	39,99	#3
HOR_T2	2005	230 / 46 / 10	120 / 120 / 40	14,69	21,30	40,05	#3
NOR_T1	1982	220 / 46 - 15 / 10	90 / 60 - 30 / 10	19,36 (220 / 46 kV)	Sin info	Sin info	ACORAZADO
NOR_T2	1973	220 / 46 - 15 / 10	90 / 60 - 30 / 10	19,29 (220 / 46 kV)	Sin info	Sin info	ACORAZADO
PRI_T1	2006	230 / 45 / 10	120 / 120 / 40	13,82	22,56	40,65	#3
VLL_T1	2005	230 / 45 / 10	120 / 120 / 40	13,91	22,50	40,80	#3
VLL_T2	2005	230 / 45 / 10	120 / 120 / 40	13,94	22,41	40,65	#3

**Tabla 8.22. Principales parámetros característicos de los transformadores 220/45 kV de la red urbana analizada.**

De la misma forma que en el caso anterior de red rural, se presentan a continuación los resultados de las simulaciones en explotación normal y en un escenario representativo de explotación ante contingencia.

<sup>87</sup> Tipología constructiva considerada a efectos de estimación de las impedancias del circuito equivalente a secuencia homopolar a partir de las reglas definidas en el apartado 7.2. Se recuerda que la tipología #1 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización interno y ausencia de pantallas magnéticas, la tipología #2 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización interno y presencia de pantallas magnéticas en la cuba y la tipología #3 representa a transformadores con arrollamiento de estabilización externo.

### Simulación de escenarios de red en explotación normal y configuración mallada

En las tablas 8.23 y 8.24 se presentan los resultados de las simulaciones en el caso de disponer la red en estado normal de explotación con operación mallada (es decir, suponiendo que todos los interruptores de la red y de acoplamiento de barras se operan cerrados).

Se indican, para cada uno de los nodos de la red analizada, la corriente de falta trifásica ( $I_{3\phi}$ ), así como, para las faltas monofásicas, la corriente de falta ( $I_{1\phi}$ ), el ratio de la corriente monofásica respecto a la trifásica ( $I_{1\phi}/I_{3\phi}$ ), la tensión homopolar ( $V_0$ ) y el factor de defecto a tierra  $K_{PAT}$ .

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con configuración de red MALLADA									
		Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
		$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi} / I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$	$I_{3\phi}$ (A)	$I_{1\phi}$ (A)	$I_{1\phi} / I_{3\phi}$	$V_0$ (kV)	$K_{PAT}$
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	35516	37183	1,10	53,6	1,09	35516	35781	1,08	61,5	1,16
	PROMEDIO	29904	30451	1,01	42,1	1,04	29904	29378	0,97	45,3	1,07
	MÍNIMA	19757	17139	0,87	34,3	1,02	19757	15311	0,77	36,5	1,03
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	64697	65132	1,19	14,8	1,33	64697	65046	1,19	14,8	1,33
	PROMEDIO	37698	35532	0,94	10,5	1,19	37698	35492	0,94	10,6	1,19
	MÍNIMA	3942	3179	0,65	5,4	0,94	3942	3177	0,65	5,5	0,94

Tabla 8.23. Comparación de los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración MALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.

Red analizada		Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO con configuración de red MALLADA				
		$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	-2,4 %	-2,4 %	14,7 %	5,7 %
	PROMEDIO	0,0 %	-3,9 %	-3,9 %	7,6 %	2,1 %
	MÍNIMA	0,0 %	-10,7 %	-10,7 %	4,4 %	1,0 %
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,5 %	0,3 %
	PROMEDIO	0,0 %	-0,1 %	-0,1 %	0,2 %	0,1 %
	MÍNIMA	0,0 %	-0,3 %	-0,3 %	0,0 %	0,0 %

Tabla 8.24. Variación relativa entre los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración MALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.

De las tablas anteriores se pueden extraer las siguientes conclusiones relacionadas con el efecto de explotar los transformadores 220/45 kV (de tipología #3) con el arrollamiento de estabilización abierto en las redes urbanas en explotación normal con configuración mallada:

- En los nodos de la red de 220 kV se produce una reducción de las corrientes de cortocircuito ante faltas monofásicas. La magnitud de esta reducción es notablemente inferior a la que se producía en la red de 132 kV de la red rural y, lógicamente, tampoco compromete la actuación del sistema de protección. La reducción más relevante se produce en la subestación VLL que se dispone de forma radial respecto al resto de subestaciones de 220 kV.
- En las subestaciones de la red de 45 kV las variaciones que se producen en las corrientes de cortocircuito ante faltas monofásicas son prácticamente nulas. Como ya se había adelantado, se observa que los valores de las corrientes de cortocircuito que se producen en configuración mallada son inadmisibles dado que la aparataje está dimensionada en este nivel de tensión para corrientes de cortocircuito máximas de 25 kA o 31,5 kA.
- Las tensiones homopolares crecen de una forma muy moderada en la red de 220 kV (incrementos promedio de 2-3 kV, con un máximo de unos 8 kV en el nodo de VLL). De igual forma, el factor de defecto a tierra tiene un incremento poco significativo.
- En el caso de la red de 45 kV los incrementos en las tensiones homopolares y el factor de defecto a tierra son irrelevantes.

#### Simulación de escenarios de red en explotación normal y configuración desmallada

En las tablas 8.25 y 8.26 se presentan los resultados de las simulaciones en el caso de disponer la red en estado normal de explotación con operación desmallada (es decir, suponiendo que todos los interruptores de la red y de acoplamiento de barras se operan según lo indicado en la figura 8.4).

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con configuración de red DESMALLADA									
		Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
		I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	34868	36048	1,10	61,2	1,13	34868	34762	1,07	69,2	1,20
	PROMEDIO	29295	29370	0,99	43,7	1,05	29295	28388	0,95	46,8	1,07
	MÍNIMA	18533	14412	0,78	34,6	1,02	18533	12657	0,68	36,8	1,03
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	11594	11323	1,36	13,4	1,25	11594	11325	1,36	13,5	1,25
	PROMEDIO	7810	7954	1,03	8,4	1,06	7810	7928	1,02	8,5	1,06
	MÍNIMA	3582	3177	0,73	2,5	0,88	3582	3175	0,72	2,5	0,88

**Tabla 8.25. Comparación de los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración DESMALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.**

Red analizada		Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO con configuración de red DESMALLADA				
		$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	-2,2 %	-2,2 %	13,2 %	6,3 %
	PROMEDIO	0,0 %	-3,8 %	-3,8 %	6,8 %	2,1 %
	MÍNIMA	0,0 %	-12,2 %	-12,2 %	4,0 %	1,0 %
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,6 %	0,7 %
	PROMEDIO	0,0 %	-0,3 %	-0,3 %	0,5 %	0,1 %
	MÍNIMA	0,0 %	-1,0 %	-1,0 %	0,0 %	-0,1 %

**Tabla 8.26. Variación relativa entre los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración DESMALLADA entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto.**

Los resultados que se obtienen en configuración desmallada son cualitativamente análogos a los que se observaron en el apartado anterior con configuración mallada.

En la red de 220 kV, el efecto de explotar los transformadores 220/45 kV con el arrollamiento de estabilización abierto se traduce en una ligera disminución de las corrientes de cortocircuito monofásicas y un ligero incremento de las tensiones homopolares y del factor de defecto a tierra, sin relevancia sobre el régimen de neutro efectivamente puesto a tierra de la red.

Por su parte, en la red de 45 kV las variaciones, tanto en las corrientes de cortocircuito como en las tensiones homopolares y el factor de defecto a tierra, son totalmente irrelevantes. En esta configuración, la magnitud de las corrientes de cortocircuito adopta valores compatibles con el dimensionamiento habitual de la aparamenta.

Tanto en el caso de configuración mallada como en el caso de configuración desmallada de la red urbana se han observado variaciones mucho más reducidas de las corrientes y tensiones en la red de reparto de 45 kV al considerar el arrollamiento de estabilización abierto, que las observadas para la red rural. Mayores variaciones aunque también bastante inferiores a las de la red rural se producen en la red alimentadora.

Ello se puede explicar a partir de los valores de los parámetros de los circuitos equivalentes a secuencia directa y a secuencia homopolar mostrados en las tablas 8.2 y 8.3. Como se puede observar en estas tablas, los diferentes parámetros de la rama serie primaria para secuencia directa, secuencia homopolar con arrollamiento de estabilización y secuencia homopolar sin arrollamiento de estabilización ( $Z_1, Z'_{01}, Z''_{01}$ ) y de la misma manera los de la rama serie secundaria ( $Z_2, Z'_{02}, Z''_{02}$ ) son muy similares entre sí para el caso de un transformador de tipología #3. No ocurre lo mismo para los transformadores de tipología #1 y #2. Dado que la tipología principal de los transformadores 220/45 kV de la red urbana es principalmente transformadores #3, su comportamiento diferencial al disponer del arrollamiento de estabilización cerrado o abierto será muy parecido.

### Comparaciones de los escenarios de red en explotación normal en configuración mallada y configuración desmallada

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con los arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV tanto cerrados como abiertos, y con las configuraciones de explotación tanto malladas como desmalladas, en este apartado se pretende valorar el impacto sobre la red urbana del hecho de realizar una explotación con configuración mallada o desmallada, si bien como se ha mencionado anteriormente, el escenario mallado no es viable en la práctica.

En las tablas 8.27 a 8.30 se muestran los resultados comparativos, de forma agregada para cada nivel de tensión, entre las configuraciones de explotación malladas y desmalladas, tanto para el caso de arrollamientos de estabilización cerrados como para el caso de arrollamientos de estabilización abiertos.

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con el arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV CERRADO									
		Configuración MALLADA					Configuración DESMALLADA				
		I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	35516	37183	1,10	53,6	1,09	34868	36048	1,10	61,2	1,13
	PROMEDIO	29904	30451	1,01	42,1	1,04	29295	29370	0,99	43,7	1,05
	MÍNIMA	19757	17139	0,87	34,3	1,02	18533	14412	0,78	34,6	1,02
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	64697	65132	1,19	14,8	1,33	11594	11323	1,36	13,4	1,25
	PROMEDIO	37698	35532	0,94	10,5	1,19	7810	7954	1,03	8,4	1,06
	MÍNIMA	3942	3179	0,65	5,4	0,94	3582	3177	0,73	2,5	0,88

Tabla 8.27. Comparación de los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización CERRADO.

Red analizada		Configuración MALLADA VS Configuración DESMALLADA				
		Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	-1,2 %	-1,8 %	-0,4 %	14,0 %	3,5 %
	PROMEDIO	-2,2 %	-4,2 %	-2,1 %	3,5 %	0,8 %
	MÍNIMA	-6,2 %	-15,9 %	-10,4 %	1,0 %	0,0 %
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	-0,1 %	-0,1 %	28,8 %	0,1 %	0,0 %
	PROMEDIO	-74,3 %	-72,2 %	9,6 %	-20,6 %	-11,0 %
	MÍNIMA	-92,9 %	-92,2 %	-4,3 %	-57,8 %	-23,0 %

Tabla 8.28. Variación relativa entre los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización CERRADO.

Red analizada		Comparación de escenarios de red en explotación normal con el arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTO									
		Configuración MALLADA					Configuración DESMALLADA				
		I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	35516	35781	1,08	61,5	1,16	34868	34762	1,07	69,2	1,20
	PROMEDIO	29904	29378	0,97	45,3	1,07	29295	28388	0,95	46,8	1,07
	MÍNIMA	19757	15311	0,77	36,5	1,03	18533	12657	0,68	36,8	1,03
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	64697	65046	1,19	14,8	1,33	11594	11325	1,36	13,5	1,25
	PROMEDIO	37698	35492	0,94	10,6	1,19	7810	7928	1,02	8,5	1,06
	MÍNIMA	3942	3177	0,65	5,5	0,94	3582	3175	0,72	2,5	0,88

Tabla 8.29. Comparación de los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización ABIERTO.

Red analizada		Configuración MALLADA VS Configuración DESMALLADA				
		Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	-1,2 %	-1,6 %	-0,3 %	12,5 %	4,1 %
	PROMEDIO	-2,2 %	-4,2 %	-2,1 %	2,8 %	0,8 %
	MÍNIMA	-6,2 %	-17,3 %	-11,9 %	0,7 %	0,0 %
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	-0,1 %	-0,1 %	28,9 %	0,1 %	0,0 %
	PROMEDIO	-74,3 %	-72,2 %	9,4 %	-20,3 %	-10,9 %
	MÍNIMA	-92,9 %	-92,2 %	-5,0 %	-57,8 %	-23,0 %

Tabla 8.30. Variación relativa entre los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL en configuración mallada y configuración desmallada. Efecto sobre los escenarios de arrollamiento de estabilización ABIERTO.

En lo que respecta a la red de 220kV, en la configuración desmallada frente a la mallada se producen ligeras disminuciones de las corrientes de cortocircuito e incrementos de las tensiones homopolares y el factor de defecto a tierra.

Por su parte, en la red de 45 kV la configuración desmallada reduce muy significativamente las corrientes de falta trifásicas y monofásicas, de forma similar para los escenarios con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV tanto cerrados como abiertos. Se producen también reducciones relevantes en las tensiones homopolares y los factores de defecto a tierra. Estos efectos son cualitativamente similares a los vistos en la red rural de 45 kV, pero cuantitativamente de mucha mayor relevancia.

**Simulación de escenarios de red en explotación ante contingencia y configuración desmallada**

De igual forma que en la red rural, se considerará también en la red urbana un caso representativo de red en explotación ante contingencia.

El escenario ante contingencia analizado que se mostrará será la situación N-1 de fallo del transformador CLP\_T2 de 220/45 kV en configuración desmallada y con arrollamientos de estabilización abiertos. Dicho transformador alimenta las subestaciones RCL\_A, VLD\_B y SDG\_B que, en el escenario N-1, serán alimentadas respectivamente por los transformadores NOR\_T2 (RCL\_B), GTF (VLD\_B) y PRI\_T1 (SDG\_B).

Red analizada		Estado de explotación de la red									
		Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de CLP_T2 (N-1)				
		I3φ (A)	I1φ (A)	I1φ / I3φ	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I3φ (A)	I1φ (A)	I1φ / I3φ	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	34868	34762	1,07	69,2	1,20	34868	34665	1,07	69,2	1,20
	PROMEDIO	29295	28388	0,95	46,8	1,07	29295	28362	0,95	46,9	1,08
	MÍNIMA	18533	12657	0,68	36,8	1,03	18533	12657	0,68	36,9	1,03
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	11594	11325	1,36	13,5	1,25	11594	11325	1,36	13,5	1,25
	PROMEDIO	7810	7928	1,02	8,5	1,06	7809	7963	1,03	8,4	1,05
	MÍNIMA	3582	3175	0,72	2,5	0,88	3582	3175	0,72	2,5	0,88

**Tabla 8.31. Comparación de los escenarios de red URBANA en explotación NORMAL y ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) en configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS.**

Red analizada		Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
		Δ I3φ (%)	Δ I1φ (%)	Δ (I1φ / I3φ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
Red 220 kV (10 nodos)	MÁXIMA	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,6 %	0,2 %
	PROMEDIO	0,0 %	-0,1 %	-0,1 %	0,2 %	0,0 %
	MÍNIMA	0,0 %	-0,3 %	-0,3 %	0,0 %	0,0 %
Red 45 kV (62 nodos)	MÁXIMA	29,5 %	21,9 %	8,0 %	11,6 %	5,1 %
	PROMEDIO	-0,1 %	0,3 %	0,4 %	-0,8 %	-0,3 %
	MÍNIMA	-45,6 %	-43,6 %	-5,9 %	-22,1 %	-19,2 %

**Tabla 8.32. Variación relativa en la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS.**

De la misma forma que se observó en redes rurales, en redes urbanas como la estudiada explotadas con configuración desmallada y con los arrollamientos de estabilización de los transformadores de inyección 220/45 kV abiertos, la ocurrencia de una contingencia en un

transformador de inyección tiene una influencia muy limitada que se puede resumir en las siguientes consideraciones:

- En la red de 220 kV la variación de los parámetros es muy reducida.
- En las subestaciones de la red de 45 kV del área de influencia (color) del transformador en contingencia, hay un impacto significativo en las corrientes de falta trifásica y monofásica y también, en menor medida, en las tensiones homopolares y los factores de defecto a tierra. Estas variaciones adoptan diferentes signos, pero en ninguno de los casos, supone una alteración promedio relevante de las corrientes de cortocircuito o de las tensiones homopolares habituales ni las condiciones de puesta a tierra de la red.
- El resto de subestaciones de la red de 45 kV no se ven afectados por la contingencia.

Merece destacarse en el análisis realizado que existe una diferencia respecto al estudio de la contingencia en la red rural. En esta última, en general y como consecuencia de la mayor dispersión geográfica de las subestaciones, la alimentación de las subestaciones alimentadas por el transformador en contingencia es realizada por otras inyecciones ubicadas en subestaciones significativamente más alejadas, conllevando una disminución de las corrientes de cortocircuito y un incremento de las tensiones homopolares y el factor de defecto a tierra. Sin embargo, en la red urbana la dispersión geográfica es muy reducida, de tal forma que la variación de las corrientes de cortocircuito y las tensiones homopolares y el factor de defecto a tierra adopta diferentes signos que dependen de la mayor o menor fortaleza, respecto a la inyección en contingencia, de las inyecciones que le hacen la cobertura en las diferentes subestaciones.

#### 8.4. Resumen del capítulo

En este capítulo se ha profundizado en la influencia global que ejercen los arrollamientos de estabilización de los transformadores estrella-estrella sobre la explotación de una red ante faltas asimétricas, aclarando cuestiones enunciadas pero no resueltas en la literatura técnica respecto a en qué medidas son admisibles las variaciones en las corrientes y tensiones de cortocircuito para un adecuado funcionamiento del sistema de protección y para la coordinación de aislamiento, como consecuencia de la modificación de la impedancia homopolar de los transformadores.

Para realizar una aproximación global y rigurosa sobre esta cuestión era necesario disponer de medidas fiables sobre los parámetros de los circuitos equivalentes a secuencia homopolar de los transformadores. Con el apoyo de los análisis y resultados presentados en el capítulo 4, en el apartado 8.2 de este capítulo se han propuesto reglas de estimación de los parámetros a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella en todas sus configuraciones a partir de factores multiplicadores aplicados sobre los parámetros a secuencia directa siempre disponibles de los ensayos en fábrica de estos equipos.

En este sentido, se han propuesto factores multiplicadores diferenciados en función de la tipología constructiva de los transformadores.

En el caso de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización interno se ha observado que dichos factores son menores (más alejados de la unidad) en el caso de no disponer de pantallas magnéticas. Por su parte, para transformadores con arrollamiento de estabilización externo los factores adoptan valores muy próximos a la unidad. La utilización de las reglas de estimación propuestas ofrece una precisión superior a las estimaciones que habitualmente se vienen realizando por parte de las empresas eléctricas. Adicionalmente, en el apéndice F se ha

constatado mediante un análisis de sensibilidad detallado que la precisión en los cálculos de las corrientes de cortocircuito no se ve significativamente menoscabada por pequeñas variaciones en los factores multiplicadores.

Para el caso de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto también se han propuesto reglas de estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar significativamente más precisas que las habitualmente utilizadas en la industria. En este caso, y como consecuencia del comportamiento no lineal de la impedancia de magnetización, se ha comprobado que la sensibilidad en los cálculos a errores en la estimación de los parámetros es superior. No obstante, este riesgo en la precisión está también bastante acotado debido a la mayor importancia en los cálculos de la impedancia conjunta de la rama serie, cuyo valor es asimilable sin apenas error a la impedancia de cortocircuito a secuencia directa del transformador.

En lo que respecta a la cuestión esencial de este capítulo respecto al comportamiento de la red ante faltas asimétricas, se ha analizado con detalle en el apartado 8.3 (con resultados complementarios en el apéndice G) el funcionamiento de dos redes eléctricas reales, una de naturaleza rural (con elevada dispersión geográfica en el consumo y redes mayoritariamente aéreas) y otra de naturaleza urbana (con elevada concentración del consumo y redes mayoritariamente subterráneas). En ambos casos, se ha evaluado la influencia del arrollamiento de estabilización en diferentes escenarios de explotación mallada y desmallada, así como ante contingencias en la red.

Como cabía esperar se ha verificado en ambas redes que la presencia de los arrollamientos de estabilización supone corrientes de cortocircuitos monofásicos más elevadas y sobretensiones en las fases sanas más bajas. Con carácter general, en ambos casos se ha podido comprobar que explotar las redes con los arrollamientos de estabilización abiertos no supone en modo alguno un problema en la sensibilidad del sistema de protección por menores corrientes de cortocircuito (cuyo valor sigue siendo razonable) ni un problema en la coordinación de aislamiento de la red ni en el mantenimiento de un régimen de neutro efectivamente puesto a tierra.

El efecto diferencial de disponer el arrollamiento de estabilización abierto en la red urbana en las variaciones en las corrientes y tensiones es, como se ha visto, bastante inferior al de la red rural, siendo prácticamente irrelevante en la red de reparto de 45 kV. Esto es debido, como se explicó en el apartado 8.3.2 a la reducida influencia del arrollamiento de estabilización en las impedancias de la rama serie de los circuitos equivalentes en el caso de transformadores con dicho arrollamiento externo, que son los que conforman la mayor parte de la transformación 220/45 kV de la red urbana.

Finalmente, en relación a todo lo expuesto en este capítulo cabe concluir que, en lo que respecta al funcionamiento de la red y los transformadores estrella-estrella ante faltas asimétricas, disponer de transformadores sin arrollamiento de estabilización mejora sustancialmente el riesgo de fallos electrodinámicos de los equipos sin perjuicio de un adecuado funcionamiento del sistema de protección, de la coordinación de aislamiento y del régimen de neutro de la red.

## Capítulo 9

### Conclusiones

En este último capítulo se exponen las conclusiones generales extraídas a partir de los resultados experimentales, simulaciones y análisis realizados a lo largo del trabajo de investigación desarrollado. Asimismo se resaltan las contribuciones originales de la tesis y se sugieren algunas posibles líneas futuras de continuación de esta tesis. Finalmente, se relacionan las publicaciones en revistas presentadas en base a los trabajos realizados.

#### 9.1. Conclusiones generales

El principal objetivo de esta tesis doctoral consistía en cubrir la carencia existente en la literatura técnica de un análisis completo y riguroso respecto a la necesidad y conveniencia en el uso de arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella definiendo una metodología clara y concluyente para la evaluación de dicha necesidad.

En la revisión bibliográfica realizada en el capítulo 2 se ha constatado que no existe un consenso claro sobre la necesidad de utilizar los arrollamientos de estabilización en los diseños de núcleos trifásicos de tres columnas donde su uso es cuestionado. Ello se corrobora por el hecho de que en la actualidad la utilización de estos arrollamientos en dichas tipologías de transformadores está muy extendida, a pesar de la existencia de experiencias positivas en las que se ha prescindido de su uso.

De cara a la consecución del objetivo mencionado se desarrolló una metodología de análisis que facilitara la toma de decisión respecto a la incorporación de dichos arrollamientos en las especificaciones de los transformadores. Esta metodología no sólo tiene validez para la especificación de adquisición de nuevos transformadores sino que también es aplicable a la posibilidad de explotar transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización ya existentes con el triángulo abierto.

A continuación se presentan las principales conclusiones extraídas del trabajo de investigación realizado. En primer lugar, se expone la metodología general que se propone para poder realizar una toma de decisión rigurosa sobre la necesidad de los arrollamientos de estabilización, independientemente del contexto en el cual se deba tomar dicha decisión en lo relativo a la arquitectura y normalización de la red. En segundo lugar, se muestran las conclusiones derivadas de la aplicación de dicha metodología en el contexto concreto en el que se han desarrollado los trabajos de esta tesis.

### 9.1.1. Metodología general de análisis de la necesidad de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella

A lo largo de la tesis doctoral se han identificado y analizado diversos aspectos que afectan de forma determinante en la evaluación de la necesidad de utilización de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella. El análisis riguroso de estos aspectos constituye la base para la toma de decisión (en cada contexto concreto) respecto a la necesidad y conveniencia de dichos arrollamientos.

La presencia de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella no sólo supone un sobrecoste en la adquisición del equipo sino que, como se ha visto a lo largo de la tesis, determina una mayor complejidad constructiva y, especialmente, un mayor riesgo electromecánico como consecuencia del aumento de las corrientes de cortocircuito, además del riesgo intrínseco añadido por el propio arrollamiento de estabilización.

La metodología que se propone para valorar la posibilidad de funcionamiento de los transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización requiere la constatación rigurosa de tres aspectos:

1. Determinar la posibilidad de efectos indeseables en el transformador y en la red como consecuencia de los terceros armónicos de corriente y tensión derivados de la corriente de magnetización del transformador, típicamente relacionados con su funcionamiento en vacío (si bien están lógicamente presentes también en funcionamiento en carga). Para ello, será necesaria la realización de medidas del contenido armónico presente en las corrientes y tensiones durante ensayos de vacío en ausencia de arrollamiento de estabilización, constatándose si dicho contenido armónico, así como el desplazamiento de neutro, son inocuos para el transformador y para la red.
2. Valorar el riesgo de calentamiento de la cuba ante situaciones de desequilibrio de las corrientes circulantes por el transformador. Esta valoración requiere de ensayos de calentamiento con alimentación homopolar con la circulación de una corriente de neutro igual o superior a la corriente mínima detectable por el sistema de protección. La temperatura máxima alcanzada en el ensayo debe estar holgadamente por debajo del límite admisible para un funcionamiento seguro del transformador, sin degradación de sus elementos y materiales constructivos y sin riesgo para las personas que puedan llegar a estar en contacto con el transformador. Esta holgura debe tener en cuenta que durante el funcionamiento en servicio estará presente tanto el calentamiento debido a las componentes de secuencia homopolar como a las de secuencia directa. Eventualmente se podría requerir incorporar pantallas magnéticas en el diseño interno del transformador para disminuir el riesgo de calentamiento, prestando en este caso especial atención al calentamiento en la zona de la cuba adyacente a los extremos superior e inferior de dichas pantallas.
3. Como consecuencia del aumento de la impedancia homopolar del transformador producido por la ausencia de arrollamiento de estabilización, debe analizarse finalmente el impacto para la red eléctrica en su conjunto en lo relativo a la detección eficaz de las corrientes durante cortocircuitos asimétricos (sin que se vean comprometidas la sensibilidad y selectividad de las protecciones) y, en su caso, en lo relativo a los valores del factor de defecto a tierra para el mantenimiento de un sistema eficazmente puesto a tierra (sin que se vea comprometida la coordinación de aislamiento de la red). En este

sentido, será necesaria la realización de simulaciones sobre los diferentes escenarios posibles de explotación de la red que se puedan presentar, verificando un funcionamiento correcto en los aspectos señalados.

Como ya se ha indicado, esta metodología será también de aplicación en la valoración de la posibilidad de explotar transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización ya existentes con el triángulo abierto. En este caso, no será posible evitar un sobrecoste ya incurrido pero sí minimizar los requerimientos electromecánicos y consecuentemente el riesgo de fallo en los transformadores instalados.

Esta metodología de evaluación requiere tomar adicionalmente en consideración varios aspectos relacionados con el diseño de los propios transformadores y de las redes eléctricas en las que estos se encuentran instalados:

- En lo que respecta al diseño interno del transformador, se identifican como aspectos relevantes a considerar el tipo de construcción del núcleo magnético, la presencia de pantallas magnéticas y, en el caso de que ya se encuentren presentes, la ubicación del arrollamiento de estabilización.
- Por otra parte, respecto a la arquitectura y diseño de la red, la tipología de puesta a tierra de los neutros primario y secundario, la necesidad de disponer de un sistema eficazmente puesto a tierra en las redes primaria y secundaria<sup>88</sup> o la tipología y ajuste del sistema de protección (en lo relativo a la detección y eliminación de condiciones de operación con elevada corriente de neutro) representan aspectos a tener en cuenta.

Estos aspectos deberán analizarse a la hora de determinar el alcance y las condiciones de los ensayos y simulaciones a realizar según lo indicado en la metodología propuesta.

### **9.1.2. Conclusiones respecto a la necesidad de los arrollamientos de estabilización en transformadores estrella-estrella a partir del trabajo de investigación realizado**

La metodología general expuesta en el epígrafe anterior ha sido desarrollada como generalización de los trabajos de investigación realizados a lo largo de la tesis doctoral. En estos trabajos se ha aplicado la misma al contexto concreto de la tipología de la red y de los transformadores de Unión Fenosa Distribución. La extrapolación de los resultados obtenidos a otros contextos más o menos similares se ve facilitada por el hecho de haber estructurado dichos resultados en las tres tipologías más habituales de transformadores estrella-estrella de tres columnas en función de la ubicación de los arrollamientos de estabilización y la presencia de pantallas magnéticas, así como en el análisis de las distintas configuraciones posibles de puesta a tierra del neutro.

En términos de la secuencia metodológica expuesta en el epígrafe anterior, se indican a continuación las conclusiones extraídas a partir de los ensayos y simulaciones realizados de cara a valorar la posibilidad de funcionamiento de los transformadores estrella-estrella de núcleo magnético de tres columnas sin arrollamiento de estabilización:

---

<sup>88</sup> Si bien se trata de cuestiones relacionadas, la disposición del neutro de cada transformador individual y el régimen de neutro de la red en su conjunto son aspectos a considerar de forma complementaria.

1. La influencia del arrollamiento de estabilización en los terceros armónicos de intensidad y tensión es prácticamente irrelevante tanto en términos absolutos como en términos relativos entre las distintas configuraciones de funcionamiento analizadas en los ensayos de vacío<sup>89</sup>. Asimismo, el desplazamiento del neutro debido a efectos relacionados con la corriente de magnetización es prácticamente nulo en el caso de ausencia de arrollamiento de estabilización.
2. Ante situaciones de desequilibrio en las corrientes circulantes por el transformador se puede concluir que no existe riesgo de calentamiento de la cuba en ausencia de arrollamiento de estabilización cuando ambos neutros del transformador se encuentran puestos a tierra (y evidentemente tampoco cuando ambos neutros están aislados). Sin embargo, se han identificado como susceptibles de tener un excesivo calentamiento de la cuba aquellas configuraciones que, en ausencia de arrollamiento de estabilización, tienen un neutro puesto a tierra y el otro neutro aislado. En este caso, los ensayos de calentamiento realizados han constatado que efectivamente estas configuraciones provocan un mayor calentamiento, si bien no han podido ser concluyentes al no haberse alcanzado una corriente de ensayo suficiente.
3. La ausencia de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella (con ambos neutros puestos a tierra) que ejercen la función de inyección de energía a redes de reparto rurales o urbanas no supone ningún problema en la explotación de estas redes ante faltas asimétricas ni en la sensibilidad del sistema de protección por las menores corrientes de cortocircuito ni en el mantenimiento de un régimen de neutro eficazmente puesto a tierra por mayores sobretensiones en las fases sanas.

Adicionalmente, como consecuencia de los trabajos realizados en el curso de la tesis doctoral se han obtenido otros resultados de interés que merecen ser destacados:

- Por un lado, se ha identificado al modelo de circuito equivalente de tres impedancias que considera de forma separada las configuraciones con y sin arrollamiento de estabilización como el más adecuado en términos de precisión y sencillez a la hora de realizar una caracterización integral del comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella en presencia y en ausencia de arrollamiento de estabilización. En este mismo sentido, en el análisis de estos modelos se ha comprobado que considerar únicamente los módulos de las impedancias, prescindiendo de la componente resistiva de la impedancia, no resta precisión en los resultados y permite simplificar las configuraciones e instrumentación de los ensayos y los procesos de cálculo en la obtención de los parámetros. De cara a la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes a secuencia homopolar, se ha validado un conjunto de ensayos en baja tensión que pueden realizarse en campo con resultados equivalentes a los que se obtendrían en laboratorios de alta tensión.
- Por otro lado, la presencia del arrollamiento de estabilización, especialmente cuando se dispone como arrollamiento más interno, implica no sólo corrientes de cortocircuito muy elevadas en él mismo (hasta 15 veces su corriente asignada con potencias de cortocircuito medias) sino que determina incrementos muy significativos en las corrientes de

---

<sup>89</sup> En el curso de estos ensayos se ha comprobado que los materiales actualmente utilizados para la construcción de los núcleos magnéticos determinan unas corrientes de magnetización muy reducidas en los transformadores analizados (alrededor del 0,07-0,10% de la corriente asignada cuando se alimentan a la tensión asignada), lo que limita extraordinariamente las potenciales consecuencias nocivas del funcionamiento en vacío.

cortocircuito de los arrollamientos primario y secundario (más de 10 veces su corriente asignada, y superando 1,5 veces las que se tendrían en el caso de cortocircuitos trifásicos). Todo ello conlleva solicitaciones electrodinámicas muy elevadas en el transformador con el consecuente incremento en la probabilidad de fallo.

En base a todo lo anterior, se puede concluir que en los transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico de tres columnas resulta conveniente prescindir del arrollamiento de estabilización en los casos en los que los neutros primario y secundario se disponen ambos puestos a tierra o ambos aislados.

En los casos en los que uno de los neutros se explote puesto a tierra y el otro aislado, se debe mantener el arrollamiento de estabilización a menos que se pueda comprobar que el transformador es capaz de soportar la temperatura producida en la cuba y otros elementos estructurales durante la circulación de corrientes de neutro iguales o superiores a las mínimas que el sistema de protección es capaz de detectar. En estos casos, la colocación de pantallas magnéticas en la cuba puede constituir una alternativa a la instalación de arrollamiento de estabilización.

## 9.2. Principales aportaciones de la tesis

A continuación se resumen las principales aportaciones originales que se han desarrollado en el curso de los trabajos de investigación de esta tesis:

- Se ha definido y puesto en práctica una metodología de análisis para valorar de forma integral la conveniencia y necesidad de utilización de los arrollamientos de estabilización en los transformadores estrella-estrella.
- Se ha propuesto un conjunto de ensayos en baja tensión que, a partir de medidas en campo, permiten una caracterización completa del comportamiento a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella.
- Se ha contrastado la validez y precisión de diferentes modelos de circuito equivalente a secuencia homopolar de transformadores estrella-estrella, validando la posibilidad de utilización de modelos sencillos de tres impedancias así como la simplificación mediante la utilización del módulo de las impedancias homopolares.
- Se ha comprobado el papel irrelevante del arrollamiento de estabilización en el comportamiento armónico de la corriente de magnetización de un transformador estrella-estrella.
- Se ha propuesto una metodología basada en el análisis de los amperios-vuelta circulantes durante ensayos de alimentación homopolar y en ensayos de calentamiento con alimentación homopolar con el objetivo de identificar el riesgo de calentamiento de la cuba y otros elementos estructurales durante en funcionamiento de un transformador estrella-estrella ante cargas desequilibradas.
- Se ha cuantificado la influencia del arrollamiento de estabilización en la magnitud de las corrientes de cortocircuito monofásicas en diferentes tipologías constructivas de transformadores estrella-estrella y en diferentes condiciones de puesta a tierra de los neutros. Asimismo, se ha analizado la sensibilidad de dichas corrientes ante parámetros

como la potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria, la relación  $Z_0/Z_1$  de la red o el tipo de falta.

- Se han propuesto reglas para la estimación de las impedancias homopolares en los transformadores estrella-estrella en función de su tipología constructiva, que mejoran las disponibles actualmente en la literatura y normativa técnica.
- Se ha planteado una metodología de evaluación de la influencia global sobre una red eléctrica del arrollamiento de estabilización de los transformadores estrella-estrella instalados en ella, con el objetivo de evaluar problemas relacionados con la sensibilidad y selectividad de las protecciones ante faltas asimétricas y el mantenimiento de las condiciones de sistema eficazmente puesto a tierra, así como en su coordinación de aislamiento. Esta metodología se ha aplicado sobre una red de tipología rural y una red de tipología urbana en distintas condiciones de explotación.

### 9.3. Líneas de trabajo futuras

En este apartado se proponen algunas líneas de investigación que no han sido exploradas en la tesis, pero que, a partir del trabajo realizado en la misma, permitirían ampliar o complementar las conclusiones expuestas en el apartado 9.1.

En primer lugar, cabe señalar que todos los ensayos experimentales y las simulaciones realizadas han partido de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización. Si bien se ha contrastado exhaustivamente el comportamiento de dichos transformadores sin la intervención del arrollamiento de estabilización, esta contrastación se ha realizado en equipos con el arrollamiento de estabilización presente, dejando el triángulo abierto en uno de sus vértices. Por tanto un grado de refinamiento mayor en las conclusiones extraídas requerirá analizar y ensayar transformadores estrella-estrella diseñados y fabricados sin dicho arrollamiento, cuyo diseño será por tanto más compacto. Si bien las conclusiones cabe esperar que sean en todo análogas a las expuestas en este trabajo, la contrastación experimental de este hecho supondrá un interesante complemento al trabajo desarrollado.

Por otro lado, el trabajo desarrollado en la tesis analiza el comportamiento de transformadores con un arrollamiento primario y un arrollamiento secundario conectados ambos en estrella. La problemática de la utilización de arrollamientos de estabilización en transformadores de flujos ligados afecta también de forma muy similar a dos tipologías adicionales:

- Autotransformadores trifásicos conectados en estrella (grupo de conexión YNa).
- Transformadores con doble arrollamiento secundario.

En el caso de los autotransformadores trifásicos conectados en estrella y núcleo magnético de tres columnas, sus características de funcionamiento son muy similares a las de los transformadores estrella-estrella estudiados, por lo que las conclusiones expuestas en la tesis podrían ser extrapolables a ellos. No obstante, la constatación de este hecho debería ser objeto de ensayos experimentales y simulaciones equivalentes a las realizadas en los capítulos 4, 5, 6, 7 y 8 de esta tesis. Por su parte, en el caso de los transformadores de doble arrollamiento secundario, cuyo diseño es frecuentemente realizado mediante la tipología constructiva conocida como *Split-Winding*, la problemática es de una mayor complejidad. La dificultad de establecer y validar experimentalmente un modelo de circuito equivalente a secuencia homopolar, así como la mayor complejidad en el acoplamiento eléctrico, magnético y térmico entre los arrollamientos de esta

tipología de transformador son retos que, de cara a evaluar las implicaciones de los arrollamientos de estabilización en este tipo de transformadores, constituyen una interesante línea de investigación.

De la misma forma, también se podría plantear un análisis detallado de los transformadores estrella-estrella de flujos libres en los mismos términos y con la misma metodología desarrollada en la tesis doctoral, si bien la necesidad del arrollamiento de estabilización en estos casos no ha sido claramente cuestionada por ningún autor. Como se ha indicado en algunos capítulos a lo largo de la tesis, en el caso de bancos de transformación compuestos por unidades monofásicas o en diseños con núcleos trifásicos de cinco columnas o acorazados la alta impedancia homopolar que presentan a secuencia homopolar (significativamente mayor que los transformadores con núcleos de tres columnas estudiados) determina una necesidad mayor de la presencia de arrollamientos de estabilización. En todo caso, una verificación o refutación experimental de este hecho en el contexto actual puede ser de interés para compañías eléctricas en las que la existencia de esta tipología de transformadores sea significativa.

Finalmente, otro aspecto sobre el que se podría profundizar en alguna de las cuestiones desarrolladas en la tesis sería el funcionamiento específico de transformadores estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización en caso de realizar una conexión del neutro a tierra a través de una impedancia (resistencia o reactancia) o a través de una bobina Petersen. En el primero de los casos los resultados esperables serían intermedios entre la conexión a tierra y la conexión aislada, mientras que en el segundo caso, el comportamiento sería más asimilable a la configuración aislada. De cualquier forma, a la hora de aplicar a estas situaciones los resultados obtenidos en esta tesis, en algunos aspectos sería imprescindible realizar un análisis específico riguroso de las peculiaridades que estas tipologías de conexión de neutro aportan.

#### 9.4. Publicaciones en revistas

Los trabajos efectuados en el contexto de esta tesis doctoral han dado lugar a las siguientes publicaciones en revistas:

Título	Revista	Fecha presentación	Estado
<i>Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers Based in Onsite Low-Voltage Tests</i>	<i>IEEE Transactions on Power Delivery</i>	Agosto 2012	Publicado (Vol. 28, Nº 3, July 2013)
<i>Influence of Tertiary Stabilizing Windings on Zero-Sequence Performance of Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers. Part I: Equivalent Circuit Models</i>	<i>Electric Power Systems Research</i>	Octubre 2015	Presentado para primera revisión
<i>Influence of Tertiary Stabilizing Windings on Zero-Sequence Performance of Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers. Part II: Tank Overheating Hazard and Short-Circuit Duty</i>	<i>Electric Power Systems Research</i>	Octubre 2015	Presentado para primera revisión
<i>Influence of Tertiary Stabilizing Windings of Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers on Power Grids</i>	<i>Electric Power Systems Research</i>	Noviembre 2015	Presentado para primera revisión

**Tabla 9.1. Publicaciones en revistas derivadas de la tesis doctoral.**

## 9.5. Financiación de los trabajos de investigación

El desarrollo de las simulaciones y ensayos experimentales de la tesis doctoral han sido financiadas por Unión Fenosa Distribución S.A. en el contexto del Proyecto ENERGOS “Tecnologías para la gestión automatizada e inteligente de las redes de distribución energéticas del futuro”, proyecto a su vez financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MICINN) dentro la quinta convocatoria del programa CENIT - INGENIO 2010 y gestionado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI). En concreto, los trabajos de la tesis han estado encuadrados dentro del paquete de trabajo PT III.IV “Seguridad y disponibilidad de los activos”.

## Apéndices



## Apéndice A

### Patente de los arrollamientos terciarios

Por su interés histórico en relación con la tesis, se reproduce a continuación el texto original íntegro de la patente de Louis F. Blume **US Patent 1,173,094 Tertiary winding**. Su solicitud en julio de 1913 y su consecución en febrero de 1916 marcan el comienzo de estos arrollamientos tan necesarios (en algunos casos) como controvertidos (en otros).

# UNITED STATES PATENT OFFICE

LOUIS F. BLUME, OF PITTSFIELD, MASSACHUSETTS, ASSIGNOR TO GENERAL ELECTRIC COMPANY, A CORPORATION OF NEW YORK.

## TERTIARY WINDING.

1,173,004.

Specification of Letters Patent.

Patented Feb. 22, 1916.

Application filed July 11, 1913. Serial No. 778,815.

To all whom it may concern:

Be it known that I, LOUIS F. BLUME, a citizen of the United States, residing at Pittsfield, county of Berkshire, State of Massachusetts, have invented certain new and useful Improvements in Tertiary Windings, of which the following is a specification.

My invention relates to transformers in polyphase systems of distribution.

The object of my invention is to provide improved means for balancing the electromotive forces of the phases when the primaries and secondaries are respectively Y-connected.

It is often desirable to connect both the primaries and the secondaries of transformers in polyphase systems of distribution in Y, but with such connections there is considerable tendency toward unbalancing of the voltages due to unbalancing of the load or other causes. It has heretofore been proposed to add an auxiliary secondary winding to each set of primary and secondary windings and to connect these auxiliary secondary windings in delta to maintain the balance of the voltages of the phases. In such an arrangement the delta connection carries current on a tendency of the voltages to unbalance and resists, and substantially prevents, the unbalancing. The amount of current carried by these auxiliary secondary windings is normally small and for economic reasons these windings are made of small capacity.

So far as I am aware it has always heretofore been considered necessary to wind each auxiliary secondary coil in close inductive relation to its primary and secondary power coils so that the auxiliary secondary coils might be very sensitive to the current in the primary and secondary coils. In the case of very heavy unbalanced overload, as for example, a short-circuit on one phase of the secondary, the current carried by the auxiliary secondaries so wound is very high and as a result it has happened that the auxiliary secondary windings have been destroyed, more or less completely destroying the rest of the transformer or transformers. Various constructions have been proposed to prevent this; for example it has been proposed to open a switch in the secondary circuit by means of the excessive current in the auxiliary coils but this is undesirable

because it results in dropping the load which might otherwise be avoided if the excess power currents could be carried for a short period of time.

Now I have discovered that it is not necessary to have the auxiliary secondary windings in close inductive relation to the primary and secondary power windings, but that even though the auxiliary secondary windings possess very considerable reactance with respect to the primary and secondary windings, they still retain the ability to maintain balanced voltages on the secondaries. The increased reactance which I have found can be given to the auxiliary secondary windings is sufficient to prevent the flow of excessive currents in the auxiliary secondary windings in cases of a short-circuit on the secondary side of the transformers so that it becomes unnecessary to provide any means for opening the circuit.

In certain constructions heretofore used the reactance of the auxiliary secondary coils has been about seven times the normal reactance of the transformers. In this case the auxiliary secondary windings were placed in the middle of the winding spaces of the cores. By placing the auxiliary windings at the ends of the winding spaces in the same kind of transformers, it becomes possible to increase their reactance to something like twenty-nine times the normal reactance of the transformers. This change obviously entails practically no increase in the first cost of the transformers and their normal operation is substantially the same in both cases; my invention, however, gives the additional factor of safety.

In the accompanying drawings which form a part of this specification, I have illustrated transformers involving my invention.

Figure 1 illustrates a shell type transformer involving my invention; Fig. 2 illustrates a core type transformer also involving my invention; and Fig. 3 illustrates diagrammatically the connection of the windings of a transformer or transformers involving my invention.

It is customary to use interchangeably a three phase transformer or three single phase transformers. The connections are similar in the two cases and my invention is applied in the same manner to three phase

55

1,172,094

transformers and to single phase transform-  
ers when connected in three phase relation-  
ship.

In Fig. 1, I have illustrated a single phase  
5 shell type transformer with the tertiary  
winding so located as to possess considerable  
reactance as is required by my invention.  
The core 1 is of the common three-legged  
type. About the center leg is located the  
10 high tension winding 2 and the low tension  
winding 3, and also the auxiliary secondary  
winding 4. The high and low tension wind-  
ings, which are the power windings, are well  
inter-wound to secure good magnetic link-  
15 age. The auxiliary secondary winding 4 is  
located at one end of the winding space, that  
is, at one end of the core containing the  
power coils, and hence possesses considerable  
reactance as will be understood.

20 Fig. 2 illustrates a core type transformer.  
The core 10 is of the usual two-legged type,  
each leg being surrounded by a high tension  
winding 11 and a low tension winding 12,  
one placed above the other. The tertiary  
25 winding 13 is here also located on one end of  
each leg and hence possessing considerable  
reactance as in the preceding case.

The connections whether a single three  
phase transformer or three single phase  
30 transformers are used, are the same as have  
been common heretofore: thus in Fig. 3 the  
primary windings 20 are Y-connected and  
the secondary windings 21 are Y-connected.  
The tertiary windings 22 are connected in

delta and in Fig. 3 are located at some dis- 35  
tance from the power windings 20 and 21 to  
indicate their high reactance.

It will be understood that it is not neces-  
sary that the reactance of the tertiary wind- 40  
ing be obtained in exactly the way I have  
described it and it will be further under-  
stood that the available reactance values ex-  
tend throughout a very considerable range.

What I claim as new and desire to secure  
by Letters Patent of the United States, is,— 45

1. In a system of distribution, the combi-  
nation with Y-connected primary trans-  
former coils and Y-connected secondary  
transformer coils, of delta connected aux-  
iliary secondary transformer coils in poor 50  
inductive relation to said primary and sec-  
ondary coils.

2. In a system of distribution, the combi-  
nation with Y-connected primary trans-  
former coils and Y-connected secondary 55  
transformer coils, of delta connected aux-  
iliary secondary transformer coils respec-  
tively linked by the same magnetic circuits  
as the primary and secondary coils and lo-  
cated at one end only of the winding spaces 60  
in poor inductive relation to said primary  
and secondary coils.

In witness whereof, I have hereunto set  
my hand this 8th day of July, 1913.

LOUIS F. BLUME.

Witnesses:

A. K. NICKERT,  
H. NICKERT.

1,173,094.

L. F. BLUME,  
TERTIARY WINDING.  
APPLICATION FILED JULY 11, 1912.

Patented Feb. 22, 1916.

Fig. 1.

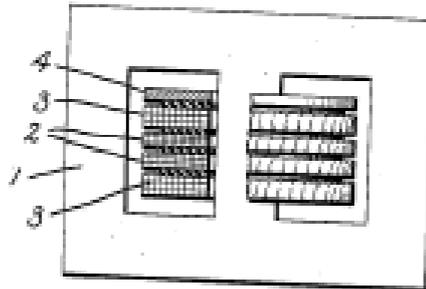


Fig. 2.

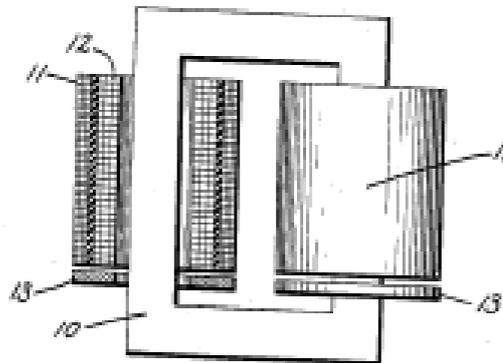
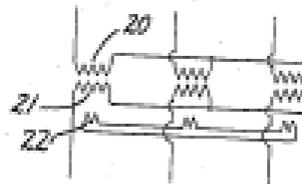


Fig. 3.



Witnesses

*Anthony Marx*  
*J. Ellis Glan*

Inventor:  
Louis F. Blume.

by *Alfred Davis*  
His Attorney.

## Apéndice B

### Ensayos de obtención de la impedancia homopolar en un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

En este apéndice se detallan algunos aspectos relacionados con la ejecución de los ensayos de impedancia homopolar realizados en campo sobre los tres transformadores objeto de estudio, la instrumentación utilizada y el tratamiento de las señales medidas. Asimismo, se presentan el conjunto completo de medidas realizadas en campo y en fábrica para todos los transformadores en diferentes posiciones del cambiador de tomas en carga.

Tal y como se expone en el apartado 4.2.1, para conseguir una caracterización completa del comportamiento homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización se plantea realizar el siguiente conjunto de ensayos:

Identificador del ensayo	Situación de los diferentes arrollamientos durante los ensayos de medida de la impedancia homopolar		
	Arrollamiento primario	Arrollamiento secundario	Arrollamiento estabilización
A0A	Energizado	En vacío	Abierto
A0C	Energizado	En vacío	Cerrado
A1A	Energizado	Cortocircuitado	Abierto
A1C	Energizado	Cortocircuitado	Cerrado
B0A	En vacío	Energizado	Abierto
B0C	En vacío	Energizado	Cerrado
B1A	Cortocircuitado	Energizado	Abierto
B1C	Cortocircuitado	Energizado	Cerrado

**Tabla 4.4 (rep.). Codificación de los ensayos y disposición de los arrollamientos en los mismos.**

La ejecución de los ensayos en campo se realizó efectuando la alimentación con un equipo de ensayo M4110 de la compañía Doble, normalmente utilizado para la ejecución de las medidas de reactancia de fuga (*leakage reactance tests*) en secuencia directa de transformadores de potencia. Las medidas de tensión y corriente se obtuvieron con sondas conectadas a un osciloscopio de cuatro canales DLM2000 de la compañía Yokogawa.

A continuación se muestran en detalle las configuraciones de ensayo realizadas.

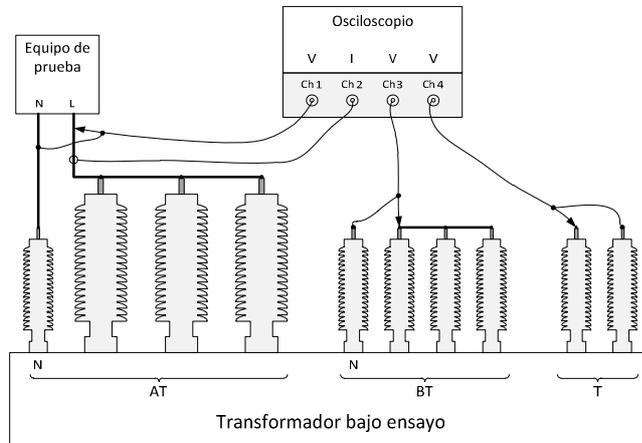


Figura B.1. Conexiones del ensayo A0A

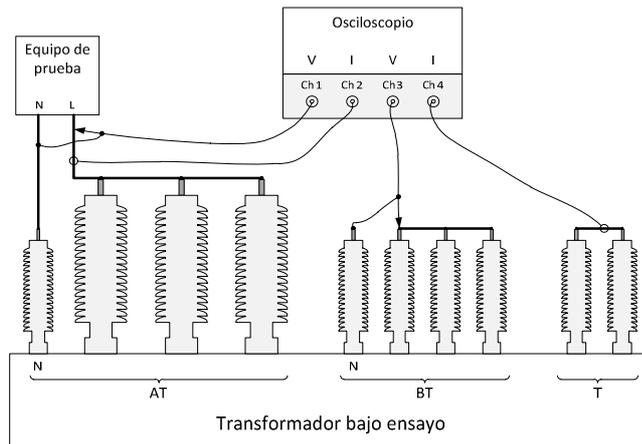


Figura B.2. Conexiones del ensayo A0C

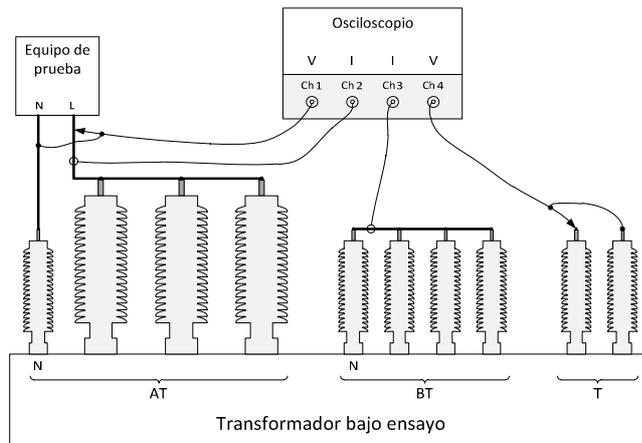


Figura B.3. Conexiones del ensayo A1A

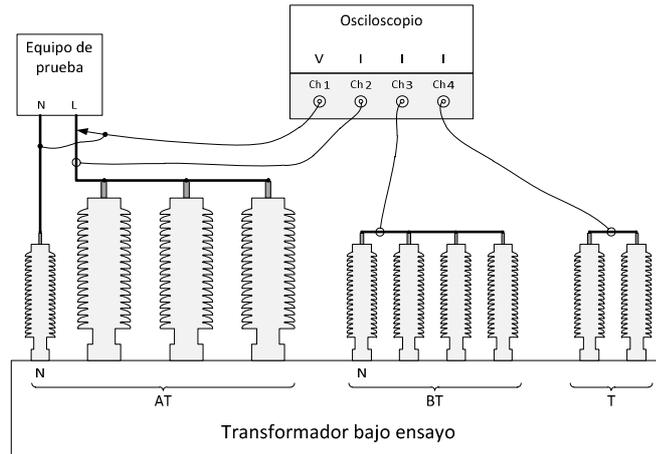


Figura B.4. Conexiones del ensayo A1C

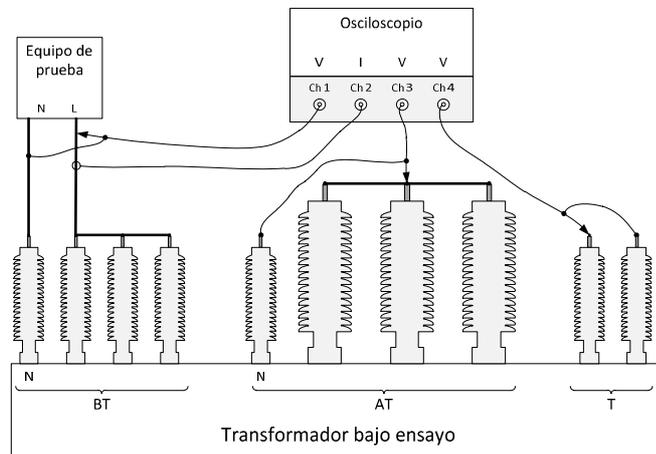


Figura B.5. Conexiones del ensayo B0A

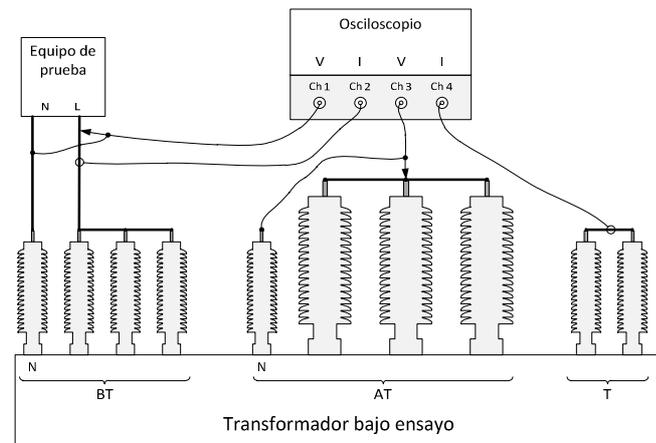


Figura B.6. Conexiones del ensayo B0C

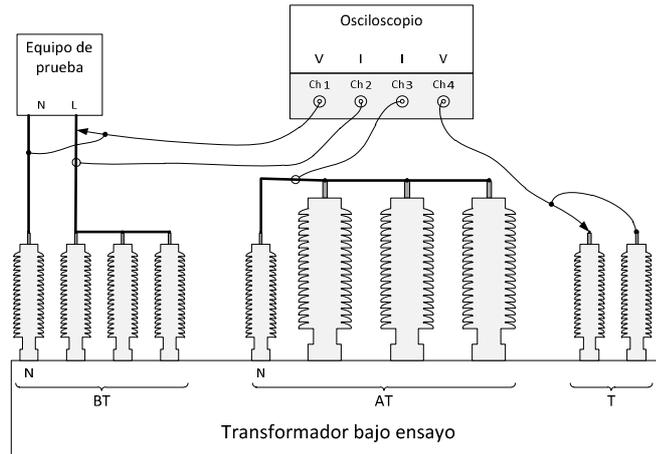


Figura B.7. Conexiones del ensayo B1A

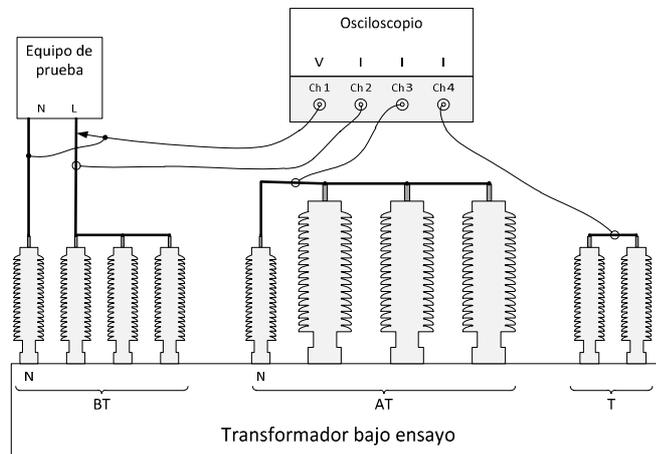


Figura B.8. Conexiones del ensayo B1C

Las señales registradas en el osciloscopio presentaron en algunos casos un ruido excesivo, por lo que se consideró necesario realizar un proceso de filtrado sobre el conjunto de datos extraídos del osciloscopio.

El filtrado de las señales se realizó en Simulink (Matlab), utilizando un demultiplexor para separar las cuatro señales de cada ensayo (introducidas en una misma matriz) y filtrando cada una de ellas por medio de un sistema de primer orden configurado para actuar como filtro paso-bajo. Con ello se atenuó la señal a razón de 20 decibelios por década a partir de la frecuencia de corte, que se situó en 1250 Hz. Con esta frecuencia de corte se consiguió un filtrado adecuado sin afectar significativamente al desfase angular entre las variables.

En las tablas B.1 a B.6 se muestran el conjunto de las medidas realizadas en cada uno de los ensayos efectuados tanto en campo como en fábrica. Las medidas de tensión y corriente presentan los valores eficaces de las mismas tanto en valor absoluto como en valor relativo referidas a las magnitudes base (potencia aparente asignada y tensiones y corrientes de línea asignadas del transformador; en el caso de las tensiones, referidas a la tensión asignada de toma).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar					Corrientes de fase medidas en los arrollamientos					
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)	Arroll. primario		Arroll. secundario		Arroll. estabilización	
												Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)
AOA	1	108,6	0,367	4,161	0,493	145,9	78,30	71,16	74,38	25,28	74,11	0,493	-71,16	-	-	-	-
		173,7	0,586	6,314	0,748	381,7	82,53	69,63	78,40	28,72	77,37	0,748	-69,63	-	-	-	-
		249,6	0,843	8,681	1,028	792,4	86,26	68,55	81,94	31,54	80,28	1,028	-68,55	-	-	-	-
	11	103,1	0,397	5,061	0,526	166,9	61,11	71,35	75,45	19,55	57,90	0,526	-71,35	-	-	-	-
		208,2	0,801	9,434	0,980	702,7	66,21	69,04	81,74	23,69	61,83	0,980	-69,04	-	-	-	-
		246,9	0,950	10,98	1,141	989,8	67,46	68,59	83,28	24,63	62,80	1,141	-68,59	-	-	-	-
	21	75,87	0,340	5,048	0,451	114,5	45,09	72,60	75,26	13,48	43,03	0,451	-72,60	-	-	-	-
		163,8	0,733	10,07	0,900	559,1	48,80	70,19	81,46	16,54	45,91	0,900	-70,19	-	-	-	-
		231,9	1,038	13,66	1,221	1139	50,93	68,93	85,01	18,31	47,52	1,221	-68,93	-	-	-	-
AOC	1	85,12	0,287	15,05	1,783	154,2	16,97	83,09	16,12	2,04	16,84	1,783	-83,09	-	-	1,390	93,61
	11	64,74	0,249	15,21	1,581	112,5	12,77	83,44	15,76	1,46	12,69	1,581	-83,44	-	-	1,243	93,59
	21	48,65	0,218	15,25	1,363	81,97	9,57	83,66	15,98	1,06	9,51	1,363	-83,66	-	-	1,081	93,68
A1A	1	52,35	0,177	15,06	1,784	71,13	10,43	84,82	9,91	0,94	10,39	1,784	-84,82	1,539	93,81	-	-
	11	38,94	0,150	15,30	1,590	51,63	7,64	85,03	9,43	0,66	7,61	1,590	-85,03	1,386	93,90	-	-
	21	29,39	0,132	15,54	1,389	40,99	5,67	84,85	9,47	0,51	5,65	1,389	-84,85	1,226	94,37	-	-
A1C	1	31,16	0,105	9,09	1,077	42,05	10,28	81,46	9,77	1,53	10,17	1,077	-81,46	1,060	109,81	0,262	-16,58
	11	37,78	0,145	14,96	1,555	88,94	7,58	80,95	9,35	1,19	7,48	1,555	-80,95	1,659	111,62	0,387	-15,23
	21	28,28	0,127	15,10	1,350	68,05	5,62	80,83	9,38	0,90	5,55	1,350	-80,83	1,364	112,82	0,358	-12,96
BOA	-	13,82	0,149	5,024	0,186	17,07	8,25	75,77	80,09	2,03	8,00	-	-	0,186	-75,77	-	-
		60,16	0,649	19,88	0,737	352,8	9,08	72,84	88,11	2,68	8,67	-	-	0,737	-72,84	-	-
		74,61	0,805	24,09	0,893	554	9,29	72,05	90,17	2,86	8,84	-	-	0,893	-72,05	-	-
B0C	-	3,1	0,033	16,17	0,599	9,35	0,575	79,25	5,58	0,107	0,565	-	-	0,599	-79,25	0,545	100,64
B1A	1	5,43	0,059	13,91	0,516	3,59	1,171	87,28	11,37	0,056	1,170	0,512	92,95	0,516	-87,28	-	-
	11	5,05	0,054E	13,67	0,507	3,55	1,108	87,05	10,76	0,057	1,107	0,503	93,19	0,507	-87,05	-	-
	21	5,35	0,058	14,72	0,546	4,99	1,090	86,37	10,58	0,069	1,088	0,535	93,72	0,546	-86,37	-	-
B1C	1	1,74	0,019	14,93	0,553	4,52	0,350	79,98	3,39	0,061	0,344	0,205	97,33	0,553	-79,98	0,347	101,11
	11	1,79	0,019	15,83	0,587	4,99	0,339	79,86	3,29	0,060	0,334	0,225	97,83	0,587	-79,86	0,360	100,92
	21	1,85	0,020	16,56	0,614	5,62	0,335	79,43	3,25	0,061	0,329	0,236	98,58	0,614	-79,43	0,373	103,16

Tabla B.1. Ensayos en campo realizados sobre el transformador #1 (#B).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar					Corrientes de fase medidas en los arrollamientos					
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)	Arroll. primario		Arroll. secundario		Arroll. estabilización	
												Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)
A0A	1	125,9	0,086	0,3395	0,066	2,11	1112,52	81,49	130,35	164,70	1100,26	0,066	-81,49	-	-	-	-
		209,6	0,143	0,5471	0,107	5,90	1149,33	81,11	134,67	177,62	1135,53	0,107	-81,11	-	-	-	-
	13	127,04	0,100	0,442	0,075	2,81	862,26	81,37	133,62	129,39	852,50	0,075	-81,37	-	-	-	-
		203,9	0,161	0,6921	0,117	7,27	883,83	81,10	136,96	136,68	873,20	0,117	-81,10	-	-	-	-
		25	122,71	0,114	0,5739	0,083	3,30	641,45	81,91	137,58	90,24	635,07	0,083	-81,91	-	-	-
	209,7	0,194	0,9554	0,138	10,32	658,47	81,11	141,23	101,71	650,56	0,138	-81,11	-	-	-	-	
A0C	1	232,3	0,159	4,081	0,795	12,01	170,77	87,82	20,01	6,50	170,64	0,795	-87,82	-	-	0,780	91,49
	13	172,34	0,136	4,128	0,699	9,63	125,25	87,67	19,41	5,09	125,14	0,699	-87,67	-	-	0,695	92,99
	25	129,98	0,120	4,27	0,615	7,80	91,32	87,57	19,59	3,87	91,24	0,615	-87,57	-	-	0,618	88,20
A1A	1	256,6	0,176	6,305	1,228	19,12	122,09	87,97	14,31	4,33	122,02	1,228	-87,97	1,190	92,03	-	-
	13	217,8	0,171	7,431	1,258	20,19	87,93	87,85	13,63	3,29	87,87	1,258	-87,85	1,223	91,76	-	-
	25	169,5	0,157	8,047	1,158	19,64	63,19	87,52	13,55	2,73	63,13	1,158	-87,52	1,129	93,05	-	-
A1C	1	200,4	0,137	4,982	0,970	15,12	120,67	87,29	14,14	5,70	120,54	0,970	-87,29	1,136	96,59	0,193	-62,68
	13	140,29	0,110	4,848	0,821	11,09	86,81	87,20	13,45	4,24	86,69	0,821	-87,20	0,931	96,80	0,164	-62,45
	25	102,21	0,095	4,911	0,707	9,04	62,44	86,90	13,39	3,37	62,35	0,707	-86,90	0,843	97,68	0,142	-59,77
B0A	-	63,0	0,154	2,014	0,110	6,54	93,84	81,21	139,62	14,35	92,74	-	-	0,110	-81,21	-	-
		104,45	0,255	3,29	0,180	18,20	95,24	80,86	141,70	15,13	94,03	-	-	0,180	-80,86	-	-
		128,73	0,314	4,028	0,220	27,80	95,88	80,74	142,64	15,43	94,63	-	-	0,220	-80,74	-	-
		214,1	0,522	6,58	0,360	79,02	97,61	80,30	145,23	16,44	96,22	-	-	0,360	-80,30	-	-
BOC	-	22,47	0,055	21,42	1,171	21,11	3,15	82,44	4,68	0,414	3,12	-	-	1,171	-82,44	1,160	96,83
B1A	1	49,06	0,120	15,01	0,820	8,04	9,81	88,13	14,59	0,321	9,80	0,733	90,84	0,820	-88,13	-	-
	13	47,32	0,115	15,35	0,839	8,56	9,25	87,97	13,76	0,327	9,24	0,766	92,38	0,839	-87,97	-	-
	25	46,8	0,114	15,55	0,850	10,48	9,03	87,53	13,43	0,390	9,02	0,769	91,28	0,850	-87,53	-	-
B1C	1	17,27	0,042	23,37	1,277	18,57	2,22	82,08	3,30	0,306	2,20	0,277	102,60	1,277	-82,08	0,952	98,08
	13	16,17	0,039	22,29	1,218	17,06	2,18	81,83	3,24	0,309	2,15	0,322	99,86	1,218	-81,83	0,893	98,49
	25	16,09	0,039	22,43	1,226	17,61	2,15	81,59	3,20	0,315	2,13	0,295	99,04	1,226	-81,59	0,892	97,76

Tabla B.2. Ensayos en campo realizados sobre el transformador #2 (#F).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar					Corrientes de fase medidas en los arrollamientos					
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)	Arroll. primario		Arroll. secundario		Arroll. estabilización	
												Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)	Módulo (%)	Fase (°)
A0A	1	72,18	0,047	0,565	0,058	2,62	383,26	78,92	82,17	73,66	376,11	0,058	-78,92	-	-	-	-
		122,7	0,080	0,94	0,096	7,71	391,60	78,42	83,96	78,61	383,62	0,096	-78,42	-	-	-	-
		172,23	0,113	1,305	0,133	15,41	395,93	78,12	84,89	81,53	387,44	0,133	-78,12	-	-	-	-
		204,1	0,134	1,539	0,157	21,80	397,86	77,98	85,30	82,84	389,14	0,157	-77,98	-	-	-	-
	11	54,93	0,041	0,544	0,048	1,80	302,92	79,56	85,89	54,91	297,91	0,048	-79,56	-	-	-	-
		99,25	0,075	0,959	0,085	5,98	310,48	79,11	88,04	58,65	304,89	0,085	-79,11	-	-	-	-
		135,7	0,102	1,3	0,115	11,36	313,15	78,85	88,80	60,58	307,24	0,115	-78,85	-	-	-	-
		162,5	0,122	1,55	0,137	16,44	314,52	78,70	89,18	61,63	308,42	0,137	-78,70	-	-	-	-
	21	44,22	0,039	0,561	0,042	1,38	236,47	80,36	92,81	39,61	233,13	0,042	-80,36	-	-	-	-
		73,94	0,066	0,921	0,069	3,92	240,85	80,05	94,52	41,60	237,23	0,069	-80,05	-	-	-	-
		105,7	0,094	1,304	0,098	8,13	243,17	79,81	95,44	43,04	239,34	0,098	-79,81	-	-	-	-
		125,1	0,111	1,536	0,116	11,47	244,34	79,68	95,89	43,75	240,39	0,116	-79,68	-	-	-	-
A0C	1	59,56	0,039	2,993	0,305	3,69	59,70	86,44	12,80	3,71	59,58	0,305	-86,44	-	-	0,296	93,11
	11	59,22	0,045	2,99	0,265	3,00	59,42	87,08	16,85	3,02	59,34	0,265	-87,08	-	-	0,257	93,52
	21	59,3	0,053	2,94	0,221	2,47	60,51	87,56	23,75	2,57	60,46	0,221	-87,56	-	-	0,215	91,42
A1A	1	199,4	0,131	10,405	1,059	49,80	57,49	85,87	12,33	4,14	57,34	1,059	-85,87	0,900	91,87	-	-
	11	144,8	0,109	10,12	0,896	29,91	42,92	86,49	12,17	2,63	42,84	0,896	-86,49	0,782	91,90	-	-
	21	114,46	0,101	10,161	0,765	19,41	33,79	87,13	13,26	1,69	33,75	0,765	-87,13	0,690	91,63	-	-
A1C	1	82,74	0,054	10,01	1,019	18,00	24,80	86,25	5,32	1,62	24,74	1,019	-86,25	0,480	93,30	0,520	94,28
	11	82,14	0,062	10,13	0,897	14,20	24,33	87,06	6,90	1,25	24,29	0,897	-87,06	0,487	92,31	0,396	93,12
	21	88,61	0,079	10,55	0,794	13,73	25,20	87,47	9,89	1,11	25,17	0,794	-87,47	0,508	91,89	0,277	92,20
B0A	-	44,24	0,108	3,83	0,105	9,59	34,65	80,23	103,11	5,88	34,15	-	-	0,105	-80,23	-	-
		68,27	0,167	5,85	0,160	23,01	35,01	80,04	104,18	6,06	34,48	-	-	0,160	-80,04	-	-
		89,7	0,219	7,66	0,209	40,56	35,13	79,81	104,53	6,21	34,58	-	-	0,209	-79,81	-	-
		112,5	0,274	9,54	0,261	64,74	35,38	79,57	105,27	6,41	34,79	-	-	0,261	-79,57	-	-
B0C	-	50,27	0,123	13,12	0,359	6,89	11,49	88,21	34,20	0,360	11,49	-	-	0,359	-88,21	0,324	91,30
B1A	1	22,2	0,054	13,3	0,363	3,60	5,01	87,90	14,90	0,183	5,00	0,358	92,80	0,363	-87,90	-	-
	11	21,63	0,053	13,73	0,375	3,64	4,73	87,89	14,06	0,174	4,72	0,366	92,42	0,375	-87,89	-	-
	21	21,61	0,053	13,59	0,371	4,06	4,77	87,62	14,19	0,198	4,77	0,349	91,88	0,371	-87,62	-	-
B1C	1	27,49	0,067	17,39	0,475	6,55	4,74	87,64	14,11	0,195	4,74	0,582	93,36	0,475	-87,64	0,130	-84,42
	11	26,72	0,065	17,19	0,470	5,42	4,66	87,97	13,88	0,165	4,66	0,502	93,40	0,470	-87,97	0,061	-86,73
	21	26,99	0,066	17,07	0,466	5,63	4,74	87,90	14,11	0,174	4,74	0,418	92,80	0,466	-87,90	0,019	-82,19

Tabla B.3. Ensayos en campo realizados sobre el transformador #3 (#G).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar				
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
AOA	1	2300	7,766	88,2	10,45	74,8	78,23	68,36	74,32	28,85	72,72
		2600	8,778	101,4	12,01	95,1	76,92	68,86	73,07	27,75	71,74
		2900	9,791	115,8	13,72	119,2	75,13	69,21	71,37	26,67	70,24
		3267	11,030	132,6	15,71	150,0	73,91	69,74	70,22	25,59	69,34
	11	2000	7,698	98,7	10,26	71,9	60,79	68,64	75,05	22,14	56,61
		2300	8,853	116,1	12,07	84,4	59,43	71,57	73,37	18,78	56,38
		2600	10,007	133,8	13,90	120,0	58,30	69,82	71,97	20,11	54,72
		2900	11,162	152,1	15,81	149,5	57,20	70,19	70,62	19,39	53,81
	21	1700	7,608	110,4	9,87	66,1	46,20	69,38	77,11	16,27	43,24
		2000	8,951	134,7	12,04	92,9	44,54	69,83	74,35	15,36	41,81
		2200	9,846	149,1	13,33	110,7	44,27	70,28	73,89	14,94	41,67
		2500	11,189	173,4	15,50	142,9	43,25	70,75	72,20	14,26	40,81
AOC	1	585	1,975	98,7	11,69	7,74	17,78	16,89	82,30	2,38	17,62
	11	495	1,905	111,3	11,57	7,15	13,34	16,47	82,54	1,73	13,23
	21	420	1,880	126,0	11,26	6,65	10,00	16,69	82,78	1,26	9,92
A1A	1	1020	3,444	285,6	33,84	28,1	10,71	10,18	84,46	1,03	10,66
	11	870	3,349	331,2	34,42	26,5	7,88	9,73	84,72	0,72	7,85
	21	720	3,222	372,0	33,25	24,8	5,81	9,69	84,69	0,54	5,78
A1C	1	1020	3,444	292,8	34,69	31,7	10,45	9,93	83,91	1,11	10,39
	11	870	3,349	340,8	35,42	30,6	7,66	9,45	84,08	0,79	7,62
	21	720	3,222	382,8	34,21	28,9	5,64	9,42	83,98	0,59	5,61
BOA	-	720	7,770	240,0	8,90	55,8	9,00	87,34	71,16	2,91	8,52
		810	8,741	273,6	10,14	70,3	8,88	86,19	71,50	2,82	8,42
		930	10,036	321,6	11,92	93,4	8,68	84,19	71,81	2,71	8,24
		1020	11,007	356,4	13,21	110,5	8,59	83,32	72,30	2,61	8,18
BOC	-	60	0,647	308,4	11,43	3,41	0,58	5,66	79,38	0,11	0,57
B1A	1	105	1,133	267,6	9,92	1,17	1,18	11,42	87,61	0,049	1,18
	11	105	1,133	283,8	10,52	1,31	1,11	10,77	87,48	0,049	1,11
	21	105	1,133	291,0	10,79	1,71	1,08	10,51	86,79	0,061	1,08
B1C	1	35	0,378	298,8	11,08	1,56	0,35	3,41	81,42	0,052	0,35
	11	35	0,378	308,4	11,43	1,62	0,34	3,30	81,37	0,051	0,34
	21	35	0,378	313,2	11,61	1,72	0,34	3,25	80,97	0,053	0,33

Tabla B.4. Ensayos en fábrica realizados sobre el transformador #1 (#B).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar				
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
AOA	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	13	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	25	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
AOC	1	3202	2,192	56,20	10,95	N/D	170,93	-	20,03	-	-
	13	2670	2,102	63,94	10,83	N/D	125,27	-	19,41	-	-
	25	2143	1,985	70,94	10,21	N/D	90,63	-	19,44	-	-
A1A	1	2263	1,549	56,32	10,97	N/D	120,54	-	14,12	-	-
	13	1842	1,450	63,82	10,81	N/D	86,59	-	13,42	-	-
	25	1456	1,349	70,34	10,13	N/D	62,10	-	13,32	-	-
A1C	1	2238	1,532	56,35	10,97	N/D	119,15	-	13,96	-	-
	13	1823	1,435	63,94	10,83	N/D	85,53	-	13,25	-	-
	25	1437	1,331	70,33	10,12	N/D	61,30	-	13,15	-	-
BOA	-	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
BOC	-	227,3	0,555	210,8	11,52	N/D	3,23	-	4,81	-	-
B1A	1	761,1	1,857	234,5	12,82	N/D	9,74	-	14,49	-	-
	13	720,5	1,758	235,7	12,88	N/D	9,17	-	13,64	-	-
	25	695,4	1,696	233,3	12,75	N/D	8,94	-	13,30	-	-
B1C	1	176,4	0,430	232,6	12,71	N/D	2,28	-	3,38	-	-
	13	172,9	0,422	232,7	12,72	N/D	2,23	-	3,32	-	-
	25	171,2	0,418	233,3	12,75	N/D	2,20	-	3,28	-	-

Tabla B.5. Ensayos en fábrica realizados sobre el transformador #2 (#F).

Id. ensayo	Pos. CTC	Fuente de alimentación aplicada					Impedancia homopolar				
		Tensión (V)	Tensión (%)	Corriente (A)	Corriente (%)	Potencia (kW)	Z <sub>0</sub> (Ω)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	R <sub>0</sub> (Ω)	X <sub>0</sub> (Ω)
AOA	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	11	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	21	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
AOC	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	11	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	21	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
A1A	1	988,2	0,647	50,25	5,12	N/D	59,00	-	12,65	-	-
	11	746,9	0,562	49,99	4,42	N/D	44,82	-	12,71	-	-
	21	564	0,500	49,8	3,75	N/D	33,98	-	13,33	-	-
A1C	1	415,6	0,272	49,98	5,09	N/D	24,95	-	5,35	-	-
	11	414	0,312	50,24	4,45	N/D	24,72	-	7,01	-	-
	21	418,5	0,371	49,75	3,74	N/D	25,24	-	9,90	-	-
B0A	-	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
B0C	-	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
B1A	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	11	238,1	0,581	150,1	4,10	N/D	4,76	-	14,16	-	-
	21	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
B1C	1	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-
	11	237,6	0,580	151,1	4,13	N/D	4,72	-	14,04	-	-
	21	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	-	-	-	-	-

Tabla B.6. Ensayos en fábrica realizados sobre el transformador #3 (#G).

## Apéndice C

# Proceso de optimización numérica para la obtención de los parámetros de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos

En este apéndice se detallan algunos aspectos relativos al proceso de resolución del sistema de ecuaciones no lineales planteado en el apartado 4.2.2 con el objetivo de obtener los parámetros de los circuitos equivalentes de los distintos modelos seleccionados para la representación del comportamiento homopolar de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización.

A modo de resumen de lo expuesto, se reproduce de nuevo la tabla 4.15 en la que se muestran, para cada uno de los modelos, los parámetros a obtener mediante el proceso de optimización numérica, la referencia a las ecuaciones de cada uno de los modelos (que constituyen el sistema de ecuaciones no lineales a resolver), y las medidas de los ensayos realizados en cada uno de los tres transformadores de estudio que están presentes en dichas ecuaciones.

Modelo	Parámetros a obtener	Ecuaciones del modelo	Medidas de los ensayos utilizadas (para cada transformador de estudio)
Modelo A	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, Z_{0M}$ (4) (Fig. 4.11)	8 ecs. impedancia: (4.9) a (4.16)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo B1	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}$ (3) (Fig. 4.12.a)	4 ecs. impedancia: (4.25) a (4.28)	$Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1C)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo B2	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{0M}$ (3) (Fig. 4.12.b)	4 ecs. impedancia: (4.29) a (4.32)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(B0A)}, Z_{0(B1A)}$
Modelo C	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03}, Z_{00}$ (4) (Fig. 4.13)	4 ecs. impedancia: (4.41) a (4.48)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$
Modelo D	$Z_{01}, Z_{02}, Z_{03},$ $Z_{012}, Z_{013}, Z_{023}$ (6) (Fig. 4.14)	8 ecs. impedancia: (4.57) a (4.64) 6 ecs. intensidad: (4.68), (4.70), (4.71) (4.72), (4.74), (4.75)	$Z_{0(A0A)}, Z_{0(A0C)}, Z_{0(A1A)}, Z_{0(A1C)}$ $Z_{0(B0A)}, Z_{0(B0C)}, Z_{0(B1A)}, Z_{0(B1C)}$ $I_{terciario(A0C)}, I_{secundario(A1C)}, I_{terciario(A1C)}$ $I_{terciario(B0C)}, I_{primario(B1C)}, I_{terciario(B1C)}$

Tabla 4.15 (rep.). Resumen de los elementos considerados en el proceso de optimización numérica.

Para resolver este problema matemático de optimización numérica se ha planteado la resolución de un problema de mínimos cuadrados no lineal por medio de las funciones “*fsolve*” y “*lsqnonlin*” de la aplicación MATLAB.

### C.1. Metodología de resolución del problema de optimización numérica

Como se ha indicado, de cara a garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el proceso de optimización numérica, se utilizarán dos procedimientos de resolución:

- La función “*fsolve*” de MATLAB, que maneja tres posibles algoritmos de resolución:
  - o Algoritmo *trust-region-dogleg*
  - o Algoritmo *Levenberg-Marquardt*
  - o Algoritmo *trust-region-reflective*
  
- La función “*lsqnonlin*” de MATLAB, que maneja dos posibles algoritmos de resolución:
  - o Algoritmo *Levenberg-Marquardt*
  - o Algoritmo *trust-region-reflective*

En nuestro caso, al tratarse de sistemas sobredimensionados, por exceder el número de ecuaciones al número de incógnitas, los algoritmos que automáticamente se asignan en ambas funciones son el algoritmo *Levenberg-Marquardt*, en el caso de la función “*fsolve*”, y el algoritmo *trust-region-reflective*, en la función “*lsqnonlin*”. Ambos tienen su origen en los trabajos de Marquardt en la década de los 60 [113].

En ambos casos, el objetivo de las funciones es minimizar la raíz cuadrada de la suma de los errores de cada una de las ecuaciones del modelo elevados al cuadrado.

Los algoritmos de resolución de los sistemas de ecuaciones no lineales propuestos operan con las derivadas parciales de las ecuaciones de cada modelo respecto a las incógnitas (parámetros) a determinar. Se ha comprobado en los trabajos de resolución de las ecuaciones que si se incorpora la matriz jacobiana del sistema de ecuaciones, calculada de forma analítica, se mejora significativamente la estabilidad y la convergencia de las soluciones. En caso de no realizar dicho trabajo, las funciones “*fsolve*” y “*lsqnonlin*” de la aplicación MATLAB las estiman a partir de métodos numéricos, con peores resultados.

A continuación se describen detalladamente los pasos empleados para la resolución de los problemas de optimización numérica:

1. Generar un vector con los valores de las impedancias homopolares medidos en cada un de los ensayos realizados. Se denotará como vector  $\mathbf{Z}$ , y será utilizado en la construcción del sistema de ecuaciones de los modelos de circuito equivalente.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_0 (A0A) \\ Z_0 (A0C) \\ Z_0 (A1A) \\ Z_0 (A1C) \\ Z_0 (B0A) \\ Z_0 (B0C) \\ Z_0 (B1A) \\ Z_0 (B1C) \end{bmatrix}$$

2. Generar un vector con los valores de las intensidades medidas en los arrollamientos no energizados y la tensión de alimentación de los arrollamientos en cada uno de los ensayos. Se denotará como vector  $\mathbf{IU}$ , y será utilizado parcialmente en la construcción del sistema de ecuaciones del modelo D. En todos los modelos será utilizado para contrastar la precisión obtenida por el proceso de optimización.

$$\mathbf{IU} = \begin{bmatrix} I_{terciario} (A0C) \\ I_{secundario} (A1A) \\ I_{secundario} (A1C) \\ I_{terciario} (A1C) \\ I_{terciario} (B0C) \\ I_{primario} (B1A) \\ I_{primario} (B1C) \\ I_{terciario} (B1C) \\ U_{primario} (A0C) \\ U_{primario} (A1A) \\ U_{primario} (A1C) \\ U_{secundario} (B0C) \\ U_{secundario} (B1A) \\ U_{secundario} (B1C) \end{bmatrix}$$

3. Definir el vector con las incógnitas (parámetros) del modelo cuyo sistema de ecuaciones no lineales se desea resolver. Se denotará como vector  $\mathbf{X}$ . En el apartado C.2 se describen los vectores de cada uno de los modelos. Se indica a continuación, a modo de ejemplo ilustrativo, el del modelo A:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Z_{01} \\ Z_{02} \\ Z_{03} \\ Z_{0M} \end{bmatrix}$$

4. Describir las ecuaciones del modelo, que contienen el error entre las impedancias (o corrientes en su caso) calculadas con los parámetros del modelo circuital y las impedancias (o corrientes en su caso) medidas. Con las ecuaciones del modelo se construye un vector, que se denotará como vector  $\mathbf{F}$ , que se forma igualando a cero cada una de las ecuaciones del modelo. Cada componente de este vector constituye, por tanto, el error de dicho modelo en la obtención de las impedancias homopolares en cada una de las configuraciones de ensayo.

En el caso del modelo A, se indica a modo ilustrativo la formulación del vector  $\mathbf{F}$ .

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (Z_{01} + Z_{0M}) - Z_{0(A0A)} \\ (Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}}) - Z_{0(A0C)} \\ (Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02}}{Z_{0M} + Z_{02}}) - Z_{0(A1A)} \\ (Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03}}) - Z_{0(A1C)} \\ (Z_{02} + Z_{0M}) - Z_{0(B0A)} \\ (Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}}) - Z_{0(B0C)} \\ (Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01}}{Z_{0M} + Z_{01}}) - Z_{0(B1A)} \\ (Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot Z_{03}}) - Z_{0(B1C)} \end{bmatrix}$$

De cara a conseguir que el peso del error porcentual de cada una de las ecuaciones sea semejante, se ha incluido un factor de compensación en cada uno de los elementos del vector  $\mathbf{F}$  consistente en multiplicar la ecuación de cada configuración de ensayo por el máximo del vector  $\mathbf{Z}$  dividido por la componente del citado vector en dicha configuración. Con ello se constituye el vector  $\mathbf{F}^*$ :

$$\mathbf{F}^* = \begin{bmatrix} [(Z_{01} + Z_{0M}) - Z_{0(A0A)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(A0A)}} \\ [(Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}}) - Z_{0(A0C)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(A0C)}} \\ [(Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02}}{Z_{0M} + Z_{02}}) - Z_{0(A1A)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(A1A)}} \\ [(Z_{01} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{02} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03}}) - Z_{0(A1C)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(A1C)}} \\ [(Z_{02} + Z_{0M}) - Z_{0(B0A)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(B0A)}} \\ [(Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} + Z_{03}}) - Z_{0(B0C)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(B0C)}} \\ [(Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01}}{Z_{0M} + Z_{01}}) - Z_{0(B1A)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(B1A)}} \\ [(Z_{02} + \frac{Z_{0M} \cdot Z_{01} \cdot Z_{03}}{Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot Z_{03}}) - Z_{0(B1C)}] \cdot \frac{\max[Z]}{Z_{0(B1C)}} \end{bmatrix}$$

- Construir la matriz jacobiana del vector  $\mathbf{F}$  a partir de una resolución analítica de las derivadas parciales de los componentes de dicho vector respecto a los parámetros del modelo, es decir de los componentes del vector  $\mathbf{X}$ .

Los elementos de la matriz  $\mathbf{J}$  se calcularán por tanto como:

$$J_{n,m} = \frac{\partial F_n}{\partial X_m}$$

Conformando la matriz jacobiana con la siguiente estructura:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_7}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{0M}} \\ \frac{\partial F_8}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{0M}} \end{bmatrix}$$

Resultando los siguientes valores una vez efectuadas las operaciones correspondientes:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & \frac{Z_{0M}^2}{(Z_{0M}+Z_{03})^2} & \frac{Z_{03}^2}{(Z_{0M}+Z_{03})^2} \\ 1 & \frac{Z_{0M}^2}{(Z_{0M}+Z_{02})^2} & 0 & \frac{Z_{02}^2}{(Z_{0M}+Z_{02})^2} \\ 1 & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{0M}} \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & \frac{Z_{0M}^2}{(Z_{0M}+Z_{03})^2} & \frac{Z_{03}^2}{(Z_{0M}+Z_{03})^2} \\ \frac{Z_{0M}^2}{(Z_{0M}+Z_{01})^2} & 1 & 0 & \frac{Z_{01}^2}{(Z_{0M}+Z_{01})^2} \\ \frac{\partial F_8}{\partial Z_{01}} & 1 & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{0M}} \end{bmatrix}$$

Donde,

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} = \frac{(Z_{0M} \cdot Z_{03})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03})^2}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} = \frac{(Z_{0M} \cdot Z_{02})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03})^2}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{0M}} = \frac{(Z_{02} \cdot Z_{03})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{02} + Z_{0M} \cdot Z_{03} + Z_{02} \cdot Z_{03})^2}$$

$$\frac{\partial F_8}{\partial Z_{01}} = \frac{(Z_{0M} \cdot Z_{03})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{01} \cdot Z_{03})^2}$$

$$\frac{\partial F_8}{\partial Z_{03}} = \frac{(Z_{0M} \cdot Z_{01})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{01} \cdot Z_{03})^2}$$

$$\frac{\partial F_8}{\partial Z_{0M}} = \frac{(Z_{01} \cdot Z_{03})^2}{(Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{0M} \cdot Z_{01} + Z_{01} \cdot Z_{03})^2}$$

De la misma forma que en el punto anterior, los elementos de la matriz jacobiana  $J$  que se introducirán en la resolución de las ecuaciones se encuentran también afectados por los factores de compensación  $\frac{\max [Z]}{Z_{0(ABC)}}$ , constituyendo de esta forma la matriz  $J^*$ .

6. Ejecutar en la aplicación MATLAB las funciones “fsolve” y “lsqnonlin”, con los vectores y matrices definidos en los puntos anteriores, para obtener los parámetros óptimos de cada modelo.

Para realizar la ejecución de dichas funciones es necesario establecer un vector de valores iniciales de las impedancias buscadas  $X_0$  así como las tolerancias que utilizará el algoritmo de resolución tanto con el vector de ecuaciones (errores)  $F^*$  como con el vector de parámetros (incógnitas)  $X$ .

En cuanto al primero de los dos aspectos mencionados, de cara a asegurar la estabilidad y validez de las soluciones encontradas, se han repetido tres casos del vector de valores iniciales para cada una de las ejecuciones de los algoritmos de optimización numérica tomando todos los componentes del vector  $X_0$  iguales a  $-1 \cdot 10^{-7}$  (caso 1), iguales a 0,1 (caso 2) e iguales a 1000 (caso 3).

En lo que respecta a las tolerancias, se han considerado tanto para el vector de ecuaciones  $F^*$  como para el vector de parámetros  $X$  unas tolerancias de  $10^{-17}$ .

7. Como se explicó en el apartado 3.2, se ha considerado, por un lado, un escenario de impedancias homopolares complejas y por otro lado, un escenario simplificado que despreciaba la componente resistiva de las impedancias, permitiendo formular unos modelos en el campo real.

Así pues, el proceso de optimización numérica se ha ejecutado para todas las posibles combinaciones de casos indicados a continuación en la tabla C.1:

Nº casos	Descripción	Situaciones a considerar
3	Transformadores a estudiar	- Trafo #1 - Trafo #2 - Trafo #3
3	Posiciones del cambiador de tomas en carga	- Posición central - Posición máxima - Posición mínima
2	Consideración componente resistiva	- Impedancias complejas - Impedancias reales (reactancia pura)
4	Modelos de circuito equivalente	- Modelo A - Modelo B - Modelo C - Modelo D
2	Algoritmos de resolución de los sistemas de ecuaciones no lineales	- Función "fsolve" - Función "lsqnonlin"
3	Valor inicial del vector de parámetros $X_0$	Componentes de vector iguales a: - $(-1) \cdot 10^{-7}$ - 0,1 - 1000

Tabla C.1. Combinaciones de los casos de optimización numérica ejecutados.

Como se deduce de la tabla anterior, se han realizado un total de 432 casos<sup>90</sup>. La ejecución de un número tan amplio de casos ha permitido disponer de una importante garantía en lo que respecta a la validez de los resultados obtenidos.

8. Calcular, a partir de las ecuaciones de cada uno de los modelos y de los parámetros calculados en el proceso de optimización numérica, las impedancias homopolares y las corrientes circulantes en los arrollamientos no energizados para cada una de las configuraciones de ensayo.

Para ello se hará uso de los vectores  $Z$  y  $IU$  definidos anteriormente con las medidas obtenidas en los ensayos.

Con la metodología indicada en los puntos 1 a 8 anteriores, se ha realizado el proceso de optimización numérica de resolución de cada uno de los modelos de circuito equivalente a secuencia homopolar descritos en el capítulo 4. Los resultados más significativos (bajo la hipótesis de considerar las impedancias como si fueran estrictamente reactancias y en el caso de la posición central del cambiador de tomas en carga) se han reflejado en las tablas 4.16 a 4.18 del apartado 4.2.2.

En el apartado C.3 de este apéndice se completa dicha información con los resultados para las posiciones extremas del cambiador de tomas en carga y considerando impedancias complejas.

<sup>90</sup> En realidad, el número de casos ejecutados ha sido mayor ya que para cada uno de los modelos se han realizado simulaciones de comprobación. Dichas simulaciones han consistido en asignar tres conjuntos de valores aleatorios a las medidas de los ensayos, comprobando que también en estos casos el proceso de optimización numérica conducía a resultados consistentes con estos valores.

## C.2. Particularidades del proceso de resolución de las ecuaciones de los modelos

En el apartado C.1 se ha descrito la metodología del proceso de resolución de las ecuaciones de los modelos. En la exposición de dicha metodología se han utilizado las ecuaciones del modelo A para ilustrar los distintos pasos.

A continuación se van a describir algunas particularidades del resto de los modelos de circuito equivalente, así como la formulación en cada uno de los modelos del vector de resultados de los ensayos de impedancias homopolares  $Z$ , del vector de parámetros a calcular en cada uno de los modelos  $X$ , del vector que describe las ecuaciones a optimizar en el proceso de mínimos cuadrados  $F$ , y de la matriz jacobiana  $J$ .

### C.2.1. Resolución de las ecuaciones del modelo B

En el caso del modelo B, de cara a obtener una segmentación más clara de sus dos sub-modelos (B1 y B2), se ha dispuesto una agrupación de los vectores y las ecuaciones de modo que todo lo relacionado con las configuraciones con el arrollamiento de estabilización cerrado (sub-modelo B1) figurará en primer lugar y todo lo relacionado con las configuraciones con el arrollamiento de estabilización abierto (sub-modelo B2) figurará a continuación.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_0 \text{ (A0C)} \\ Z_0 \text{ (A1C)} \\ Z_0 \text{ (B0C)} \\ Z_0 \text{ (B1C)} \\ Z_0 \text{ (A0A)} \\ Z_0 \text{ (A1A)} \\ Z_0 \text{ (B0A)} \\ Z_0 \text{ (B1A)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Z'_{01} \\ Z'_{02} \\ Z'_{03} \\ Z''_{01} \\ Z''_{02} \\ Z''_{0M} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (Z'_{01} + Z'_{03}) - Z_0(A0C) \\ (Z'_{01} + \frac{Z'_{02} \cdot Z'_{03}}{Z'_{02} + Z'_{03}}) - Z_0(A1C) \\ (Z'_{02} + Z'_{03}) - Z_0(B0C) \\ (Z'_{02} + \frac{Z'_{01} \cdot Z'_{03}}{Z'_{01} + Z'_{03}}) - Z_0(B1C) \\ (Z''_{01} + Z''_{0M}) - Z_0(A0A) \\ (Z''_{01} + \frac{Z''_{02} \cdot Z''_{0M}}{Z''_{02} + Z''_{0M}}) - Z_0(A1A) \\ (Z''_{02} + Z''_{0M}) - Z_0(B0A) \\ (Z''_{02} + \frac{Z''_{01} \cdot Z''_{0M}}{Z''_{01} + Z''_{0M}}) - Z_0(B1A) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_7}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z''_{0M}} \\ \frac{\partial F_8}{\partial Z'_{01}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z'_{02}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z'_{03}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z''_{01}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z''_{02}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z''_{0M}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \frac{Z'_{03}{}^2}{(Z'_{02} + Z'_{03})^2} & \frac{Z'_{02}{}^2}{(Z'_{02} + Z'_{03})^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Z'_{03}{}^2}{(Z'_{01} + Z'_{03})^2} & 1 & \frac{Z'_{01}{}^2}{(Z'_{01} + Z'_{03})^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{Z''_{0M}{}^2}{(Z''_{02} + Z''_{0M})^2} & \frac{Z''_{02}{}^2}{(Z''_{02} + Z''_{0M})^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{Z''_{0M}{}^2}{(Z''_{01} + Z''_{0M})^2} & 1 & \frac{Z''_{01}{}^2}{(Z''_{01} + Z''_{0M})^2} \end{bmatrix}$$

### C.2.2. Resolución de las ecuaciones del modelo C

En el modelo C, la formulación analítica del proceso de optimización numérica es similar al modelo A.

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_0 (A0A) \\ Z_0 (A0C) \\ Z_0 (A1A) \\ Z_0 (A1C) \\ Z_0 (B0A) \\ Z_0 (B0C) \\ Z_0 (B1A) \\ Z_0 (B1C) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Z_{01} \\ Z_{02} \\ Z_{03} \\ Z_{00} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (Z_{00}) - Z_0 (A0A) \\ (Z_{00} \cdot \frac{Z_{01} + Z_{03}}{Z_{00} + Z_{01} + Z_{03}}) - Z_0 (A0C) \\ (Z_{00} \cdot \frac{Z_{01} + Z_{02}}{Z_{00} + Z_{01} + Z_{02}}) - Z_0 (A1A) \\ (Z_{00} \cdot \frac{Z_{02} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot (Z_{02} + Z_{03})}{(Z_{00} + Z_{01}) \cdot (Z_{02} + Z_{03}) + Z_{02} \cdot Z_{03}}) - Z_0 (A1C) \\ (Z_{00} + Z_{01} + Z_{02}) - Z_0 (B0A) \\ (\frac{Z_{02} \cdot (Z_{01} + Z_{00}) + Z_{03} \cdot (Z_{00} + Z_{01} + Z_{02})}{Z_{00} + Z_{01} + Z_{03}}) - Z_0 (B0C) \\ (Z_{01} + Z_{02}) - Z_0 (B1A) \\ (\frac{Z_{02} \cdot (Z_{01} + Z_{03}) + Z_{03} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{03}}) - Z_0 (B1C) \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_4}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_5}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_6}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_7}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{00}} \\ \frac{\partial F_8}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{00}} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{Z_{00}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} & 0 & \frac{Z_{00}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} & \frac{(Z_{01}+Z_{03})^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} \\ \frac{Z_{00}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{02})^2} & \frac{Z_{00}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{02})^2} & 0 & \frac{(Z_{01}+Z_{02})^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{02})^2} \\ \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{00}} \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ \frac{Z_{03}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} & 1 & \frac{(Z_{01}+Z_{00})^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} & \frac{Z_{03}^2}{(Z_{00}+Z_{01}+Z_{03})^2} \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{Z_{03}^2}{(Z_{01}+Z_{03})^2} & 1 & \frac{Z_{01}^2}{(Z_{01}+Z_{03})^2} & 0 \end{bmatrix}$$

Donde,

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{01}} = \frac{[Z_{00} \cdot (Z_{02} + Z_{03})]^2}{[(Z_{01}+Z_{00}) \cdot (Z_{02} + Z_{03}) + Z_{02} \cdot Z_{03}]^2}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} = \frac{(Z_{00} \cdot Z_{03})^2}{[(Z_{01}+Z_{00}) \cdot (Z_{02} + Z_{03}) + Z_{02} \cdot Z_{03}]^2}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} = \frac{(Z_{00} \cdot Z_{02})^2}{[(Z_{01}+Z_{00}) \cdot (Z_{02} + Z_{03}) + Z_{02} \cdot Z_{03}]^2}$$

$$\frac{\partial F_4}{\partial Z_{00}} = \frac{[Z_{02} \cdot Z_{03} + Z_{01} \cdot (Z_{02} + Z_{03})]^2}{[(Z_{01}+Z_{00}) \cdot (Z_{02} + Z_{03}) + Z_{02} \cdot Z_{03}]^2}$$

### C.2.3. Resolución de las ecuaciones del modelo D

La mayor complejidad del modelo D y, especialmente, la mayor inestabilidad numérica encontrada en la resolución de las ecuaciones formuladas en el campo complejo, obligó a buscar alternativas a la formulación del proceso de optimización numérica realizado para los modelos anteriores. Dentro de estas alternativas, se observó que dichos problemas de inestabilidad se resolvían al incorporar en el modelo las ecuaciones de intensidad circulante en los arrollamientos no energizados en las configuraciones de ensayo en las que se disponía el arrollamiento de estabilización cerrado.

En este caso, el vector de resultados de los ensayos de impedancias homopolares  $\mathbf{Z}$ , se completa con algunas de las medidas de corriente del vector  $\mathbf{IU}$ , según se muestra a continuación en el vector  $\mathbf{Z}_{mod}$ . Consecuentemente, los vectores  $\mathbf{F}$  y la matriz jacobiana  $\mathbf{J}$  disponen de ecuaciones adicionales.

$$\mathbf{Z}_{mod} = \begin{bmatrix} Z_0 (A0A) \\ Z_0 (A0C) \\ Z_0 (A1A) \\ Z_0 (A1C) \\ Z_0 (B0A) \\ Z_0 (B0C) \\ Z_0 (B1A) \\ Z_0 (B1C) \\ I_{terciario} (A0C) \\ I_{secundario} (A1C) \\ I_{terciario} (A1C) \\ I_{terciario} (B0C) \\ I_{primario} (B1C) \\ I_{terciario} (B1C) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Z_{01} \\ Z_{02} \\ Z_{03} \\ Z_{012} \\ Z_{013} \\ Z_{023} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix}
 \{Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y}) // (Z_{03Y})]\} - Z_0 (A0A) \\
 \{Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y} + Z_{02}) // (Z_{03Y} + Z_{03})]\} - Z_0 (A0C) \\
 \{Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y}) // (Z_{03Y})]\} - Z_0 (A1A) \\
 \{Z_{01} // [Z_{01Y} + (Z_{02Y}) // (Z_{03Y} + Z_{03})]\} - Z_0 (A1C) \\
 \{Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y} + Z_{01}) // (Z_{03Y})]\} - Z_0 (B0A) \\
 \{Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y} + Z_{01}) // (Z_{03Y} + Z_{03})]\} - Z_0 (B0C) \\
 \{Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y}) // (Z_{03Y})]\} - Z_0 (B1A) \\
 \{Z_{02} // [Z_{02Y} + (Z_{01Y}) // (Z_{03Y} + Z_{03})]\} - Z_0 (B1C) \\
 \{-U_{primario} \cdot \left[ \frac{Z_{012} \cdot Z_{02} + Z_{012} \cdot Z_{023} + Z_{02} \cdot Z_{023} + Z_{013} \cdot Z_{02}}{Z_{013} \cdot (Z_{012} \cdot Z_{02} + Z_{012} \cdot Z_{023} + Z_{02} \cdot Z_{023})} \right]\} - I_{terciario (A0C)} \\
 \left\{ \frac{-U_{primario}}{Z_{012}} \right\} - I_{secundario (A1C)} \\
 \left\{ \frac{-U_{primario}}{Z_{013}} \right\} - I_{terciario (A1C)} \\
 \{-U_{secundario} \cdot \left[ \frac{Z_{01} \cdot Z_{012} + Z_{012} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{023}}{Z_{023} \cdot (Z_{01} \cdot Z_{012} + Z_{012} \cdot Z_{013} + Z_{01} \cdot Z_{013})} \right]\} - I_{terciario (B0C)} \\
 \left\{ \frac{-U_{secundario}}{Z_{012}} \right\} - I_{primario (B1C)} \\
 \left\{ \frac{-U_{secundario}}{Z_{023}} \right\} - I_{terciario (B1C)}
 \end{bmatrix}$$

Donde las impedancias  $Z_{01Y}$  -  $Z_{02Y}$  -  $Z_{03Y}$  son las resultantes de la transformación triángulo a estrella de las impedancias  $Z_{012}$  -  $Z_{013}$  -  $Z_{023}$  según las siguientes expresiones:

$$Z_{01Y} = \frac{Z_{012} \cdot Z_{013}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.65 \text{ rep.})$$

$$Z_{02Y} = \frac{Z_{012} \cdot Z_{023}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.66 \text{ rep.})$$

$$Z_{03Y} = \frac{Z_{013} \cdot Z_{023}}{Z_{012} + Z_{013} + Z_{023}} \quad (4.67 \text{ rep.})$$

$$J = \begin{bmatrix}
 \frac{\partial F_1}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_1}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_2}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_2}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_3}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_3}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_4}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_4}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_5}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_5}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_6}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_6}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_7}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_7}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_8}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_8}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_9}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_9}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_9}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_9}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_9}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_9}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{10}}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{11}}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{12}}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{13}}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{14}}{\partial Z_{023}} \\
 \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{01}} & \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{02}} & \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{03}} & \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{012}} & \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{013}} & \frac{\partial F_{15}}{\partial Z_{023}}
 \end{bmatrix}$$

No se desarrollarán explícitamente en mayor medida las ecuaciones analíticas del vector  $\mathbf{F}$  y la matriz jacobiana  $\mathbf{J}$  por su complejidad y extensión.

### C.3. Resultados obtenidos en el cálculo de los parámetros de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos

A continuación se muestran en las tablas C.2 a C.31 los resultados obtenidos en el proceso de optimización numérica en el cálculo de los circuitos equivalentes de los diferentes modelos y para las diferentes hipótesis relacionadas con la posición del cambiador de tomas en carga y la consideración de impedancias complejas o reales.

#### C.3.1. Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #1

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,07	85,0	Z' <sub>01</sub>	9,79	83,1	Z'' <sub>01</sub>	1,11	33,4
Z <sub>02</sub>	0,23	-72,1	Z' <sub>02</sub>	0,47	-73,5	Z'' <sub>02</sub>	9,99	92,6
Z <sub>03</sub>	6,07	81,0	Z' <sub>03</sub>	5,99	82,0	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	78,52	70,7	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	78,03	70,6
<b>Error</b>	ECM = 8,70 %		<b>Error</b>	ECM = 0,17 %		<b>Error</b>	ECM = 1,51 %	

Tabla C.2. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,08	-	Z' <sub>01</sub>	9,79	-	Z'' <sub>01</sub>	1,08	-
Z <sub>02</sub>	-0,20	-	Z' <sub>02</sub>	-0,42	-	Z'' <sub>02</sub>	9,53	-
Z <sub>03</sub>	6,07	-	Z' <sub>03</sub>	5,99	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	78,38	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	77,84	-
<b>Error</b>	ECM = 8,82 %		<b>Error</b>	ECM = 0,16 %		<b>Error</b>	ECM = 1,51 %	

Tabla C.3. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,20	85,1	Z' <sub>01</sub>	9,92	83,2	Z'' <sub>01</sub>	1,41	59,5
Z <sub>02</sub>	0,36	-72,1	Z' <sub>02</sub>	0,57	-73,7	Z'' <sub>02</sub>	9,25	90,7
Z <sub>03</sub>	6,21	81,6	Z' <sub>03</sub>	6,09	82,4	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	78,75	71,2	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	78,26	71,1
<b>Error</b>	ECM = 8,27 %			ECM = 0,20 %		<b>Error</b>	ECM = 1,11 %	

Tabla C.4. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,21	-	Z' <sub>01</sub>	9,93	-	Z'' <sub>01</sub>	1,55	-
Z <sub>02</sub>	-0,31	-	Z' <sub>02</sub>	-0,52	-	Z'' <sub>02</sub>	8,94	-
Z <sub>03</sub>	6,21	-	Z' <sub>03</sub>	6,09	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	78,60	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	78,09	-
Error	ECM = 7,57 %		Error	ECM = 0,20 %		Error	ECM = 1,11 %	

Tabla C.5. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,45	84,9	Z' <sub>01</sub>	10,16	83,1	Z'' <sub>01</sub>	0,92	24,3
Z <sub>02</sub>	0,11	-67,7	Z' <sub>02</sub>	0,40	-74,5	Z'' <sub>02</sub>	10,86	91,9
Z <sub>03</sub>	5,95	80,3	Z' <sub>03</sub>	5,95	81,5	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	77,09	70,7	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	76,77	70,6
Error	ECM = 9,42 %		Error	ECM = 0,07 %		Error	ECM = 1,04 %	

Tabla C.6. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	10,46	-	Z' <sub>01</sub>	10,16	-	Z'' <sub>01</sub>	0,84	-
Z <sub>02</sub>	-0,09	-	Z' <sub>02</sub>	-0,36	-	Z'' <sub>02</sub>	10,42	-
Z <sub>03</sub>	5,95	-	Z' <sub>03</sub>	5,95	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	76,93	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	76,56	-
Error	ECM = 8,59 %		Error	ECM = 0,11 %		Error	ECM = 1,04 %	

Tabla C.7. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	78,34	70,9	77,99	70,4	76,74	70,4
Z <sub>01</sub>	12,20	87,9	12,12	88,0	12,73	87,9
Z <sub>02</sub>	1,54	-77,2	1,42	-77,6	1,41	-78,8
Z <sub>03</sub>	7,61	85,5	7,49	85,1	7,49	84,7
Error	ECM = 1,65 %		ECM = 1,38 %		ECM = 0,98 %	

Tabla C.8. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	78,28	-	77,95	-	76,68	-
Z <sub>01</sub>	12,21	-	12,14	-	12,76	-
Z <sub>02</sub>	-1,45	-	-1,35	-	-1,35	-
Z <sub>03</sub>	7,64	-	7,52	-	7,53	-
Error	ECM = 1,85 %		ECM = 1,53 %		ECM = 1,13 %	

Tabla C.9. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	98,94	31,4	89,35	36,4	85,97	40,6
Z <sub>02</sub>	37,11	-162,0	38,16	144,7	41,89	-159,1
Z <sub>03</sub>	46,97	-36,6	52,66	-37,5	53,68	-36,2
Z <sub>012</sub>	8,93	71,8	9,05	72,9	9,57	73,6
Z <sub>013</sub>	34,24	144,1	39,28	-160,2	39,85	146,5
Z <sub>023</sub>	5,62	70,2	5,63	71,7	5,66	72,1
Error	ECM = 2,67 %		ECM = 2,57 %		ECM = 2,33 %	

Tabla C.10. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	76,56	-	73,52	-	72,00	-
Z <sub>02</sub>	-200,83	-	-204,26	-	-209,59	-
Z <sub>03</sub>	204,54	-	229,94	-	240,47	-
Z <sub>012</sub>	8,21	-	8,35	-	8,86	-
Z <sub>013</sub>	-37,03	-	-39,07	-	-41,61	-
Z <sub>023</sub>	5,14	-	5,19	-	5,25	-
Error	ECM = 2,61 %		ECM = 2,54 %		ECM = 2,25 %	

Tabla C.11. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #1 (Hipótesis: impedancias reales).

### C.3.2. Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #2

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	14,41	88,8	Z' <sub>01</sub>	14,13	88,5	Z'' <sub>01</sub>	5,02	93,3
Z <sub>02</sub>	0,51	-67,6	Z' <sub>02</sub>	0,67	-70,9	Z'' <sub>02</sub>	9,09	85,2
Z <sub>03</sub>	5,27	85,3	Z' <sub>03</sub>	5,28	85,7	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	131,94	80,6	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	131,76	80,6
Error	ECM = 5,29 %		Error	ECM = 0,10 %		Error	ECM = 1,03 %	

Tabla C.12. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	14,39	-	Z' <sub>01</sub>	14,13	-	Z'' <sub>01</sub>	4,96	-
Z <sub>02</sub>	-0,45	-	Z' <sub>02</sub>	-0,61	-	Z'' <sub>02</sub>	9,12	-
Z <sub>03</sub>	5,26	-	Z' <sub>03</sub>	5,28	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	131,87	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	131,70	-
Error	ECM = 5,32 %		Error	ECM = 0,15 %		Error	ECM = 1,03 %	

Tabla C.13. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	14,43	88,6	Z' <sub>01</sub>	14,20	88,3	Z'' <sub>01</sub>	6,57	91,9
Z <sub>02</sub>	0,65	-71,1	Z' <sub>02</sub>	0,77	-72,8	Z'' <sub>02</sub>	7,29	83,9
Z <sub>03</sub>	5,43	85,6	Z' <sub>03</sub>	5,39	85,8	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	134,32	80,8	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	133,96	80,8
Error	ECM = 4,32 %		Error	ECM = 0,03 %		Error	ECM = 0,74 %	

Tabla C.14. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	14,42	-	Z' <sub>01</sub>	14,20	-	Z'' <sub>01</sub>	6,50	-
Z <sub>02</sub>	-0,59	-	Z' <sub>02</sub>	-0,71	-	Z'' <sub>02</sub>	7,33	-
Z <sub>03</sub>	5,43	-	Z' <sub>03</sub>	5,39	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	134,26	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	133,92	-
Error	ECM = 3,65 %		Error	ECM = 0,06 %		Error	ECM = 0,74 %	

Tabla C.15. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	15,07	88,9	Z' <sub>01</sub>	14,78	88,5	Z'' <sub>01</sub>	4,44	96,0
Z <sub>02</sub>	0,44	-64,2	Z' <sub>02</sub>	0,63	-70,2	Z'' <sub>02</sub>	10,53	84,9
Z <sub>03</sub>	5,17	85,2	Z' <sub>03</sub>	5,25	85,7	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	129,94	80,6	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	129,92	80,6
Error	ECM = 6,06 %		Error	ECM = 0,11 %		Error	ECM = 1,30 %	

Tabla C.16. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	15,05	-	Z' <sub>01</sub>	14,77	-	Z'' <sub>01</sub>	4,35	-
Z <sub>02</sub>	-0,37	-	Z' <sub>02</sub>	-0,57	-	Z'' <sub>02</sub>	10,57	-
Z <sub>03</sub>	5,17	-	Z' <sub>03</sub>	5,25	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	129,86	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	129,86	-
Error	ECM = 5,12 %		Error	ECM = 0,06 %		Error	ECM = 1,30 %	

Tabla C.17. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	134,58	80,8	132,37	80,6	130,59	80,6
Z <sub>01</sub>	15,83	89,3	15,93	89,6	16,80	89,7
Z <sub>02</sub>	1,41	-77,2	1,32	-76,9	1,32	-76,9
Z <sub>03</sub>	6,33	87,4	6,22	87,2	6,23	87,3
Error	ECM = 4,10 %		ECM = 3,27 %		ECM = 3,07 %	

Tabla C.18. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	134,53	-	132,32	-	130,52	-
Z <sub>01</sub>	15,83	-	15,93	-	16,80	-
Z <sub>02</sub>	-1,35	-	-1,26	-	-1,27	-
Z <sub>03</sub>	6,34	-	6,23	-	6,24	-
Error	ECM = 4,17 %		ECM = 3,34 %		ECM = 3,14 %	

Tabla C.19. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	242,91	84,6	188,64	80,3	175,57	84,7
Z <sub>02</sub>	99,63	-46,7	99,06	-102,5	100,86	-78,9
Z <sub>03</sub>	79,27	122,6	77,45	78,2	82,19	97,0
Z <sub>012</sub>	11,76	82,2	12,00	82,7	12,70	82,3
Z <sub>013</sub>	66,27	-120,2	67,33	-117,8	70,99	-117,9
Z <sub>023</sub>	4,37	82,2	4,34	81,1	4,37	81,9
Error	ECM = 1,39 %		ECM = 1,16 %		ECM = 1,35 %	

Tabla C.20. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	228,75	-	177,07	-	168,03	-
Z <sub>02</sub>	-111,81	-	-82,58	-	-86,03	-
Z <sub>03</sub>	79,81	-	67,49	-	71,25	-
Z <sub>012</sub>	11,60	-	11,90	-	12,58	-
Z <sub>013</sub>	-66,80	-	-67,78	-	-71,60	-
Z <sub>023</sub>	4,32	-	4,31	-	4,34	-
Error	ECM = 1,13 %		ECM = 1,17 %		ECM = 1,35 %	

Tabla C.21. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #2 (Hipótesis: impedancias reales).

### C.3.3. Parámetros de los circuitos equivalentes del transformador #3

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	1,55	-86,9	Z' <sub>01</sub>	1,60	-86,4	Z'' <sub>01</sub>	0,53	-108,1
Z <sub>02</sub>	15,73	88,6	Z' <sub>02</sub>	15,65	88,7	Z'' <sub>02</sub>	14,67	87,2
Z <sub>03</sub>	23,04	89,9	Z' <sub>03</sub>	18,48	87,7	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	89,39	78,9	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	89,07	78,9
Error	ECM = 1,07 %		Error	ECM = 0,22 %		Error	ECM = 0,64 %	

Tabla C.22. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	-1,54	-	Z' <sub>01</sub>	-1,59	-	Z'' <sub>01</sub>	-0,46	-
Z <sub>02</sub>	15,73	-	Z' <sub>02</sub>	15,65	-	Z'' <sub>02</sub>	14,61	-
Z <sub>03</sub>	23,12	-	Z' <sub>03</sub>	18,48	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	89,34	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	88,99	-
Error	ECM = 1,15 %		Error	ECM = 0,22 %		Error	ECM = 0,64 %	

Tabla C.23. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC central; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	2,09	85,0	Z' <sub>01</sub>	2,00	83,9	Z'' <sub>01</sub>	3,14	94,3
Z <sub>02</sub>	12,30	88,3	Z' <sub>02</sub>	12,31	88,5	Z'' <sub>02</sub>	11,27	85,8
Z <sub>03</sub>	28,25	90,5	Z' <sub>03</sub>	21,81	88,0	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	92,48	79,4	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	92,30	79,3
Error	ECM = 0,97 %		Error	ECM = 0,23 %		Error	ECM = 0,72 %	

Tabla C.24. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	2,09	-	Z' <sub>01</sub>	2,00	-	Z'' <sub>01</sub>	3,11	-
Z <sub>02</sub>	12,30	-	Z' <sub>02</sub>	12,31	-	Z'' <sub>02</sub>	11,28	-
Z <sub>03</sub>	28,37	-	Z' <sub>03</sub>	21,81	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	92,42	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	92,23	-
Error	ECM = 1,01 %		Error	ECM = 0,23 %		Error	ECM = 0,72 %	

Tabla C.25. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC mínima; Impedancias reales).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	3,18	-89,0	Z' <sub>01</sub>	3,20	-88,8	Z'' <sub>01</sub>	2,08	-91,5
Z <sub>02</sub>	18,27	88,6	Z' <sub>02</sub>	18,12	88,7	Z'' <sub>02</sub>	17,12	87,9
Z <sub>03</sub>	19,43	89,4	Z' <sub>03</sub>	16,02	87,5	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	87,12	78,5	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	86,66	78,5
Error	ECM = 1,22 %		Error	ECM = 0,19 %		Error	ECM = 0,65 %	

Tabla C.26. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias complejas).

Parámetros de los circuitos equivalentes en T a secuencia homopolar (modelos A y B)								
Modelo A			Modelo B1			Modelo B2		
Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Imped.	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	-3,17	-	Z' <sub>01</sub>	-3,19	-	Z'' <sub>01</sub>	-1,96	-
Z <sub>02</sub>	18,28	-	Z' <sub>02</sub>	18,12	-	Z'' <sub>02</sub>	17,01	-
Z <sub>03</sub>	19,48	-	Z' <sub>03</sub>	16,02	-	-	-	-
Z <sub>0M</sub>	87,08	-	-	-	-	Z'' <sub>0M</sub>	86,59	-
Error	ECM = 1,33 %		Error	ECM = 0,19 %		Error	ECM = 0,65 %	

Tabla C.27. Impedancias homopolares de los circuitos equivalentes en T (modelos A y B) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: Posición CTC máxima; Impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	92,86	79,4	88,96	78,9	86,04	78,4
Z <sub>01</sub>	2,69	86,8	1,96	-85,1	3,67	-87,9
Z <sub>02</sub>	11,82	88,2	16,03	88,8	18,51	88,7
Z <sub>03</sub>	29,04	90,8	22,74	89,7	18,77	88,9
Error	ECM = 2,39 %		ECM = 0,64 %		ECM = 1,87 %	

Tabla C.28. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de cuatro impedancias a secuencia homopolar (Modelo C)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>00</sub>	92,80	-	88,90	-	85,98	-
Z <sub>01</sub>	2,70	-	-1,96	-	-3,67	-
Z <sub>02</sub>	11,82	-	16,05	-	18,53	-
Z <sub>03</sub>	29,18	-	22,81	-	18,81	-
Error	ECM = 2,45 %		ECM = 0,60 %		ECM = 1,80 %	

Tabla C.29. Impedancias homopolares del circuito equivalente de cuatro impedancias (modelo C) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: impedancias reales).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	1598,13	77,3	697,62	58,5	322,75	70,2
Z <sub>02</sub>	410,00	78,7	593,70	93,7	1271,81	95,3
Z <sub>03</sub>	108,86	78,2	103,78	77,8	112,69	78,7
Z <sub>012</sub>	15,40	87,6	12,63	87,6	11,27	86,8
Z <sub>013</sub>	27,26	87,8	15,09	87,1	10,19	86,1
Z <sub>023</sub>	350,04	97,8	107,99	-93,6	52,37	-95,9
Error	ECM = 1,18 %		ECM = 1,30 %		ECM = 1,01 %	

Tabla C.30. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: impedancias complejas).

Parámetros del circuito equivalente de seis impedancias a secuencia homopolar (modelo D)						
Imped.	Posición CTC mínima		Posición CTC central		Posición CTC máxima	
	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)	Z <sub>0</sub> (%)	Φ <sub>0</sub> (°)
Z <sub>01</sub>	1661,55	-	834,42	-	351,30	-
Z <sub>02</sub>	414,66	-	579,08	-	1148,87	-
Z <sub>03</sub>	107,55	-	102,77	-	110,97	-
Z <sub>012</sub>	15,41	-	12,64	-	11,28	-
Z <sub>013</sub>	27,28	-	15,09	-	10,19	-
Z <sub>023</sub>	350,10	-	-107,95	-	-52,35	-
<b>Error</b>	ECM = 1,13 %		ECM = 1,26 %		ECM = 0,98 %	

Tabla C.31. Impedancias homopolares del circuito equivalente de seis impedancias (modelo D) calculadas para el transformador #3 (Hipótesis: impedancias reales).

#### C.4. Capacidad de los circuitos equivalentes de los modelos propuestos para representar el comportamiento homopolar de los transformadores estrella-estrella

En este apartado se exponen los resultados detallados para cada uno de los transformadores y configuraciones de ensayo, la capacidad de los modelos de circuito equivalente analizados para predecir con precisión las impedancias homopolares así como las corrientes circulantes en cada uno de los arrollamientos del transformador.

Para ello, se compararán los resultados que arrojan los modelos con las medidas obtenidas en campo durante los ensayos realizados.

Para facilitar la interpretación de los resultados de estas tablas, se han sombreado en verde las celdas en las que dicho error relativo es inferior al 5 %. Asimismo, se han sombreado en amarillo las celdas en las que el error es superior al 5% e inferior al 15 % y en rojo las celdas en las que el error es superior al 15 %.

Al igual que se realizó en el apartado C.3 anterior, se muestran los resultados tanto para los circuitos equivalentes cuyos parámetros han sido calculados considerando impedancias homopolares complejas como para los circuitos equivalentes cuyos parámetros han sido calculados considerando impedancias homopolares como reactancias puras.

Los resultados presentados son los correspondientes a la toma central del cambiador de tomas en carga ya que, como se pudo comprobar en el apartado anterior, no existen diferencias significativas entre los resultados de la toma central y los resultados de las tomas extrema.

C.4.1. Precisión en la predicción de las impedancias homopolares

Ensayo	Modelo	Transformador #1		Transformador #2		Transformador #3	
		Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)	Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)	Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)
A0A	<b>Medida</b>	<b>80,14</b>	-	<b>135,29</b>	-	<b>87,98</b>	-
	Modelo A	88,31	10,20	146,22	8,08	87,89	0,10
	Modelo B	78,92	1,53	136,66	1,01	88,54	0,64
	Modelo C	77,99	2,68	132,37	2,16	88,96	1,11
	Modelo D	79,48	0,82	137,20	1,41	89,05	1,22
A0C	<b>Medida</b>	<b>15,76</b>	-	<b>19,41</b>	-	<b>16,85</b>	-
	Modelo A	15,70	0,39	19,47	0,31	16,83	0,11
	Modelo B	15,78	0,12	19,41	0,02	16,89	0,23
	Modelo C	15,77	0,07	19,00	2,13	16,89	0,25
	Modelo D	15,30	2,90	19,21	1,03	16,91	0,35
A1A	<b>Medida</b>	<b>9,43</b>	-	<b>13,63</b>	-	<b>12,17</b>	-
	Modelo A	9,86	4,54	13,94	2,30	11,86	2,55
	Modelo B	9,58	1,55	13,49	1,02	12,10	0,59
	Modelo C	9,49	0,59	13,20	3,15	12,18	0,05
	Modelo D	9,36	0,71	13,48	1,13	12,39	1,79
A1C	<b>Medida</b>	<b>9,35</b>	-	<b>13,45</b>	-	<b>6,90</b>	-
	Modelo A	9,85	5,38	13,91	3,43	6,93	0,46
	Modelo B	9,34	0,15	13,44	0,06	6,88	0,25
	Modelo C	9,28	0,75	12,97	3,60	6,88	0,23
	Modelo D	9,52	1,77	13,35	0,72	6,82	1,21
B0A	<b>Medida</b>	<b>86,09</b>	-	<b>142,30</b>	-	<b>104,27</b>	-
	Modelo A	78,34	9,01	131,51	7,58	104,93	0,63
	Modelo B	87,37	1,49	140,82	1,04	103,61	0,64
	Modelo C	88,39	2,67	146,90	3,23	102,89	1,32
	Modelo D	86,74	0,76	140,43	1,31	102,25	1,94
B0C	<b>Medida</b>	<b>5,58</b>	-	<b>4,68</b>	-	<b>34,20</b>	-
	Modelo A	5,44	2,55	4,62	1,26	34,10	0,29
	Modelo B	5,57	0,26	4,67	0,15	34,13	0,21
	Modelo C	5,59	0,23	4,72	0,79	34,11	0,25
	Modelo D	5,41	2,96	4,74	1,23	34,65	1,31
B1A	<b>Medida</b>	<b>10,76</b>	-	<b>13,76</b>	-	<b>14,06</b>	-
	Modelo A	8,74	18,73	12,54	8,86	14,16	0,71
	Modelo B	10,60	1,47	13,90	1,03	14,16	0,69
	Modelo C	10,75	0,09	14,65	6,47	14,08	0,16
	Modelo D	10,22	5,03	13,79	0,24	14,22	1,16
B1C	<b>Medida</b>	<b>3,29</b>	-	<b>3,24</b>	-	<b>13,88</b>	-
	Modelo A	3,41	3,74	3,30	1,90	14,05	1,19
	Modelo B	3,29	0,08	3,24	0,10	13,91	0,20
	Modelo C	3,29	0,03	3,22	0,63	13,90	0,16
	Modelo D	3,37	2,34	3,29	1,64	13,97	0,63

Tabla C.32. Comparación de la predicción de impedancias de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias complejas)

Ensayo	Modelo	Transformador #1		Transformador #2		Transformador #3	
		Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)	Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)	Z <sub>0</sub> (%)	Error (%)
A0A	<b>Medida</b>	<b>80,14</b>	-	<b>135,29</b>	-	<b>87,98</b>	-
	Modelo A	88,46	10,38	146,26	8,11	87,80	0,20
	Modelo B	78,92	1,52	136,66	1,01	88,53	0,63
	Modelo C	77,95	2,73	132,32	2,20	88,90	1,05
	Modelo D	77,25	3,60	136,85	1,15	89,01	1,17
A0C	<b>Medida</b>	<b>15,76</b>	-	<b>19,41</b>	-	<b>16,85</b>	-
	Modelo A	15,71	0,29	19,45	0,20	16,83	0,14
	Modelo B	15,78	0,13	19,41	0,00	16,89	0,24
	Modelo C	15,70	0,38	18,98	2,21	16,89	0,23
	Modelo D	16,36	3,80	19,34	0,34	16,91	0,35
A1A	<b>Medida</b>	<b>9,43</b>	-	<b>13,63</b>	-	<b>12,17</b>	-
	Modelo A	9,88	4,77	13,94	2,26	11,84	2,75
	Modelo B	9,57	1,49	13,49	1,03	12,09	0,66
	Modelo C	9,48	0,51	13,21	3,11	12,16	0,06
	Modelo D	9,62	2,02	13,52	0,84	12,38	1,72
A1C	<b>Medida</b>	<b>9,35</b>	-	<b>13,45</b>	-	<b>6,90</b>	-
	Modelo A	9,87	5,59	13,90	3,32	6,93	0,48
	Modelo B	9,34	0,12	13,44	0,07	6,88	0,23
	Modelo C	9,25	1,08	12,95	3,74	6,88	0,24
	Modelo D	9,28	0,76	13,35	0,77	6,82	1,13
B0A	<b>Medida</b>	<b>86,09</b>	-	<b>142,30</b>	-	<b>104,27</b>	-
	Modelo A	78,18	9,19	131,42	7,65	105,07	0,77
	Modelo B	87,37	1,49	140,82	1,04	103,60	0,64
	Modelo C	88,74	3,08	146,99	3,30	102,99	1,23
	Modelo D	88,26	2,52	140,65	1,16	102,28	1,90
B0C	<b>Medida</b>	<b>5,58</b>	-	<b>4,68</b>	-	<b>34,20</b>	-
	Modelo A	5,43	2,62	4,61	1,53	34,10	0,30
	Modelo B	5,57	0,18	4,67	0,21	34,13	0,20
	Modelo C	5,59	0,19	4,72	0,83	34,12	0,24
	Modelo D	5,73	2,73	4,77	1,90	34,63	1,26
B1A	<b>Medida</b>	<b>10,76</b>	-	<b>13,76</b>	-	<b>14,06</b>	-
	Modelo A	8,73	18,85	12,52	8,98	14,16	0,73
	Modelo B	10,60	1,53	13,90	1,02	14,15	0,62
	Modelo C	10,79	0,28	14,67	6,61	14,09	0,21
	Modelo D	10,99	2,14	13,89	0,95	14,23	1,18
B1C	<b>Medida</b>	<b>3,29</b>	-	<b>3,24</b>	-	<b>13,88</b>	-
	Modelo A	3,41	3,77	3,29	1,63	14,05	1,22
	Modelo B	3,30	0,19	3,23	0,19	13,91	0,22
	Modelo C	3,29	0,11	3,22	0,66	13,91	0,19
	Modelo D	3,25	1,17	3,29	1,55	13,97	0,66

Tabla C.33. Comparación de la predicción de impedancias de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias reales)

**C.4.2. Precisión en la predicción de las corrientes circulantes por los arrollamientos**

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>1,581</b>	-	-	-	<b>1,243</b>	-
	Modelo A	1,587	0,43	-	-	1,475	18,65
	Modelo B	1,579	0,09	-	-	1,579	27,02
	Modelo C	1,580	0,03	-	-	1,271	2,24
	Modelo D	1,628	3,02	-	-	1,308	5,20
A1A	<b>Medida</b>	<b>1,590</b>	-	<b>1,386</b>	-	-	-
	Modelo A	1,521	4,37	1,524	9,96	-	-
	Modelo B	1,565	1,55	1,398	0,86	-	-
	Modelo C	1,580	0,62	1,394	0,59	-	-
	Modelo D	1,601	0,69	1,443	4,11	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>1,555</b>	-	<b>1,659</b>	-	<b>0,387</b>	-
	Modelo A	1,476	5,08	1,531	7,70	0,058	85,01
	Modelo B	1,557	0,18	1,676	1,07	0,132	66,01
	Modelo C	1,567	0,78	1,688	1,78	0,32	17,31
	Modelo D	1,528	1,71	1,607	3,13	0,370	4,35
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>0,599</b>	-	<b>0,545</b>	-
	Modelo A	-	-	0,616	2,79	0,572	5,04
	Modelo B	-	-	0,602	0,43	0,602	10,44
	Modelo C	-	-	0,599	0,06	0,552	1,59
	Modelo D	-	-	0,619	3,22	0,555	1,79
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,503</b>	-	<b>0,507</b>	-	-	-
	Modelo A	0,554	10,27	0,623	23,00	-	-
	Modelo B	0,508	1,15	0,514	1,45	-	-
	Modelo C	0,507	0,88	0,507	0,05	-	-
	Modelo D	0,525	4,41	0,533	5,26	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,225</b>	-	<b>0,587</b>	-	<b>0,360</b>	-
	Modelo A	0,203	9,70	0,565	3,63	0,337	6,32
	Modelo B	0,222	1,11	0,586	0,11	0,364	1,07
	Modelo C	0,224	0,42	0,586	0,05	0,363	0,77
	Modelo D	0,213	5,22	0,573	2,30	0,343	4,72

**Tabla C.34. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #1 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias complejas)**

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>1,581</b>	-	-	-	<b>1,243</b>	-
	Modelo A	1,586	0,33	-	-	1,472	18,39
	Modelo B	1,579	0,09	-	-	1,579	27,02
	Modelo C	1,587	0,42	-	-	1,268	1,95
	Modelo D	1,523	3,62	-	-	1,232	0,91
A1A	<b>Medida</b>	<b>1,590</b>	-	<b>1,386</b>	-	-	-
	Modelo A	1,517	4,58	1,521	9,74	-	-
	Modelo B	1,566	1,49	1,395	0,67	-	-
	Modelo C	1,582	0,53	1,389	0,23	-	-
	Modelo D	1,558	2,01	1,364	1,60	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>1,555</b>	-	<b>1,659</b>	-	<b>0,387</b>	-
	Modelo A	1,473	5,27	1,527	7,93	0,050	87,00
	Modelo B	1,557	0,15	1,674	0,96	0,117	69,66
	Modelo C	1,572	1,11	1,689	1,82	0,303	21,67
	Modelo D	1,567	0,79	1,741	4,99	0,372	3,84
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>0,599</b>	-	<b>0,545</b>	-
	Modelo A	-	-	0,617	2,86	0,572	4,99
	Modelo B	-	-	0,601	0,35	0,601	10,36
	Modelo C	-	-	0,599	0,02	0,553	1,48
	Modelo D	-	-	0,584	2,49	0,550	0,95
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,503</b>	-	<b>0,507</b>	-	-	-
	Modelo A	0,553	10,06	0,624	23,19	-	-
	Modelo B	0,507	0,96	0,514	1,52	-	-
	Modelo C	0,505	0,52	0,505	0,31	-	-
	Modelo D	0,496	1,31	0,496	2,14	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,225</b>	-	<b>0,587</b>	-	<b>0,360</b>	-
	Modelo A	0,203	9,92	0,565	3,65	0,337	6,45
	Modelo B	0,222	1,22	0,586	0,21	0,363	0,96
	Modelo C	0,224	0,38	0,586	0,13	0,362	0,57
	Modelo D	0,231	2,73	0,594	1,16	0,372	3,35

Tabla C.35. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #1 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias reales)

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>0,699</b>	-	-	-	<b>0,695</b>	-
	Modelo A	0,697	0,31	-	-	0,670	3,59
	Modelo B	0,699	0,03	-	-	0,699	0,59
	Modelo C	0,714	2,18	-	-	0,613	11,86
	Modelo D	0,706	1,05	-	-	0,672	3,31
A1A	<b>Medida</b>	<b>1,258</b>	-	<b>1,223</b>	-	-	-
	Modelo A	1,230	2,26	1,234	0,91	-	-
	Modelo B	1,271	1,01	1,189	2,74	-	-
	Modelo C	1,299	3,23	1,171	4,27	-	-
	Modelo D	1,273	1,12	1,195	2,29	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>0,821</b>	-	<b>0,931</b>	-	<b>0,164</b>	-
	Modelo A	0,794	3,35	0,870	6,50	0,084	48,70
	Modelo B	0,821	0,04	0,928	0,31	0,118	28,28
	Modelo C	0,851	3,71	0,963	3,46	0,204	24,47
	Modelo D	0,827	0,70	0,920	1,17	0,164	0,14
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>1,171</b>	-	<b>1,160</b>	-
	Modelo A	-	-	1,186	1,30	1,140	1,65
	Modelo B	-	-	1,173	0,17	1,173	1,13
	Modelo C	-	-	1,162	0,77	1,115	3,83
	Modelo D	-	-	1,157	1,19	1,180	1,73
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,766</b>	-	<b>0,839</b>	-	-	-
	Modelo A	0,830	8,43	0,920	9,69	-	-
	Modelo B	0,800	4,51	0,830	1,05	-	-
	Modelo C	0,788	2,86	0,788	6,11	-	-
	Modelo D	0,804	4,99	0,837	0,28	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,322</b>	-	<b>1,218</b>	-	<b>0,893</b>	-
	Modelo A	0,311	3,65	1,193	2,05	0,849	4,84
	Modelo B	0,331	2,73	1,217	0,08	0,886	0,69
	Modelo C	0,344	6,61	1,224	0,45	0,880	1,37
	Modelo D	0,328	1,84	1,196	1,80	0,908	1,72

Tabla C.36. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #2 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias complejas)

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>0,699</b>	-	-	-	<b>0,695</b>	-
	Modelo A	0,698	0,193	-	-	0,671	3,483
	Modelo B	0,699	0,003	-	-	0,699	0,564
	Modelo C	0,715	2,262	-	-	0,612	11,915
	Modelo D	0,701	0,341	-	-	0,670	3,584
A1A	<b>Medida</b>	<b>1,258</b>	-	<b>1,223</b>	-	-	-
	Modelo A	1,230	2,231	1,235	0,959	-	-
	Modelo B	1,271	1,024	1,189	2,769	-	-
	Modelo C	1,299	3,193	1,169	4,403	-	-
	Modelo D	1,269	0,829	1,188	2,836	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>0,821</b>	-	<b>0,931</b>	-	<b>0,164</b>	-
	Modelo A	0,794	3,236	0,872	6,322	0,075	54,564
	Modelo B	0,821	0,045	0,929	0,236	0,107	34,657
	Modelo C	0,853	3,861	0,964	3,593	0,195	18,779
	Modelo D	0,827	0,750	0,928	0,340	0,163	0,804
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>1,171</b>	-	<b>1,160</b>	-
	Modelo A	-	-	1,189	1,576	1,144	1,383
	Modelo B	-	-	1,173	0,232	1,173	1,194
	Modelo C	-	-	1,161	0,803	1,114	3,890
	Modelo D	-	-	1,149	1,844	1,181	1,827
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,766</b>	-	<b>0,839</b>	-	-	-
	Modelo A	0,831	8,483	0,921	9,827	-	-
	Modelo B	0,800	4,477	0,830	1,043	-	-
	Modelo C	0,787	2,721	0,787	6,237	-	-
	Modelo D	0,800	4,406	0,831	0,981	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,322</b>	-	<b>1,218</b>	-	<b>0,893</b>	-
	Modelo A	0,311	3,467	1,197	1,779	0,851	4,603
	Modelo B	0,331	2,804	1,218	0,011	0,887	0,619
	Modelo C	0,344	6,749	1,224	0,483	0,880	1,400
	Modelo D	0,331	2,696	1,198	1,703	0,914	2,426

Tabla C.37. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #2 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias reales)

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>0,265</b>	-	-	-	<b>0,257</b>	-
	Modelo A	0,265	0,109	-	-	0,211	17,776
	Modelo B	0,264	0,235	-	-	0,264	2,753
	Modelo C	0,264	0,257	-	-	0,215	16,523
	Modelo D	0,264	0,352	-	-	0,250	2,765
A1A	<b>Medida</b>	<b>0,896</b>	-	<b>0,782</b>	-	-	-
	Modelo A	0,919	2,587	0,783	0,160	-	-
	Modelo B	0,901	0,565	0,775	0,916	-	-
	Modelo C	0,895	0,078	0,774	0,986	-	-
	Modelo D	0,880	1,788	0,762	2,257	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>0,897</b>	-	<b>0,487</b>	-	<b>0,396</b>	-
	Modelo A	0,893	0,425	0,481	1,169	0,328	17,075
	Modelo B	0,899	0,288	0,487	0,038	0,412	4,117
	Modelo C	0,899	0,264	0,487	0,046	0,343	13,326
	Modelo D	0,908	1,260	0,490	0,068	0,410	3,561
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>0,359</b>	-	<b>0,324</b>	-
	Modelo A	-	-	0,360	0,269	0,287	11,433
	Modelo B	-	-	0,359	0,191	0,359	10,976
	Modelo C	-	-	0,359	0,233	0,286	11,694
	Modelo D	-	-	0,354	1,309	0,325	0,402
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,366</b>	-	<b>0,375</b>	-	-	-
	Modelo A	0,379	3,681	0,373	0,618	-	-
	Modelo B	0,375	2,567	0,373	0,597	-	-
	Modelo C	0,375	2,495	0,375	0,076	-	-
	Modelo D	0,369	0,971	0,371	1,066	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,502</b>	-	<b>0,470</b>	-	<b>0,061</b>	-
	Modelo A	0,507	1,048	0,464	1,182	0,034	44,295
	Modelo B	0,513	2,283	0,469	0,208	0,044	27,433
	Modelo C	0,513	2,290	0,469	0,168	0,044	27,753
	Modelo D	0,516	2,937	0,467	0,633	0,060	1,346

Tabla C.38. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #3 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias complejas)

Ensayo	Modelo	Corriente arrollamiento primario		Corriente arrollamiento secundario		Corriente arrollamiento estabilización	
		I <sub>1</sub> (%)	Error (%)	I <sub>2</sub> (%)	Error (%)	I <sub>3</sub> (%)	Error (%)
A0C	<b>Medida</b>	<b>0,265</b>	-	-	-	<b>0,257</b>	-
	Modelo A	0,265	0,135	-	-	0,211	18,069
	Modelo B	0,264	0,240	-	-	0,264	2,748
	Modelo C	0,264	0,234	-	-	0,214	16,767
	Modelo D	0,264	0,357	-	-	0,250	2,765
A1A	<b>Medida</b>	<b>0,896</b>	-	<b>0,782</b>	-	-	-
	Modelo A	0,921	2,801	0,783	0,180	-	-
	Modelo B	0,902	0,637	0,774	0,927	-	-
	Modelo C	0,896	0,035	0,774	1,036	-	-
	Modelo D	0,880	1,723	0,762	2,510	-	-
A1C	<b>Medida</b>	<b>0,897</b>	-	<b>0,487</b>	-	<b>0,396</b>	-
	Modelo A	0,893	0,444	0,481	1,207	0,327	17,394
	Modelo B	0,899	0,271	0,487	0,017	0,412	4,096
	Modelo C	0,899	0,278	0,487	0,038	0,343	13,491
	Modelo D	0,907	1,178	0,490	0,599	0,410	3,561
B0C	<b>Medida</b>	-	-	<b>0,359</b>	-	<b>0,324</b>	-
	Modelo A	-	-	0,360	0,285	0,286	11,757
	Modelo B	-	-	0,359	0,188	0,359	10,972
	Modelo C	-	-	0,359	0,219	0,285	12,065
	Modelo D	-	-	0,354	1,257	0,325	0,381
B1A	<b>Medida</b>	<b>0,366</b>	-	<b>0,375</b>	-	-	-
	Modelo A	0,379	3,702	0,373	0,642	-	-
	Modelo B	0,375	2,555	0,373	0,534	-	-
	Modelo C	0,375	2,442	0,375	0,127	-	-
	Modelo D	0,369	0,916	0,371	1,086	-	-
B1C	<b>Medida</b>	<b>0,502</b>	-	<b>0,470</b>	-	<b>0,061</b>	-
	Modelo A	0,507	1,009	0,464	1,209	0,034	44,867
	Modelo B	0,513	2,261	0,469	0,224	0,044	27,901
	Modelo C	0,513	2,283	0,469	0,191	0,044	27,980
	Modelo D	0,516	2,856	0,467	0,656	0,060	1,310

Tabla C.39. Comparación de la predicción de intensidades circulantes por cada arrollamiento del transformador #3 de los modelos de circuito equivalente en cada una de las configuraciones de ensayo (Hipótesis: impedancias reales)



## Apéndice D

# Análisis cualitativo de las trayectorias de flujo homopolar de los transformadores estrella-estrella

Como complemento de las medidas experimentales obtenidas sobre el balance de amperios-vuelta de tres transformadores objeto de estudio, uno por cada una de las tipologías constructivas, en este apéndice se va a efectuar un análisis cualitativo de las trayectorias de flujo homopolar.

El objetivo de ello es contrastar ambos análisis identificando los transformadores y las configuraciones de funcionamiento de los mismos más susceptibles de generar un riesgo de calentamiento de la cuba.

La metodología empleada para el análisis de las trayectorias de flujo homopolar se basa en la evaluación de las distintas configuraciones de funcionamiento del transformador (representadas por los distintos ensayos de alimentación homopolar realizados) a partir del circuito magnético del transformador. El circuito eléctrico equivalente dual al circuito magnético del transformador está basado en las indicaciones de representación indicadas en el artículo [69], elaborado en el marco del *IEEE PES Task Force on Data for Modeling System Transients* constituido dentro del *IEEE PES Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation*.

### D.1. Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #1

Los transformadores de tipología constructiva #1 disponen el arrollamiento de estabilización de forma interna y no disponen de pantallas magnéticas adosadas en la cuba para el control del flujo magnético. La ausencia de las pantallas magnéticas podrá suponer una circulación relevante de flujo homopolar a lo largo de toda la longitud de las paredes de la cuba.

En la figura D.1, se representa el circuito magnético equivalente para el caso de un transformador de tipología constructiva #1. Los amperios-vuelta creados por los arrollamientos primario, secundario y de estabilización se representan por sendas fuentes de tensión.

Las reluctancias de trayectos a través de hierro se muestran como rectángulos negros:  $R_n$  para las columnas del núcleo magnético,  $R_{ns}$  y  $R_{ni}$  para las culatas superior e inferior del núcleo magnético y  $R_{cuba}$  para el trayecto a través de las paredes de la cuba. En este último caso, dado el carácter resistivo de las corrientes de Foucault por la cuba, el flujo creado por estas corrientes está decalado 90° respecto al creado por los arrollamientos, por lo que se representa como una impedancia compleja.

Por su parte, los trayectos a través de elementos no ferromagnéticos determinan reluctancias que se representan como rectángulos blancos:  $R_1$  para el camino entre las columnas del núcleo magnético y el arrollamiento más cercano (en este caso, el arrollamiento de estabilización),  $R_2$  para el camino entre el arrollamiento más cercano y el intermedio (en este caso, el arrollamiento secundario),  $R_3$  para el camino entre el arrollamiento intermedio y el más externo (en este caso, el arrollamiento primario) y  $R_4$  para el camino entre el arrollamiento más externo y las paredes laterales de la cuba. Para el caso de los trayectos horizontales del flujo magnético, se disponen las reluctancias  $R_{5s}$  y  $R_{5i}$ , respectivamente en paralelo a  $R_{ns}$  y  $R_{ni}$ .

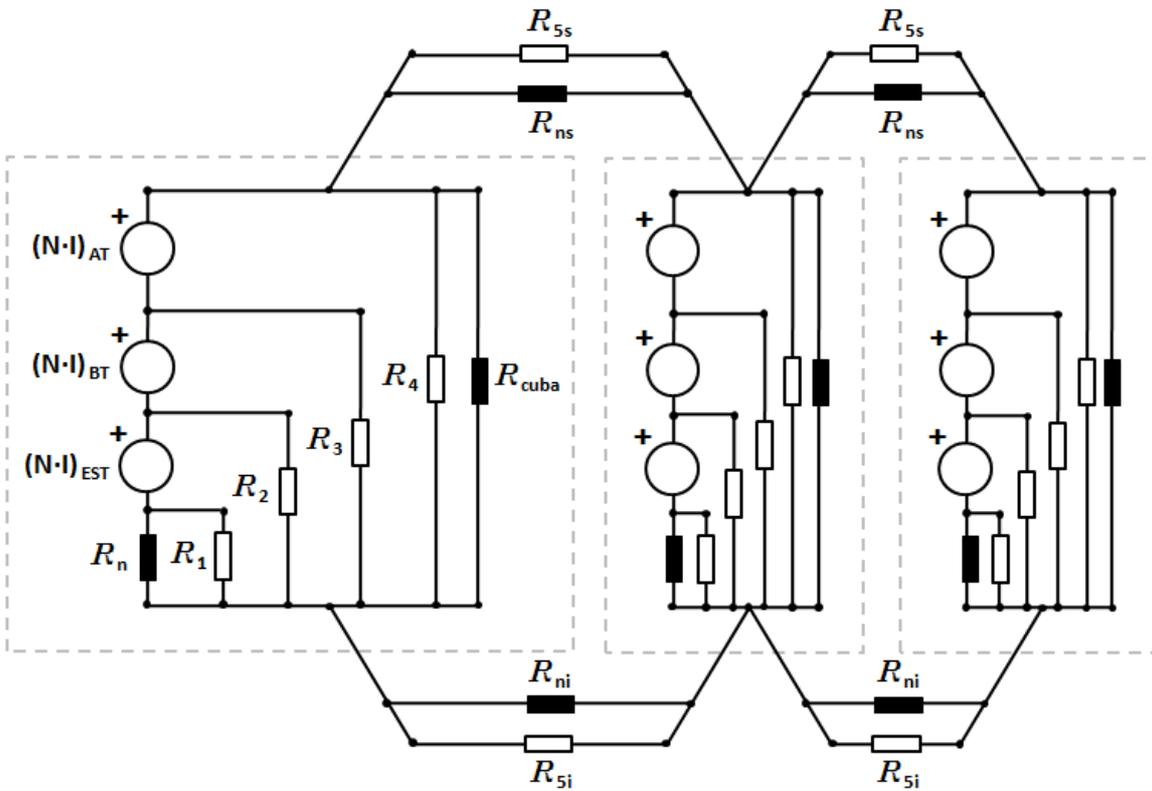


Figura D.1. Circuito magnético para un transformador de tipología constructiva #1.

A continuación se presenta el análisis de cada una de las configuraciones de funcionamiento del transformador. Para cada una de ellas se realizará una representación cualitativa aproximada de las trayectorias del flujo homopolar<sup>91</sup>. Asimismo, se presentará el circuito magnético que representa dicha configuración, simplificando el análisis a una de las fases. Todo ello se comparará con el balance de amperios-vuelta obtenido en esa configuración según lo indicado en la tabla 6.1 del capítulo 6.

<sup>91</sup> Se representarán en naranja los arrollamientos energizados, en gris los arrollamientos cortocircuitados y en blanco los arrollamientos por los que no circula ninguna corriente. Las trayectorias del flujo homopolar se representarán en líneas azules.

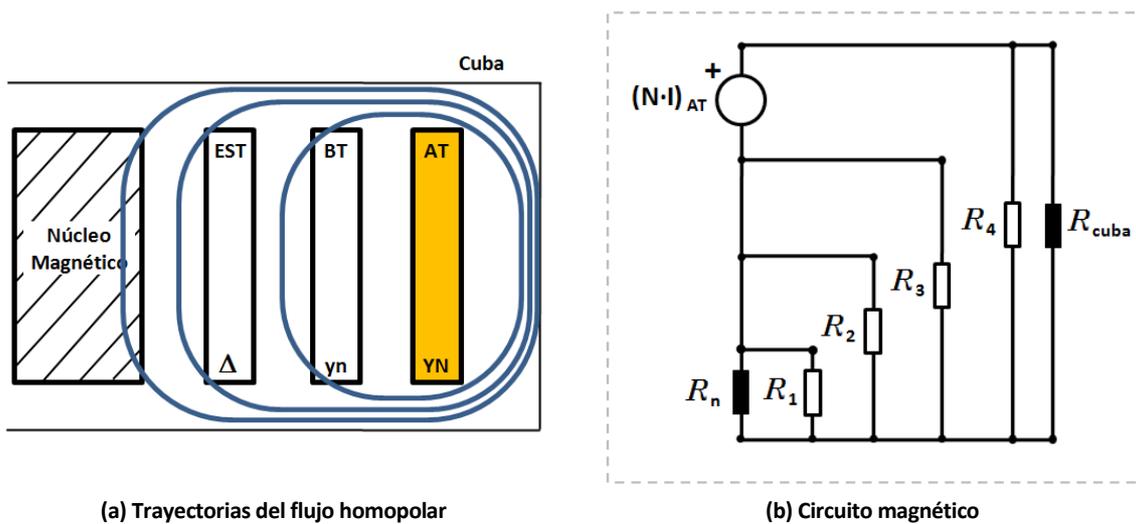
### D.1.1. Configuración de funcionamiento A0A

Durante el funcionamiento en una configuración A0A todos los amperios-vuelta homopolares creados por el arrollamiento primario han de ser compensados por las corrientes circulantes por la cuba, con la salvedad de la fuerza magnetomotriz necesaria para establecer el flujo.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0A	100	-	-	100

Tabla D.1. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo A0A.

Como se observa en la figura D.2, la reluctancia que cabe esperar entre el arrollamiento primario y el núcleo magnético ( $R_n / R_1 / R_2 / R_3$ ) es muy inferior a la que habrá entre el arrollamiento energizado y la cuba ( $R_4 / R_{cuba}$ ). La fuerza magnetomotriz necesaria para crear el flujo será reducida y por tanto, dentro del desbalance de amperios-vuelta la mayor parte se deberá a la circulación de corriente por la cuba con el consiguiente riesgo de calentamiento de la misma.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.2. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo A0A.

### D.1.2. Configuración de funcionamiento A0C

Partiendo de la configuración anterior, en caso de cerrar el arrollamiento de estabilización se engendran en él unas corrientes que apantallan el núcleo magnético casi en su totalidad, tal y como se observa en la figura D.3 (a). Así pues, el flujo que concatena al arrollamiento primario tiene su camino de ida en el canal formado entre dicho arrollamiento y el arrollamiento de estabilización ( $R_2 / R_3$ ) y su camino de retorno por el espacio comprendido entre el arrollamiento primario y la cuba, así como por la propia cuba ( $R_4 / R_{cuba}$ ).

El flujo externo al arrollamiento energizado tiene una parte muy relevante de su circulación a través de las paredes de la cuba, engendrando en ellas unas corrientes elevadas, provocando con ello un desbalance de amperios-vuelta significativo. Esta situación queda refrendada en los ensayos realizados, donde se obtuvo un desbalance del 21,8 % en la configuración de ensayo A0C, tal y como se observa en la tabla D.2.

Del circuito magnético equivalente de este ensayo, representado en la figura D.3 (b), se puede obtener una aproximación al valor de los amperios-vuelta creados por el arrollamiento de estabilización como:

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{(R_2 // R_3)}{(R_2 // R_3) + (R_4 // R_{cuba})} \tag{D.1}$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0C	100	-	78,7	21,8

Tabla D.2. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo A0C.

Esta circulación relevante de corrientes por la cuba nos muestra un posible riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores con el arrollamiento de estabilización cerrado en caso de funcionamiento con desequilibrios importantes en el lado primario, estando el neutro primario puesto a tierra y el neutro secundario aislado. Esto contrasta con la creencia habitualmente aceptada de que un arrollamiento de estabilización elimina, o al menos minimiza, problemas derivados de funcionamiento con intensidades desequilibradas.

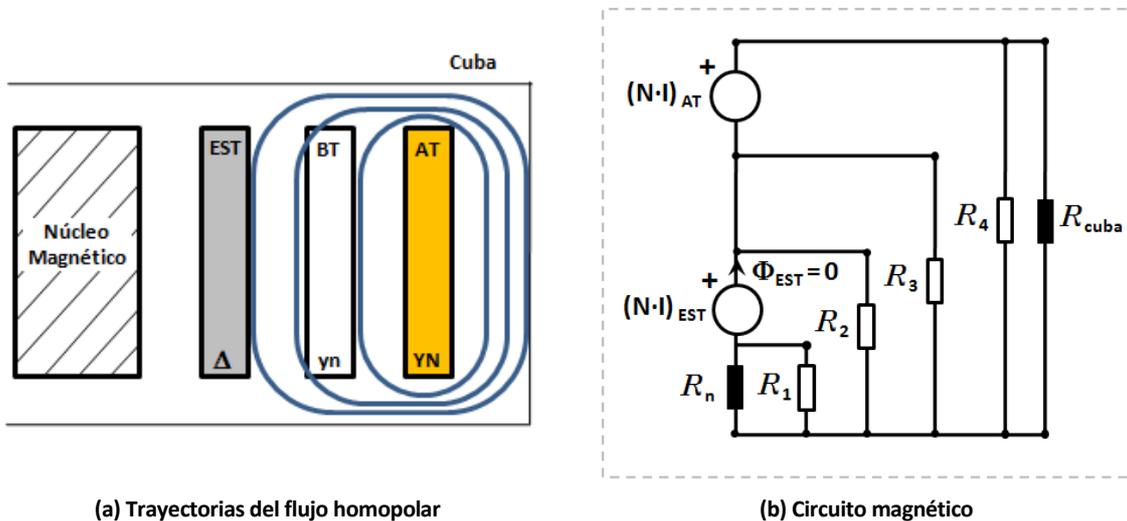


Figura D.3. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo A0C.

### D.1.3. Configuración de funcionamiento A1A

La configuración A1A es muy semejante a la configuración A0C estudiada anteriormente. En este caso, el arrollamiento secundario en cortocircuito realiza la función de apantallamiento del flujo hacia el núcleo magnético. El mayor espesor del arrollamiento secundario frente al arrollamiento de estabilización determina que el efecto de apantallamiento no sea tan efectivo, al estar cada una de las capas del arrollamiento concatenadas por un flujo diferente.

En la figura D.4 (a) se observa que, también en la configuración A1A, cabe esperar una circulación de corrientes por la cuba significativa, provocando con ello un desbalance de amperios-vuelta relevante, cuyo valor en el ensayo realizado es un 12,9 %, tal y como se observa en la tabla D.3. Este desbalance es menor al de la configuración A0C, ya que como se observa en la ecuación (D.2) en relación con la (D.1), cabe esperar una aportación de amperios-vuelta en el arrollamiento secundario en la configuración A1A mayor que la del arrollamiento de estabilización en la A0C.

$$(N \cdot I)_{BT} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_3}{R_3 + (R_4 // R_{cuba})} \quad (D.2)$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>CUBA</sub>
A1A	100	87,2	-	12,9

Tabla D.3. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo A1A.

En todo caso, al igual que en la configuración A0C, la configuración A1A nos muestra un posible riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores con el arrollamiento de estabilización abierto en caso de funcionamiento con desequilibrios importantes en el lado primario, estando ambos neutros puestos a tierra.

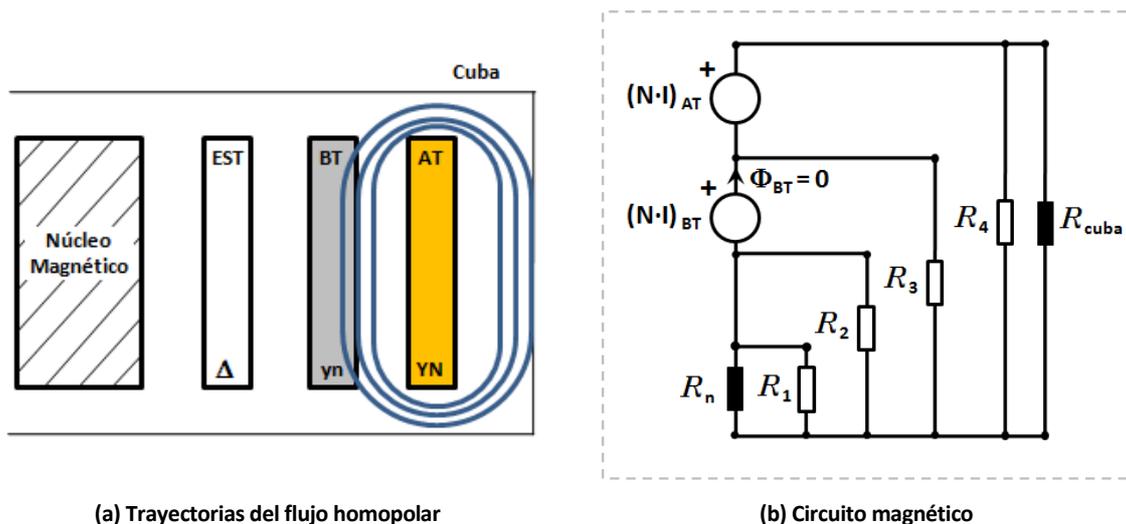


Figura D.4. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo A1A.

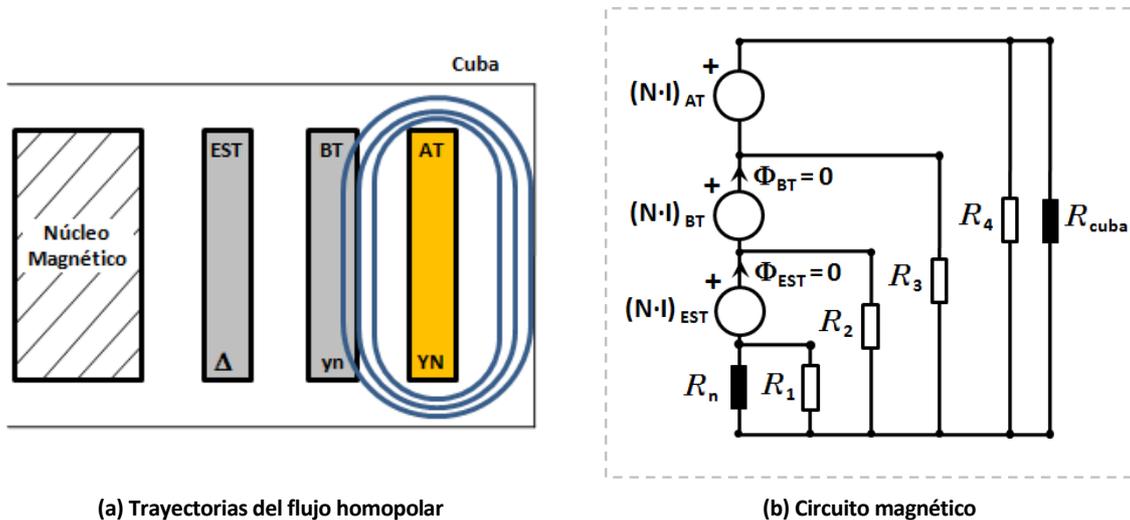
### D.1.4. Configuración de funcionamiento A1C

Esta configuración de ensayo presenta un comportamiento muy similar al caso anterior en lo que respecta a la circulación del flujo homopolar exteriormente al arrollamiento primario. En ese sentido, hay una circulación significativa de flujo por la cuba con circulación de corrientes por la misma que pueden provocar su calentamiento. Por ello, los amperios-vuelta no compensados tienen un valor del 13,1 %, según se indica en la tabla D.4.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A1C	100	113,5	25,1	13,1

Tabla D.4. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo A1C.

En este caso, el núcleo magnético se encuentra apantallado por el arrollamiento de estabilización y el arrollamiento secundario. El mayor espesor de este último, con la existencia de varios conductores distribuidos a lo ancho del espesor del arrollamiento, hace que el apantallamiento proporcionado por el arrollamiento secundario no sea tan efectivo, y en la parte interna de dicho arrollamiento penetra un flujo de sentido contrario al que se tiene entre los arrollamientos primario y secundario. Por esta razón los amperios-vuelta del arrollamiento de estabilización tienen sentido opuesto a los del arrollamiento secundario y coincidente con los del arrollamiento primario<sup>92</sup>.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.5. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo A1C.

<sup>92</sup> Este hecho tiene también un reflejo en el circuito equivalente a secuencia homopolar en el que el arrollamiento intermedio adopta una impedancia de valor negativo (tal y como se pudo observar en el capítulo 4).

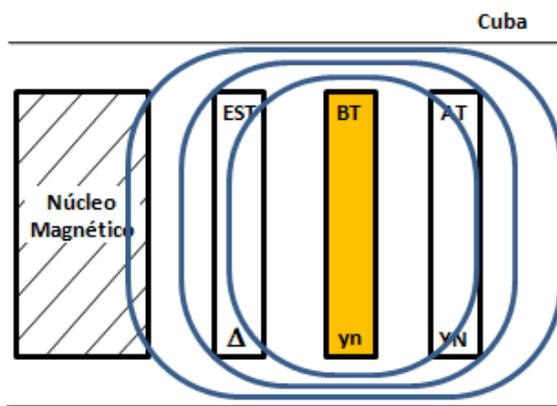
### D.1.5. Configuración de funcionamiento B0A

Durante el funcionamiento en una configuración B0A todos los amperios-vuelta homopolares creados por el arrollamiento secundario han de ser compensados por las corrientes circulantes por la cuba, con la salvedad de la fuerza magnetomotriz necesaria para establecer el flujo.

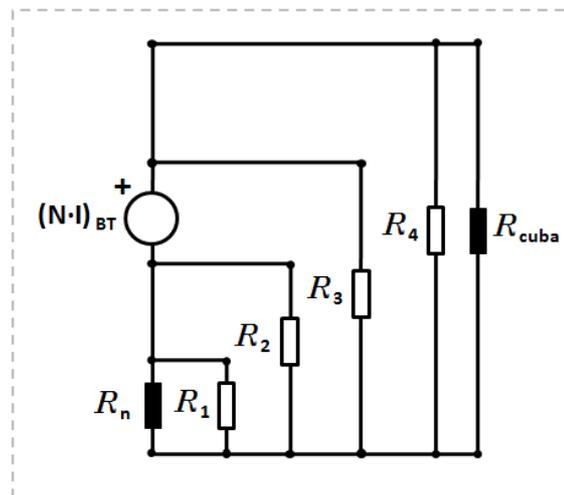
Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B0A	-	100	-	100

Tabla D.5. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo B0A.

Como se observa en la figura D.6, la reluctancia que cabe esperar entre el arrollamiento secundario y el núcleo magnético ( $R_n / R_1 / R_2$ ) es muy inferior a la que habrá entre el arrollamiento energizado y la cuba ( $R_3 / R_4 / R_{cuba}$ ). Al igual que en caso A0A, la fuerza magnetomotriz necesaria para crear el flujo será reducida y por tanto, dentro del desbalance de amperios-vuelta la mayor parte se deberá a la circulación de corriente por la cuba con el consiguiente riesgo de calentamiento de la misma. En la configuración B0A, no obstante, la mayor distancia entre el arrollamiento energizado y la cuba determinará un riesgo de calentamiento muy relevante de ésta, pero algo inferior al del caso A0A.



(a) Trayectorias del flujo homopolar



(b) Circuito magnético

Figura D.6. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo B0A.

### D.1.6. Configuración de funcionamiento BOC

Debido a la circulación de corriente por el arrollamiento de estabilización, el flujo magnético creado por el arrollamiento secundario queda apantallado hacia el núcleo magnético confinando su camino de ida en el canal existente entre ambos arrollamientos, cuya reluctancia es representada por  $R_2$ . Por su parte, el camino de retorno del flujo dispone del espacio comprendido entre el arrollamiento secundario y la cuba, así como por la propia cuba ( $R_3 / R_4 / R_{cuba}$ ). En una cierta parte, este flujo al recorrer la cuba engendra en ella corrientes que se manifiestan en el desbalance de amperios-vuelta, que en este caso alcanza el 9,1 %.

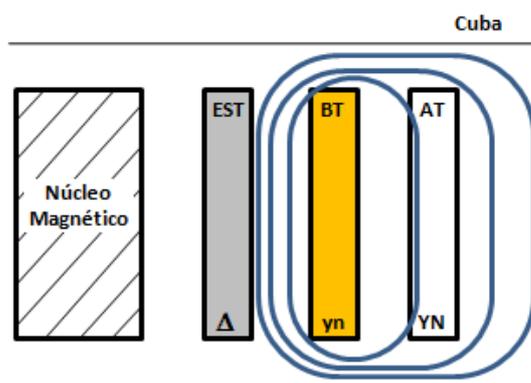
Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>CUBA</sub>
BOC	-	100	90,9	9,1

Tabla D.6. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo BOC.

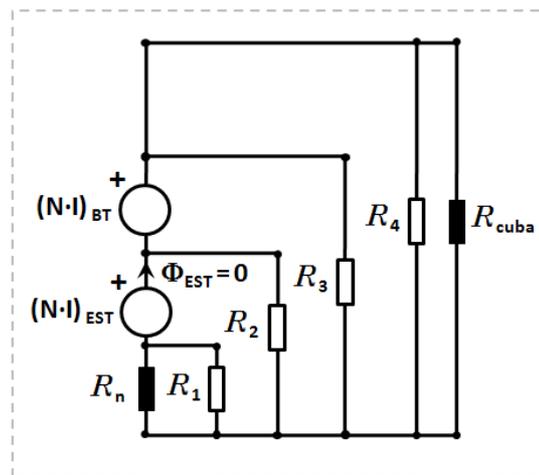
Del circuito de la figura D.7 (b) se deduce:

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + (R_3 // R_4 // R_{cuba})} \tag{D.3}$$

En comparación con la expresión (D.1) analizada en la configuración AOC, se puede deducir para el caso BOC que el número de amperios-vuelta no compensados es menor. No obstante, aunque en menor medida que en el caso AOC, cabría esperar también en la configuración BOC un cierto riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores en caso de funcionamiento con desequilibrios importantes en el lado secundario, estando el neutro secundario puesto a tierra y el neutro primario aislado aún a pesar de disponer de un arrollamiento de estabilización cerrado.



(a) Trayectorias del flujo homopolar



(b) Circuito magnético

Figura D.7. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo BOC.

### D.1.7. Configuración de funcionamiento B1A

A diferencia del resto de configuraciones estudiadas anteriormente, en el caso de funcionamiento del transformador según una configuración B1A, el arrollamiento primario en cortocircuito provoca un efecto de apantallamiento hacia la cuba como se puede observar en la figura D.8 (a).

Por otra parte, al disponerse el arrollamiento de estabilización abierto, y no producirse por tanto un efecto de apantallamiento hacia el núcleo magnético, la reducida reluctancia de éste determina que el trayecto de ida del flujo magnético se canalice esencialmente por el núcleo.

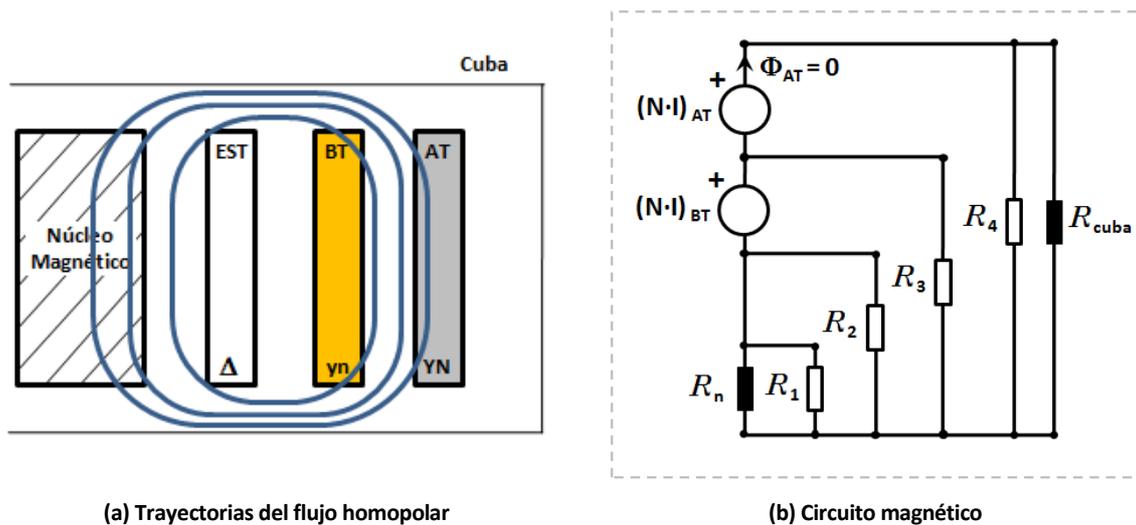
Por todo ello, en este caso no cabe esperar un desbalance de amperios-vuelta significativo como puede deducirse en la expresión (D.4), lo que también se ha corroborado en los resultados del ensayo realizado en esta configuración que se muestran en la tabla D.7.

$$(N \cdot I)_{AT} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_3}{R_3 + (R_n // R_1 // R_2)} \quad (D.4)$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>CUBA</sub>
B1A	99,1	100	-	1,0

Tabla D.7. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo B1A.

Así pues, a pesar de la ausencia de arrollamiento de estabilización, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador con ambos neutros puestos a tierra no presenta riesgos relevantes de calentamiento de la cuba en transformadores con desequilibrios en el lado secundario.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.8. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo B1A.

### D.1.8. Configuración de funcionamiento B1C

En la configuración de ensayo B1C, el arrollamientos primario por un lado (hacia la cuba) y el arrollamiento de estabilización por otro (hacia el núcleo magnético) realizan un efecto de apantallamiento que confina el flujo magnético en los dos canales concéntricos existentes entre los tres arrollamientos, tal y como se representa en la figura D.9 (a). No cabe esperar por tanto la circulación de corrientes por la cuba ni un desbalance apreciable de amperios-vuelta, lo cual se corrobora en el ensayo realizado para esta configuración.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B1C	38,3	100	61,3	0,8

Tabla D.8. Balance de amperios-vuelta del transformador #1 durante el ensayo B1C.

Los amperios-vuelta creados por el arrollamiento secundario son compensados en parte por el arrollamiento primario y en parte por el de estabilización. Como se puede deducir de las expresiones (D.5) y (D.6), la previsible mayor distancia del arrollamiento secundario hacia el arrollamiento primario (por cuestiones de diseño dieléctrico) frente a la distancia respecto del arrollamiento de estabilización, determina que sea este último el que haya de compensar una mayor proporción de amperios-vuelta.

$$(N \cdot I)_{AT} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \tag{D.5}$$

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \tag{D.6}$$

Al igual que en el caso anterior, en esta ocasión con el arrollamiento de estabilización cerrado, no cabe esperar riesgos de calentamiento de la cuba en el funcionamiento de un transformador con ambos neutros puestos a tierra con desequilibrios en el lado secundario.

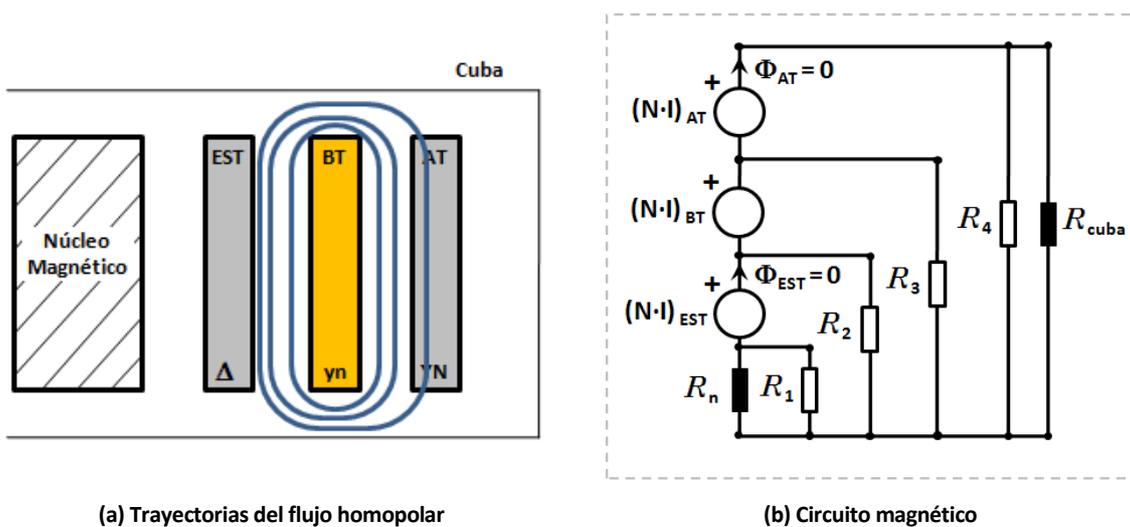


Figura D.9. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo B1C.

## D.2. Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #2

Los transformadores de tipología constructiva #2 disponen el arrollamiento de estabilización interno y, a diferencia de los tipología #1, disponen de pantallas magnéticas adosadas en la cuba para el control del flujo magnético. La presencia de las pantallas magnéticas permite canalizar en buena medida a través de ellas la circulación del flujo magnético, que en su ausencia, circularía por la cuba.

El circuito magnético equivalente para un transformador de tipología constructiva #2 puede representarse también según el indicado en la figura D.1. En este caso, la reluctancia indicada como  $R_{\text{cuba}}$  representa al conjunto de las paredes de la cuba y las pantallas magnéticas adosadas en ella. Ello supone que el valor de esta reluctancia es más reducido que en el caso de la tipología #1. Dado que en este caso el flujo que circula por la cuba es más reducido que el que circula por las pantallas magnéticas, las corrientes de Foucault serán significativamente menores que en el caso anterior.

### D.2.1. Configuración de funcionamiento A0A

Durante el funcionamiento en una configuración A0A de un transformador de tipología #2, el flujo homopolar creado por el arrollamiento primario puede retornar por las pantallas magnéticas adosadas a la cuba, con lo que el flujo neto en el interior de la espira formada por las paredes de la cuba será significativamente inferior respecto al de un transformador de tipología #1. Sin embargo, las pantallas magnéticas no cubren la totalidad de la altura de la cuba por lo que persiste un riesgo de calentamiento en las zonas de la cuba no apantalladas.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0A	100	-	-	100

Tabla D.9. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo A0A.

Conceptualmente, como en el caso de los transformadores de tipología #1, la fuerza magnetomotriz necesaria para crear el flujo será también reducida y por tanto, dentro del desbalance de amperios-vuelta la mayor parte se deberá a la circulación de corriente por las pantallas magnéticas y en menor medida por las paredes de la cuba, habiendo por tanto un cierto riesgo de calentamiento de la misma.

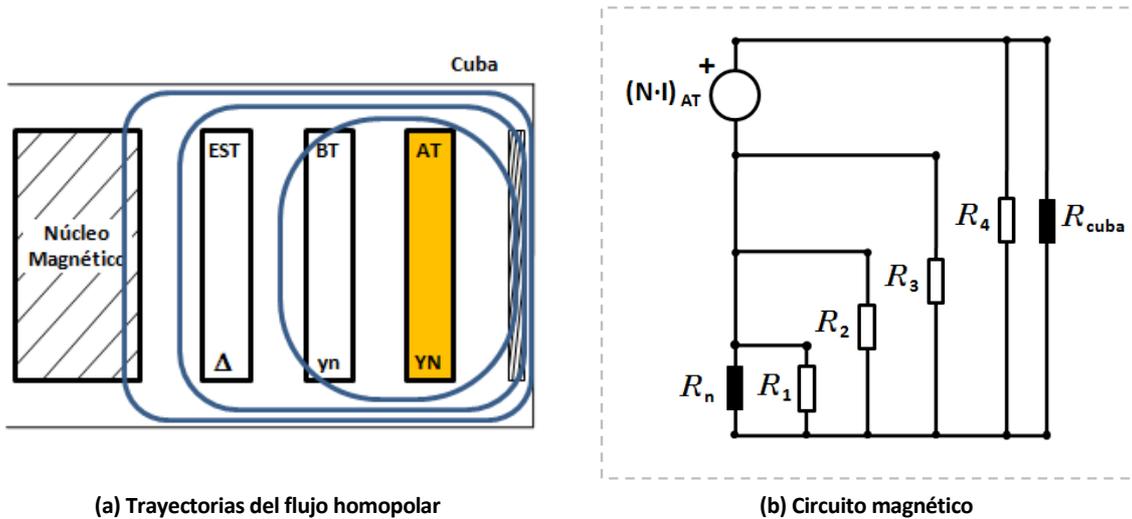


Figura D.10. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo A0A.

### D.2.2. Configuración de funcionamiento A0C

Al estar cerrado el arrollamiento de estabilización se engendran en él corrientes que apantallan el núcleo magnético casi en su totalidad, tal y como se observa en la figura D.11 (a). De esta forma, el flujo que concatena al arrollamiento primario tiene su camino de ida en el canal formado entre dicho arrollamiento y el arrollamiento de estabilización y su camino de retorno por el espacio comprendido entre el arrollamiento primario y la cuba y, en buena parte por las pantallas magnéticas y en una parte menor por la propia cuba.

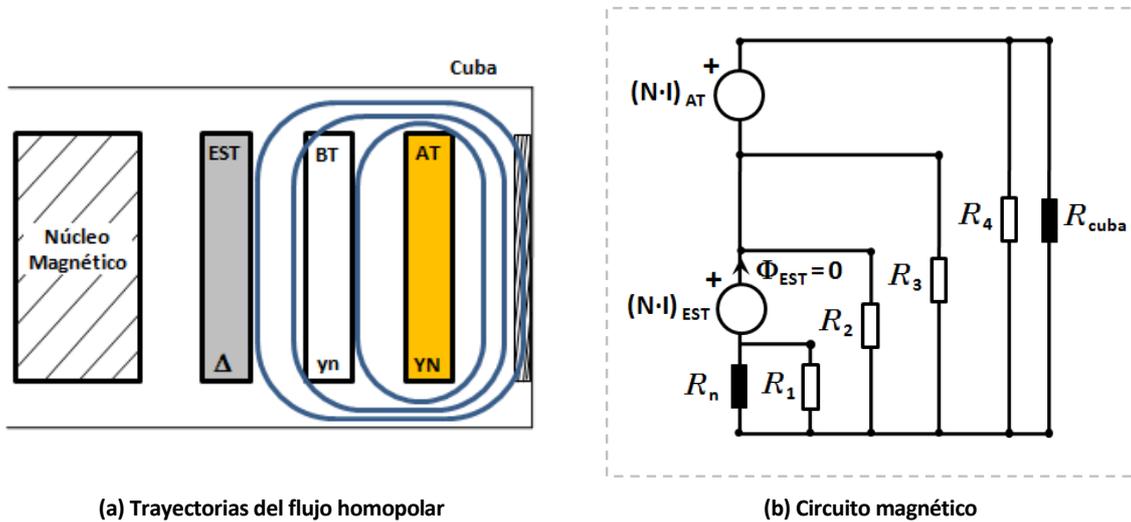
En la expresión (D.7) deducida a partir del circuito magnético equivalente de este ensayo representado en la figura D.11 (b), se puede observar que, como consecuencia de la presencia de las pantallas magnéticas, el reducido valor de  $R_{cuba}$  determinará que los amperios-vuelta creados en el arrollamiento de estabilización sean muy similares a los del arrollamiento primario, con lo que el desbalance será muy reducido, lo que se refrenda en las medidas de la tabla D.10 con un desbalance del 1,2 %.

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{(R_2 // R_3)}{(R_2 // R_3) + (R_4 // R_{cuba})} \tag{D.7}$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0C	100	-	99,6	1,2

Tabla D.10. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo A0C.

De lo anterior se puede concluir que, a diferencia de los transformadores de tipología constructiva #1, la existencia de pantallas magnéticas en esta configuración de funcionamiento minimiza el posible riesgo de calentamiento de la cuba.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.11. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo A0C.

### D.2.3. Configuración de funcionamiento A1A

Una situación similar se encuentra en el caso de la configuración A1A, en la que el arrollamiento secundario en cortocircuito realiza la función de apantallamiento del flujo hacia el núcleo magnético, si bien el mayor espesor del arrollamiento secundario no permite un apantallamiento igualmente efectivo.

De forma análoga al ensayo A0C, se observa en la expresión (D.8) que, un valor reducido de  $R_{cuba}$  supone que los amperios-vuelta creados por el arrollamiento secundario sean muy similares a los del arrollamiento energizado, con un reducido valor en el desbalance, como el valor de 2,9 % obtenidos en el ensayo reflejado en la tabla D.11.

$$(N \cdot I)_{BT} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_3}{R_3 + (R_4 // R_{cuba})} \tag{D.8}$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A1A	100	97,1	-	2,9

Tabla D.11. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo A1A.

Así pues, también en el caso de la configuración A1A, la presencia de las pantallas magnéticas reduce notablemente el riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores con el

arrollamiento de estabilización abierto cuando opera con desequilibrios importantes en el lado primario, estando ambos neutros puestos a tierra.

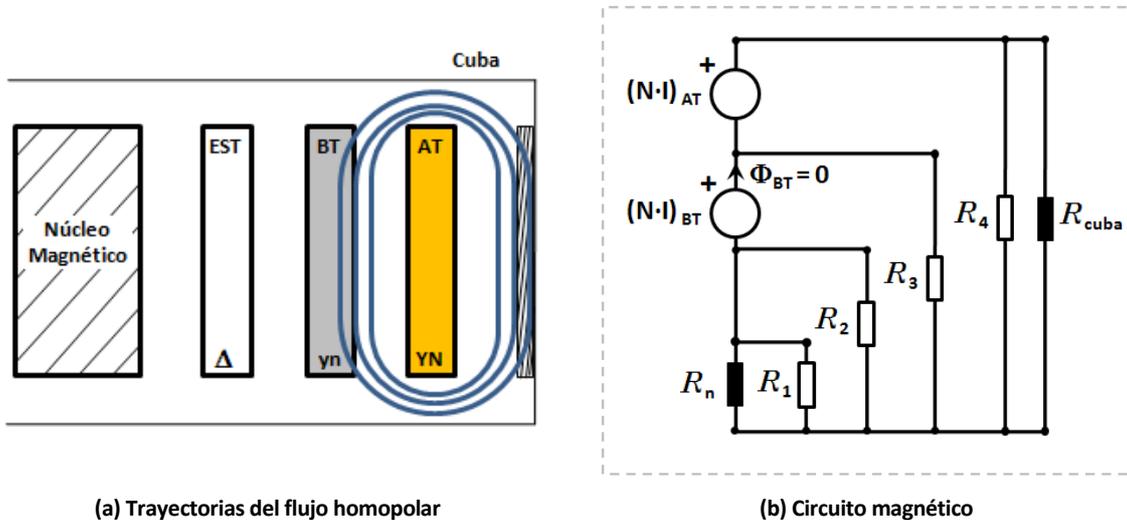


Figura D.12. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo A1A.

### D.2.4. Configuración de funcionamiento A1C

El comportamiento es muy parecido al caso del ensayo A1A en el que el desbalance es muy reducido (0,3 %) como se observa en la tabla D.12.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A1C	100	118,2	20,0	0,3

Tabla D.12. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo A1C.

De igual forma que en el transformador #1 en esta misma configuración, los amperios-vuelta de los arrollamientos primario y de estabilización tienen idéntico signo, por lo que los amperios-vuelta creados por el arrollamiento secundario son mayores que los creados por el arrollamiento primario de alimentación.

En este caso, nuevamente la presencia de pantallas magnéticas, y la circulación de corrientes a través de ella, minimiza la posibilidad de calentamiento de la cuba por la circulación de flujo homopolar.

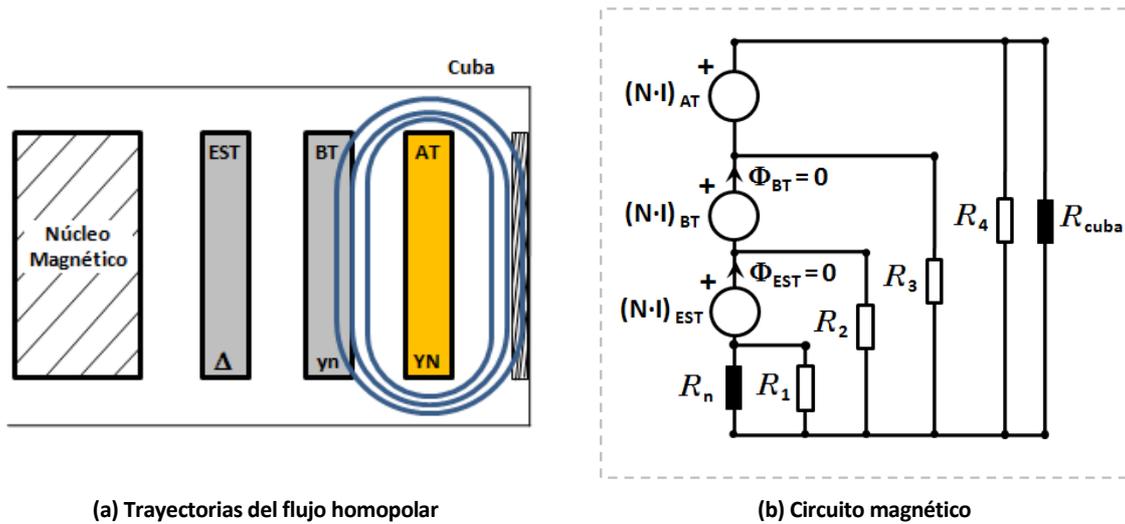


Figura D.13. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo A1C.

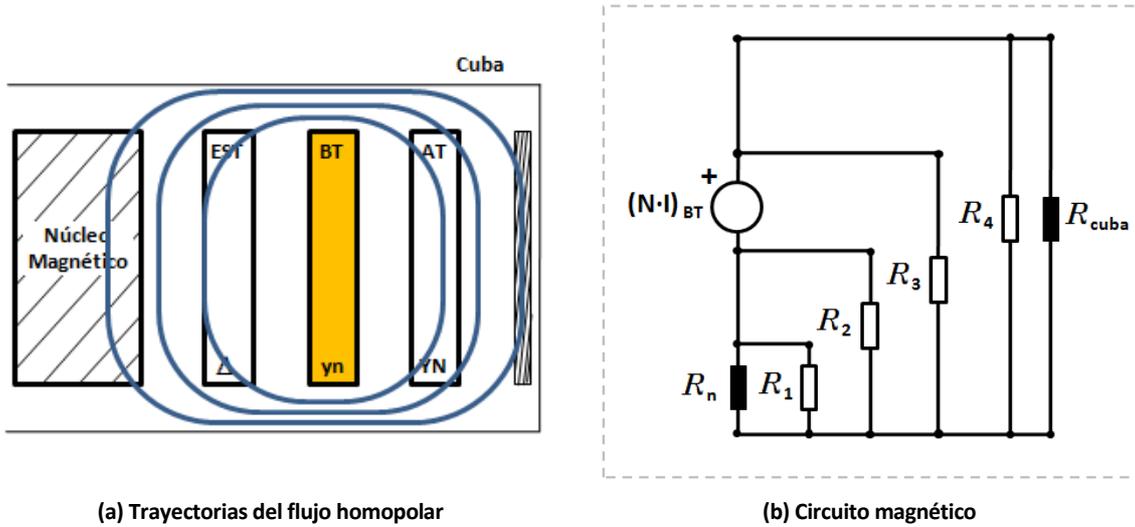
### D.2.5. Configuración de funcionamiento B0A

De la misma forma que en la configuración A0A, durante el funcionamiento en una configuración B0A de un transformador de tipología #2, el flujo homopolar creado por el arrollamiento secundario puede retornar por las pantallas magnéticas adosadas a la cuba, con lo que el flujo neto en el interior de la espira formada por las paredes de la cuba será significativamente inferior respecto al de un transformador de tipología #1, con la salvedad ya indicada de que las pantallas magnéticas no cubren la totalidad de la altura de la cuba por lo que persiste un riesgo de calentamiento en las zonas de la cuba no apantalladas.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B0A	-	100	-	100

Tabla D.13. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo B0A.

Al igual que en el ensayo A0A, a pesar de las pantallas magnéticas adosadas a la cuba, la posibilidad de un cierto riesgo de calentamiento debe ser cuidadosamente valorado.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.14. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo B0A.

**D.2.6. Configuración de funcionamiento B0C**

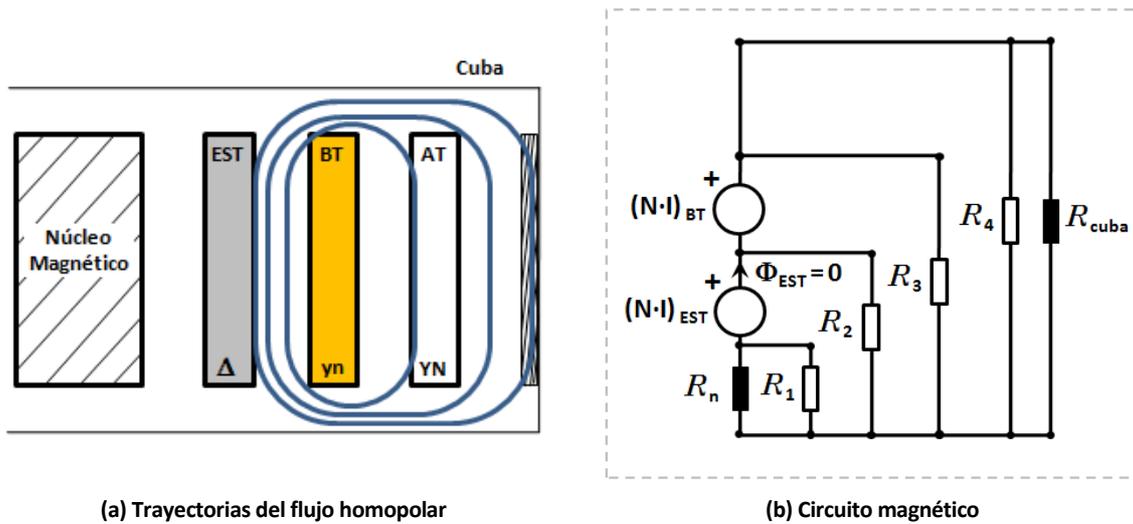
En este ensayo, la circulación de corriente por el arrollamiento de estabilización apantalla el flujo magnético creado por el arrollamiento secundario hacia el núcleo magnético. Por otro lado, en el camino de retorno del flujo la presencia de las pantallas magnéticas junto con el espacio comprendido entre el arrollamiento secundario y la cuba determinan una reluctancia reducida. Como consecuencia de ello, los amperios-vuelta del arrollamiento de estabilización, como se deduce de la expresión (D.9), serán muy similares a los creados por el arrollamiento secundario, de forma que es previsible un desbalance reducido. En este caso, los resultados del ensayo arrojaron un desbalance del 1,5%.

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + (R_3 // R_4 // R_{cuba})} \tag{D.9}$$

Id. Ensayo	(N·I) <sub>AT</sub>	(N·I) <sub>BT</sub>	(N·I) <sub>EST</sub>	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>CUBA</sub>
B0C	-	100	99,2	1,5

Tabla D.14. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo B0C.

No es esperable por tanto riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores que disponen de pantallas magnéticas en caso de funcionamiento con desequilibrios importantes en el lado secundario, estando el neutro secundario puesto a tierra y el neutro primario aislado cuando se dispone de un arrollamiento de estabilización cerrado.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.15. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo B0C.

## D.2.7. Configuración de funcionamiento B1A

El efecto de apantallamiento del arrollamiento primario en cortocircuito por un lado y el cierre del flujo por el núcleo magnético por otro lado, determina una situación en la que cabe esperar, según la expresión (D.10), que los amperios-vuelta creados por los arrollamientos primario y secundario sean muy similares y el desbalance sea muy reducido.

$$(N \cdot I)_{AT} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_3}{R_3 + (R_n // R_1 // R_2)} \quad (D.10)$$

Ello contrasta con el resultado obtenido en el ensayo que se muestra en la tabla D.15, donde el desbalance se sitúa en un 9,7 %. Teniendo en cuenta que en el ensayo B1A del transformador de tipología #1 el desbalance de amperios-vuelta era del 1,0 %, y que la presencia de pantallas magnéticas no haría sino mejorar la situación, es muy probable que exista algún error en la medida de la corriente primaria, y consecuentemente, en el desbalance<sup>93</sup>.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B1A	90,3	100	-	9,7

Tabla D.15. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo B1A.

<sup>93</sup> Las trayectorias del flujo homopolar en el ensayo B1A de los transformadores #1 y #2 son conceptualmente muy similares entre sí y similares a su vez a las trayectorias del flujo en el ensayo A0C del transformador #3 (que se verá más adelante). Al igual que en el ensayo B1A del transformador #1, también en este último caso, el desbalance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo A0C es muy reducido (3,1 %), lo que refuerza la posibilidad de que exista un error en la medida del transformador #2.

Salvo por la incertidumbre que genera el posible error en las medidas realizadas en este ensayo, el funcionamiento de un transformador con ambos neutros puestos a tierra no debería presentar riesgos relevantes de calentamiento de la cuba en caso de desequilibrios en el lado secundario.

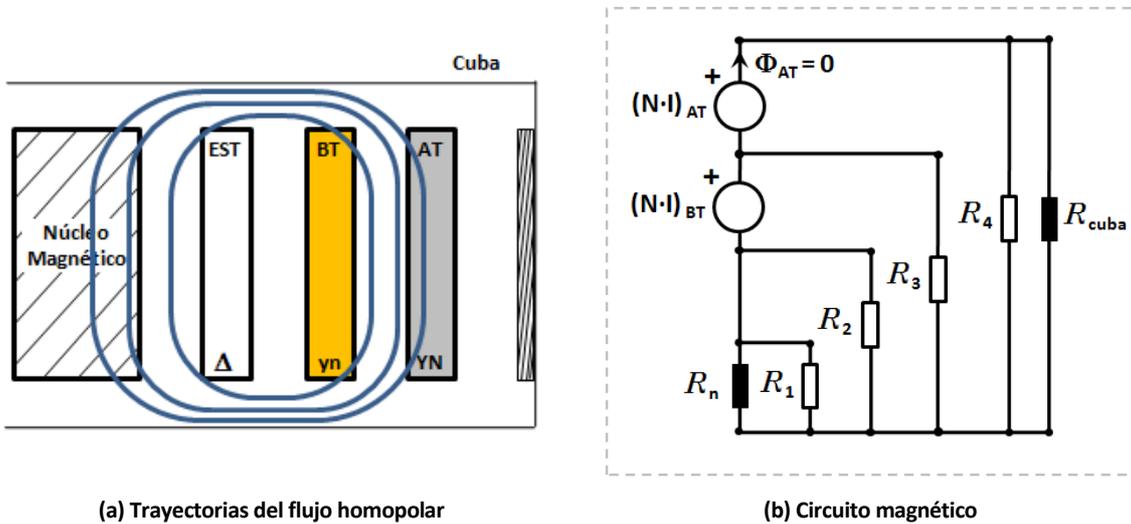


Figura D.16. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo B1A.

### D.2.8. Configuración de funcionamiento B1C

De la misma manera que en el transformador #1, en la configuración de ensayo B1C del transformador #2, el arrollamientos primario por un lado (hacia la cuba) y el arrollamiento de estabilización por otro (hacia el núcleo magnético) realizan un efecto de apantallamiento que confina el flujo magnético en los dos canales tubulares concéntricos existentes entre los tres arrollamientos. No cabe esperar por tanto la circulación de corrientes por la cuba ni un desbalance apreciable de amperios-vuelta, lo cual se corrobora en el ensayo realizado para esta configuración.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B1C	23,2	100	73,4	3,6

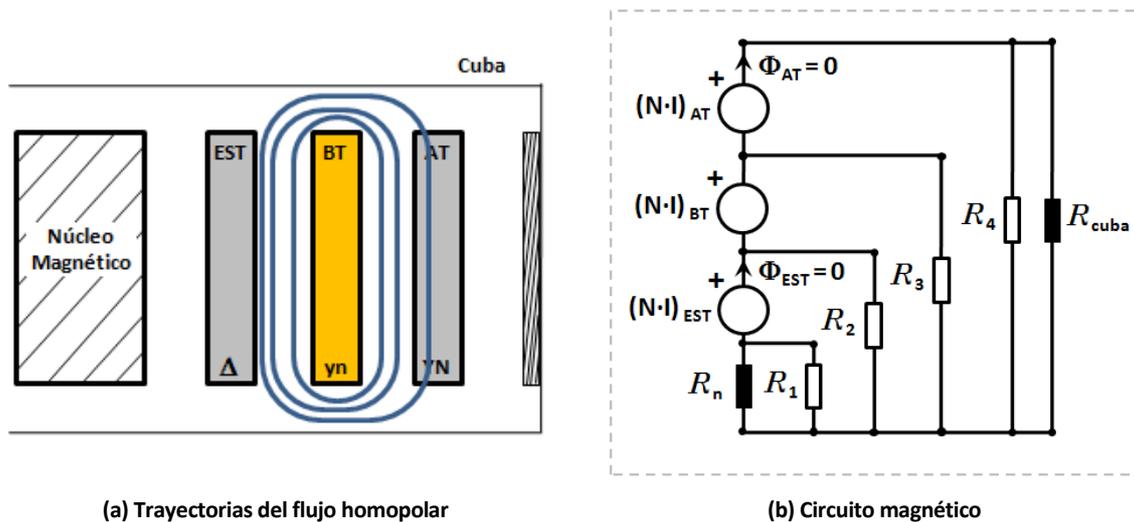
Tabla D.16. Balance de amperios-vuelta del transformador #2 durante el ensayo B1C.

La compensación de los amperios-vuelta creados por el arrollamiento secundario por parte de los arrollamientos primario y de estabilización se puede obtener según las expresiones (D.11) y (D.12), donde la previsible mayor distancia entre el arrollamiento secundario respecto del arrollamiento primario que entre el arrollamiento secundario y el arrollamiento de estabilización, determina que sea este último el que haya de compensar una mayor proporción de amperios-vuelta.

$$(N \cdot I)_{AT} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \tag{D.11}$$

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (D.12)$$

Por tanto, no cabe esperar riesgos de calentamiento de la cuba en el funcionamiento de un transformador #2 con ambos neutros puestos a tierra con desequilibrios en el lado secundario.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.17. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #2 durante el ensayo B1C.

### D.3. Trayectorias del flujo homopolar en transformadores estrella-estrella de tipología constructiva #3

Finalmente, los transformadores de tipología constructiva #3 disponen el arrollamiento de estabilización externo y no disponen de pantallas magnéticas adosadas en la cuba. Al igual que en los transformadores de tipología #1, la ausencia de las pantallas magnéticas podrá suponer una circulación relevante de flujo homopolar a lo largo de toda la longitud de las paredes de la cuba.

En la figura D.18, se representa el circuito magnético equivalente para el caso de un transformador de tipología constructiva #3. Los amperios-vuelta creados por los arrollamientos primario, secundario y de estabilización se representan por sendas fuentes de tensión, esta vez en un orden distinto al de los dos casos anteriores.

Las reluctancias representadas en la figura D.18 de los trayectos a través de caminos ferromagnéticos y no ferromagnéticos tienen idéntica interpretación que la realizada para la figura D.1, sin más cambio que la identificación, diferente en este caso, del arrollamiento más cercano al núcleo magnético, del intermedio y del más lejano.

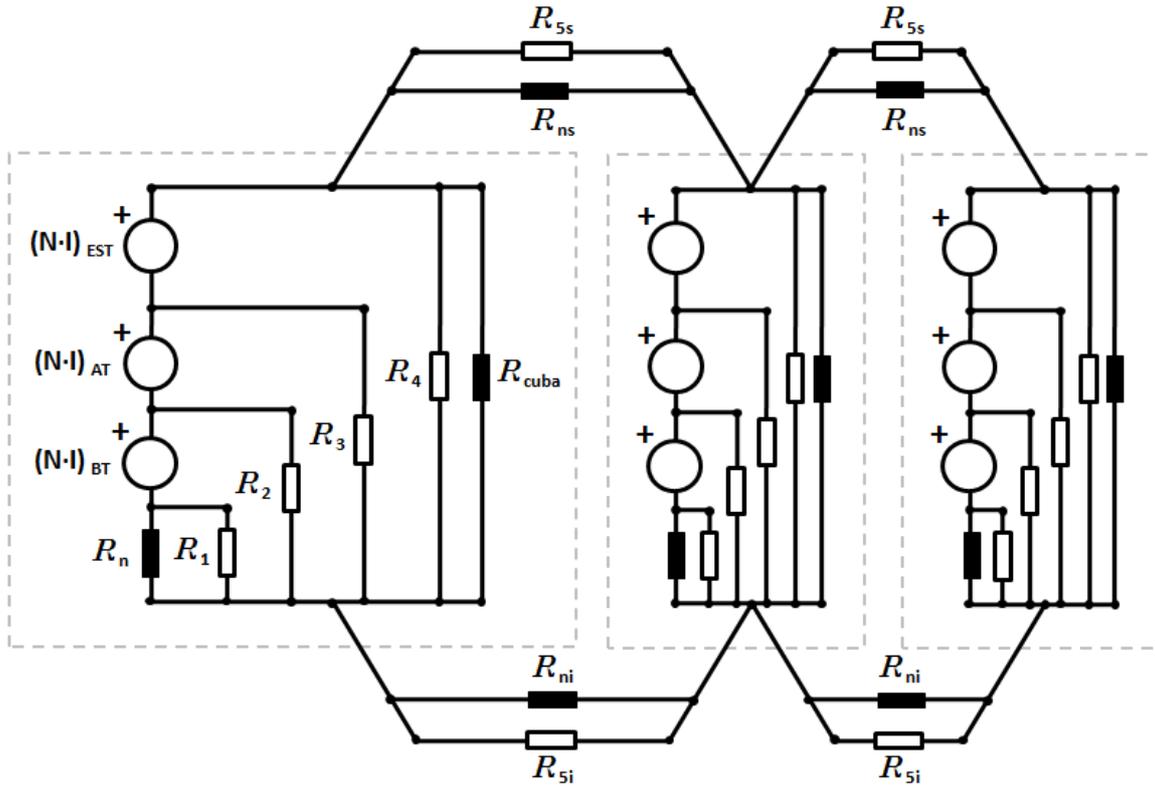


Figura D.18. Circuito magnético para un transformador de tipología constructiva #3.

### D.3.1. Configuración de funcionamiento A0A

Como en los ensayos de vacío efectuados en los transformadores anteriores, cuando no se dispone de circulación de corriente por otros arrollamientos, todos los amperios-vuelta homopolares creados por el arrollamiento primario han de ser compensados por las corrientes circulantes por la cuba, con la salvedad de la fuerza magnetomotriz necesaria para establecer el flujo.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0A	100	-	-	100

Tabla D.17. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo A0A.

Como se observa en la figura D.19, una buena parte del flujo homopolar creado por el arrollamiento primario será canalizado a través de la cuba con el consiguiente riesgo de calentamiento de la misma.

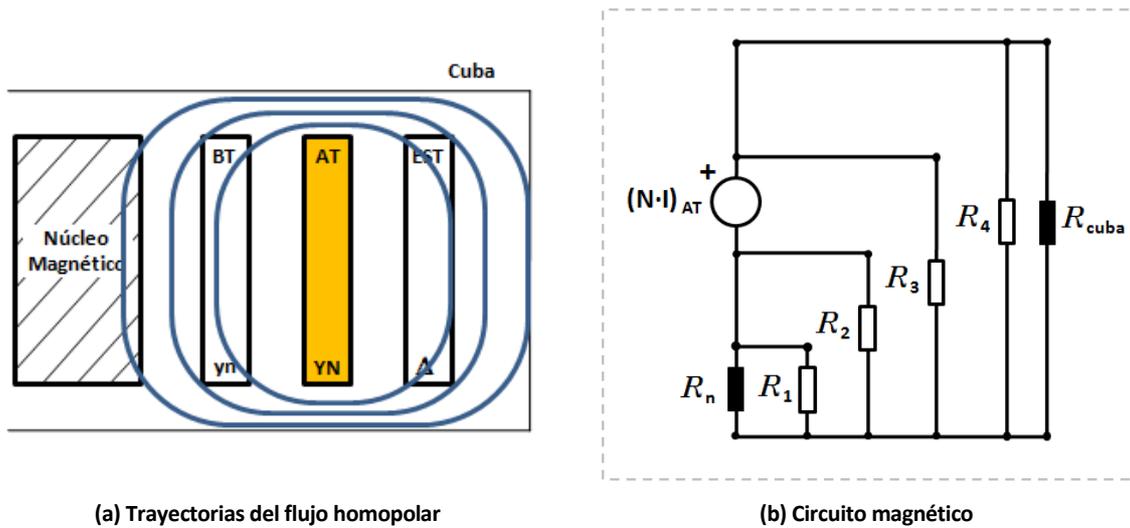


Figura D.19. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo A0A.

### D.3.2. Configuración de funcionamiento A0C

En un transformador de tipología constructiva #3, durante el ensayo A0C la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización apantalla de forma significativa la cuba (a diferencia de los transformadores anteriores donde en esta configuración se apantallaba el núcleo magnético), tal y como se observa en la figura D.20 (a). En este caso, el flujo que concatena al arrollamiento primario tiene su camino de ida esencialmente canalizado a través del núcleo magnético ( $R_n / R_1 / R_2$ ) y su camino de retorno por el espacio comprendido en el canal formado entre dicho arrollamiento y el arrollamiento de estabilización ( $R_3$ ).

Del circuito magnético equivalente de este ensayo representado en la figura D.20 (b), se puede deducir que los amperios-vuelta creados por el arrollamiento de estabilización vendrán determinados por la expresión (D.13) y tendrán un valor muy parecido a los creados por el arrollamiento primario, teniendo por tanto un desbalance reducido. En la tabla D.18 se observa que dicho desbalance obtenido en el ensayo fue del 3,1%.

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_3}{R_3 + (R_n // R_1 // R_2)} \quad (D.13)$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A0C	100	-	97,1	3,1

Tabla D.18. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo A0C.

Por tanto, el funcionamiento de un transformador de tipología #3 con desequilibrios en el lado primario, estando el neutro primario puesto a tierra y el neutro secundario aislado, no genera

riesgos relevantes de calentamiento de la cuba debido al efecto de apantallamiento del arrollamiento de estabilización.

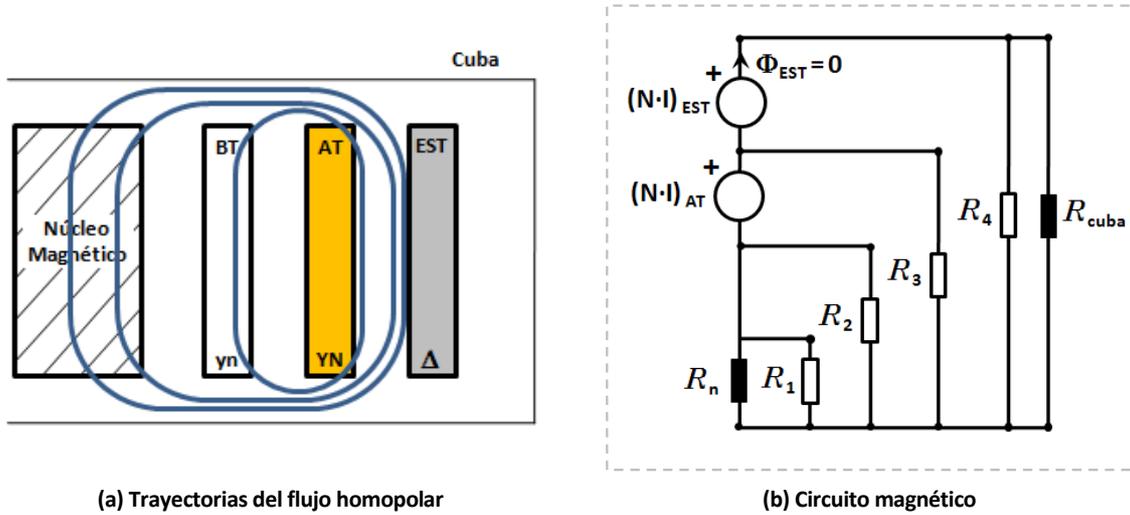


Figura D.20. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #1 durante el ensayo A0C.

### D.3.3. Configuración de funcionamiento A1A

En el funcionamiento con una configuración A1A, el efecto de apantallamiento es realizado en este caso internamente al arrollamiento primario energizado y como consecuencia de los amperios-vuelta creados por el arrollamiento secundario. Por tanto, el flujo magnético creado se canaliza en su camino de ida por el canal formado entre los arrollamientos primario y secundario y su camino de retorno en el espacio comprendido entre el arrollamiento primario y la cuba, incluyendo la propia cuba.

Así pues, cabe esperar una circulación de corrientes por la cuba significativa, provocando con ello un desbalance de amperios-vuelta relevante, cuyo valor en el ensayo realizado es un 13,0 %, tal y como se observa en la tabla D.19. Comparando la expresión (D.13), correspondiente al ensayo A0C, con la (D.14), correspondiente al ensayo A1A, se observa, como es esperable, una mayor diferencia entre los amperios-vuelta primarios y secundarios, y por tanto un mayor desbalance.

$$(N \cdot I)_{BT} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + (R_3 // R_4 // R_{cuba})} \tag{D.14}$$

Id. Ensayo	(N·I) <sub>AT</sub>	(N·I) <sub>BT</sub>	(N·I) <sub>EST</sub>	FMM <sub>0</sub> + (I) <sub>CUBA</sub>
A1A	100	87,3	-	13,0

Tabla D.19. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo A1A.

La configuración A1A genera por tanto un posible riesgo de calentamiento de la cuba en transformadores de tipología #3 con el arrollamiento de estabilización abierto en caso de

funcionamiento con desequilibrios importantes en el lado primario, estando ambos neutros puestos a tierra.

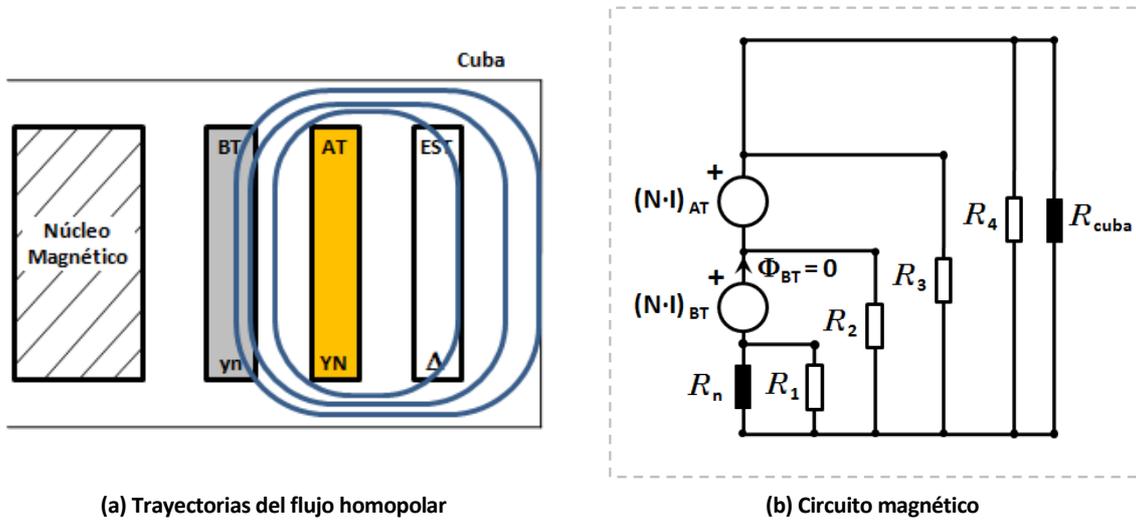


Figura D.21. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo A1A.

### D.3.4. Configuración de funcionamiento A1C

En la configuración de ensayo A1C en los transformadores de tipología #3, el arrollamiento secundario por un lado (hacia el núcleo magnético) y el arrollamiento de estabilización por otro (hacia la cuba) realizan un efecto de apantallamiento que confina el flujo magnético en los dos canales concéntricos existentes entre los tres arrollamientos, tal y como se representa en la figura D.22 (a). No cabe esperar por tanto la circulación de corrientes por la cuba ni un desbalance apreciable de amperios-vuelta, lo cual se corrobora en el ensayo realizado para esta configuración.

Frente a los amperios-vuelta creados por el arrollamiento primario, su compensación por parte de los arrollamientos secundario y de estabilización se puede deducir de las expresiones (D.15) y (D.16). A diferencia de la situación, muy similar a ésta, que se producía en la configuración B1C de los transformadores de tipo #1 y, sobre todo, de tipo #2, en este caso, las distancias del arrollamiento primario hacia el arrollamiento secundario y el arrollamiento de estabilización son más parecidas (como consecuencia de los requerimientos dieléctricos), lo que determinará un reparto más equitativo en la proporción de amperios-vuelta a compensar por cada arrollamiento.

$$(N \cdot I)_{BT} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (D.15)$$

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{AT} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (D.16)$$

Por todo lo indicado, no cabe esperar riesgos de calentamiento de la cuba en el funcionamiento de un transformador #3 con arrollamiento de estabilización cerrado y con ambos neutros puestos a tierra durante el funcionamiento con desequilibrios en el lado primario.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
A1C	100	54,3	44,2	1,6

Tabla D.20. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo A1C.

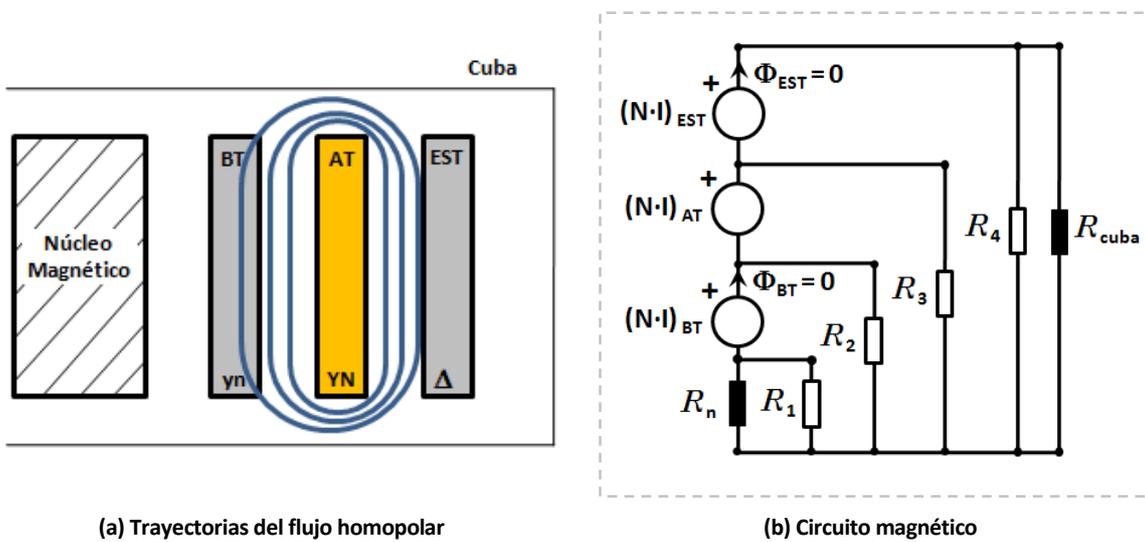


Figura D.22. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo A1C.

### D.3.5. Configuración de funcionamiento B0A

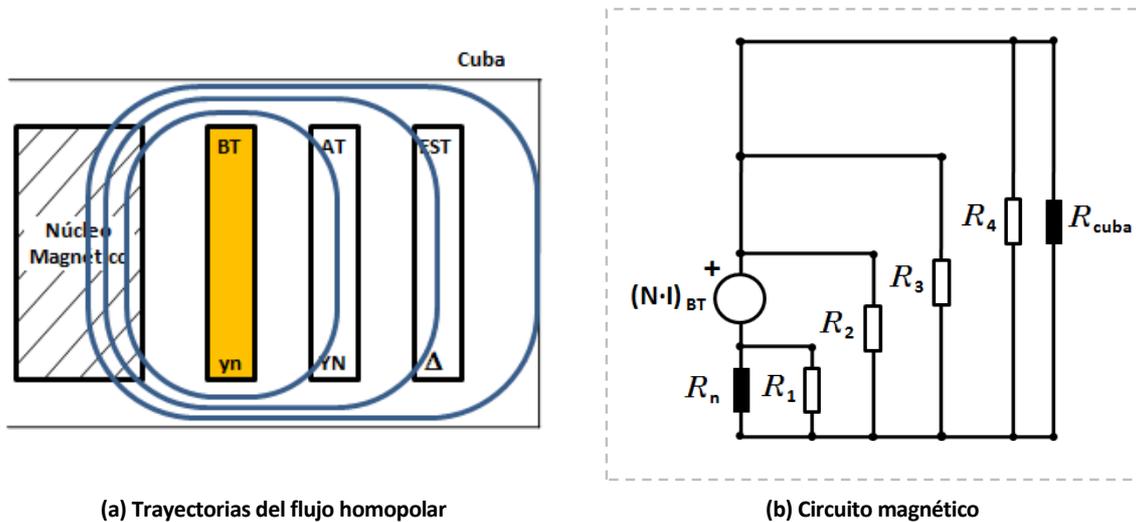
Al igual que en la configuración A0A, durante el funcionamiento en una configuración B0A todos los amperios-vuelta homopolares creados por el arrollamiento secundario han de ser compensados por las corrientes circulantes por la cuba, con la salvedad de la fuerza magnetomotriz necesaria para establecer el flujo.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B0A	-	100	-	100

Tabla D.21. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo B0A.

En este caso, la parte del flujo magnético que podría retornar por la cuba se verá más repartida entre las diferentes reluctancias entre el arrollamiento energizado y la cuba que entran en juego

$(R_2 / R_3 / R_4 / R_{cuba})$ , por lo que el riesgo de calentamiento de la cuba sería algo inferior al del caso AOA.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.23. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo B0A.

### D.3.6. Configuración de funcionamiento B0C

En este caso, debido a la circulación de corriente por el arrollamiento de estabilización, el flujo magnético creado por el arrollamiento secundario queda apantallado hacia la cuba confinando su camino de retorno en el canal existente entre ambos arrollamientos, cuya reluctancia es representada por  $R_2 // R_3$ . Por su parte, el camino de ida del flujo estará esencialmente canalizada por el núcleo magnético ( $R_n // R_1$ ).

Los fenómenos físicos guardan gran semejanza con los que tienen lugar en la configuración A0C, y de la expresión (D.17) cabe deducir que los amperios-vuelta producidos por el arrollamiento de estabilización serán muy semejantes a los creados por el arrollamiento secundario y, por tanto el desbalance será reducido.

$$(N \cdot I)_{EST} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{(R_2 // R_3)}{(R_2 // R_3) + (R_n // R_1)} \quad (D.17)$$

No obstante, como se observa en la tabla D.22, el desbalance según las medidas realizadas se sitúa en el 9,7% que es un valor mayor al esperado. Teniendo en cuenta los resultados del ensayo A0C sobre este mismo transformador, es posible pensar en que un cierto error en la medida de la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización haya producido un cálculo del desbalance superior al que razonablemente cabría esperar.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
BOC	-	100	90,3	9,7

Tabla D.22. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo BOC.

En línea con lo indicado para la configuración AOC, en el funcionamiento de un transformador de tipología #3 con el arrollamiento de estabilización cerrado con desequilibrios en el lado secundario, estando el neutro secundario puesto a tierra y el neutro primario aislado, no es previsible la existencia de un riesgo relevante de calentamiento de la cuba, si bien la incertidumbre generada por el posible error en las medidas experimentales realizadas aconsejaría realizar medidas adicionales de contraste.

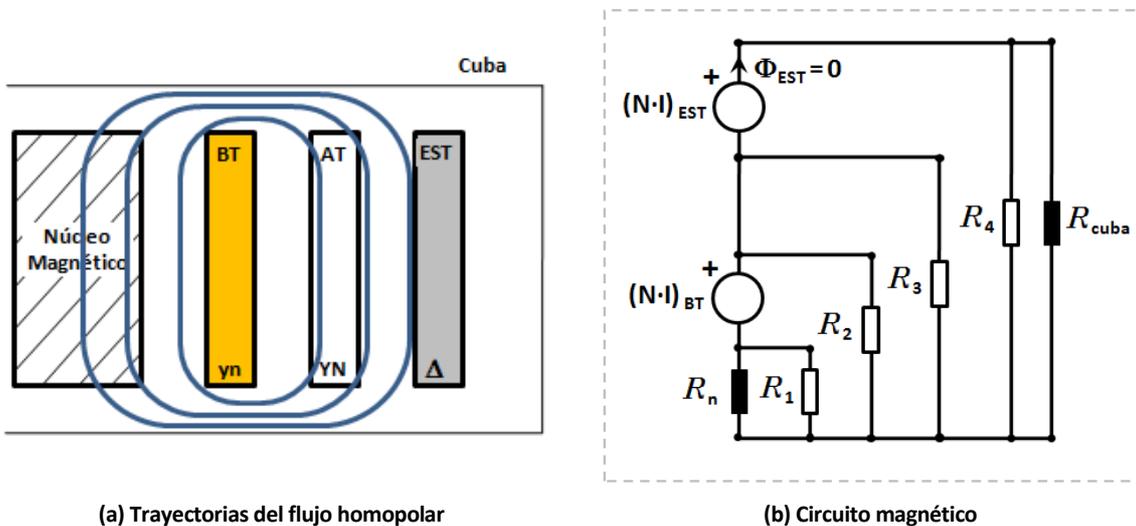


Figura D.24. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo BOC.

### D.3.7. Configuración de funcionamiento B1A

Cualitativamente, los fenómenos físicos durante el funcionamiento del transformador según una configuración B1A son muy similares a los de los ensayos AOC y BOC. En este caso, el arrollamiento primario en cortocircuito es el responsable de producir el efecto de apantallamiento del flujo magnético hacia la cuba como se puede observar en la figura D.25 (a). De la misma forma que en los otros dos casos, el trayecto de ida del flujo magnético se canaliza esencialmente por el núcleo.

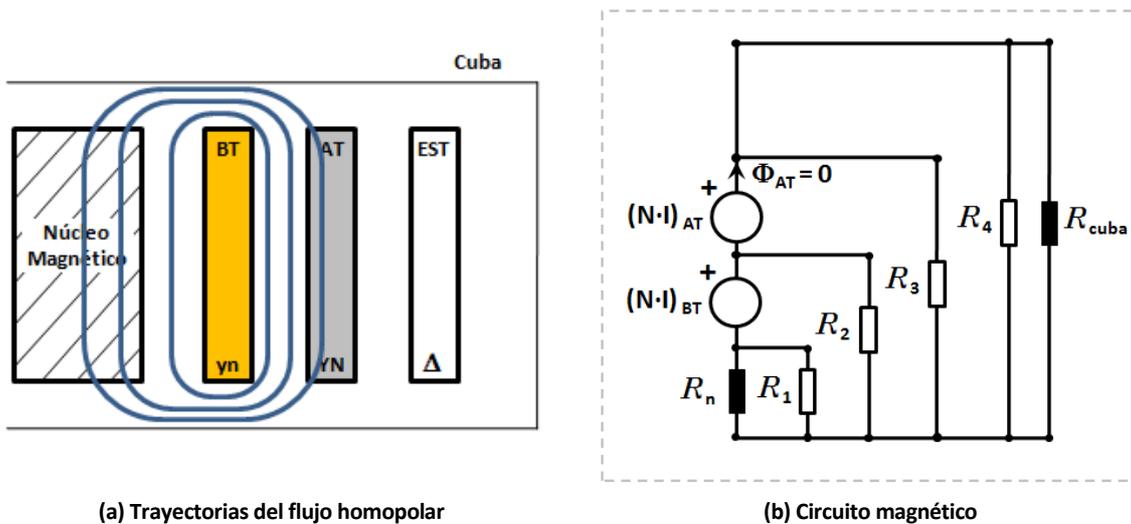
Por todo ello, en este caso los amperios-vuelta producidos por el arrollamiento primario deben ser muy similares a los creados por el arrollamiento secundario, como puede deducirse en la expresión (D.18), de forma que no cabe esperar un desbalance de amperios-vuelta significativo, que en el ensayo experimental se ha calculado en un 2,6 % como se muestra en la tabla D.23.

$$(N \cdot I)_{AT} = (N \cdot I)_{BT} \cdot \frac{R_2}{R_2 + (R_n // R_1)} \tag{D.18}$$

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 + (I)_{CUBA}$
B1A	97,5	100	-	2,6

Tabla D.23. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo B1A.

Así pues, a pesar de la ausencia de arrollamiento de estabilización, se puede concluir que el funcionamiento de un transformador de tipología #3 con ambos neutros puestos a tierra no presenta riesgos relevantes de calentamiento de la cuba en transformadores con desequilibrios en el lado secundario.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.25. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo B1A.

### D.3.8. Configuración de funcionamiento B1C

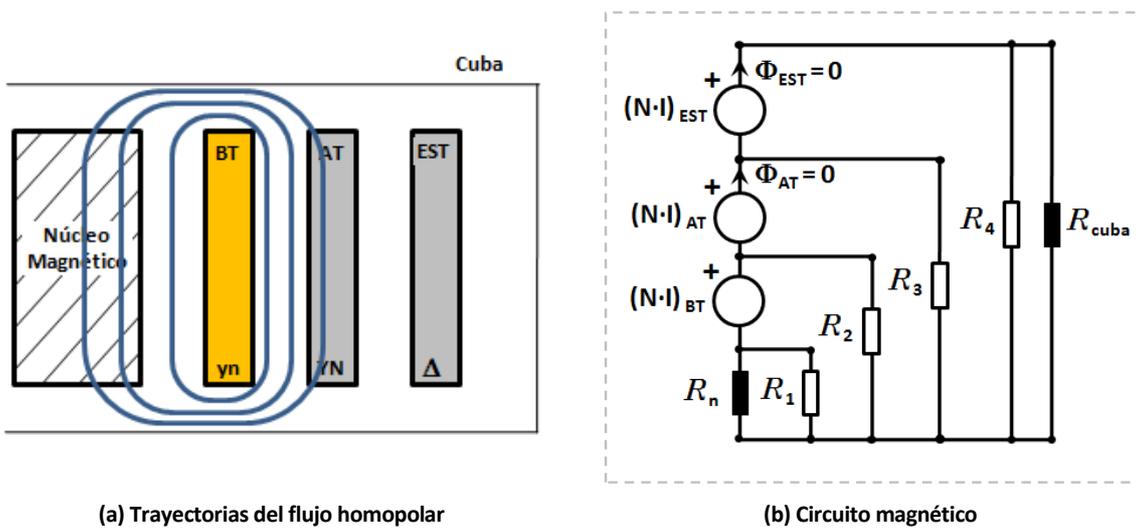
Finalmente, en la configuración de ensayo B1C, se vuelve a tener una situación cualitativamente bastante similar a los ensayos A0C, B0C y B1A en la que, en este caso, tanto las corrientes circulantes por el arrollamientos primario como las del arrollamiento de estabilización realizan un efecto de apantallamiento del flujo magnético hacia la cuba, tal y como se representa en la figura D.26 (a). No cabe esperar por tanto la circulación de corrientes por la cuba ni un desbalance apreciable de amperios-vuelta. En la tabla D.24 se muestran los resultados del ensayo realizado para esta configuración observándose un desbalance del 6,7 %, valor algo superior al esperado y que también podría denotar un cierto error en la medida de la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización.

Id. Ensayo	$(N \cdot I)_{AT}$	$(N \cdot I)_{BT}$	$(N \cdot I)_{EST}$	$FMM_0 - (I)_{CUBA}$
B1C	106,7	100	13,0	6,7

Tabla D.24. Balance de amperios-vuelta del transformador #3 durante el ensayo B1C.

Al igual que ha ocurrido en algunos casos anteriores en los transformadores #1 y #2, el arrollamiento primario en cortocircuito apantalla magnéticamente en gran medida el espacio exterior al mismo. Idealmente, si su espesor fuera nulo el apantallamiento sería total. En la práctica, su espesor no es nulo por lo que las diferentes espiras están concatenadas por flujos diferentes, lo que termina determinando que los amperios-vuelta creados por el arrollamiento primario sean superiores a los del arrollamiento secundario y que circule una corriente por el arrollamiento de estabilización para cancelar el flujo total concatenado por dicho arrollamiento.

En definitiva, complementando lo que se concluyó para la configuración B1A, en los transformadores de tipología constructiva #3 en su funcionamiento con ambos neutros puestos a tierra y con desequilibrios en el lado secundario no se prevé riesgo de calentamiento de la cuba, se disponga o no de arrollamiento de estabilización.



(a) Trayectorias del flujo homopolar

(b) Circuito magnético

Figura D.26. Trayectorias del flujo homopolar y circuito magnético representativos del comportamiento del transformador #3 durante el ensayo B1C.

## Apéndice E

# Simulaciones de las corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella

El objetivo de este apéndice es complementar las tablas y figuras del capítulo 7 con el detalle de algunos resultados de los cálculos de las corrientes de cortocircuito de las simulaciones realizadas.

En particular, se pretende valorar la influencia de diversas variables (características constructivas del transformador, conexión de los neutros, tipo de falta, potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria, relación  $Z_0 / Z_1$  de la red y posición del cambiador de tomas en carga) en las corrientes de cortocircuito circulantes por los arrollamientos.

Dicha influencia será analizada de forma separada en los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado y abierto, valorando la sensibilidad de las corrientes de cortocircuito circulantes por el transformador ante las diversas variables indicadas, y evaluando cualitativamente y cuantitativamente su influencia. Ello, junto con todo lo expuesto en el capítulo 7 permitirá profundizar en el comportamiento de los transformadores estrella-estrella en lo relativo a sus corrientes de cortocircuito.

Como ya se indicó en el apartado 7.2.1 del capítulo 7, los resultados mostrados en este apéndice son fruto de las 9.072 simulaciones realizadas sobre diferentes escenarios de los siete transformadores indicados en la tabla 7.1. La tipología constructiva será tenida en cuenta en su versión más agrupada (es decir, las tipologías #1, #2 y #3 considerando únicamente la presencia de pantallas magnéticas y la ubicación del arrollamiento de estabilización) o en su versión más extendida (considerando los siete transformadores analizados), según convenga de cara a una mayor claridad en la exposición.

### E.1. Corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado

En este apartado se considerará la influencia de las variables mencionadas en el comportamiento de las corrientes de cortocircuito circulantes por los arrollamientos de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado.

Dado que en el análisis paramétrico intervienen un número elevado de variables, algunas de ellas cuya influencia se prevé menor se tomarán por defecto fijas en su valor medio o más habitual, sin perjuicio de que lógicamente también será analizada la sensibilidad ante ellas.

En concreto, la potencia de cortocircuito de las redes se considerará media (lo que representa la situación promedio más probable de la red de distribución), la relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red y su impedancia de secuencia directa se considerará igual a tres (situación más habitual en las redes interurbanas y periurbanas) y la posición del cambiador de tomas en carga se considerará en la toma central.

**E.1.1. Influencia del tipo de falta y la conexión del neutro en relación con la tipología constructiva de los transformadores**

Las corrientes de cortocircuito se ven significativamente influidas por el tipo de falta (trifásica, monofásica en la red primario o monofásica en la red secundaria) y las posibles configuraciones respecto a los neutros de los arrollamientos primario y secundario como consecuencia de la forma de conexión del neutro en el circuito equivalente ante secuencia homopolar.

A continuación se muestra en las tablas E.1, E.2 y E.3 las corrientes de cortocircuito circulantes por cada uno de los arrollamientos en cada uno de los siete tipos de transformadores analizados.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador								
		Transformador #A			Transformador #B			Transformador #C		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu) <sup>94</sup>	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	7,06	7,06	-	6,33	6,33	-	6,49	6,49	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	6,31	3,64	7,99	5,75	3,05	8,11	4,74	2,11	7,88
	PAT / AIS	6,01	2,73	9,83	5,55	2,46	9,28	4,62	1,69	8,79
	AIS / PAT	2,11	2,11	-	1,68	1,68	-	1,49	1,49	-
	AIS / AIS	2,11	2,11	-	1,68	1,68	-	1,49	1,49	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,71	12,19	16,45	5,87	10,24	13,10	6,53	10,71	12,56
	PAT / AIS	2,25	2,25	-	1,83	1,83	-	1,77	1,77	-
	AIS / PAT	4,78	11,03	18,74	4,57	9,55	14,93	4,94	9,92	14,93
	AIS / AIS	2,25	2,25	-	1,83	1,83	-	1,77	1,77	-

**Tabla E.1. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #A, #B y #C.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

<sup>94</sup> Se indican valores por unidad respecto a corriente asignada (dimensionado térmico) de cada arrollamiento, que en el caso de los arrollamientos de estabilización es la tercera parte de la de los arrollamientos primario y secundario.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador					
		Transformador #D			Transformador #E		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	8,04	8,04	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	6,50	3,52	8,96	5,33	2,51	8,44
	PAT / AIS	6,20	2,60	10,78	5,20	2,07	9,38
	AIS / PAT	2,24	2,24	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	2,24	2,24	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,53	12,65	15,35	6,88	11,33	13,33
	PAT / AIS	2,49	2,49	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	5,23	11,33	18,31	5,40	10,58	15,52
	AIS / AIS	2,49	2,49	-	1,89	1,89	-

**Tabla E.2. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #D y #E.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador					
		Transformador #F			Transformador #G		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	6,66	6,66	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,59	3,45	6,43	7,06	3,77	9,89
	PAT / AIS	5,27	2,31	8,89	5,35	2,04	9,93
	AIS / PAT	2,17	2,17	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	2,17	2,17	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,81	13,33	19,55	5,59	5,96	1,12
	PAT / AIS	2,32	2,32	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	4,23	11,57	22,02	2,74	4,42	5,03
	AIS / AIS	2,32	2,32	-	1,99	1,99	-

**Tabla E.3. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #F y #G.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

Las principales conclusiones que se pueden extraer de las tablas precedentes se presentan a continuación.

Desde un punto de vista cualitativo, en lo que respecta al comportamiento ante cortocircuito en relación a los tipos de falta y la conexión de los neutros, no existen diferencias relevantes entre los distintos tipos de transformadores, con la salvedad del transformador #G. Es decir, la ubicación del arrollamiento de estabilización es la característica constructiva que ofrece un papel más relevante en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella. Esta circunstancia puede explicarse en relación con la configuración que se establece en los flujos magnéticos de dispersión entre arrollamientos en función de la ubicación del arrollamiento de estabilización. Ello se puede visualizar y cuantificar en la tabla E.4 con la comparación de las impedancias de secuencia directa medidas y los parámetros de los circuitos en T a secuencia directa y homopolar de cada uno de los tipos de transformadores estudiados<sup>95</sup> y en la tabla E.5 si se comparan las impedancias homopolares que presentan cada uno de los transformadores en las configuraciones de ensayo con el arrollamiento no energizado en cortocircuito y el arrollamiento de estabilización cerrado. En este sentido, los transformadores con arrollamiento de estabilización externo presentan una impedancia homopolar  $Z_0$  (A1C) ligeramente inferior ante cortocircuitos en el lado secundario vista desde el lado primario y una impedancia homopolar  $Z_0$  (B1C) ante cortocircuitos en el lado primario vista desde el lado secundario aproximadamente cuatro veces superior

Impedancia (en %)		Transformador						
		#A	#B	#C	#D	#E	#F	#G
Secuencia Directa (entre arrollam)	$Z_{12}$	11,17	10,80	13,90	10,94	11,0	14,26	14,09
	$Z_{13}$	18,69	20,04	21,21	18,33	17,7	20,97	17,56
	$Z_{23}$	5,19	6,33	4,95	5,37	4,8	4,83	35,20
Secuencia Directa (en T)	$Z_1$	12,34	12,26	15,08	11,95	11,95	15,20	-1,78
	$Z_2$	-1,17	-1,46	-1,18	-1,01	-0,95	-0,94	15,87
	$Z_3$	6,36	7,79	6,13	6,38	5,75	5,77	19,34
Secuencia Homopolar (en T)	$Z'_{01}$	10,52	9,79	13,66	10,14	11,38	14,13	-1,59
	$Z'_{02}$	-0,45	-0,42	-0,74	0,31	-0,68	-0,61	15,65
	$Z'_{03}$	5,64	5,99	5,54	5,41	5,39	5,58	18,48

**Tabla E.4. Comparación de las impedancias de secuencia directa medidas y los parámetros de los circuitos en T a secuencia directa y homopolar de uno de los tipos de transformadores estudiados.**

<sup>95</sup> La ubicación externa del arrollamiento de estabilización determina una  $Z_{23}$  mucho más elevada y, en los modelos de circuito equivalente en T (tanto a secuencia directa como a secuencia homopolar) supone una inversión entre los parámetros  $Z_1$  y  $Z_2$  (y  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ ) y un valor de  $Z_3$  (y  $Z_{03}$ ) aproximadamente tres veces superior.

Impedancia homopolar (en %)	Transformador						
	#A	#B	#C	#D	#E	#F	#G
$Z_0$ (A0C)	16,21	15,76	19,2	15,69	16,87	19,41	16,85
$Z_0$ (A1C)	10,00	9,35	12,8	9,73	10,55	13,45	6,90
$Z_0$ (B0C)	5,16	5,58	4,8	5,06	4,69	4,68	34,20
$Z_0$ (B1C)	3,23	3,29	3,2	3,25	3,00	3,24	13,88

**Tabla E.5. Comparación de las impedancias homopolares en las distintas configuraciones de ensayo obtenidas en cada uno de los tipos de transformadores estudiados.**

Por su parte, la existencia o no de pantallas magnéticas o la potencia y tensiones asignadas del transformador no implican diferencias cuantitativas ni cualitativas importantes.

En lo que respecta a las conexiones de los neutros primario y secundario de los transformadores, como era de esperar, la configuración con puesta a tierra en ambos neutros es la que supone una mayor corriente de cortocircuito en los arrollamientos primario y secundario, tanto en el caso de cortocircuitos monofásicos en la red primaria como en el caso de cortocircuitos monofásicos de la red secundaria. Como se puede deducir de los circuitos equivalentes de las figuras 7.2 (a) y 7.3 (a), el parámetro del transformador que resulta más determinante en la ocurrencia de altas corrientes de cortocircuito es la impedancia del circuito equivalente a secuencia homopolar que adopte un valor más pequeño (o incluso negativo), siendo éste  $Z_{02}$  para transformadores con arrollamiento de estabilización ubicado internamente y  $Z_{01}$  para transformadores con arrollamiento de estabilización ubicado externamente. En el caso de transformadores con arrollamiento de estabilización interno, esto se traduce en unas elevadísimas corrientes de cortocircuito circulantes por el arrollamiento secundario para faltas monofásicas en la red secundaria (que pueden llegar a ser entre 1,5 y 2 veces la corriente en el caso de un cortocircuito trifásico). En el caso de transformadores con arrollamiento de estabilización externo, la situación equivalente se produce con las corrientes de cortocircuito circulantes por el arrollamiento primario para faltas monofásicas en la red primaria, si bien la magnitud es significativamente menos relevante aunque se llega a superar la corriente circulante durante cortocircuitos trifásicos.

Las menores corrientes de cortocircuito primarias y secundarias se dan en las configuraciones con el neutro aislado del lado donde se produce el cortocircuito monofásico, es decir, las configuraciones AIS/PAT y AIS/AIS en caso de cortocircuitos en la red primaria y las configuraciones PAT/AIS y AIS/AIS en caso de cortocircuitos en la red secundaria.

En lo relativo a las corrientes circulantes por el arrollamiento de estabilización, se pueden deducir también conclusiones muy significativas de las simulaciones de cortocircuito expuestas. En transformadores con arrollamiento de estabilización interno, las mayores corrientes de cortocircuito en dicho arrollamiento se dan en el caso de faltas monofásicas en el lado secundario en configuraciones PAT/PAT y AIS/PAT (la configuración AIS/PAT es incluso más nociva que la PAT/PAT). Aunque de menor magnitud, también se producen corrientes de cortocircuito en el arrollamiento de estabilización de valor muy elevado en faltas monofásicas en el lado primario y configuraciones PAT/PAT y PAT/AIS.

Por su parte, en transformadores con arrollamiento de estabilización externo, se producen elevadas corrientes de cortocircuito por dicho arrollamiento en faltas monofásicas en el lado primario en configuraciones PAT/PAT y PAT/AIS, si bien los valores alcanzados son, en general, menores que en transformadores con arrollamiento de estabilización interno.

### **E.1.2. Influencia de la potencia de cortocircuito de la red**

Intuitivamente, cabría esperar que las pautas de comportamiento indicadas anteriormente fueran aplicables independientemente de la potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. También cabría esperar que las corrientes de cortocircuito fueran creciendo proporcionalmente al crecimiento de la potencia de cortocircuito de la red. A continuación, se van a contrastar ambas hipótesis valorando cuantitativamente la influencia de la potencia de cortocircuito de la red en las corrientes de cortocircuito circulantes por cada uno de los arrollamientos del transformador.

No habiéndose encontrado diferencias significativas en el comportamiento de diferentes transformadores de una misma tipología constructiva, se presentan en las tablas E.6, E.7 y E.8 los resultados de las simulaciones de tres de los transformadores en diferentes escenarios de potencia de cortocircuito.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>96</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
Trifásica	-	8,47	8,47	-	8,47	8,47	-	8,47	8,47	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,61	5,25	7,07	5,92	2,73	9,57	3,97	0,47	10,51
	PAT / AIS	6,84	3,19	10,94	5,68	2,07	10,82	3,94	0,40	10,64
	AIS / PAT	2,88	2,88	-	1,87	1,87	-	0,36	0,36	-
	AIS / AIS	2,88	2,88	-	1,87	1,87	-	0,36	0,36	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	8,56	15,52	20,85	8,53	12,84	12,93	8,51	11,23	8,16
	PAT / AIS	3,01	3,01	-	2,25	2,25	-	0,56	0,56	-
	AIS / PAT	4,78	12,61	23,51	5,91	11,34	16,30	6,73	10,42	11,08
	AIS / AIS	3,01	3,01	-	2,25	2,25	-	0,56	0,56	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
		Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-	2,79
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,75	3,05	8,11	3,34	0,56	8,35	2,22	0,72	4,53
	PAT / AIS	5,55	2,46	9,28	3,32	0,50	8,47	2,22	0,68	4,60
	AIS / PAT	1,68	1,68	-	0,35	0,35	-	0,32	0,32	-
	AIS / AIS	1,68	1,68	-	0,35	0,35	-	0,32	0,32	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,87	10,24	13,10	6,07	8,58	7,53	2,66	4,25	4,76
	PAT / AIS	1,83	1,83	-	0,53	0,53	-	0,42	0,42	-
	AIS / PAT	4,57	9,55	14,93	5,27	8,27	8,99	2,53	4,22	5,06
	AIS / AIS	1,83	1,83	-	0,53	0,53	-	0,42	0,42	-

**Tabla E.6. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)**

<sup>96</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>97</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
Trifásica	-	8,51	8,51	-	8,51	8,51	-	8,51	8,51	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,18	4,98	6,62	5,43	2,32	9,34	4,04	0,70	10,02
	PAT / AIS	6,59	3,11	10,42	5,28	1,84	10,34	4,01	0,60	10,23
	AIS / PAT	2,89	2,89	-	1,71	1,71	-	0,56	0,56	-
	AIS / AIS	2,89	2,89	-	1,71	1,71	-	0,56	0,56	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	8,65	16,68	24,07	8,59	13,04	14,35	8,56	11,66	9,27
	PAT / AIS	3,03	3,03	-	2,11	2,11	-	0,84	0,84	-
	AIS / PAT	4,96	13,81	26,54	6,30	11,81	16,54	6,90	10,92	12,06
	AIS / AIS	3,03	3,03	-	2,11	2,11	-	0,84	0,84	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
		Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-	4,35
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,33	2,51	8,44	3,73	0,79	8,83	3,05	0,97	6,25
	PAT / AIS	5,20	2,07	9,38	3,71	0,70	9,02	3,04	0,90	6,40
	AIS / PAT	1,61	1,61	-	0,55	0,55	-	0,51	0,51	-
	AIS / AIS	1,61	1,61	-	0,55	0,55	-	0,51	0,51	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,88	11,33	13,33	6,97	9,93	8,87	4,14	6,49	7,05
	PAT / AIS	1,89	1,89	-	0,80	0,80	-	0,68	0,68	-
	AIS / PAT	5,40	10,58	15,52	5,94	9,51	10,71	3,82	6,40	7,73
	AIS / AIS	1,89	1,89	-	0,80	0,80	-	0,68	0,68	-

**Tabla E.7. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)**

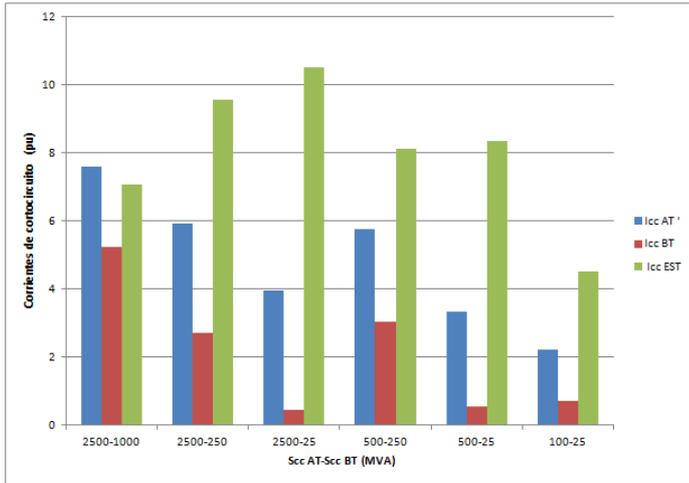
<sup>97</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>98</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
Trifásica	-	6,74	6,74	-	6,74	6,74	-	6,74	6,74	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	8,43	4,90	10,59	7,21	3,72	10,47	5,00	1,58	10,26
	PAT / AIS	5,79	2,36	10,30	5,38	1,95	10,27	4,36	0,97	10,19
	AIS / PAT	2,19	2,19	-	1,81	1,81	-	0,90	0,90	-
	AIS / AIS	2,19	2,19	-	1,81	1,81	-	0,90	0,90	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,31	6,42	0,33	6,34	6,45	0,31	6,41	6,49	0,26
	PAT / AIS	2,34	2,34	-	2,07	2,07	-	1,22	1,22	-
	AIS / PAT	2,79	4,51	5,15	2,85	4,54	5,07	3,00	4,63	4,88
	AIS / AIS	2,34	2,34	-	2,07	2,07	-	1,22	1,22	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>3</sub> (pu)
		Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-	4,98
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,06	3,77	9,89	4,87	1,61	9,76	4,33	1,75	7,74
	PAT / AIS	5,35	2,04	9,93	4,28	1,02	9,78	3,92	1,24	8,03
	AIS / PAT	1,78	1,78	-	0,89	0,89	-	0,84	0,84	-
	AIS / AIS	1,78	1,78	-	0,89	0,89	-	0,84	0,84	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,59	5,96	1,12	5,71	6,03	0,95	3,74	4,59	2,57
	PAT / AIS	1,99	1,99	-	1,19	1,19	-	1,05	1,05	-
	AIS / PAT	2,74	4,42	5,03	2,91	4,51	4,81	2,45	3,94	4,46
	AIS / AIS	1,99	1,99	-	1,19	1,19	-	1,05	1,05	-

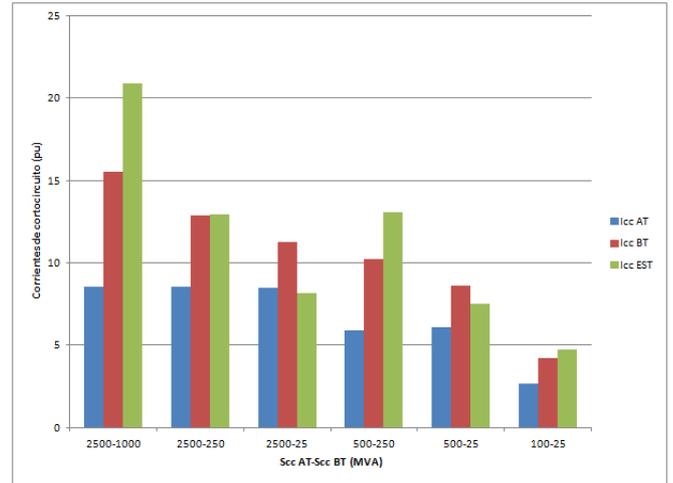
**Tabla E.8. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)**

En las tablas anteriores se pueden apreciar unas pautas de comportamiento bastante homogéneas, respecto a la sensibilidad de las corrientes de cortocircuito ante variaciones en las potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria, en cada una de las tres tipologías de transformadores. Dado que posiblemente sea la conexión a tierra de ambos neutros del transformador la configuración más representativa, se van a complementar a continuación dichas tablas con una serie de figuras que permitirán complementar gráficamente la información contenida en las tablas.

<sup>98</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.

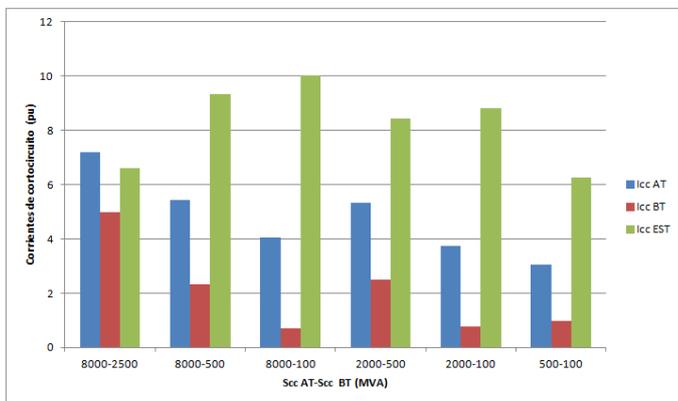


(a)

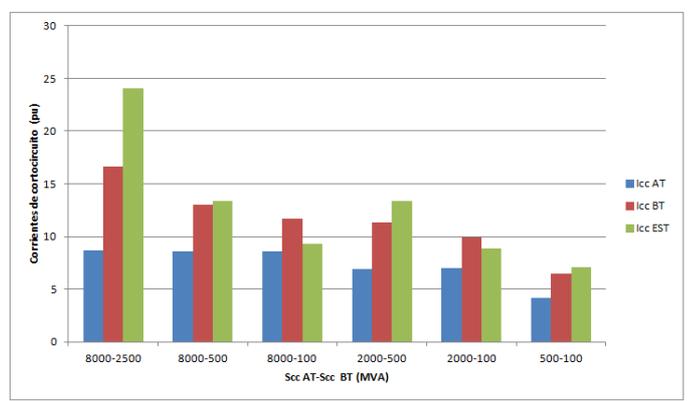


(b)

Figura E.1. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (#1) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.  
 (a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

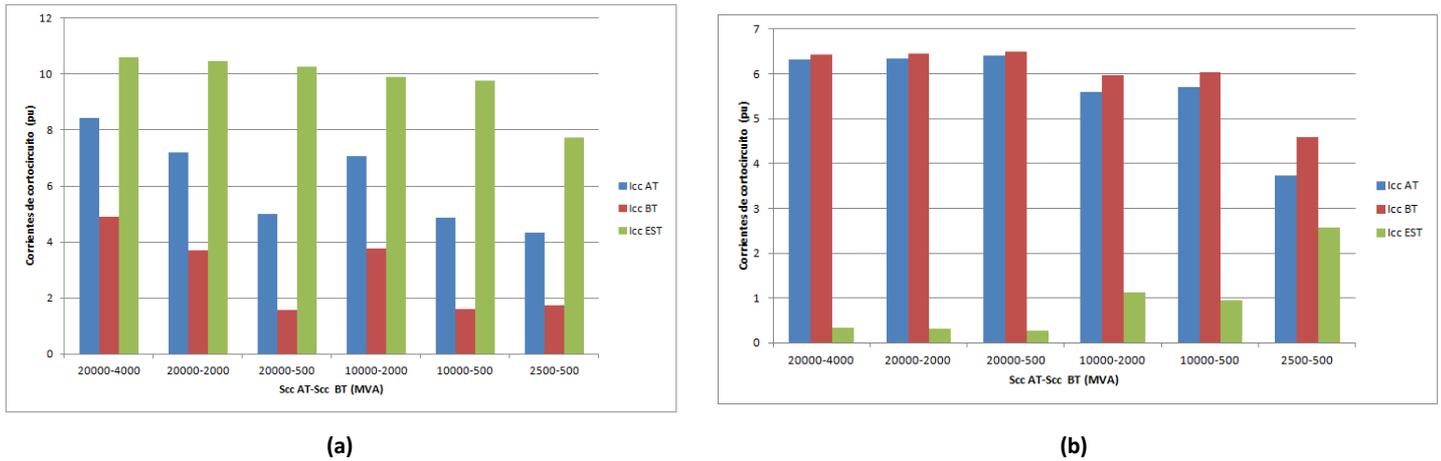


(a)



(b)

Figura E.2. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (#2) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.  
 (a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)



**Figura E.3. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (#3) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)**

A partir de la información de las tablas y figuras precedentes se puede concluir, como regla general, que las corrientes de cortocircuito de los arrollamientos primario y secundario aumentan al aumentar las potencias de cortocircuito de la red. La influencia de la potencia de cortocircuito en la red secundaria genera una mayor sensibilidad en los valores de las corrientes de cortocircuito.

Sin embargo, esto no ocurre siempre de esta forma en el caso de la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización. En el caso de transformadores con arrollamiento de estabilización interno, e independientemente de la existencia o no de pantallas magnéticas, la corriente del arrollamiento de estabilización es creciente con potencias de cortocircuito crecientes de la red primaria (tanto en cortocircuitos primarios como secundarios) pero, sin embargo, en la configuración PAT / PAT y ante cortocircuitos monofásicos en la red primaria, la corriente por el arrollamiento de estabilización es creciente ante potencias de cortocircuito de la red secundaria decrecientes. Es decir, en esta tipología de transformadores con estas configuraciones y tipos de cortocircuito, las corrientes circulantes por los arrollamientos de estabilización son más nocivas en redes de menores potencias de cortocircuito en el lado secundario<sup>99</sup>.

Esta situación no ocurre en el caso de los transformadores con arrollamiento de estabilización externo en el caso de los cortocircuitos en la red primaria, pero, sin embargo, en el caso de cortocircuitos en la red secundaria sí que se observa un repunte de la corriente del arrollamiento de estabilización con menores potencias de cortocircuito<sup>100</sup>.

Independientemente de los matices indicados anteriormente, la principal conclusión respecto a la influencia de las potencias de cortocircuito de la red en las corrientes de cortocircuito circulantes por los arrollamientos de transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización es

<sup>99</sup> Este hecho se explica, observando en la figura 7.2 (a) las impedancias en paralelo  $Z'_{03}$  y  $(Z'_{02} + Z_{0,red BT})$ , siendo  $Z_{02}$  una impedancia de valor negativo en esta tipología de transformadores, de forma que la corriente de cortocircuito circulante por el arrollamiento de estabilización puede llegar a ser mayor con valores más pequeños de  $Z_{0,red BT}$ .

<sup>100</sup> De igual forma que en la nota de pie de página anterior, este hecho se explica por el valor negativo de la impedancia  $Z'_{01}$  del transformador #G.

que la corriente circulante por dicho arrollamiento adopta valores muy elevados en la práctica totalidad de los casos analizados en transformadores de las tipologías #1 y #2. Son especialmente peligrosas las corrientes de cortocircuito en los arrollamientos de estabilización en cortocircuitos en la red secundaria cuando el neutro de dicho lado se encuentra puesto a tierra. La potencia de cortocircuito puede tener una influencia significativa en los valores de las corrientes de cortocircuito.

Sin embargo, en transformadores con arrollamiento de estabilización externo la influencia de la potencia de cortocircuito tiene menos influencia sobre los valores de las corrientes de cortocircuito. En este caso, el mayor riesgo sobre el arrollamiento de estabilización se produce con cortocircuitos en la red primaria, estando dicho neutro puesto a tierra.

### E.1.3. Influencia de la relación $Z_0 / Z_1$ de la red

Como se ha indicado anteriormente, utilizar una relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa igual a tres es la práctica habitualmente empleada en los análisis de red de sistemas eléctricos. Esta relación responde especialmente a redes esencialmente compuestas por líneas aéreas. Sin embargo, en caso de nudos de red propios de entornos urbanos alimentados por líneas subterráneas construidas con configuraciones de pantalla tipo *solid bonding* (es decir, con las pantallas puestas a tierra en ambos extremos de la línea), la relación entre las impedancias a secuencia homopolar y a secuencia directa de la red es próxima a la unidad. En situaciones mixtas entre ambos escenarios, la relación  $Z_0 / Z_1$  de la red adopta valores intermedios entre uno y tres.

De forma análoga al caso anterior, se presenta a continuación la información de diversas simulaciones orientadas a valorar la influencia de la relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,62	4,20	4,27	5,72	3,46	6,75	5,75	3,05	8,11
	PAT / AIS	5,30	3,27	6,09	5,47	2,73	8,20	5,55	2,46	9,28
	AIS / PAT	2,97	2,97	-	2,15	2,15	-	1,68	1,68	-
	AIS / AIS	2,97	2,97	-	2,15	2,15	-	1,68	1,68	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,55	9,97	10,27	6,16	10,20	12,13	5,87	10,24	13,10
	PAT / AIS	3,48	3,48	-	2,40	2,40	-	1,83	1,83	-
	AIS / PAT	4,90	8,96	12,18	4,67	9,38	14,13	4,57	9,55	14,93
	AIS / AIS	3,48	3,48	-	2,40	2,40	-	1,83	1,83	-

**Tabla E.9. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.**

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,09	3,64	4,33	5,25	2,93	6,96	5,33	2,51	8,44
	PAT / AIS	4,87	2,94	5,80	5,08	2,37	8,13	5,20	2,07	9,38
	AIS / PAT	2,78	2,78	-	2,04	2,04	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	2,78	2,78	-	2,04	2,04	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,35	11,05	11,10	7,10	11,29	12,58	6,88	11,33	13,33
	PAT / AIS	3,70	3,70	-	2,50	2,50	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	5,66	10,07	13,21	5,47	10,43	14,87	5,40	10,58	15,52
	AIS / AIS	3,70	3,70	-	2,50	2,50	-	1,89	1,89	-

**Tabla E.10. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.**

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	6,79	4,78	6,01	7,08	4,25	8,49	7,06	3,77	9,89
	PAT / AIS	5,06	3,11	5,85	5,25	2,43	8,45	5,35	2,04	9,93
	AIS / PAT	3,02	3,02	-	2,24	2,24	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	3,02	3,02	-	2,24	2,24	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,43	6,42	-0,03	6,00	6,19	0,55	5,59	5,96	1,12
	PAT / AIS	3,69	3,69	-	2,59	2,59	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	3,99	5,10	3,32	3,16	4,65	4,46	2,74	4,42	5,03
	AIS / AIS	3,69	3,69	-	2,59	2,59	-	1,99	1,99	-

Tabla E.11. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

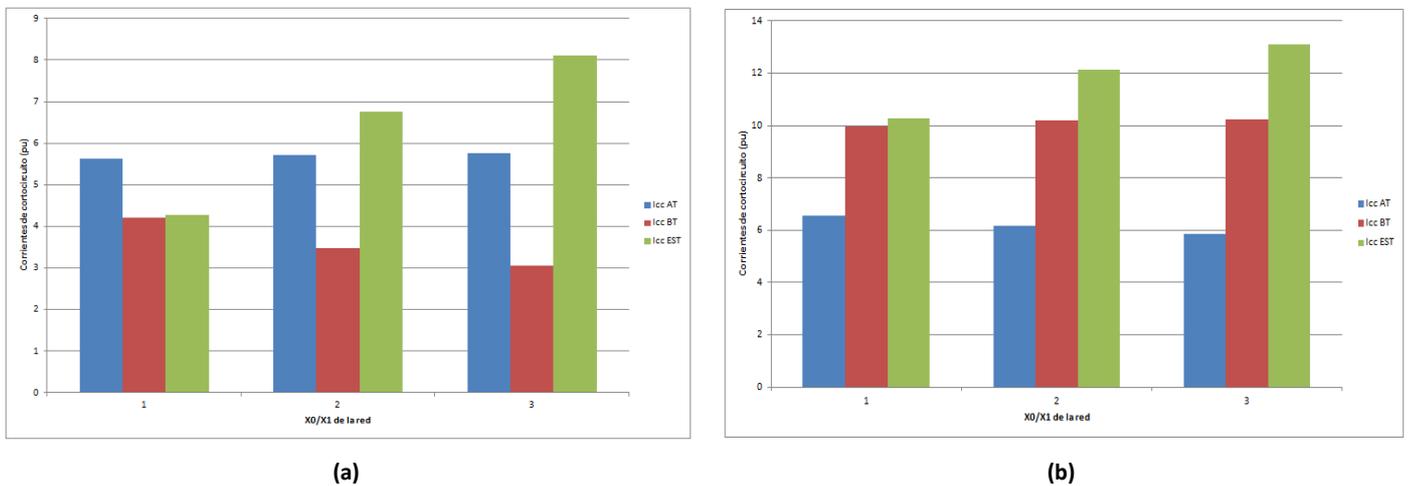


Figura E.4. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

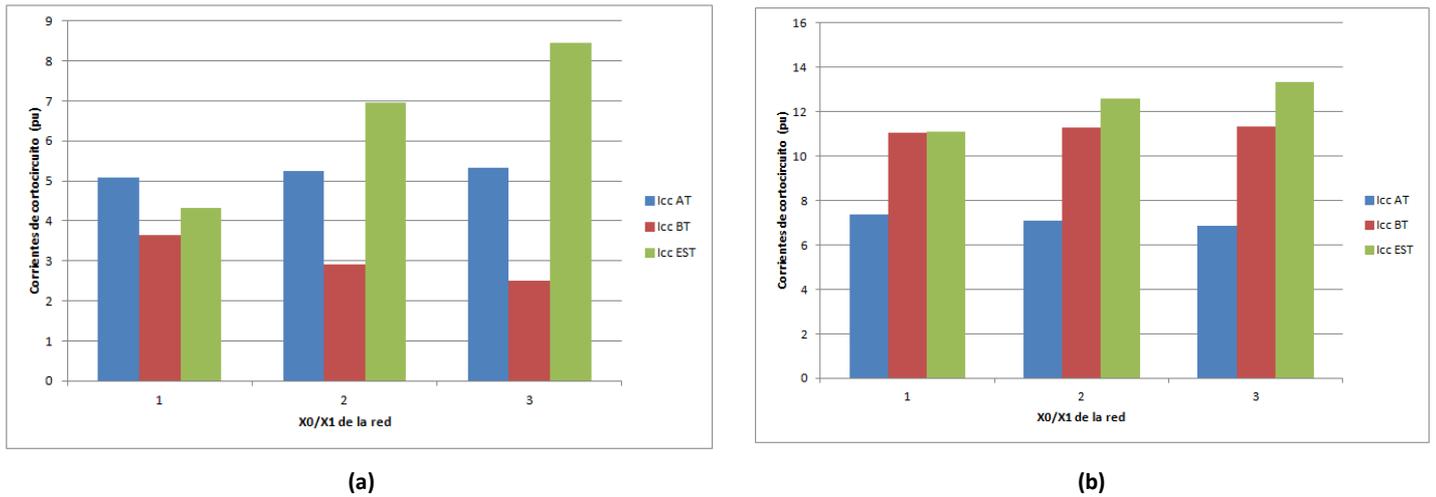


Figura E.5. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

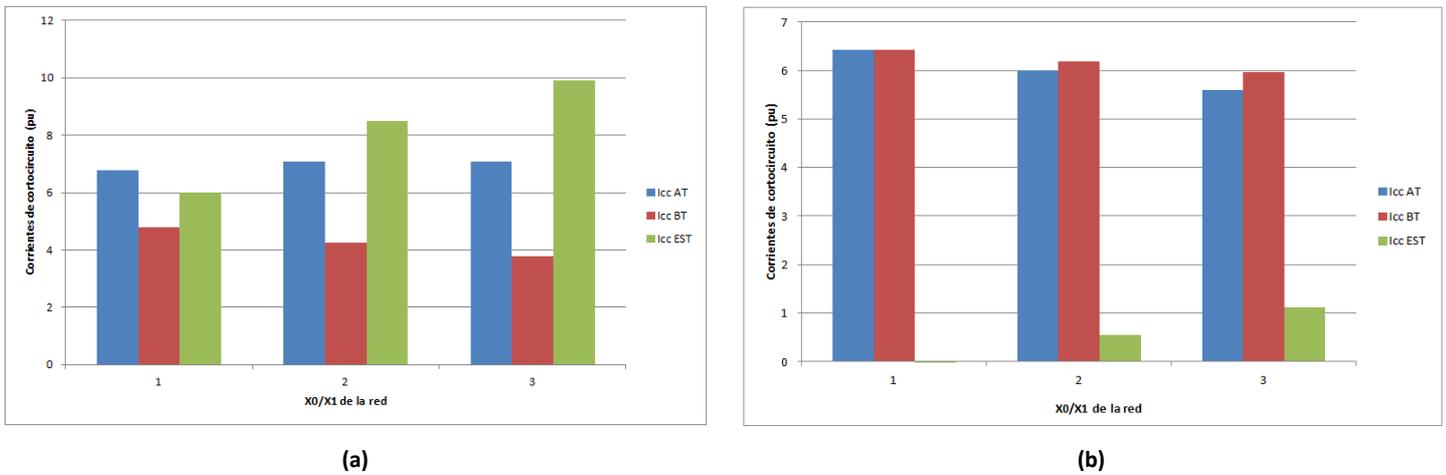


Figura E.6. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado; Posición de los CTC = Toma central)

A diferencia del apartado anterior, en este caso, se observan variaciones relativas bastante menores en los arrollamientos principales frente a los que se producen en el arrollamiento de estabilización.

La influencia más destacable de la relación  $Z_0 / Z_1$  se da en las corrientes circulantes por el arrollamiento de estabilización durante los cortocircuitos monofásicos en la red primaria. En este caso, las corrientes más elevadas suceden en escenarios de redes aéreas o rurales (ratio próximo a

3), mientras que dichas corrientes pueden reducirse un 30-50 % en redes urbanas (ratio próximo a la unidad). Por su parte, las corrientes de cortocircuito primarias y secundarias tienen un comportamiento ligeramente decreciente desde un ratio 1 a un ratio 3. Todo ello ocurre de forma bastante homogénea en todas las tipologías constructivas de los transformadores.

### E.1.4. Influencia de la posición del cambiador de tomas en carga del transformador

En los transformadores de potencia de tres columnas con regulación en carga, la práctica constructiva habitual consiste en disponer el arrollamiento de regulación en serie con el arrollamiento primario y ubicarlo como arrollamiento más externo. Este es el caso de todos los transformadores objeto de estudio.

En los transformadores estudiados el factor de regulación (variación de tensión entre la toma máxima/mínima y la toma central) es del  $\pm 15\%$  para los transformadores con tensión nominal primaria de 220 kV, del  $\pm 12\%$  para los transformadores con tensión nominal primaria de 132 kV y del  $\pm 10\%$  para los transformadores con tensión nominal primaria de 45 kV.

Siguiendo la misma estructura de los apartados anteriores, se presentan a continuación los resultados de algunas simulaciones que permiten valorar la sensibilidad de las corrientes de cortocircuito respecto a la posición del cambiador de tomas en carga.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #B								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	6,45	6,45	-	6,33	6,33	-	6,10	6,10	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,75	3,08	8,01	5,75	3,05	8,11	5,61	2,96	7,96
	PAT / AIS	5,55	2,48	9,19	5,55	2,46	9,28	5,42	2,39	9,11
	AIS / PAT	1,70	1,70	-	1,68	1,68	-	1,64	1,64	-
	AIS / AIS	1,70	1,70	-	1,68	1,68	-	1,64	1,64	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,98	10,37	13,17	5,87	10,24	13,10	5,67	9,99	12,96
	PAT / AIS	1,86	1,86	-	1,83	1,83	-	1,79	1,79	-
	AIS / PAT	4,65	9,66	15,01	4,57	9,55	14,93	4,42	9,34	14,76
	AIS / AIS	1,86	1,86	-	1,83	1,83	-	1,79	1,79	-

Tabla E.12. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.

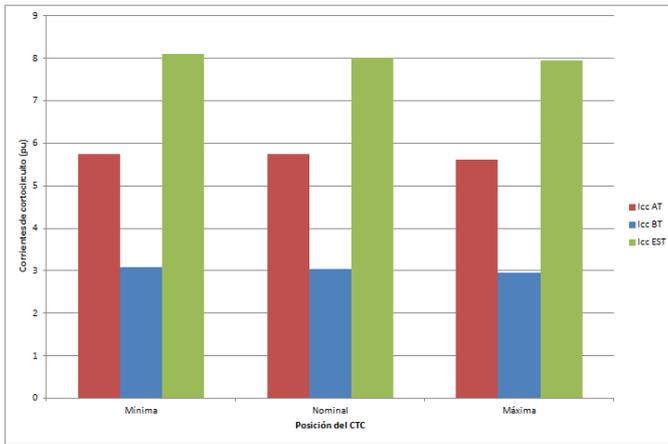
(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #E								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	7,41	7,41	-	7,14	7,14	-	6,76	6,76	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,46	2,58	8,65	5,33	2,51	8,44	5,11	2,41	8,10
	PAT / AIS	5,32	2,12	9,01	5,20	2,07	9,38	4,99	1,98	9,61
	AIS / PAT	1,65	1,65	-	1,61	1,61	-	1,56	1,56	-
	AIS / AIS	1,65	1,65	-	1,61	1,61	-	1,56	1,56	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,12	11,61	13,46	6,88	11,33	13,33	6,53	10,91	13,14
	PAT / AIS	1,93	1,93	-	1,89	1,89	-	1,82	1,82	-
	AIS / PAT	5,58	10,81	15,71	5,40	10,58	15,52	5,14	10,22	15,23
	AIS / AIS	1,93	1,93	-	1,89	1,89	-	1,82	1,82	-

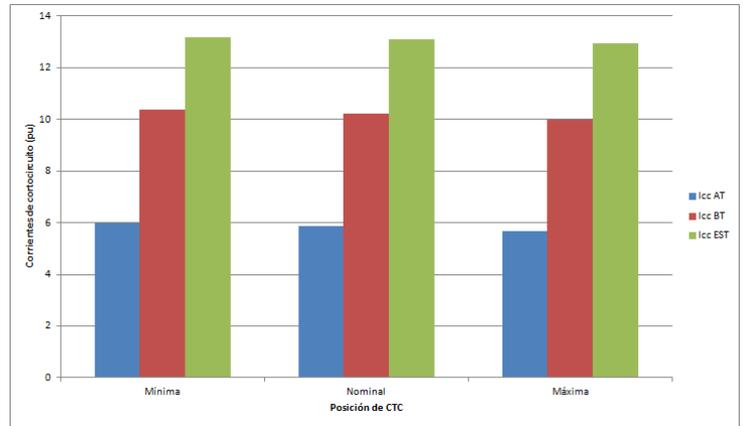
**Tabla E.13. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #G								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_3$ (pu)
Trifásica	-	6,31	6,31	-	6,41	6,41	-	6,05	6,05	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,64	3,43	6,63	7,06	3,77	9,89	8,31	3,91	13,20
	PAT / AIS	4,36	1,95	7,23	5,35	2,04	9,93	6,26	2,03	12,68
	AIS / PAT	1,76	1,76	-	1,78	1,78	-	1,71	1,71	-
	AIS / AIS	1,76	1,76	-	1,78	1,78	-	1,71	1,71	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,40	6,05	1,95	5,59	5,96	1,12	5,41	5,61	0,59
	PAT / AIS	1,96	1,96	-	1,99	1,99	-	1,90	1,90	-
	AIS / PAT	2,70	4,38	5,02	2,74	4,42	5,03	2,61	4,28	4,99
	AIS / AIS	1,96	1,96	-	1,99	1,99	-	1,90	1,90	-

**Tabla E.14. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)



(a)

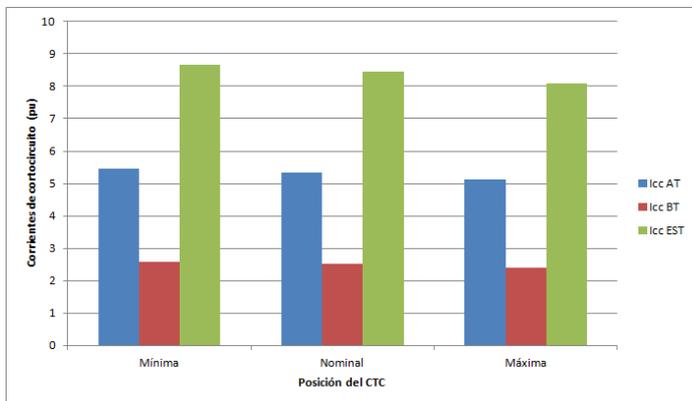


(b)

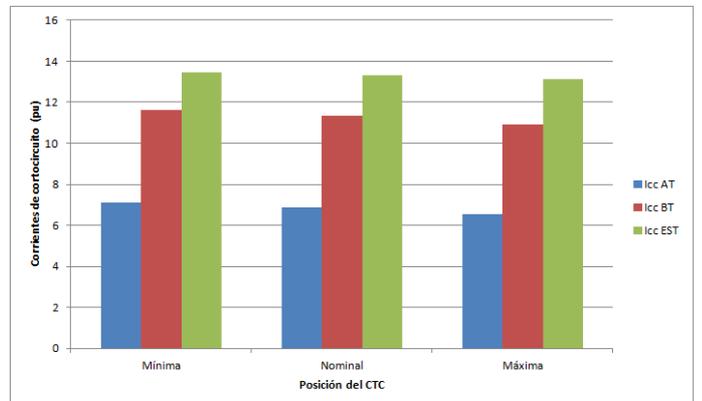
**Figura E.7. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)



(a)

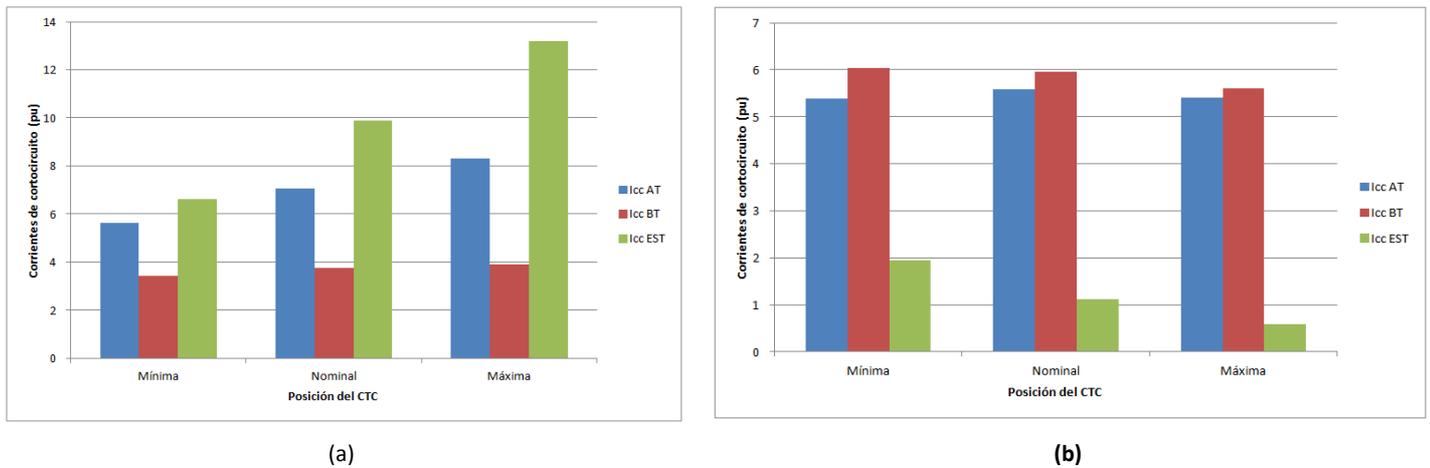


(b)

**Figura E.8. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)



**Figura E.9. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)**

Con carácter general, la influencia de la posición del cambiador de tomas en carga es prácticamente irrelevante en la gran mayoría de los casos. Es de destacar el hecho de que, incluso en el caso del transformador #E que representa una singularidad por disponer de tipología de regulación fina-gruesa, no se observan diferencias significativas.

La excepción a la afirmación del párrafo anterior la encontramos en el transformador #G, único transformador de los estudiados de la tipología constructiva #3, es decir con arrollamiento de estabilización externo. En este caso, existe una variación de cierta consideración en la corriente primaria y, especialmente, en la corriente circulante por el arrollamiento de estabilización en el caso de cortocircuitos monofásicos en la red primaria con configuraciones de neutro puesto a tierra en dicho lado. Como se vio en apartados anteriores, se trata precisamente de los eventos y configuraciones de mayor riesgo para la integridad electrodinámica del transformador. Desde el punto de vista experimental, este hecho tiene su causa en la mayor variación observada (entre las tomas de regulación) de las impedancias  $Z_{0(A0C)}$  y  $Z_{0(A1C)}$ <sup>101</sup> del transformador de tipología #3 frente a los de tipología #1 y #2, como se puede comprobar en las tablas B.1, B.2 y B.3.

<sup>101</sup> A pesar de que dentro de la tipología constructiva #3 sólo se dispone de un conjunto completo de medidas de impedancia homopolar para el transformador #G, se ha podido comprobar en otros dos diseños de transformadores con la misma tipología constructiva de arrollamiento de estabilización externo que estas dos medidas ( $Z_0(A0C)$  y  $Z_0(A1C)$ ) presentaban igualmente una variación significativa.

## E.2. Corrientes de cortocircuito de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto

De forma análoga al análisis realizado para los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización cerrado, se presenta a continuación el comportamiento de las corrientes de cortocircuito de los transformadores con arrollamiento de estabilización abierto ante diferentes variables. La estructura formal en la que se presentarán los resultados de estas nuevas simulaciones será totalmente homogénea al caso anterior para facilitar la comparación de ambas situaciones.

Las simulaciones se han realizado en este caso mediante los circuitos de cálculo presentados en las figuras 7.2 (b) y 7.3 (b). Para valorar la magnitud de las corrientes en caso de cortocircuitos asimétricos se compararán con las de cortocircuitos trifásicos calculados según la figura 7.1 (la existencia y ubicación del arrollamiento de estabilización es indiferente en este tipo de cortocircuito).

Además de las corrientes circulantes en los arrollamientos primario y secundario, se indicarán también las corrientes de secuencia homopolar no compensadas entre los arrollamientos (corrientes circulantes por la impedancia  $Z''_{0M}$  de las figuras 7.2 (b) y 7.3 (b)). En el caso de existir un arrollamiento de estabilización cerrado, se puede suponer sin gran error que dicha corriente no compensada es despreciable. No ocurre lo mismo en el caso de no existir dicho arrollamiento de estabilización. En este caso, como ya se ha explicado, la cuba actúa en cierta medida como si se tratara de un arrollamiento en triángulo por el que circulará una corriente que se denominará  $I_{0M}$  en las tablas y figuras de este apartado.

Este comportamiento de la cuba como arrollamiento de estabilización “virtual” se puede visualizar en la tabla E.15 observando que, en el circuito equivalente en T a secuencia homopolar, la impedancia que representa al arrollamiento intermedio (en este caso el arrollamiento primario, que se dispone más externamente al arrollamiento secundario y más internamente que la cuba actuando como arrollamiento en triángulo) adopta un valor próximo a cero o incluso negativo.

Impedancia (en %)		Transformador						
		#A	#B	#C	#D	#E	#F	#G
Impedancia de cortocircuito	$Z_{12}$	11,17	10,80	13,90	10,94	11,0	14,26	14,09
Secuencia Homopolar (en T)	$Z''_{01}$	1,26	1,08	2,6	1,02	3,87	4,96	-0,46
	$Z''_{02}$	10,20	9,53	11,53	10,06	7,27	9,12	14,61
	$Z''_{0M}$	74,46	77,84	108,69	68,59	150,27	131,7	88,99

Tabla E.15. Comparación de las impedancias de secuencia directa medidas y los parámetros de los circuitos en T a secuencia directa y homopolar de uno de los tipos de transformadores estudiados.

### E.2.1. Influencia del tipo de falta y la conexión del neutro en relación con la tipología constructiva de los transformadores

De la misma forma que ocurría en caso de que el arrollamiento de estabilización estuviese cerrado, los factores con una influencia más significativa para la magnitud de las corrientes de cortocircuito circulantes por los arrollamientos del transformador (en este caso, arrollamientos primario y secundario) son el tipo de falta (trifásica, monofásica en la red primario o monofásica en la red secundaria) y las posibles configuraciones respecto a los neutros de los arrollamientos primario y secundario.

A continuación se muestra en las tablas E.16, E.17 y E.18 las corrientes de cortocircuito circulantes por cada uno de los arrollamientos en cada uno de los siete tipos de transformadores analizados.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador								
		Transformador #A			Transformador #B			Transformador #C		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}^{102}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,06	7,06	-	6,33	6,33	-	6,49	6,49	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,14	4,45	0,70	4,18	3,51	0,67	3,24	2,74	0,58
	PAT / AIS	3,07	2,26	0,81	2,65	1,88	0,77	2,07	1,53	0,60
	AIS / PAT	2,11	2,11	-	1,68	1,68	-	1,49	1,49	-
	AIS / AIS	2,11	2,11	-	1,68	1,68	-	1,49	1,49	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,76	6,09	0,33	4,94	5,32	0,39	5,86	6,02	0,16
	PAT / AIS	2,25	2,25	-	1,83	1,83	-	1,77	1,77	-
	AIS / PAT	2,56	3,31	0,75	2,24	2,98	0,74	2,13	2,69	0,56
	AIS / AIS	2,25	2,25	-	1,83	1,83	-	1,77	1,77	-

**Tabla E.16. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #A, #B y #C.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

<sup>102</sup> En el caso de las simulaciones con arrollamiento de estabilización abierto, la corriente  $I_{0M}$  se expresará en valores por unidad respecto a la potencia asignada del transformador.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador					
		Transformador #D			Transformador #E		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	8,04	8,04	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,26	4,46	0,80	3,38	3,03	0,58
	PAT / AIS	3,20	2,33	0,87	2,07	1,67	0,62
	AIS / PAT	2,24	2,24	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	2,24	2,24	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,06	7,31	0,25	6,00	6,20	0,20
	PAT / AIS	2,49	2,49	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	2,86	3,68	0,82	2,19	2,63	0,44
	AIS / AIS	2,49	2,49	-	1,89	1,89	-

**Tabla E.17. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #D y #E.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Tipo de transformador					
		Transformador #F			Transformador #G		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,66	6,66	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,89	4,54	0,35	4,20	3,54	0,66
	PAT / AIS	2,63	2,19	0,44	2,52	1,83	0,68
	AIS / PAT	2,17	2,17	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	2,17	2,17	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,29	6,46	0,17	5,80	5,91	0,12
	PAT / AIS	2,32	2,32	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	2,43	2,89	0,45	2,27	2,89	0,62
	AIS / AIS	2,32	2,32	-	1,99	1,99	-

**Tabla E.18. Corrientes de cortocircuito en los transformadores #F y #G.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)

A continuación se muestran las principales conclusiones extraídas a partir de las tablas precedentes.

En lo relativo a las conexiones de los neutros primario y secundario de los transformadores, también en este caso la configuración con puesta a tierra en ambos neutros es la que supone una mayor corriente de cortocircuito en los arrollamientos primario y secundario, tanto en el caso de

cortocircuitos monofásicos en la red primaria como en el caso de cortocircuitos monofásicos de la red secundaria. Los valores en ambos tipos de falta son bastante parejos entre sí, siempre inferiores a los valores obtenidos en los cortocircuitos trifásicos (aunque relativamente próximos en los casos de cortocircuito en la red secundaria que, también ahora, generan corrientes de cortocircuito más elevadas que las debidas a cortocircuitos en la red primaria). Este comportamiento es análogo en todos los transformadores estudiados, tal y como cabría esperar observando los valores de las impedancias homopolares  $Z_0$  (A1A) y  $Z_0$  (B1A), mostrados en la tabla E.19.

En el resto de configuraciones en las que al menos uno de los neutros se encuentra aislado de tierra, las corrientes de cortocircuito primarias y secundarias se reducen significativamente sin diferencias relevantes entre los casos PAT/AIS, AIS/PAT y AIS/AIS, lo que ocurre de forma similar en los dos tipos de falta monofásica y en todos los transformadores.

Impedancia homopolar (en %)	Transformador						
	#A	#B	#C	#D	#E	#F	#G
$Z_0$ (A0A)	75,84	80,14	110,7	68,92	155,30	135,29	87,98
$Z_0$ (A1A)	10,22	9,43	13,1	9,89	10,73	13,63	12,17
$Z_0$ (B0A)	84,54	86,09	120,9	79,46	156,39	142,30	104,27
$Z_0$ (B1A)	11,46	10,76	14,0	10,95	11,13	13,76	14,06

**Tabla E.19. Comparación de las impedancias homopolares en las distintas configuraciones de ensayo obtenidas en cada uno de los tipos de transformadores estudiados.**

Por lo que respecta a la corriente  $I_{OM}$  (que, como se ha indicado anteriormente, se puede asimilar a corriente circulante a través de la cuba durante los cortocircuitos), se observa que la circulación de corrientes más relevante se producen en las configuraciones con un neutro puesto a tierra y otro aislado en los casos en los que el cortocircuito monofásico tiene lugar en la red del neutro aterrizado (es decir, cortocircuitos en red primaria para configuraciones PAT/AIS y cortocircuitos en red secundaria para configuraciones AIS/PAT). La magnitud de la corriente  $I_{OM}$  obtenida en las simulaciones en estos casos se sitúa en valores entre 0,4 y 0,9 p.u. El rango máximo se alcanza en transformadores sin pantallas magnéticas, siendo inferiores en el caso de disponer de dichas pantallas.

También se alcanzan valores similares, aunque algo inferiores, en el caso de cortocircuitos en la red primaria para configuraciones PAT/PAT.

Por su parte, en el caso de cortocircuitos en la red secundaria para configuraciones PAT/PAT, los valores de la corriente  $I_{OM}$  son significativamente menores.

La ocurrencia de valores de corriente  $I_{OM}$  de magnitudes como las mencionadas no pone en riesgo la integridad estructural o electrodinámica del transformador. La problemática asociada a estas corrientes radica en una adecuada detección y eliminación de las faltas monofásicas que las han generado, ya que de lo contrario se pueden producir calentamientos indeseables en el transformador tal y como se ha analizado en el capítulo 6.

### E.2.2. Influencia de la potencia de cortocircuito de la red

Se presenta a continuación un análisis de sensibilidad de los valores de las corrientes de cortocircuito en función de la potencia de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. A modo ilustrativo, dado que se ha identificado un comportamiento muy homogéneo en las diferentes tipologías constructivas, se presentan los resultados de los mismos transformadores representativos que se mostraron en el estudio realizado con el arrollamiento de estabilización cerrado.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>103</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	8,47	8,47	-	8,47	8,47	-	8,47	8,47	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	7,02	6,33	0,68	4,14	3,41	0,72	1,30	0,56	0,75
	PAT / AIS	3,72	2,94	0,77	2,68	1,91	0,76	1,12	0,37	0,75
	AIS / PAT	2,88	2,88	-	1,87	1,87	-	0,36	0,36	-
	AIS / AIS	2,88	2,88	-	1,87	1,87	-	0,36	0,36	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,73	7,93	0,20	7,83	8,01	0,17	7,95	8,09	0,14
	PAT / AIS	3,01	3,01	-	2,25	2,25	-	0,56	0,56	-
	AIS / PAT	3,17	3,89	0,72	2,77	3,54	0,77	2,02	2,89	0,87
	AIS / AIS	3,01	3,01	-	2,25	2,25	-	0,56	0,56	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-	2,79	2,79	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,18	3,51	0,67	1,28	0,58	0,71	1,21	0,64	0,58
	PAT / AIS	2,65	1,88	0,77	1,11	0,39	0,72	1,08	0,46	0,61
	AIS / PAT	1,68	1,68	-	0,35	0,35	-	0,32	0,32	-
	AIS / AIS	1,68	1,68	-	0,35	0,35	-	0,32	0,32	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	4,94	5,32	0,39	5,15	5,47	0,33	2,03	2,48	0,45
	PAT / AIS	1,83	1,83	-	0,53	0,53	-	0,42	0,42	-
	AIS / PAT	2,24	2,98	0,74	1,82	2,63	0,82	1,22	1,87	0,64
	AIS / AIS	1,83	1,83	-	0,53	0,53	-	0,42	0,42	-

**Tabla E.20. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

<sup>103</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>104</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	8,51	8,51	-	8,51	8,51	-	8,51	8,51	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	6,53	6,23	0,30	3,35	3,00	0,35	1,85	0,87	0,38
	PAT / AIS	3,31	2,91	0,40	2,11	2,72	0,39	0,95	0,56	0,39
	AIS / PAT	2,89	2,89	-	1,71	1,71	-	0,56	0,56	-
	AIS / AIS	2,89	2,89	-	1,71	1,71	-	0,56	0,56	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,86	8,02	0,16	7,97	8,10	0,13	8,05	8,16	0,11
	PAT / AIS	3,03	3,03	-	2,11	2,11	-	0,84	0,84	-
	AIS / PAT	3,12	3,52	0,40	2,45	2,91	0,45	1,61	2,13	0,51
	AIS / AIS	3,03	3,03	-	2,11	2,11	-	0,84	0,84	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-	4,35	4,35	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	3,38	3,03	0,34	1,25	0,88	0,37	1,26	0,91	0,35
	PAT / AIS	2,07	1,67	0,40	0,96	0,57	0,39	0,96	0,58	0,38
	AIS / PAT	1,61	1,61	-	0,55	0,55	-	0,51	0,51	-
	AIS / AIS	1,61	1,61	-	0,55	0,55	-	0,51	0,51	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,00	6,20	0,20	6,14	6,32	0,18	3,22	3,48	0,26
	PAT / AIS	1,89	1,89	-	0,80	0,80	-	0,68	0,68	-
	AIS / PAT	2,19	2,63	0,40	1,52	2,02	0,50	1,23	1,69	0,45
	AIS / AIS	1,89	1,89	-	0,80	0,80	-	0,68	0,68	-

**Tabla E.21. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

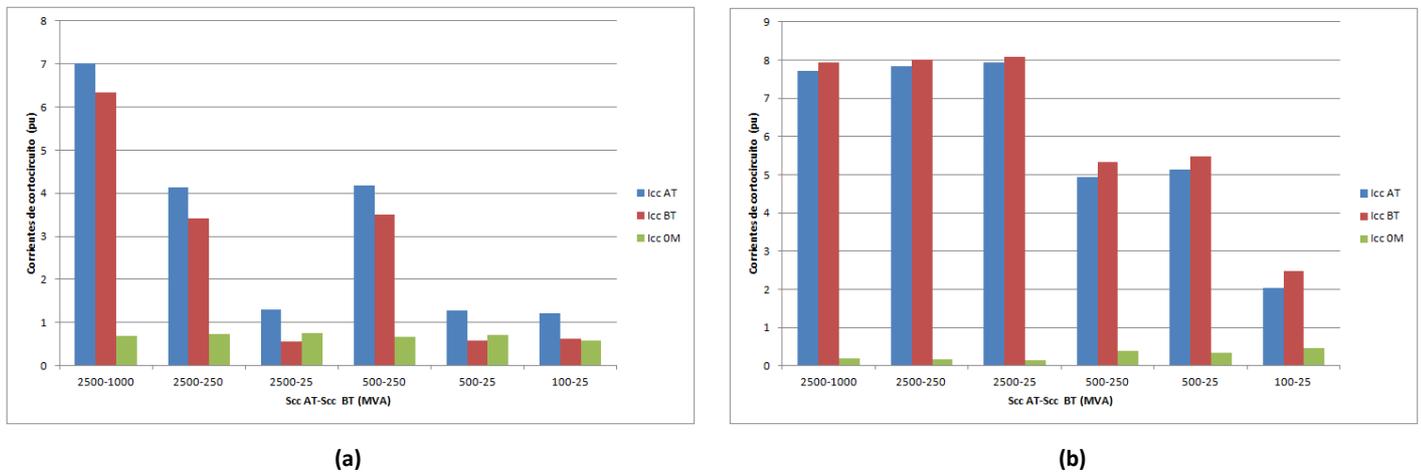
<sup>104</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Potencia de cortocircuito de la red primaria - Potencia de cortocircuito de la red secundaria <sup>105</sup>								
		Alta - Alta			Alta - Media			Alta - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)
Trifásica	-	6,74	6,74	-	6,74	6,74	-	6,74	6,74	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,32	4,64	0,67	4,19	3,52	0,67	2,17	1,50	0,67
	PAT / AIS	2,90	2,22	0,68	2,52	1,84	0,68	1,59	0,91	0,68
	AIS / PAT	2,19	2,19	-	1,81	1,81	-	0,90	0,90	-
	AIS / AIS	2,19	2,19	-	1,81	1,81	-	0,90	0,90	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,34	6,41	0,06	6,37	6,43	0,06	6,43	6,48	0,05
	PAT / AIS	2,34	2,34	-	2,07	2,07	-	1,22	1,22	-
	AIS / PAT	2,50	3,11	0,61	2,36	2,99	0,63	1,97	2,65	0,68
	AIS / AIS	2,34	2,34	-	2,07	2,07	-	1,22	1,22	-
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Media - Media			Media - Baja			Baja - Baja		
		I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)	I <sub>1</sub> (pu)	I <sub>2</sub> (pu)	I <sub>0M</sub> (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-	4,98	4,98	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,20	3,54	0,66	2,17	1,50	0,67	2,18	1,55	0,63
	PAT / AIS	2,52	1,83	0,68	1,59	0,92	0,67	1,60	0,94	0,66
	AIS / PAT	1,78	1,78	-	0,89	0,89	-	0,84	0,84	-
	AIS / AIS	1,78	1,78	-	0,89	0,89	-	0,84	0,84	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,80	5,91	0,12	5,89	5,99	0,10	3,96	4,23	0,27
	PAT / AIS	1,99	1,99	-	1,19	1,19	-	1,05	1,05	-
	AIS / PAT	2,27	2,89	0,62	1,92	2,52	0,68	1,66	2,30	0,64
	AIS / AIS	1,99	1,99	-	1,19	1,19	-	1,05	1,05	-

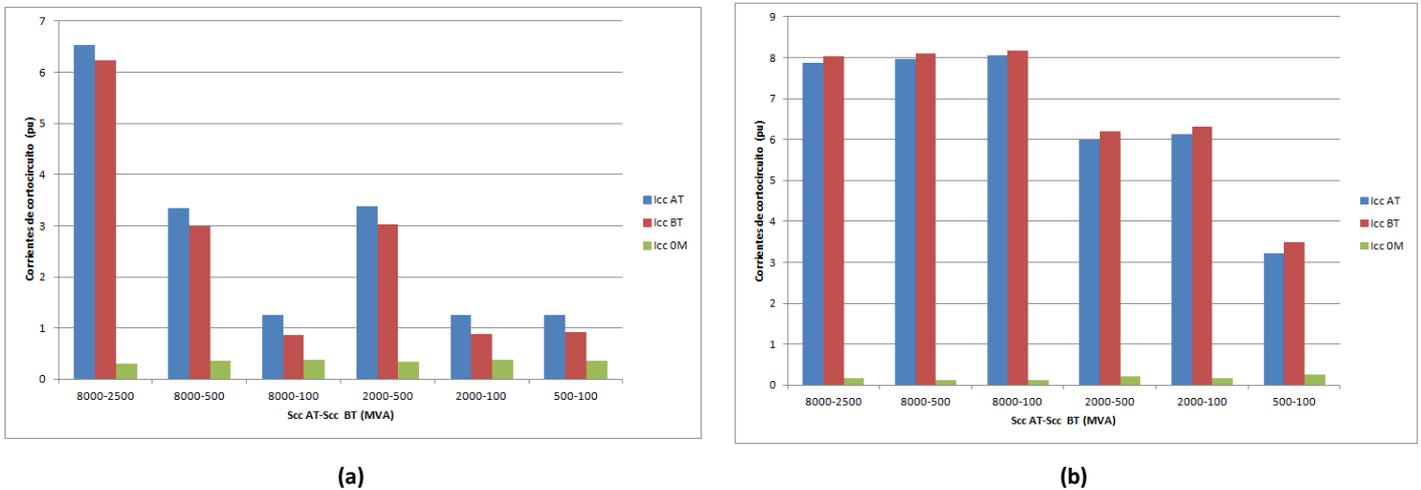
**Tabla E.22. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en diferentes escenarios de potencias de cortocircuito de las redes primaria y secundaria. (Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

En las tablas anteriores se pueden apreciar unas pautas de comportamiento muy homogéneas en todos los transformadores estudiados. Antes de resumir las conclusiones extraídas, se complementarán a continuación dichas tablas con una serie de figuras que permitirán visualizar gráficamente la información contenida en las tablas.

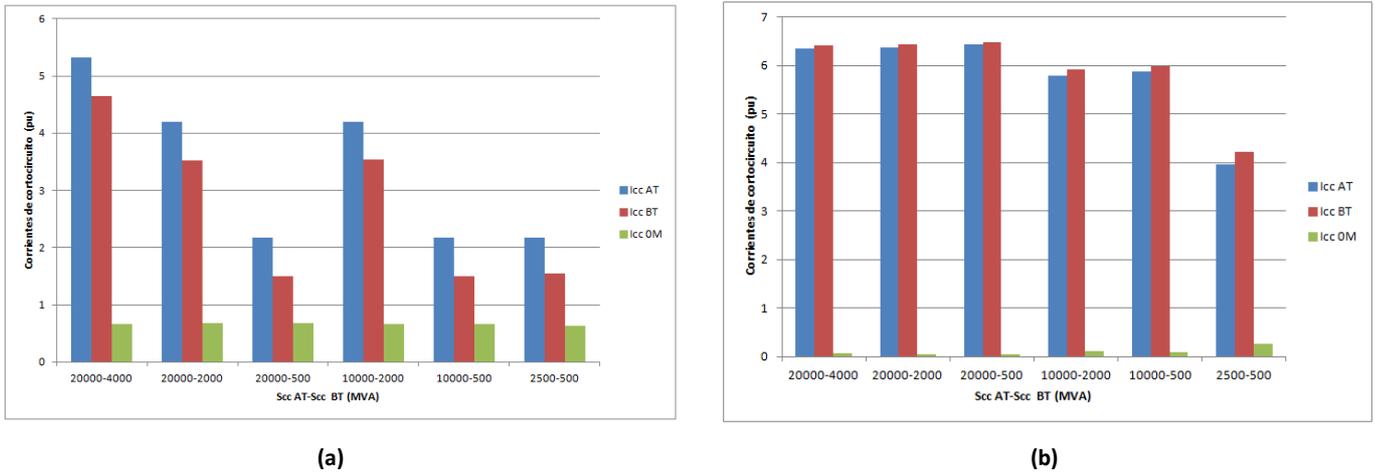
<sup>105</sup> Valores de la potencia de cortocircuito de la red en MVA según la tabla 7.2.



**Figura E.10. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**



**Figura E.11. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**



**Figura E.12. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en cada arrollamiento en función de la potencia de cortocircuito de la red.**

**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**

**(Hipótesis de las simulaciones: Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

La sensibilidad ante variaciones en la potencia de cortocircuito de la red de las corrientes de cortocircuito en los transformadores estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización abierto no presenta ningún aspecto de especial significación.

El comportamiento más habitual en todos los transformadores estudiados consiste, tal y como cabe esperar, en mayores corrientes de cortocircuito cuando las potencias de cortocircuito de la red son mayores. Este comportamiento se presenta en las corrientes primaria y secundaria, que son especialmente sensibles a las variaciones en la potencia de cortocircuito de la red secundaria en el caso de cortocircuitos monofásicos en la red primaria y a las variaciones en la potencia de cortocircuito de la red primaria en el caso de cortocircuitos monofásicos en la red secundaria. Por su parte, la corriente  $I_{OM}$  presenta un comportamiento poco dependiente en general de la potencia de cortocircuito de la red.

### E.2.3. Influencia de la relación $Z_0 / Z_1$ de la red

De la misma forma que en el caso anterior, se muestran a continuación simulaciones de los mismos transformadores de cara a evaluar la influencia de la relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa en las corrientes de cortocircuito.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-	6,33	6,33	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,19	4,80	0,39	4,68	4,08	0,56	4,18	3,51	0,67
	PAT / AIS	3,50	3,04	0,47	2,95	2,29	0,66	2,65	1,88	0,77
	AIS / PAT	2,97	2,97	-	2,15	2,15	-	1,68	1,68	-
	AIS / AIS	2,97	2,97	-	2,15	2,15	-	1,68	1,68	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,26	6,42	0,16	5,54	5,83	0,29	4,94	5,32	0,39
	PAT / AIS	3,48	3,48	-	2,40	2,40	-	1,83	1,83	-
	AIS / PAT	3,65	4,14	0,48	2,72	3,37	0,51	2,24	2,98	0,74
	AIS / AIS	3,48	3,48	-	2,40	2,40	-	1,83	1,83	-

**Tabla E.23. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.**

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-	7,14	7,14	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,49	4,31	0,18	3,87	3,59	0,28	3,38	3,03	0,34
	PAT / AIS	3,03	2,80	0,23	2,42	2,08	0,34	2,07	1,67	0,40
	AIS / PAT	2,78	2,78	-	2,04	2,04	-	1,61	1,61	-
	AIS / AIS	2,78	2,78	-	2,04	2,04	-	1,61	1,61	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	7,07	7,17	0,10	6,51	6,67	0,16	6,00	6,20	0,20
	PAT / AIS	3,70	3,70	-	2,50	2,50	-	1,89	1,89	-
	AIS / PAT	3,83	4,13	0,29	2,74	3,13	0,39	2,19	2,63	0,44
	AIS / AIS	3,70	3,70	-	2,50	2,50	-	1,89	1,89	-

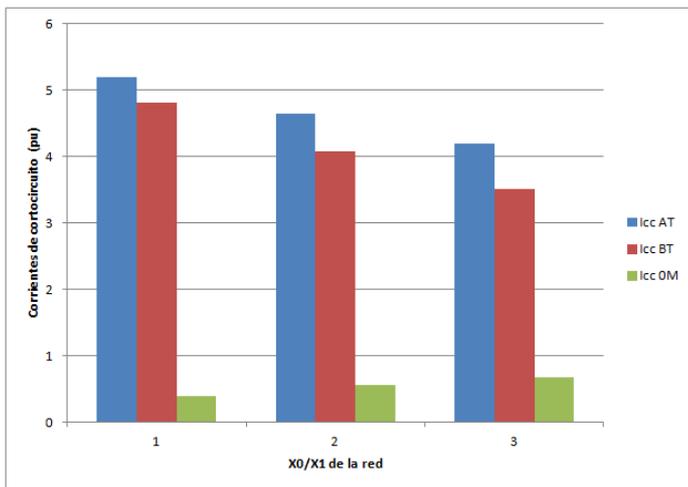
**Tabla E.24. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.**

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)

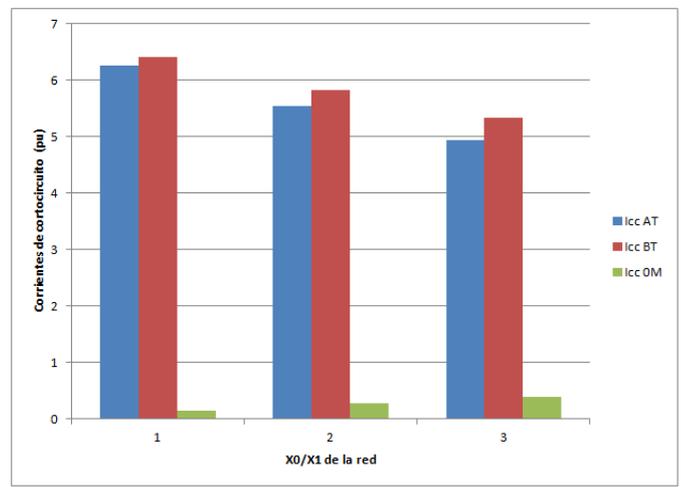
Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Relación $Z_0 / Z_1$ de la red								
		Relación $Z_0 / Z_1 = 1$			Relación $Z_0 / Z_1 = 2$			Relación $Z_0 / Z_1 = 3$		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-	6,41	6,41	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	5,02	4,64	0,38	4,61	4,06	0,56	4,20	3,54	0,66
	PAT / AIS	3,42	3,04	0,39	2,85	2,28	0,57	2,52	1,83	0,68
	AIS / PAT	3,02	3,02	-	2,24	2,24	-	1,78	1,78	-
	AIS / AIS	3,02	3,02	-	2,24	2,24	-	1,78	1,78	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,38	6,41	0,02	6,10	6,17	0,07	5,80	5,91	0,12
	PAT / AIS	3,69	3,69	-	2,59	2,59	-	1,99	1,99	-
	AIS / PAT	3,79	4,19	0,39	2,80	3,34	0,54	2,27	2,89	0,62
	AIS / AIS	3,69	3,69	-	2,59	2,59	-	1,99	1,99	-

Tabla E.25. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en diferentes escenarios de relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)



(a)

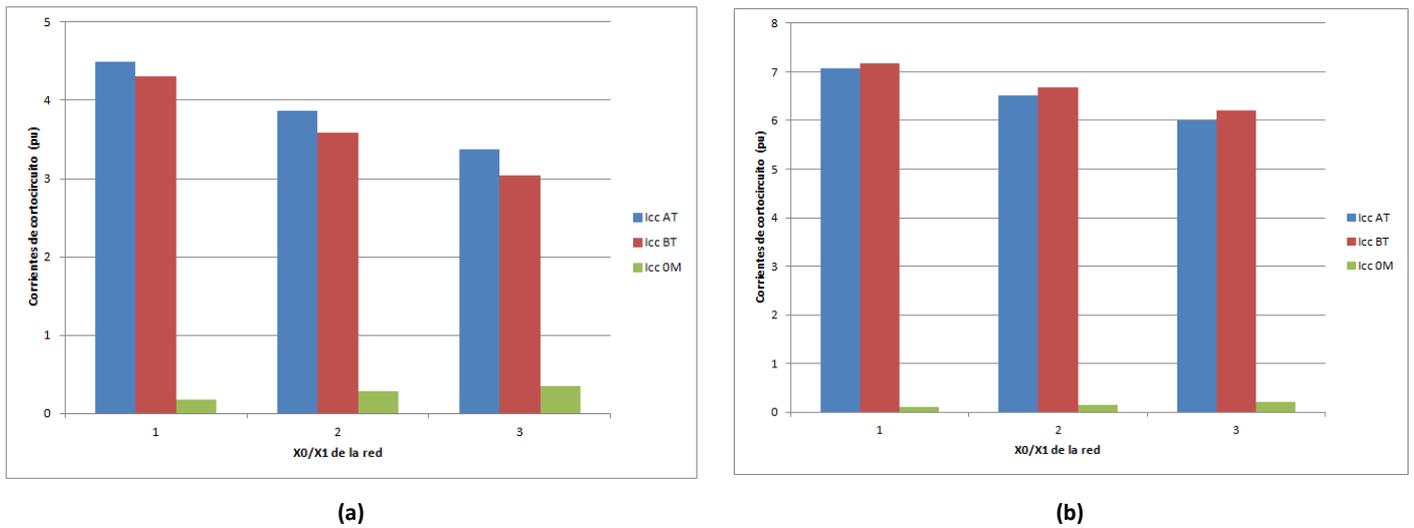


(b)

Figura E.13. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

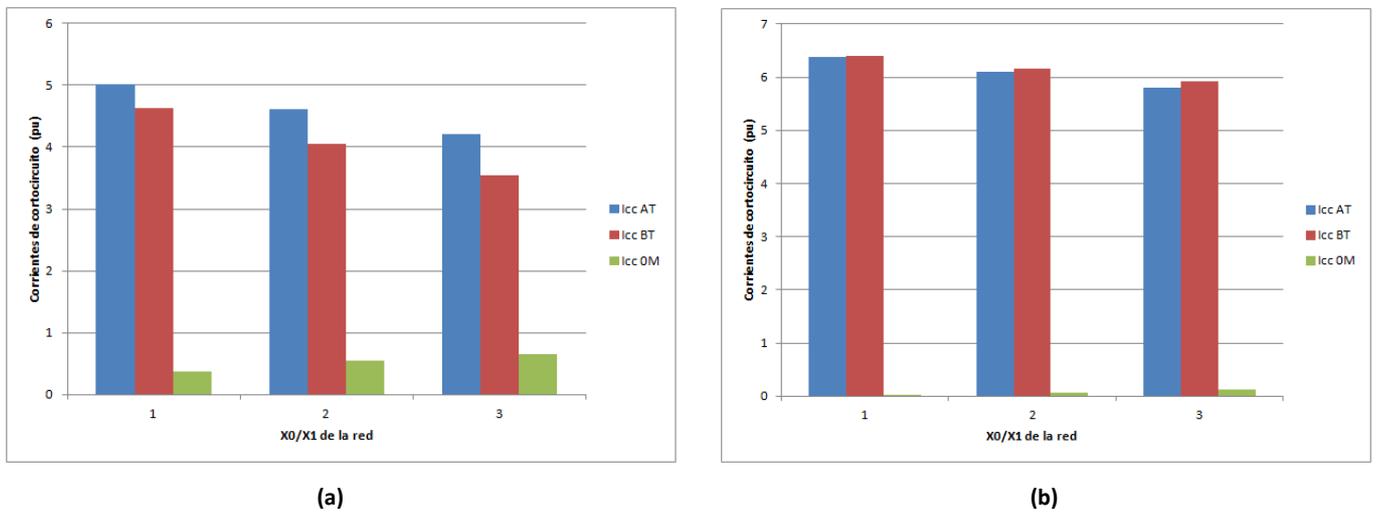
(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)



**Figura E.14. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.**

**(a) Faltas monofásicas lado primario (b) Faltas monofásicas lado secundario.**

**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**



**Figura E.15. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en cada arrollamiento en función de la relación  $Z_0/Z_1$  de la red.**

**(a) Faltas monofásicas lado primario (b) Faltas monofásicas lado secundario.**

**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto; Posición de los CTC = Toma central)**

Al igual que en el caso de los transformadores con arrollamiento de estabilización cerrado, en este caso la relación entre la impedancia de secuencia homopolar de la red respecto a la impedancia de secuencia directa tiene un peso bastante moderado en los resultados y tampoco juega un papel significativo en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores.

Los principales aspectos que cabe destacar del análisis de sensibilidad realizado sobre este factor es la distinta influencia existente sobre la corriente  $I_{0M}$  que sobre las corrientes primaria y secundaria, de forma que ambas influencias se producen en sentido distinto. Es decir, cuanto menor es la relación  $Z_0 / Z_1$  sucede que las corrientes primaria y secundaria son ligeramente mayores mientras que la corriente  $I_{0M}$  disminuye.

### E.2.4. Influencia de la posición del cambiador de tomas en carga del transformador

De cara a completar el análisis de sensibilidad de diferentes factores en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización abierto, se muestran a continuación los valores de las corrientes de cortocircuito en relación con la posición del cambiador de tomas en carga.

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #B								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,45	6,45	-	6,33	6,33	-	6,10	6,10	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,20	3,54	0,66	4,18	3,51	0,67	4,12	3,43	0,69
	PAT / AIS	2,67	1,90	0,77	2,65	1,88	0,77	2,62	1,83	0,79
	AIS / PAT	1,70	1,70	-	1,68	1,68	-	1,64	1,64	-
	AIS / AIS	1,70	1,70	-	1,68	1,68	-	1,64	1,64	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,01	5,41	0,40	4,94	5,32	0,39	4,77	5,14	0,37
	PAT / AIS	1,86	1,86	-	1,83	1,83	-	1,79	1,79	-
	AIS / PAT	2,28	3,02	0,74	2,24	2,98	0,74	2,18	2,92	0,74
	AIS / AIS	1,86	1,86	-	1,83	1,83	-	1,79	1,79	-

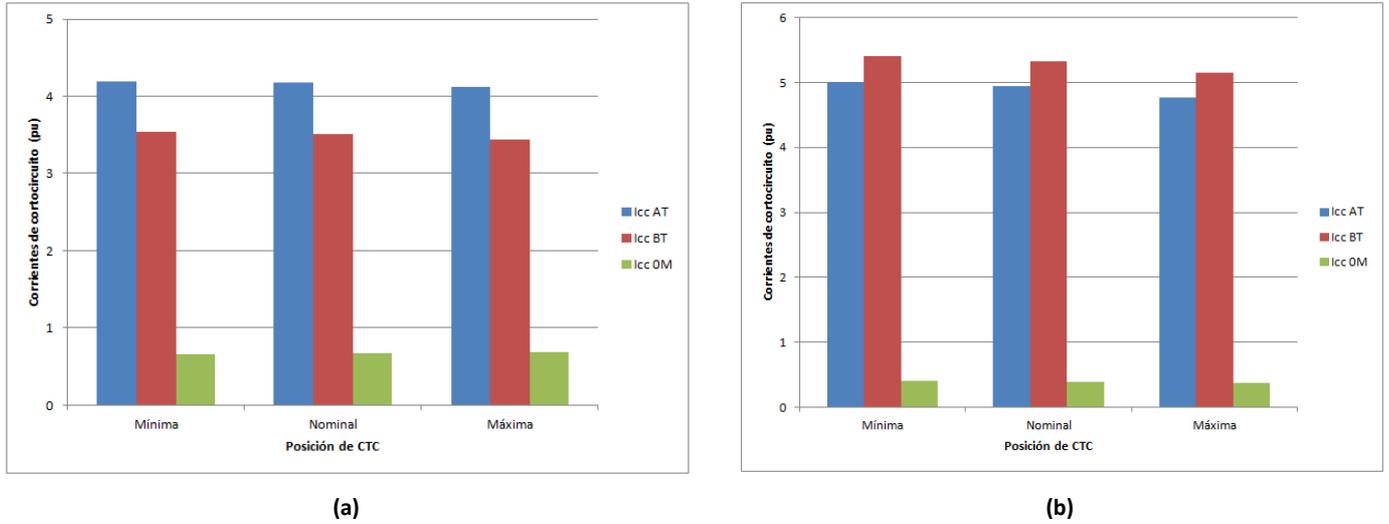
**Tabla E.26. Corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)**

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #E								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	7,41	7,41	-	7,14	7,14	-	6,76	6,76	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	3,39	3,07	0,32	3,38	3,03	0,34	3,33	2,96	0,37
	PAT / AIS	2,09	1,70	0,38	2,07	1,67	0,40	2,03	1,62	0,41
	AIS / PAT	1,65	1,65	-	1,61	1,61	-	1,56	1,56	-
	AIS / AIS	1,65	1,65	-	1,61	1,61	-	1,56	1,56	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	6,23	6,46	0,23	6,00	6,20	0,20	5,69	5,87	0,18
	PAT / AIS	1,93	1,93	-	1,89	1,89	-	1,82	1,82	-
	AIS / PAT	2,24	2,67	0,44	2,19	2,63	0,44	2,11	2,52	0,44
	AIS / AIS	1,93	1,93	-	1,89	1,89	-	1,82	1,82	-

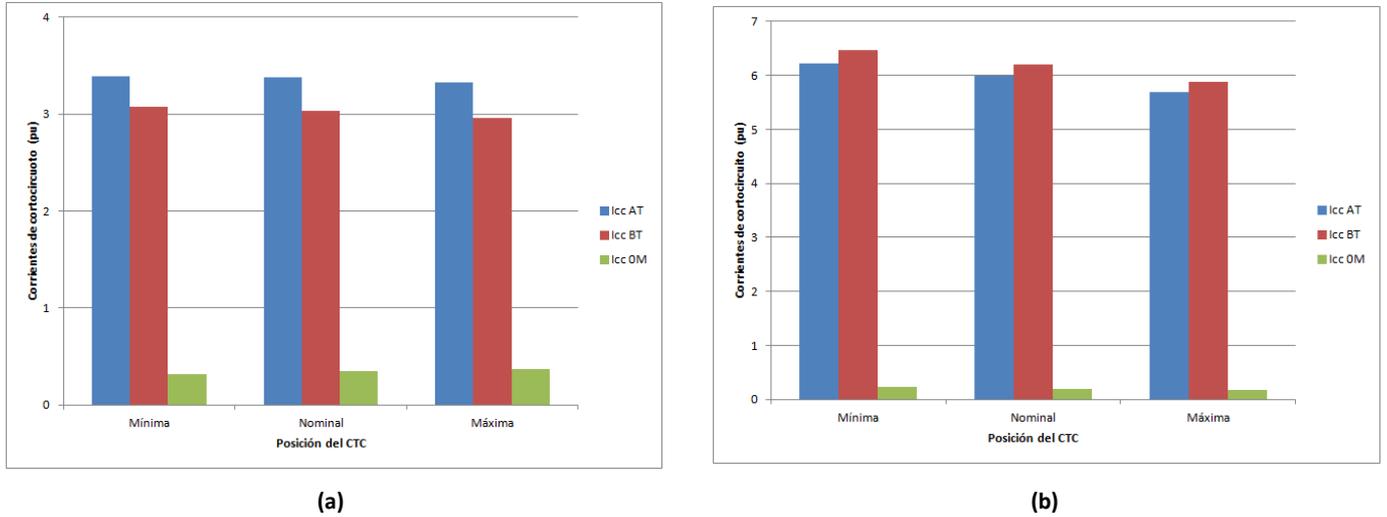
**Tabla E.27. Corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)

Tipo de Falta	Conexión Neutros AT / BT	Posición del CTC del Transformador #G								
		Posición CTC = Mínima			Posición CTC = Central			Posición CTC = Máxima		
		$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)	$I_1$ (pu)	$I_2$ (pu)	$I_{0M}$ (pu)
Trifásica	-	6,31	6,31	-	6,41	6,41	-	6,05	6,05	-
Monofásica Red Primaria	PAT / PAT	4,01	3,45	0,56	4,20	3,54	0,66	4,17	3,45	0,72
	PAT / AIS	2,44	1,81	0,63	2,52	1,83	0,68	2,47	1,76	0,71
	AIS / PAT	1,76	1,76	-	1,78	1,78	-	1,71	1,71	-
	AIS / AIS	1,76	1,76	-	1,78	1,78	-	1,71	1,71	-
Monofásica Red Secundaria	PAT / PAT	5,68	5,89	0,21	5,80	5,91	0,12	5,52	5,59	0,07
	PAT / AIS	1,96	1,96	-	1,89	1,89	-	1,90	1,90	-
	AIS / PAT	2,24	2,86	0,62	2,27	2,89	0,62	2,17	2,79	0,62
	AIS / AIS	1,96	1,96	-	1,89	1,89	-	1,90	1,90	-

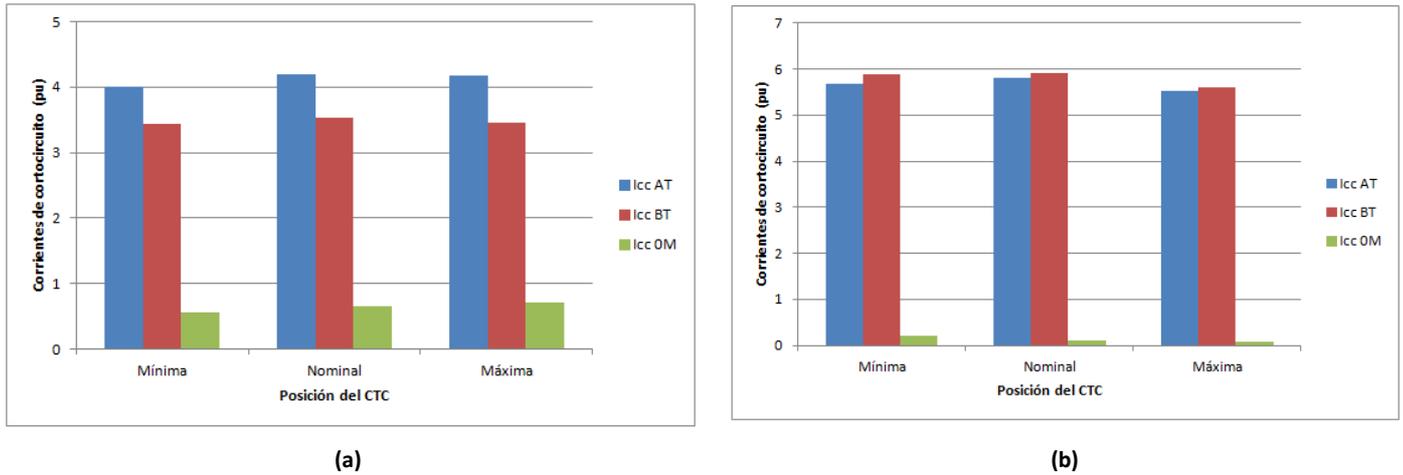
**Tabla E.28. Corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)



**Figura E.16. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #B (tipología constructiva #1) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)**



**Figura E.17. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #E (tipología constructiva #2) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**  
**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**  
**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)**



**Figura E.18. Evolución de las corrientes de cortocircuito en el transformador #G (tipología constructiva #3) en función de la posición de su cambiador de tomas en carga.**

**(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.**

**(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media ; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto )**

Como se puede deducir de las tablas y figuras anteriores, la influencia de la posición del cambiador de tomas en carga en el comportamiento ante cortocircuito de los transformadores estrella-estrella con el arrollamiento de estabilización abierto es prácticamente irrelevante. Incluso en el caso del transformador #G dicha influencia se reduce muy sustancialmente respecto del caso con arrollamiento de estabilización cerrado.



## Apéndice F

# Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella

En este apéndice se va a analizar la precisión aportada por los circuitos equivalentes a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella, en concreto la del modelo B descrito en el capítulo 4, cuando se varían los parámetros de dichos circuitos equivalentes.

El objetivo de este análisis de sensibilidad paramétrico es doble.

Por un lado, se intenta contrastar la influencia del carácter no lineal de la impedancia de magnetización en las corrientes del transformador en caso de cortocircuito cuando no se dispone de arrollamiento de estabilización, de forma que se pueda comprobar la validez de los ensayos en campo que fueron planteados en el apartado 4.2.1 del capítulo 4.

Por otro lado, se buscará verificar la validez de la propuesta realizada en el apartado 8.2 del capítulo 8 sobre criterios de estimación de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar a partir de los parámetros de secuencia directa.

Para conseguir estos objetivos se estudiará la variación en los resultados obtenidos al utilizar los circuitos equivalentes a secuencia homopolar en el cálculo de las corrientes de cortocircuito ante faltas monofásicas. Las simulaciones de estos cortocircuitos se realizarán de forma análoga a lo estudiado en el capítulo 7 y el apéndice E.

### F.1. Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización

De cara a la estudiar la sensibilidad de la estimación de las impedancias a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella con arrollamiento de estabilización, se denotarán los factores multiplicadores de la tabla 8.5 en los que se basan las reglas de estimación como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , es decir:

$$\alpha = \frac{Z_{01} + Z_{02}}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_{01} + Z_{02}}{Z_{12}} \quad (\text{F.1})$$

$$\beta = \frac{Z_{01} + Z_{03}}{Z_1 + Z_3} = \frac{Z_{01} + Z_{03}}{Z_{13}} \tag{F.2}$$

$$\gamma = \frac{Z_{02} + Z_{03}}{Z_2 + Z_3} = \frac{Z_{02} + Z_{03}}{Z_{23}} \tag{F.3}$$

De las ecuaciones anteriores se deduce fácilmente que las impedancias del circuito a secuencia homopolar se calcularán como:

$$Z_{01} = 0,5 \cdot (\alpha \cdot Z_{12} + \beta \cdot Z_{13} - \gamma \cdot Z_{23}) \tag{F.4}$$

$$Z_{02} = 0,5 \cdot (\alpha \cdot Z_{12} - \beta \cdot Z_{13} + \gamma \cdot Z_{23}) \tag{F.5}$$

$$Z_{03} = 0,5 \cdot (-\alpha \cdot Z_{12} + \beta \cdot Z_{13} + \gamma \cdot Z_{23}) \tag{F.6}$$

Como se ha indicado, la aplicación de las reglas de estimación de las impedancias a secuencia homopolar establecidas en la tabla 8.5 a un conjunto de transformadores en la red de los que únicamente se dispone de información sobre los parámetros de secuencia directa genera necesariamente un cierto error a la hora de valorar el funcionamiento de la red ante faltas asimétricas. Por ello, se plantea a continuación un análisis de sensibilidad de la influencia de posibles errores en la estimación de la corriente de cortocircuito.

Considérense cuatro posibles casos de factores multiplicadores (que barren prácticamente el espectro de valores que se pueden presentar en cualquier transformador real) según se definen en la tabla F.1:

Ratio	Identificador del Ratio	Posibles casos de factores multiplicadores <sup>106</sup>			
		Caso &A	Caso &B	Caso &C	Caso &D
$(Z_{01}+Z_{02}) / (Z_1+Z_2)$	$\alpha$	0,85	0,90	0,95	1,00
$(Z_{01}+Z_{03}) / (Z_1+Z_3)$	$\beta$	0,80	0,85	0,90	0,95
$(Z_{02}+Z_{03}) / (Z_2+Z_3)$	$\gamma$	0,90	0,95	1,00	1,00

**Tabla F.1. Identificación de posibles grupos de factores multiplicadores de cara al análisis de sensibilidad en el establecimiento de reglas de estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar en transformadores con arrollamiento de estabilización cerrado.**

<sup>106</sup> Los casos se identificarán con el símbolo & para evitar confusión con la identificación de los transformadores estudiados que está precedida por el símbolo #.

Se aplicarán estas cuatro posibilidades de estimación sobre cuatro tipologías de transformadores que se identificarán como &1, &2, &3 y &4<sup>107</sup>. Estas tipologías no responden a transformadores concretos sino que suponen un conjunto suficientemente representativo de transformadores de una red eléctrica real, en concreto la red de Unión Fenosa Distribución. No se considerarán transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización externo (tipología #3) dado que, como ya se ha visto anteriormente, se trata de una tipología muy poco frecuente, de fácil identificación con los ensayos de secuencia directa y con factores multiplicadores muy próximos a la unidad y por tanto con muy poco margen de error en la estimación.

Características constructivas	Tipologías de los transformadores del análisis de sensibilidad <sup>108</sup>			
	Transformador &1	Transformador &2	Transformador &3	Transformador &4
Potencia nominal (MVA)	25/25/8,33	30/30/10	60/60/20	120/120/40
Tensiones nominales (kV)	45/16,05/10	132/16,05/10	132/45/10	230/45/20
Grupo de conexión	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11	YNyn0+d11
Impedancia $Z_{12}$ (%)	11,0	14,0	11,0	14,0
Impedancia $Z_{13}$ (%)	20,0	20,0	20,0	20,0
Impedancia $Z_{23}$ (%)	6,0	5,0	5,0	5,0

Tabla F.2. Identificación de características constructivas de transformadores sobre los que se realizarán las simulaciones para el análisis de sensibilidad.

En las figuras F.1 a F.4 se presentan los resultados de diversas simulaciones realizadas de forma análoga a las planteadas en el capítulo 7 y el apéndice E. Se han mostrado los casos más significativos, si bien se han realizado muchas más simulaciones (en diferentes condiciones de conexión de neutro, potencias de cortocircuito de la red y relación entre las impedancias de secuencia de la red) que no se mostrarán por no aportar conclusiones adicionales de significación.

<sup>107</sup> De forma análoga a los casos de estimación, los tres tipos de transformadores (ficticios) sobre los que se realizará el análisis de sensibilidad se identificarán con el símbolo & para evitar confusión con la identificación de la tipología de transformadores que está precedida por el símbolo #.

<sup>108</sup> No es necesario identificar más características de los transformadores de cara a las estimaciones numéricas a realizar. El resto de parámetros de la red se tomarán de igual forma que en el capítulo 7.

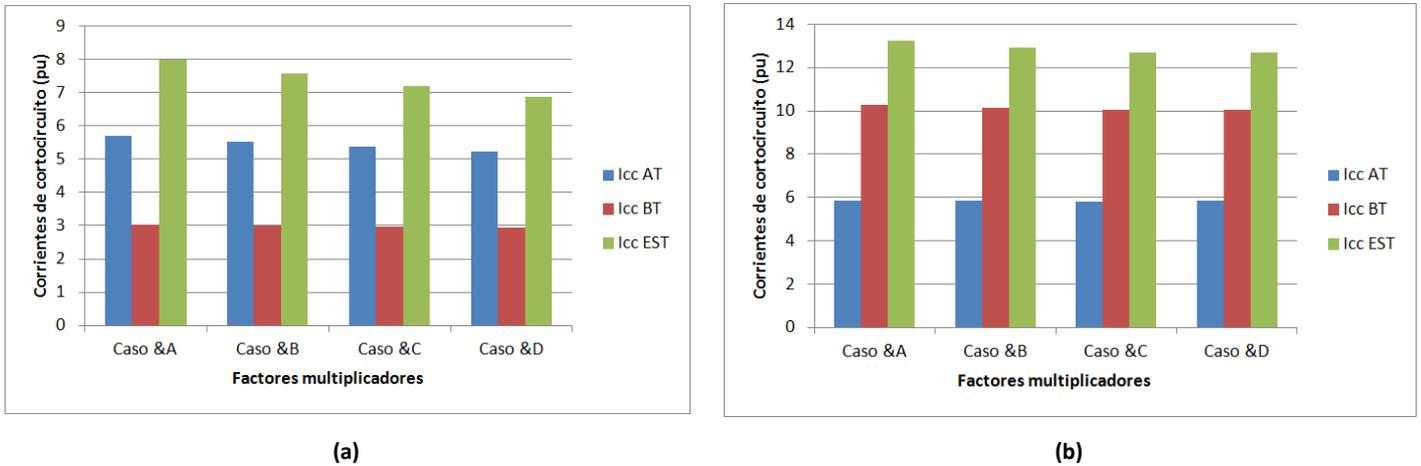


Figura F.1. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &1 en cada arrollamiento en función de los factores multiplicadores utilizados para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)

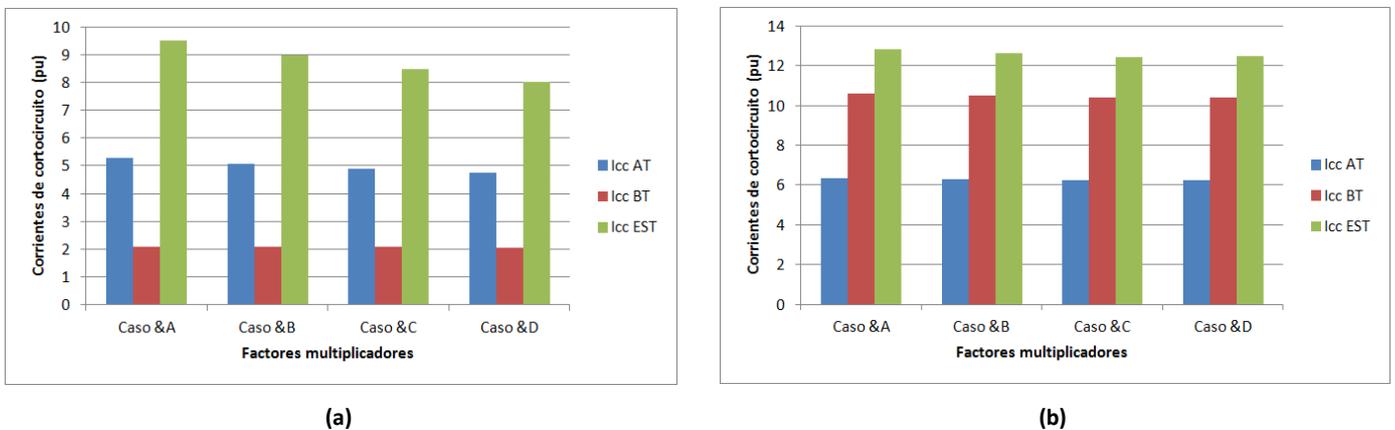
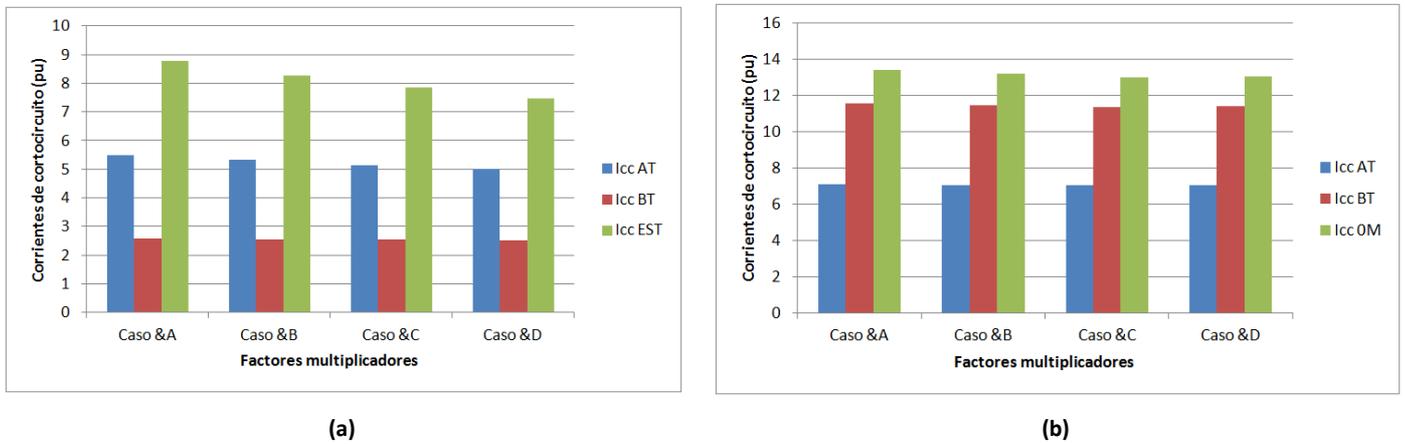


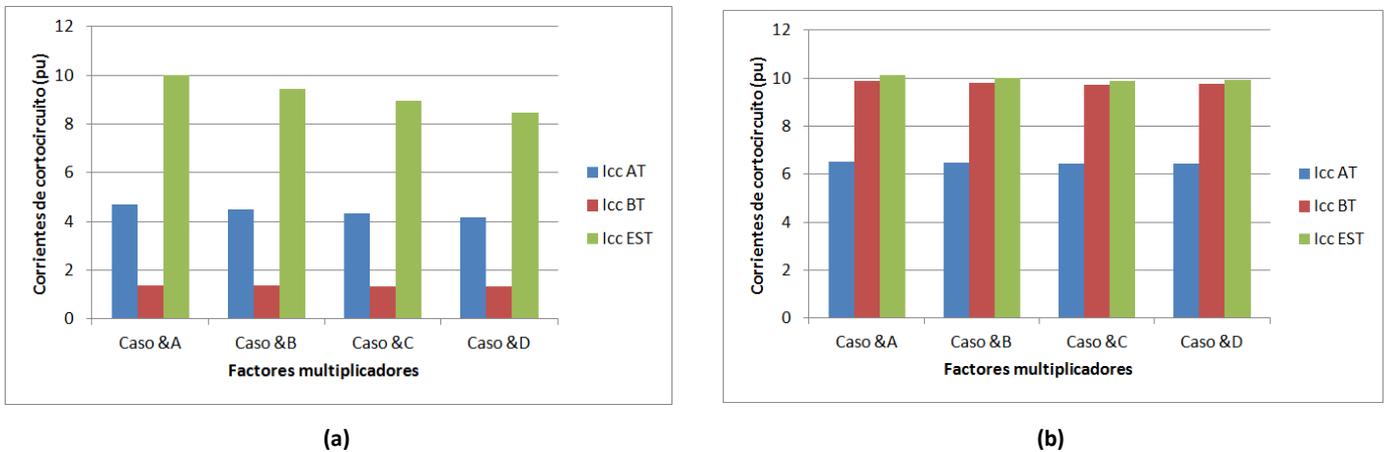
Figura F.2. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &2 en cada arrollamiento en función de los factores multiplicadores utilizados para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)



**Figura F.3. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &3 en cada arrollamiento en función de los factores multiplicadores utilizados para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.**  
 (a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)



**Figura F.4. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &4 en cada arrollamiento en función de los factores multiplicadores utilizados para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.**  
 (a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.  
 (Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Cerrado)

Como conclusión de las simulaciones realizadas, se puede deducir lo siguiente:

- En general, las corrientes en los arrollamientos primario y secundario son muy poco sensibles a los factores multiplicadores dentro del rango considerado.
  - o Las variaciones en la corriente primaria en el caso de cortocircuitos en el lado secundario y la corriente secundaria en ambos tipos de cortocircuitos son prácticamente inapreciables (diferencias inferiores al 2-3 % en todo el rango de variación para todos los transformadores).
  - o La corriente primaria en el caso de cortocircuitos en el lado primario sí que produce diferencias algo superiores (entre un mínimo de 8,2% y un máximo de 11,3% en los diferentes transformadores estudiados). No obstante, esta corriente es la que menor relevancia tiene en valores absolutos y además la evolución en estas diferencias no es abrupta por lo que posibles errores en la estimación de los parámetros de secuencia homopolar apenas serán relevantes.
- Por su parte, las corrientes en el arrollamiento de estabilización son algo más sensibles a los posibles errores en la estimación de los factores multiplicadores.
  - o En el caso de cortocircuitos en la red secundaria, es en el que la corriente en el arrollamiento de estabilización alcanza los valores más significativos (hasta 13,4 pu), las variaciones porcentuales adoptan valores muy reducidos (por debajo del 4% en todos los casos).
  - o Por su parte, en el caso de cortocircuitos en la red primaria se producen variaciones porcentuales más relevantes en la corriente en el arrollamiento de estabilización (entre un mínimo de 14,2% y un máximo de 15,7% en los diferentes transformadores estudiados), si bien se trata de valores absolutos siempre menores que en el caso anterior (por debajo de 10 pu).

Como conclusión general de este apartado se puede indicar que una posible asignación imprecisa de los factores multiplicadores estimados según la tabla 8.5 del capítulo 8 no genera una incertidumbre relevante en la validez de los resultados que se puedan derivar de estudios o análisis realizados a partir de dichas estimaciones. Adicionalmente, el conocimiento de aspectos básicos relacionados con el diseño interno del transformador (disponible o sencillo de obtener del fabricante del equipo), como la disposición de los arrollamientos o la presencia de pantallas magnéticas, limita la posibilidad de errores en este sentido.

## **F.2. Análisis de sensibilidad de los parámetros del circuito equivalente a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización**

En lo que respecta al estudio de la sensibilidad en la estimación de las impedancias a secuencia homopolar de un transformador estrella-estrella sin arrollamiento de estabilización, se analizarán por un lado la influencia del reparto porcentual entre las impedancias de la rama serie y, por otro lado, la influencia de la no linealidad y de posibles errores en la estimación de la impedancia magnetizante de la rama paralelo.

### F.2.1. Influencia del reparto porcentual de las impedancias de la rama serie

A la luz de los resultados de los valores experimentales de reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  mostrados en la tabla 8.6, el margen de error existente en su estimación, una vez conocida la tipología constructiva de un transformador, está bastante acotado. No obstante, se presenta a continuación un análisis de sensibilidad similar al realizado en el apartado anterior en relación a la influencia de dicho reparto porcentual en las corrientes de cortocircuito monofásicas.

Se plantearán siete casos de reparto de impedancias en la impedancia serie del circuito equivalente en T a secuencia homopolar según se muestra en la tabla F.3.

Impedancia homopolar	Asignación de reparto entre las impedancias homopolares $Z_{01}$ y $Z_{02}$						
	$0,5 \cdot Z_{12}$	$0,4 \cdot Z_{12}$	$0,3 \cdot Z_{12}$	$0,2 \cdot Z_{12}$	$0,1 \cdot Z_{12}$	$0 \cdot Z_{12}$	$-0,1 \cdot Z_{12}$
$Z_{01}$	$0,5 \cdot Z_{12}$	$0,6 \cdot Z_{12}$	$0,7 \cdot Z_{12}$	$0,8 \cdot Z_{12}$	$0,9 \cdot Z_{12}$	$1,0 \cdot Z_{12}$	$1,1 \cdot Z_{12}$
$Z_{02}$	$0,5 \cdot Z_{12}$	$0,6 \cdot Z_{12}$	$0,7 \cdot Z_{12}$	$0,8 \cdot Z_{12}$	$0,9 \cdot Z_{12}$	$1,0 \cdot Z_{12}$	$1,1 \cdot Z_{12}$

Tabla F.3. Casos a estudiar en el análisis de sensibilidad de la influencia del reparto porcentual de  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  en las corrientes de cortocircuito monofásicas (con arrollamiento de estabilización abierto).

Estos siete casos se aplicarán a los transformadores &1, &2, &3 y &4 definidos en la tabla F.2. Se presentan a continuación en las figuras F.5 a F.8 los resultados más significativos obtenidos en las simulaciones de cortocircuito realizadas en términos análogos a las del capítulo 7 y el apéndice E. De igual forma al apartado anterior, se han mostrado los casos más significativos, habiéndose realizado muchas más simulaciones (en diferentes condiciones de conexión de neutro, potencias de cortocircuito de la red y relación entre las impedancias de secuencia de la red) que no se mostrarán por no aportar conclusiones adicionales de significación.

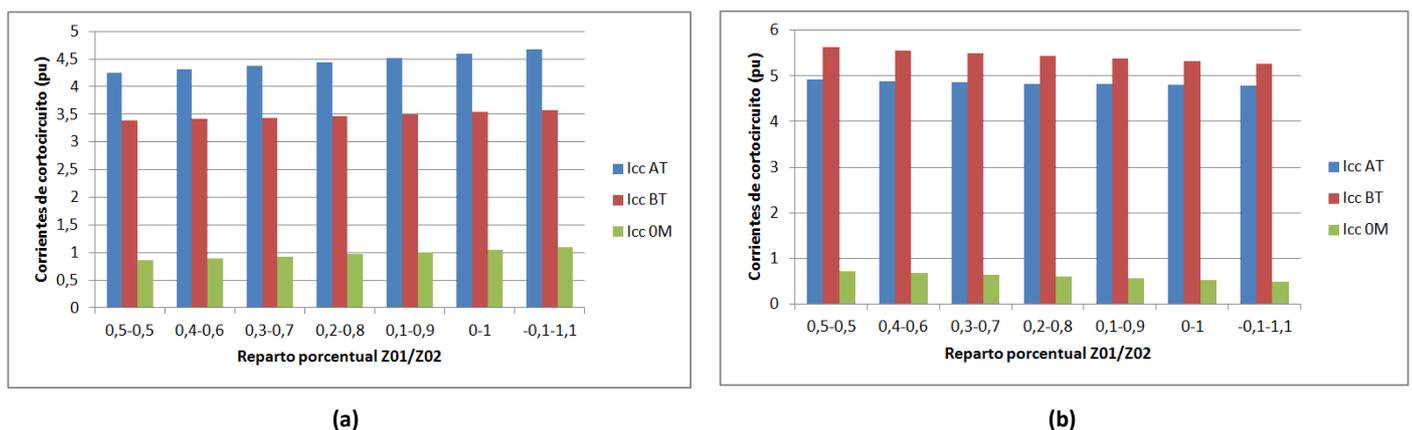
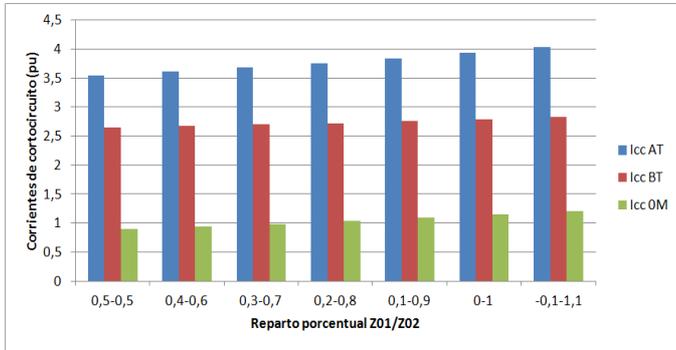


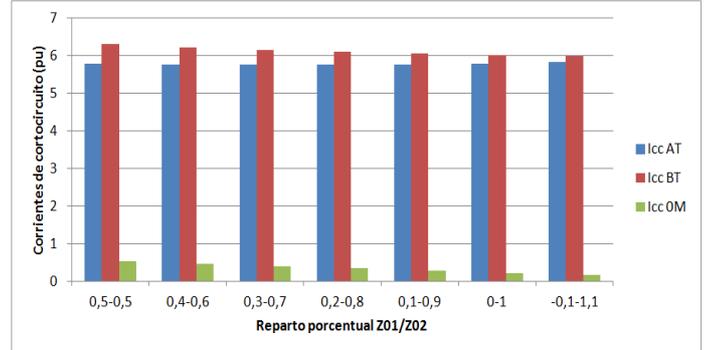
Figura F.5. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &1 en cada arrollamiento en función del reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  utilizado para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto ;  $Z_{0M} = 0,5$  pu)



(a)

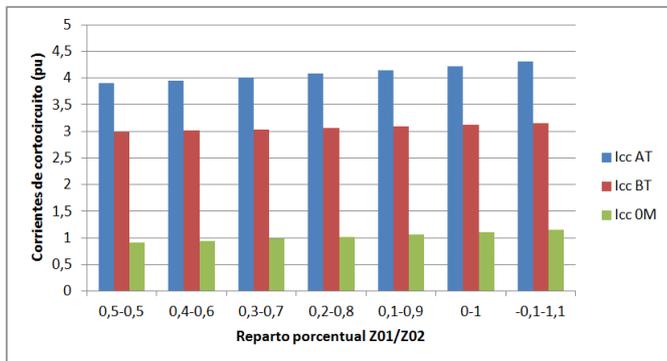


(b)

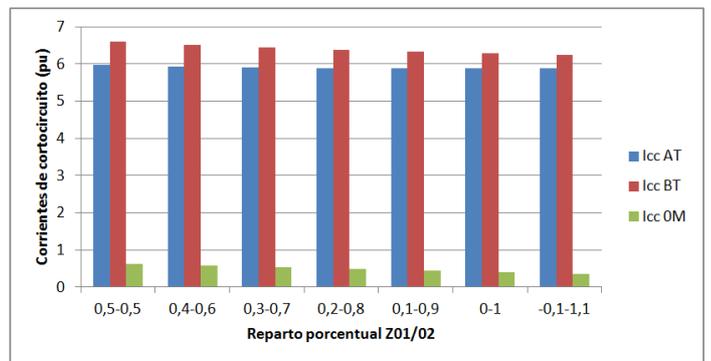
Figura F.6. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &2 en cada arrollamiento en función del reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  utilizado para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto ;  $Z_{0M} = 0,5$  pu)



(a)



(b)

Figura F.7. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &3 en cada arrollamiento en función del reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  utilizado para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto ;  $Z_{0M} = 0,5$  pu)

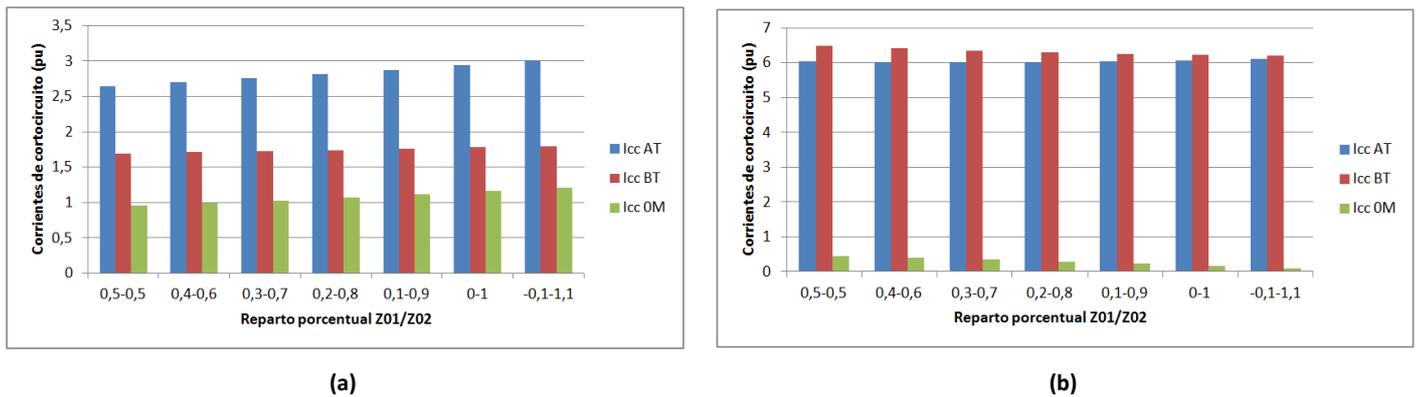


Figura F.8. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &4 en cada arrollamiento en función del reparto porcentual entre  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$  utilizado para la estimación de las impedancias del circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario (b) Falta monofásica lado secundario.

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto ;  $Z_{0M} = 0,5 \text{ pu}$ )

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, se puede indicar lo siguiente:

- Las corrientes en los arrollamientos primario y secundario son, en general, moderadamente sensibles al reparto porcentual de  $Z_{cc}$  entre las impedancias  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ .
  - o En los cortocircuitos monofásicos en la red primaria, las variaciones (en todo el rango planteado) de la corriente primaria se sitúan entre un 10% y un 14%, mientras que en la corriente secundaria son del 5-6%.
  - o En los cortocircuitos en la red secundaria, siendo el escenario de mayores corrientes de cortocircuito, las variaciones son significativamente más reducidas (inferiores al 2% en las corrientes primarias y del 5-6% en las corrientes secundarias).
- En cuanto a las corrientes  $I_{0M}$ , su pequeño valor en términos absolutos supone que se produzcan variaciones porcentuales importantes.
  - o En el caso de cortocircuitos en la red primaria, con valores de  $I_{0M}$  entre 0,5 pu y 1 pu, las variaciones en todo el rango analizado son de alrededor del 30% (aproximadamente un 6% por cada décima de variación en el reparto  $Z_{01} - Z_{02}$ ).
  - o En el caso de cortocircuitos en la red secundarias, con valores de  $I_{0M}$  inferiores a 0,5 pu, se llegan a producir variaciones del 70%, que no son significativas dado el reducido valor de la misma.

En todo caso, se puede concluir que estas variaciones potenciales derivadas de un reparto inadecuado entre las impedancias  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ , no generan una incertidumbre preocupante de cara a la validez de las conclusiones que se puedan extraer a partir de estudios o análisis bajo estas hipótesis. Adicionalmente, se ha de tener en cuenta que las simulaciones anteriores se han realizado bajo la hipótesis de considerar  $Z_{0M}$  igual a 50% que, como se verá más adelante, es la que genera corrientes  $I_{0M}$  más desfavorables.

## F.2.2. Influencia de la impedancia magnetizante de la rama paralelo

Como se ha indicado en repetidas ocasiones a lo largo de la tesis, el circuito equivalente a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto tiene una impedancia magnetizante  $Z_{0M}$  en su rama paralelo que presenta un cierto comportamiento no lineal. Hay por tanto una incertidumbre inherente en la utilización del circuito equivalente en relación con este parámetro.

Adicionalmente, en el proceso de estimación de las impedancias del circuito equivalente a secuencia homopolar de los transformadores estrella-estrella con arrollamiento de estabilización abierto, en los casos en lo que no se disponga de ensayos a secuencia homopolar se ha de basar la estimación en la información de ensayos a secuencia directa, con lo que no se dispone de ninguna información que permita una predicción fiable de  $Z_{0M}$ .

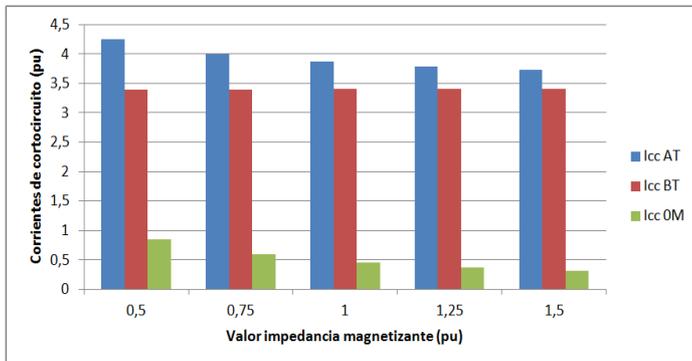
A partir de los resultados experimentales obtenidos en los transformadores estudiados, se ha podido predecir el sesgo y los valores más probables a asignar a dicho parámetro en función de la tipología constructiva del transformador en cuestión.

Con el objetivo de evaluar la influencia de  $Z_{0M}$  en las corrientes de cortocircuito ante faltas asimétricas, se van a estudiar los valores de dichas corrientes para los transformadores &1, &2, &3 y &4 en los cinco casos de asignación de dicha impedancia magnetizante que se indican en la tabla F.4.

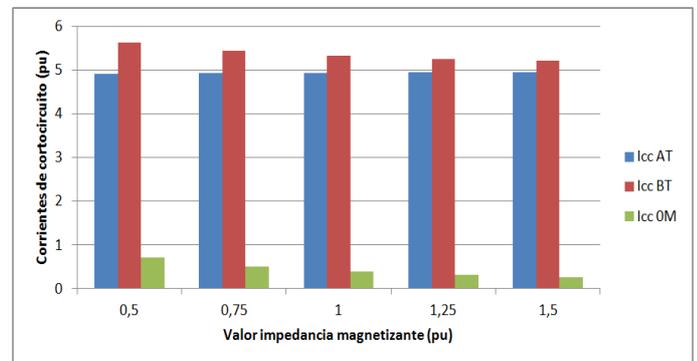
Impedancia homopolar	Posibilidades de asignación del valor de $Z_{0M}$ (expresado en por unidad respecto a la impedancia base del transformador)					
	$Z_{0M}$	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50

**Tabla F.4. Casos a estudiar en el análisis de sensibilidad de la influencia de  $Z_{0M}$  en las corrientes de cortocircuito monofásicas (con arrollamiento de estabilización abierto).**

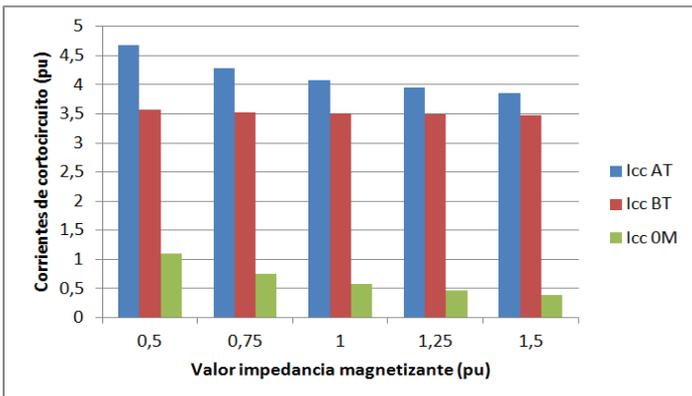
De la misma forma que en el resto de análisis de sensibilidad realizados en este capítulo, se presentan a continuación en las figuras F.9 a F.12 los resultados más significativos obtenidos en las simulaciones de cortocircuito. Para disponer de una visión más amplia de la influencia de la impedancia de la rama paralelo  $Z_{0M}$  en los valores de las corrientes de cortocircuito obtenidas en transformadores con arrollamiento de estabilización abierto, se considerarán los dos escenarios extremos de reparto entre las impedancias de la rama serie  $Z_{01}$  y  $Z_{02}$ : repartir la impedancia  $Z_{12}$  en dos partes iguales y repartirla de modo que  $Z_{01}$  sea  $0,1 \cdot Z_{12}$  y  $Z_{02}$  sea  $1,1 \cdot Z_{12}$ .



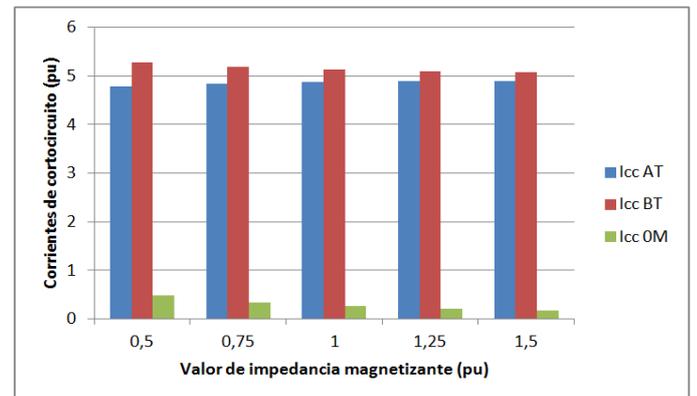
(a1)



(b1)



(a2)



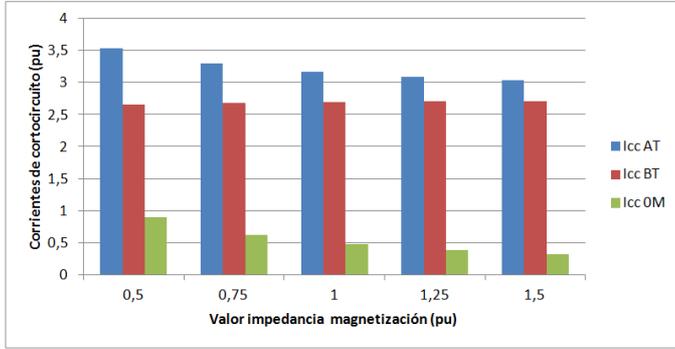
(b2)

Figura F.9. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &1 en cada arrollamiento en función del valor de  $Z_{OM}$  utilizado en el circuito equivalente de secuencia homopolar.

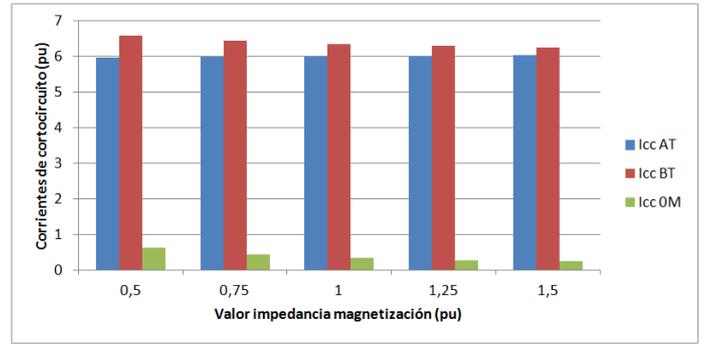
(a) Falta monofásica lado primario: (a1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (a2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(b) Falta monofásica lado secundario: (b1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (b2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

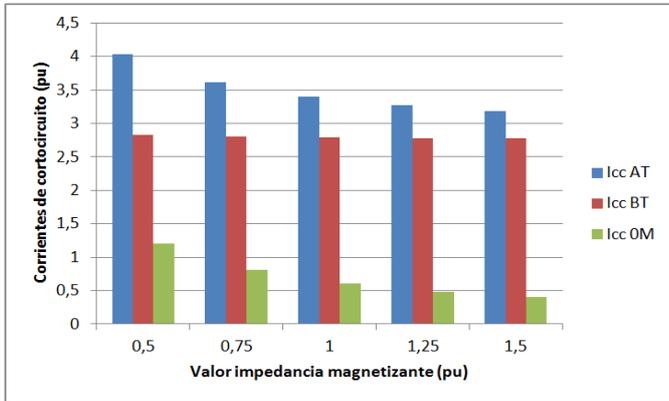
(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)



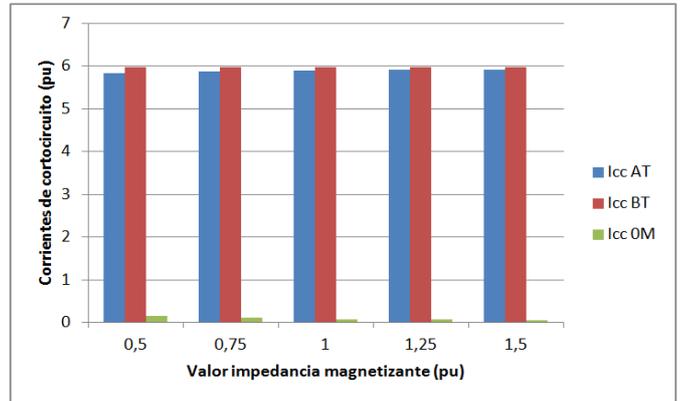
(a1)



(b1)



(a2)



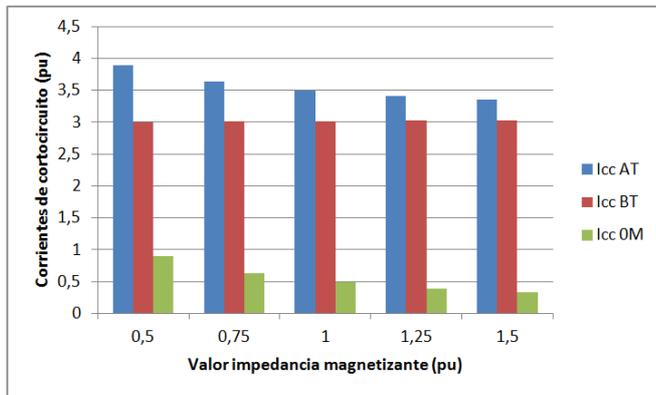
(b2)

Figura F.10. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &2 en cada arrollamiento en función del valor de  $Z_{0M}$  utilizado en el circuito equivalente de secuencia homopolar.

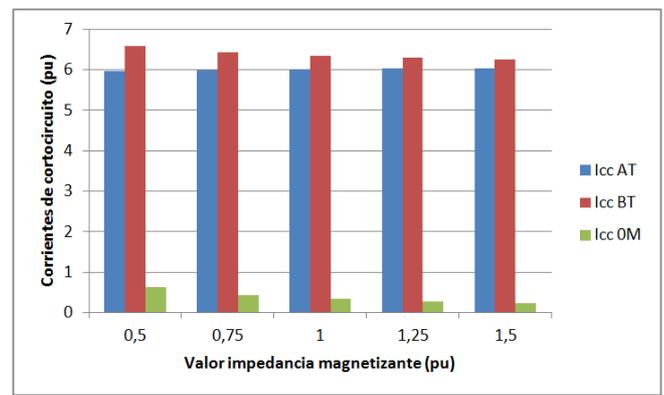
(a) Falta monofásica lado primario: (a1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (a2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(b) Falta monofásica lado secundario: (b1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (b2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

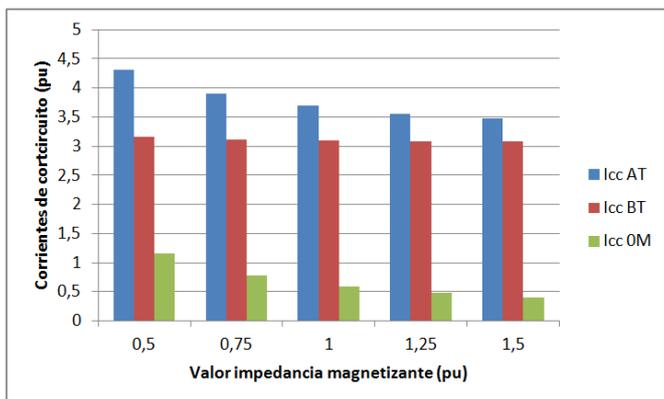
(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)



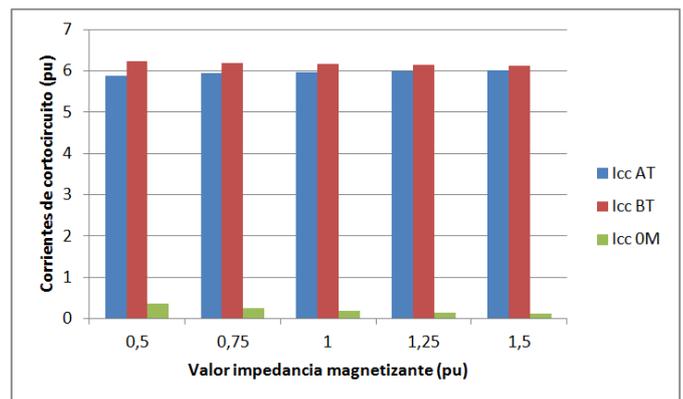
(a1)



(b1)



(a2)



(b2)

Figura F.11. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &3 en cada arrollamiento en función del valor de  $Z_{0M}$  utilizado en el circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario: (a1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (a2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(b) Falta monofásica lado secundario: (b1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (b2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)

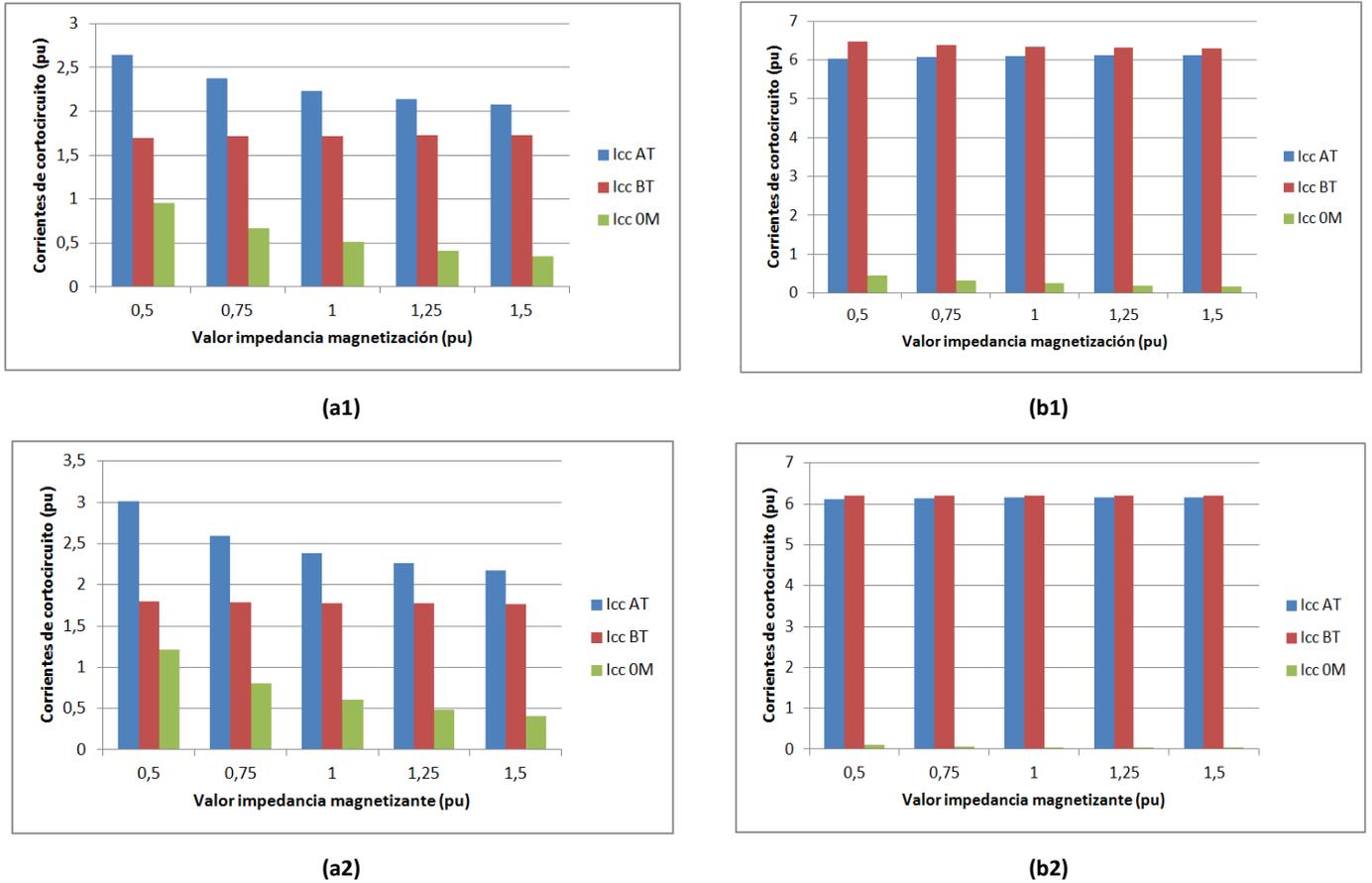


Figura F.12. Variación de las corrientes de cortocircuito en el transformador &4 en cada arrollamiento en función del valor de  $Z_{0M}$  utilizado en el circuito equivalente de secuencia homopolar.

(a) Falta monofásica lado primario: (a1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (a2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(b) Falta monofásica lado secundario: (b1) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = 0,5/0,5$  (b2) Reparto  $Z_{01}/Z_{02} = -0,1/1,1$ .

(Hipótesis de las simulaciones: Potencia de cortocircuito de la red = Media-Media; Relación  $Z_0/Z_1 = 3$  ; Conexión neutros del transformador = PAT/PAT ; Arrollamiento Estabilización = Abierto)

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se resumen a continuación los aspectos más relevantes:

- La mayor influencia de la impedancia  $Z_{0M}$  sobre las corrientes primarias y secundarias se da en la corriente primaria durante los cortocircuitos monofásicos en la red primaria.
  - o En los transformadores &1, &2 y &3, la variación que se produce en dicha corriente, en todo el rango de variación de  $Z_{0M}$  desde 0,5 pu hasta 1,5 pu, es del 12-14% (considerando el reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de 0,5-0,5) y del 17-21% (considerando el reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de -0,1-1,1).
  - o En el transformador &4 hay una variación algo mayor, del 21,4% (considerando el reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de 0,5-0,5) y del 27,9% (considerando el reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de -0,1-1,1).
  - o En todos los casos, la variación está muy sesgada hacia los casos de menores valores de  $Z_{0M}$ , es decir, el modelo es bastante sensible a variaciones de  $Z_{0M}$  entre 0,5 pu y 0,75 pu, pero mucho menos sensible en variaciones entre 1 pu y 1,5 pu.
- La corriente secundaria durante los cortocircuitos monofásicos en la red primaria y ambas corrientes primaria y secundaria durante los cortocircuitos monofásicos en la red secundaria, se ven muy poco influenciadas por variaciones en la impedancia  $Z_{0M}$ .
  - o Las variaciones se sitúan en todo el rango de variación por debajo del 3% en prácticamente todos los casos<sup>109</sup>.
  - o A diferencia de lo mostrado para las corrientes primarias en cortocircuitos en la red primaria, para los cortocircuitos monofásicos en la red secundaria, el reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de 0,5-0,5 es el que genera una mayor sensibilidad.
- Al igual que ocurría en el análisis de sensibilidad del reparto  $Z_{01}$ - $Z_{02}$ , el pequeño valor de  $I_{0M}$  en términos absolutos, provoca una mayor sensibilidad en términos porcentuales ante variaciones de  $Z_{0M}$ . En todos los casos analizados, la variación de  $I_{0M}$  en todo el rango de variación es del 63-66 %. Al igual que se indicó anteriormente, esta variación está sesgada hacia los casos de menores valores de  $Z_{0M}$ . En variaciones de  $Z_{0M}$  entre 0,5 pu y 0,75 pu, se alcanzan variaciones de hasta el 45-50 % y sin embargo entre 1 pu y 1,25 pu o entre 1 pu y 1,5 pu, las variaciones se sitúan por debajo del 20 %.

Al igual que se indicaba en el apartado anterior, se puede concluir que las variaciones derivadas de realizar una hipótesis imprecisa respecto al valor real de  $Z_{0M}$  de un transformador no suponen desviaciones suficientemente significativas como para cuestionar la validez de los resultados que se obtienen en los cálculos y análisis realizados respecto a las corrientes de cortocircuito del transformador.

---

<sup>109</sup> La única excepción es la corriente  $I_2$  en cortocircuitos en la red secundaria que llega a alcanzar variaciones de 7,3 % y 5,0 % para los transformadores &1 y &3 respectivamente con repartos de  $Z_{01}$ - $Z_{02}$  de 0,5-0,5.



## Apéndice G

# Resultados por nodo de la simulación de escenarios de explotación de red ante faltas asimétricas

En este apéndice se muestran los resultados detallados, para cada uno de los nodos de las redes analizadas, de las simulaciones realizadas de los diferentes escenarios de explotación de la red ante faltas asimétricas presentados en el capítulo 8.

Ello permite evaluar con mayor detenimiento el efecto local de la influencia de los cambios en la impedancia homopolar de los transformadores estrella-estrella al considerar o no la presencia de un arrollamiento de estabilización cerrado.

En el apartado G.1 se presentan los resultados detallados por nodo de las simulaciones para la red rural descrita en detalle en el apartado 8.3.1 del capítulo 8. Estos resultados se mostrarán para tres escenarios de red distintos en los que simularán las corrientes y tensiones producidas en caso de cortocircuito:

- Escenario de red en estado normal de explotación con operación mallada
- Escenario de red en estado normal de explotación con operación desmallada
- Escenario de red en explotación ante contingencia con operación desmallada

Para cada uno de los nodos de la red analizada se mostrarán la corriente de falta trifásica ( $I_{3\phi}$ ), así como, para las faltas monofásicas, la corriente de falta ( $I_{1\phi}$ ), el ratio de la corriente monofásica respecto a la trifásica ( $I_{1\phi}/I_{3\phi}$ ), la tensión homopolar ( $V_0$ ) y el factor de defecto a tierra  $K_{PAT}$ .

El mismo análisis detallado se realizará en el apartado G.2 para la red urbana estudiada en el apartado 8.3.2 del capítulo 8.

### G.1. Escenarios de explotación de red rural

A continuación se reproducen de nuevo los esquemas topológicos de la red de alimentación y de la red de reparto representativos de una red eléctrica rural. En estos esquemas se visualizan los diferentes nodos (subestaciones) y transformadores que conforman dichas redes.

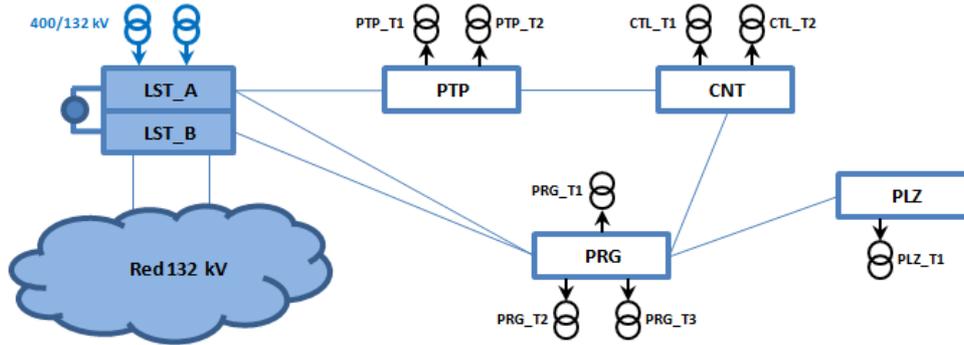


Figura 8.1 (rep.). Topología de la red de alimentación de 132 kV de la red rural analizada.

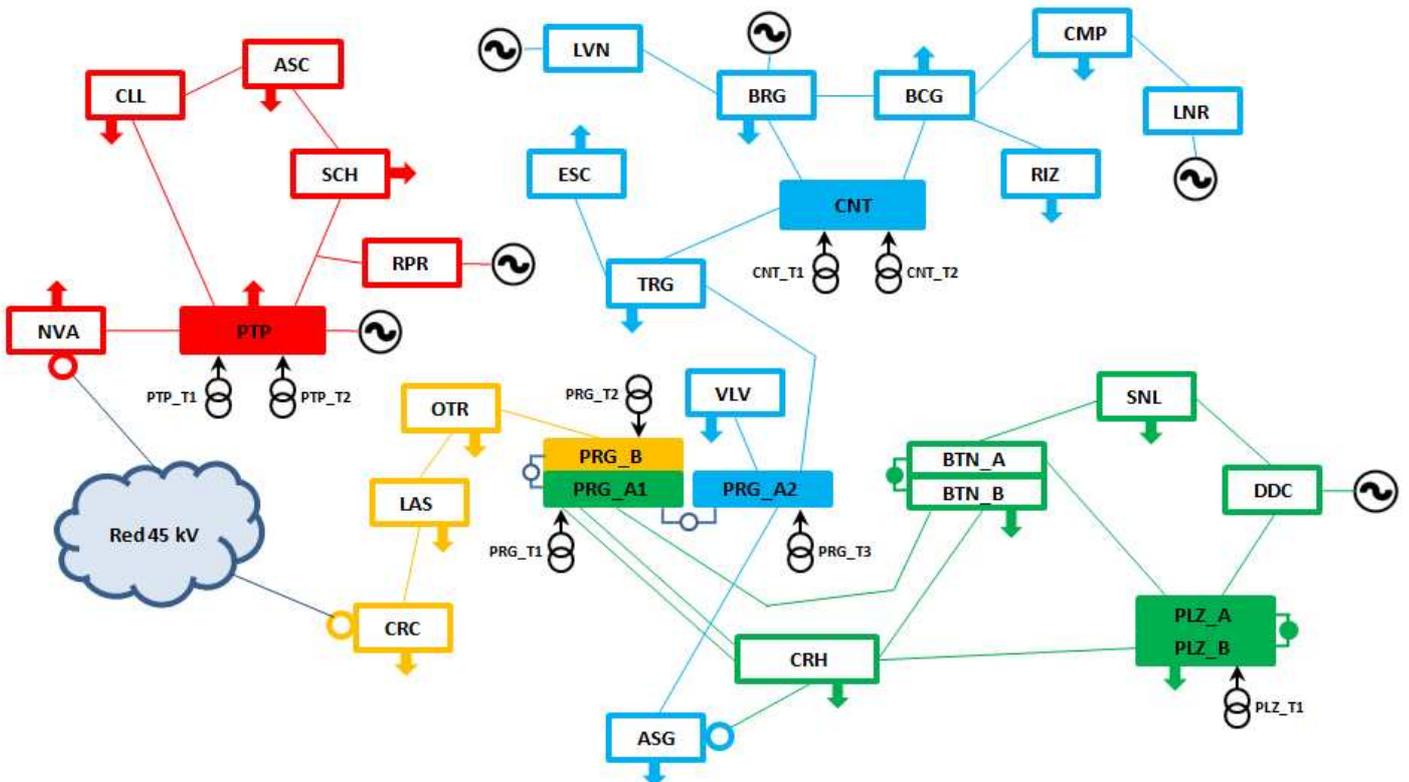


Figura 8.2 (rep.). Topología de la red de reparto de 45 kV de la red rural analizada.

### G.1.1. Resultados por nodo de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA

Nodo de la red de 132 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CNT	4738	4683	0,99	26,0	1,04	4738	4055	0,86	32,7	1,10
LST	15628	17010	1,09	20,9	0,96	15628	16489	1,06	22,6	0,98
PLZ	7231	6727	0,93	29,0	1,05	7231	5442	0,75	38,0	1,15
PRG	9924	9898	1,00	25,5	1,02	9924	7749	0,78	36,5	1,13
PTP	5823	5742	0,99	26,1	1,03	5823	4709	0,81	35,1	1,11
<b>MÁXIMA</b>	<b>15628</b>	<b>17010</b>	<b>1,09</b>	<b>29,0</b>	<b>1,05</b>	<b>15628</b>	<b>16489</b>	<b>1,06</b>	<b>38,0</b>	<b>1,15</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>8669</b>	<b>8812</b>	<b>1,00</b>	<b>25,5</b>	<b>1,02</b>	<b>8669</b>	<b>7689</b>	<b>0,85</b>	<b>33,0</b>	<b>1,09</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>4738</b>	<b>4683</b>	<b>0,93</b>	<b>20,9</b>	<b>0,96</b>	<b>4738</b>	<b>4055</b>	<b>0,75</b>	<b>22,6</b>	<b>0,98</b>

Tabla G.1. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 132 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
CNT	0,0%	-13,4%	-13,4%	25,6%	5,5%
LST	0,0%	-3,1%	-3,1%	8,1%	2,0%
PLZ	0,0%	-19,1%	-19,1%	31,1%	8,7%
PRG	0,0%	-21,7%	-21,7%	43,0%	11,0%
PTP	0,0%	-18,0%	-18,0%	34,4%	8,0%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-3,1 %</b>	<b>-3,1 %</b>	<b>43,0 %</b>	<b>11,0 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-15,1 %</b>	<b>-15,1 %</b>	<b>28,5 %</b>	<b>7,1 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-21,7 %</b>	<b>-21,7 %</b>	<b>8,1 %</b>	<b>2,0 %</b>

Tabla G.2. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ASC	2622	1995	0,76	12,8	1,15	2622	1820	0,69	13,9	1,20
ASG	9973	10166	1,02	8,6	1,09	9973	8069	0,81	12,0	1,14
BCG	2191	1837	0,84	11,4	1,10	2191	1729	0,79	12,3	1,15
BRG	3392	3386	1,00	8,6	1,02	3392	3132	0,92	9,9	1,08
BTN	10085	9525	0,94	9,7	1,07	10085	7406	0,73	13,3	1,17
CLL	2577	1959	0,76	12,8	1,15	2577	1791	0,69	13,9	1,20
CMP	803	700	0,87	11,1	1,17	803	689	0,86	11,4	1,19
CNT	5908	7691	1,30	3,4	0,91	5908	5522	0,93	9,7	1,05
CRC	1928	1329	0,69	14,1	1,24	1928	1285	0,67	14,6	1,26
CRH	11977	12945	1,08	7,4	1,02	11977	9635	0,80	12,1	1,13
DDC	8847	8534	0,96	9,3	1,02	8847	6611	0,75	13,0	1,15
ESC	2481	1674	0,67	14,3	1,22	2481	1601	0,65	14,8	1,25
LAS	2520	1774	0,70	13,9	1,22	2520	1695	0,67	14,4	1,25
LNR	609	522	0,86	11,3	1,17	609	517	0,85	11,5	1,18
LVN	1150	1083	0,94	10,3	1,19	1150	1087	0,94	10,3	1,19
NVA	1442	1004	0,70	13,9	1,20	1442	958	0,66	14,5	1,23
OTR	3226	2329	0,72	13,5	1,21	3226	2196	0,68	14,3	1,24
PLZ	11008	12911	1,17	5,7	0,94	11008	8924	0,81	11,9	1,11
PRG_A1	13968	18230	1,31	3,4	0,90	13968	12215	0,87	10,8	1,07
PRG_A2	13967	18228	1,31	3,4	0,90	13967	12214	0,87	10,8	1,07
PRG_B	13967	18229	1,31	3,4	0,90	13967	12214	0,87	10,8	1,07
PTP	6614	8658	1,31	3,2	0,90	6614	6097	0,92	10,0	1,05
RIZ	1460	1104	0,76	12,9	1,17	1460	1064	0,73	13,4	1,20
RPR	2568	1841	0,72	13,5	1,18	2568	1692	0,66	14,5	1,22
SCH	2737	2093	0,76	12,7	1,15	2737	1902	0,69	13,9	1,20
SNL	6016	4950	0,82	11,7	1,12	6016	4271	0,71	13,7	1,20
TRG	4337	3094	0,71	13,6	1,17	4337	2852	0,66	14,6	1,22
VLV	6270	4519	0,72	13,6	1,23	6270	4060	0,65	14,8	1,25
<b>MÁXIMA</b>	<b>13968</b>	<b>18230</b>	<b>1,31</b>	<b>14,3</b>	<b>1,24</b>	<b>13968</b>	<b>12215</b>	<b>0,94</b>	<b>14,8</b>	<b>1,26</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>5523</b>	<b>5797</b>	<b>0,92</b>	<b>10,1</b>	<b>1,10</b>	<b>5523</b>	<b>4402</b>	<b>0,77</b>	<b>12,7</b>	<b>1,17</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>609</b>	<b>522</b>	<b>0,67</b>	<b>3,2</b>	<b>0,90</b>	<b>609</b>	<b>517</b>	<b>0,65</b>	<b>9,7</b>	<b>1,05</b>

Tabla G.3. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ASC	0,0%	-8,8%	-8,8%	9,1%	4,4%
ASG	0,0%	-20,6%	-20,6%	39,2%	4,8%
BCG	0,0%	-5,9%	-5,9%	7,7%	3,7%
BRG	0,0%	-7,5%	-7,5%	15,7%	5,7%
BTN	0,0%	-22,2%	-22,2%	37,2%	9,5%
CLL	0,0%	-8,6%	-8,6%	9,0%	4,3%
CMP	0,0%	-1,5%	-1,5%	2,6%	1,5%
CNT	0,0%	-28,2%	-28,2%	189,1%	15,1%
CRC	0,0%	-3,3%	-3,3%	2,9%	1,5%
CRH	0,0%	-25,6%	-25,6%	64,0%	11,4%
DDC	0,0%	-22,5%	-22,5%	40,7%	13,1%
ESC	0,0%	-4,4%	-4,4%	3,7%	2,1%
LAS	0,0%	-4,4%	-4,4%	4,0%	2,0%
LNR	0,0%	-1,1%	-1,1%	1,8%	1,1%
LVN	0,0%	0,3%	0,3%	-0,1%	0,3%
NVA	0,0%	-4,6%	-4,6%	4,0%	2,0%
OTR	0,0%	-5,7%	-5,7%	5,5%	2,7%
PLZ	0,0%	-30,9%	-30,9%	110,6%	17,8%
PRG_A1	0,0%	-33,0%	-33,0%	221,1%	19,2%
PRG_A2	0,0%	-33,0%	-33,0%	221,1%	19,2%
PRG_B	0,0%	-33,0%	-33,0%	221,1%	19,2%
PTP	0,0%	-29,6%	-29,6%	207,5%	17,0%
RIZ	0,0%	-3,7%	-3,7%	3,8%	1,9%
RPR	0,0%	-8,1%	-8,1%	7,6%	3,9%
SCH	0,0%	-9,1%	-9,1%	9,6%	4,6%
SNL	0,0%	-13,7%	-13,7%	16,8%	7,4%
TRG	0,0%	-7,8%	-7,8%	7,2%	4,2%
VLV	0,0%	-10,2%	-10,2%	8,5%	1,6%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>221,1 %</b>	<b>19,2 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-13,8 %</b>	<b>-13,8 %</b>	<b>52,5 %</b>	<b>7,2 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-33,0 %</b>	<b>-33,0 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>0,3 %</b>

**Tabla G.4. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV.**

**G.1.2. Resultados por nodo de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA**

Nodo de la red de 132 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CNT	4731	4676	0,99	26,0	1,04	4731	4050	0,86	32,7	1,10
LST	15623	16996	1,09	20,9	0,96	15623	16486	1,06	22,6	0,98
PLZ	7200	6681	0,93	29,1	1,06	7200	5402	0,75	38,1	1,15
PRG	9917	9826	0,99	25,9	1,02	9917	7744	0,78	36,5	1,13
PTP	5822	5740	0,99	26,1	1,03	5822	4708	0,81	35,1	1,11
<b>MÁXIMA</b>	<b>15623</b>	<b>16996</b>	<b>1,09</b>	<b>29,1</b>	<b>1,06</b>	<b>15623</b>	<b>16486</b>	<b>1,06</b>	<b>38,1</b>	<b>1,15</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>8659</b>	<b>8784</b>	<b>1,00</b>	<b>25,6</b>	<b>1,02</b>	<b>8659</b>	<b>7678</b>	<b>0,85</b>	<b>33,0</b>	<b>1,09</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>4731</b>	<b>4676</b>	<b>0,93</b>	<b>20,9</b>	<b>0,96</b>	<b>4731</b>	<b>4050</b>	<b>0,75</b>	<b>22,6</b>	<b>0,98</b>

Tabla G.5. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 132 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
CNT	0,0	-13,4	-13,4	25,6	5,5
LST	0,0	-3,0	-3,0	8,0	2,0
PLZ	0,0	-19,1	-19,1	30,9	8,7
PRG	0,0	-21,2	-21,2	41,2	10,7
PTP	0,0	-18,0	-18,0	34,4	8,0
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-3,0 %</b>	<b>-3,0 %</b>	<b>41,2 %</b>	<b>10,7 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-14,9 %</b>	<b>-14,9 %</b>	<b>28,0 %</b>	<b>7,0 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-21,2 %</b>	<b>-21,2 %</b>	<b>8,0 %</b>	<b>2,0 %</b>

Tabla G.6. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 132/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ASC	2622	1995	0,76	12,8	1,15	2622	1820	0,69	13,9	1,20
ASG	4084	3884	0,95	9,6	1,07	4084	3411	0,84	11,5	1,11
BCG	2189	1836	0,84	11,4	1,10	2189	1727	0,79	12,3	1,14
BRG	3387	3381	1,00	8,6	1,02	3387	3127	0,92	9,9	1,08
BTN	7645	7848	1,03	8,3	1,04	7645	6066	0,79	12,2	1,14
CLL	2577	1959	0,76	12,8	1,15	2577	1791	0,69	13,9	1,20
CMP	804	700	0,87	11,1	1,17	804	690	0,86	11,4	1,19
CNT	5866	7641	1,30	3,3	0,91	5866	5489	0,94	9,7	1,05
CRC	1615	1207	0,75	13,1	1,18	1615	1135	0,70	13,9	1,21
CRH	8048	8988	1,12	6,7	0,99	8048	6753	0,84	11,5	1,10
DDC	7315	7484	1,02	8,3	1,01	7315	5763	0,79	12,3	1,13
ESC	2387	1635	0,68	14,1	1,21	2387	1560	0,65	14,7	1,24
LAS	2004	1561	0,78	12,5	1,14	2004	1442	0,72	13,5	1,19
LNR	609	522	0,86	11,3	1,17	609	517	0,85	11,5	1,18
LVN	1152	1083	0,94	10,3	1,19	1152	1087	0,94	10,3	1,19
NVA	1442	1004	0,70	13,9	1,20	1442	958	0,66	14,5	1,23
OTR	2416	1975	0,82	11,8	1,11	2416	1786	0,74	13,2	1,17
PLZ	8625	10528	1,22	4,8	0,91	8625	7394	0,86	11,1	1,09
PRG_A1	8209	10338	1,26	4,2	0,91	8209	7223	0,88	10,7	1,07
PRG_A2	5862	6809	1,16	5,9	0,95	5862	5461	0,93	9,8	1,04
PRG_B	5401	7258	1,34	2,7	0,88	5401	5184	0,96	9,4	1,03
PTP	6614	8657	1,31	3,2	0,90	6614	6096	0,92	10,0	1,05
RIZ	1459	1104	0,76	12,9	1,17	1459	1063	0,73	13,4	1,20
RPR	2568	1841	0,72	13,5	1,18	2568	1692	0,66	14,5	1,22
SCH	2737	2093	0,76	12,7	1,15	2737	1902	0,69	13,9	1,20
SNL	5239	4555	0,87	10,9	1,07	5239	3879	0,74	13,2	1,17
TRG	4052	2962	0,73	13,3	1,16	4052	2722	0,67	14,3	1,21
VLV	3929	3272	0,83	11,7	1,17	3929	2937	0,75	13,1	1,19
<b>MÁXIMA</b>	<b>8625</b>	<b>10528</b>	<b>1,34</b>	<b>14,1</b>	<b>1,21</b>	<b>8625</b>	<b>7394</b>	<b>0,96</b>	<b>14,7</b>	<b>1,24</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>3959</b>	<b>4076</b>	<b>0,93</b>	<b>9,9</b>	<b>1,08</b>	<b>3959</b>	<b>3238</b>	<b>0,79</b>	<b>12,3</b>	<b>1,15</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>609</b>	<b>522</b>	<b>0,68</b>	<b>2,7</b>	<b>0,88</b>	<b>609</b>	<b>517</b>	<b>0,65</b>	<b>9,4</b>	<b>1,03</b>

Tabla G.7. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ASC	0,0%	-8,7%	-8,7%	9,1%	4,4%
ASG	0,0%	-12,2%	-12,2%	20,4%	4,0%
BCG	0,0%	-5,9%	-5,9%	7,7%	3,8%
BRG	0,0%	-7,5%	-7,5%	15,7%	5,7%
BTN	0,0%	-22,7%	-22,7%	47,9%	9,5%
CLL	0,0%	-8,6%	-8,6%	9,0%	4,3%
CMP	0,0%	-1,5%	-1,5%	2,6%	1,5%
CNT	0,0%	-28,2%	-28,2%	189,9%	14,9%
CRC	0,0%	-6,0%	-6,0%	6,1%	3,2%
CRH	0,0%	-24,9%	-24,9%	71,0%	11,7%
DDC	0,0%	-23,0%	-23,0%	49,1%	11,5%
ESC	0,0%	-4,6%	-4,6%	4,0%	2,3%
LAS	0,0%	-7,6%	-7,6%	8,4%	4,4%
LNR	0,0%	-1,1%	-1,1%	1,8%	1,1%
LVN	0,0%	0,3%	0,3%	-0,1%	0,3%
NVA	0,0%	-4,6%	-4,6%	4,0%	2,0%
OTR	0,0%	-9,5%	-9,5%	11,5%	5,7%
PLZ	0,0%	-29,8%	-29,8%	130,2%	18,9%
PRG_A1	0,0%	-30,1%	-30,1%	157,6%	17,3%
PRG_A2	0,0%	-19,8%	-19,8%	67,8%	10,3%
PRG_B	0,0%	-28,6%	-28,6%	246,1%	16,2%
PTP	0,0%	-29,6%	-29,6%	207,5%	17,0%
RIZ	0,0%	-3,7%	-3,7%	3,9%	1,9%
RPR	0,0%	-8,1%	-8,1%	7,6%	3,9%
SCH	0,0%	-9,1%	-9,1%	9,6%	4,6%
SNL	0,0%	-14,9%	-14,9%	20,6%	9,1%
TRG	0,0%	-8,1%	-8,1%	7,7%	3,9%
VLV	0,0%	-10,2%	-10,2%	11,6%	2,0%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>246,1 %</b>	<b>18,9 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-13,2 %</b>	<b>-13,2 %</b>	<b>47,4 %</b>	<b>7,0 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-30,1 %</b>	<b>-30,1 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>0,3 %</b>

Tabla G.8. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red rural en estado de explotación normal y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV.

### G.1.3. Resultados por nodo de la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA y configuración DESMALLADA

El escenario ante contingencia que se mostrará será la situación N-1 de fallo del transformador PLZ\_T1 de 132/45 kV en configuración desmallada. Dicho transformador es la única inyección en la subestación PLZ, por lo que ante su fallo, la alimentación a la red de 45 kV de su influencia debe ser soportada por el transformador PRG\_T1. Se indican en color rojo los nodos directamente afectados por la contingencia.

Nodo de la red de 132 kV	Estado de explotación de la red									
	Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de PLZ_T1 (N-1)				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CNT	4731	4050	0,86	32,7	1,10	4728	4043	0,85	32,7	1,10
LST	15623	16486	1,06	22,6	0,98	15603	16436	1,05	22,7	0,98
PLZ	7200	5402	0,75	38,1	1,15	7054	5132	0,73	39,2	1,16
PRG	9917	7744	0,78	36,5	1,13	9896	7598	0,77	37,2	1,14
PTP	5822	4708	0,81	35,1	1,11	5818	4704	0,81	35,1	1,11
MÁXIMA	15623	16486	1,06	38,1	1,15	15603	16436	1,05	39,2	1,16
PROMEDIO	8659	7678	0,85	33,0	1,09	8620	7583	0,84	33,4	1,10
MÍNIMA	4731	4050	0,75	22,6	0,98	4728	4043	0,73	22,7	0,98

Tabla G.9. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 132 kV	Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
	Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
CNT	-0,1%	-0,2%	-0,1%	0,2%	0,0%
LST	-0,1%	-0,3%	-0,2%	0,4%	0,1%
PLZ	-2,0%	-5,0%	-3,0%	3,0%	1,1%
PRG	-0,2%	-1,9%	-1,7%	1,8%	0,9%
PTP	-0,1%	-0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
MÁXIMA	-0,1%	-0,1%	0,0%	3,0%	1,1%
PROMEDIO	-0,5%	-1,5%	-1,0%	1,1%	0,4%
MÍNIMA	-2,0%	-5,0%	-3,0%	0,0%	0,0%

Tabla G.10. Variación relativa en la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 132 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado de explotación de la red									
	Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de PLZ_T1 (N-1)				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ASC	2622	1820	0,69	13,9	1,20	2622	1820	0,69	13,9	1,20
ASG	4084	3411	0,84	11,5	1,11	4083	3403	0,83	11,6	1,11
BCG	2189	1727	0,79	12,3	1,14	2189	1727	0,79	12,3	1,14
BRG	3387	3127	0,92	9,9	1,08	3387	3126	0,92	9,9	1,08
<b>BTN</b>	<b>7645</b>	<b>6066</b>	<b>0,79</b>	<b>12,2</b>	<b>1,14</b>	<b>4664</b>	<b>3565</b>	<b>0,76</b>	<b>12,8</b>	<b>1,18</b>
CLL	2577	1791	0,69	13,9	1,20	2576	1790	0,69	13,9	1,20
CMP	804	690	0,86	11,4	1,19	804	690	0,86	11,4	1,19
CNT	5866	5489	0,94	9,7	1,05	5865	5485	0,94	9,7	1,05
CRC	1615	1135	0,70	13,9	1,21	1614	1134	0,70	13,9	1,21
<b>CRH</b>	<b>8048</b>	<b>6753</b>	<b>0,84</b>	<b>11,5</b>	<b>1,10</b>	<b>5105</b>	<b>4222</b>	<b>0,83</b>	<b>11,7</b>	<b>1,12</b>
<b>DDC</b>	<b>7315</b>	<b>5763</b>	<b>0,79</b>	<b>12,3</b>	<b>1,13</b>	<b>4323</b>	<b>3209</b>	<b>0,74</b>	<b>13,2</b>	<b>1,18</b>
ESC	2387	1560	0,65	14,7	1,24	2387	1559	0,65	14,7	1,24
LAS	2004	1442	0,72	13,5	1,19	2003	1440	0,72	13,6	1,20
LNR	609	517	0,85	11,5	1,18	609	517	0,85	11,5	1,18
LVN	1152	1087	0,94	10,3	1,19	1152	1087	0,94	10,3	1,19
NVA	1442	958	0,66	14,5	1,23	1442	958	0,66	14,5	1,23
OTR	2416	1786	0,74	13,2	1,17	2416	1784	0,74	13,2	1,17
<b>PLZ</b>	<b>8625</b>	<b>7394</b>	<b>0,86</b>	<b>11,1</b>	<b>1,09</b>	<b>4627</b>	<b>3593</b>	<b>0,78</b>	<b>12,6</b>	<b>1,16</b>
<b>PRG_A1</b>	<b>8209</b>	<b>7223</b>	<b>0,88</b>	<b>10,7</b>	<b>1,07</b>	<b>5698</b>	<b>5199</b>	<b>0,91</b>	<b>10,2</b>	<b>1,05</b>
PRG_A2	5862	5461	0,93	9,8	1,04	5860	5441	0,93	9,9	1,04
PRG_B	5401	5184	0,96	9,4	1,03	5399	5163	0,96	9,4	1,03
PTP	6614	6096	0,92	10,0	1,05	6612	6094	0,92	10,0	1,05
RIZ	1459	1063	0,73	13,4	1,20	1459	1063	0,73	13,4	1,20
RPR	2568	1692	0,66	14,5	1,22	2568	1692	0,66	14,5	1,22
SCH	2737	1902	0,69	13,9	1,20	2736	1902	0,69	13,9	1,20
<b>SNL</b>	<b>5239</b>	<b>3879</b>	<b>0,74</b>	<b>13,2</b>	<b>1,17</b>	<b>3576</b>	<b>2584</b>	<b>0,72</b>	<b>13,5</b>	<b>1,17</b>
TRG	4052	2722	0,67	14,3	1,21	4051	2720	0,67	14,3	1,21
VLV	3929	2937	0,75	13,1	1,19	3928	2931	0,75	13,1	1,19
<b>MÁXIMA</b>	<b>8625</b>	<b>7394</b>	<b>0,96</b>	<b>14,7</b>	<b>1,24</b>	<b>6612</b>	<b>6094</b>	<b>0,96</b>	<b>14,7</b>	<b>1,24</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>3959</b>	<b>3238</b>	<b>0,79</b>	<b>12,3</b>	<b>1,15</b>	<b>3348</b>	<b>2711</b>	<b>0,79</b>	<b>12,4</b>	<b>1,16</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>609</b>	<b>517</b>	<b>0,65</b>	<b>9,4</b>	<b>1,03</b>	<b>609</b>	<b>517</b>	<b>0,65</b>	<b>9,4</b>	<b>1,03</b>

Tabla G.11. Resultados de la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ASC	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ASG	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
BCG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BRG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>BTN</b>	<b>-39,0%</b>	<b>-41,2%</b>	<b>-3,7%</b>	<b>4,5%</b>	<b>3,6%</b>
CLL	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CMP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CNT	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
CRC	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
<b>CRH</b>	<b>-36,6%</b>	<b>-37,5%</b>	<b>-1,4%</b>	<b>2,0%</b>	<b>1,7%</b>
<b>DDC</b>	<b>-40,9%</b>	<b>-44,3%</b>	<b>-5,8%</b>	<b>6,6%</b>	<b>4,7%</b>
ESC	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
LAS	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
LNR	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
LVN	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
NVA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
OTR	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
<b>PLZ</b>	<b>-46,3%</b>	<b>-51,4%</b>	<b>-9,4%</b>	<b>12,9%</b>	<b>6,8%</b>
<b>PRG_A1</b>	<b>-30,6%</b>	<b>-28,0%</b>	<b>3,7%</b>	<b>-5,2%</b>	<b>-1,3%</b>
PRG_A2	0,0%	-0,4%	-0,3%	0,6%	0,1%
PRG_B	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,6%	0,3%
PTP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RIZ	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RPR	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SCH	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>SNL</b>	<b>-31,7%</b>	<b>-33,4%</b>	<b>-2,4%</b>	<b>2,3%</b>	<b>0,1%</b>
TRG	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
VLV	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,2%	0,1%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>3,7 %</b>	<b>12,9 %</b>	<b>6,8 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>-8,1 %</b>	<b>-8,5 %</b>	<b>-0,7 %</b>	<b>0,9 %</b>	<b>0,6 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>-46,3 %</b>	<b>-51,4 %</b>	<b>-9,4 %</b>	<b>-5,2 %</b>	<b>-1,3 %</b>

Tabla G.12. Variación relativa en la simulación de la red RURAL en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 132/45 kV PLZ\_T1) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 132/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV.

## G.2. Escenarios de explotación de red urbana

De igual forma que en el apartado G.1, a continuación se reproducen de nuevo los esquemas topológicos de la red de alimentación y de la red de reparto representativos de una red eléctrica urbana.

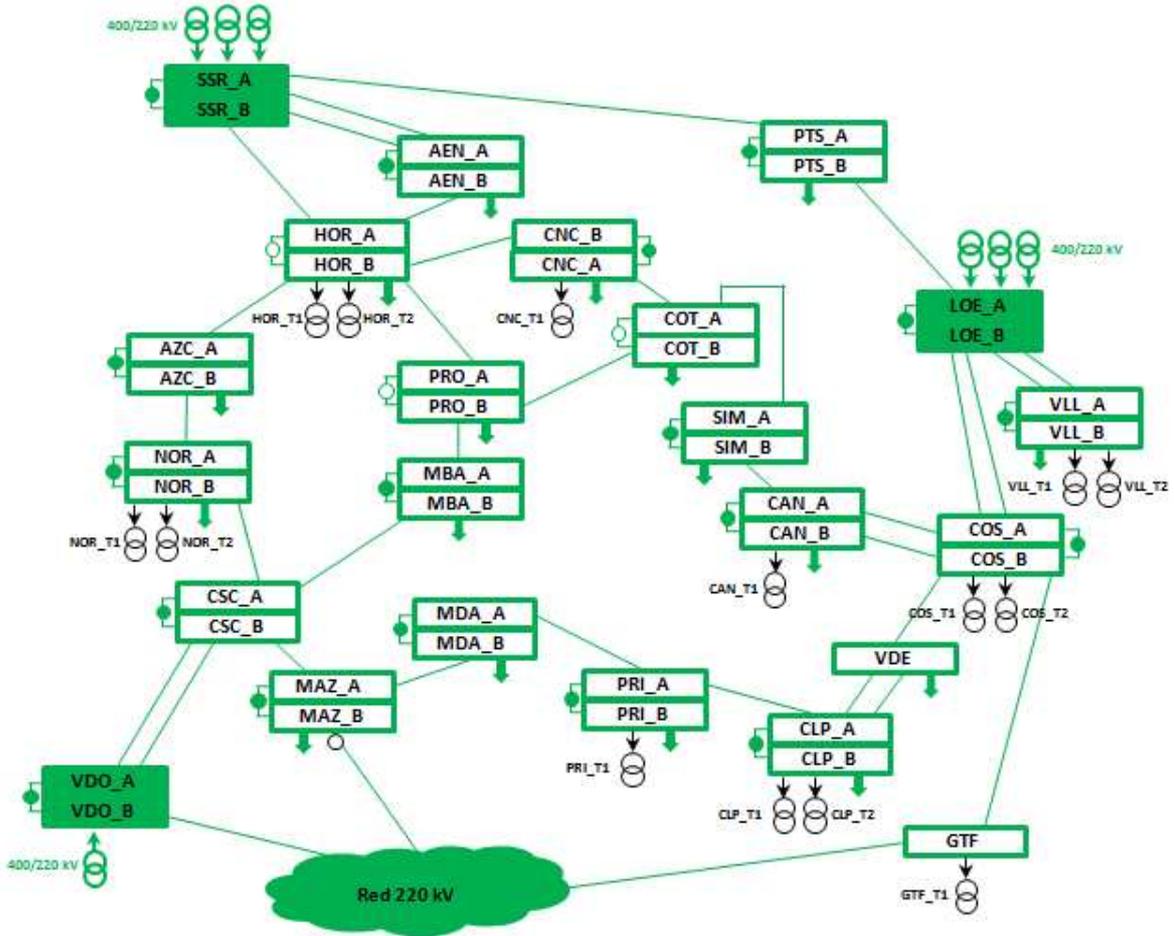


Figura 8.3 (rep.). Topología de la red de alimentación de 220 kV de la red urbana analizada.



**G.2.1. Resultados por nodo de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA**

Nodo de la red de 220 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CAN	33228	33762	1,02	41,5	1,05	33228	32761	0,99	44,1	1,07
CLP	35516	37183	1,05	38,7	1,02	35516	35781	1,01	42,0	1,04
CNC	30261	32691	1,08	36,3	1,03	30261	31719	1,05	39,0	1,05
COS	35272	34655	0,98	44,2	1,06	35272	33836	0,96	46,2	1,07
GTF	23326	20594	0,88	52,3	1,08	23326	19724	0,85	55,4	1,10
HOR_A	24640	23222	0,94	47,4	1,06	24640	22539	0,91	49,8	1,08
HOR_B	30279	33184	1,10	35,0	1,02	30279	32243	1,06	37,7	1,04
NOR	32140	35497	1,10	34,3	1,02	32140	34626	1,08	36,5	1,03
PRI	34617	36578	1,06	37,9	1,02	34617	35237	1,02	41,2	1,04
VLL	19757	17139	0,87	53,6	1,09	19757	15311	0,77	61,5	1,16
<b>MÁXIMA</b>	<b>35516</b>	<b>37183</b>	<b>1,10</b>	<b>53,6</b>	<b>1,09</b>	<b>35516</b>	<b>35781</b>	<b>1,08</b>	<b>61,5</b>	<b>1,16</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>29904</b>	<b>30451</b>	<b>1,01</b>	<b>42,1</b>	<b>1,04</b>	<b>29904</b>	<b>29378</b>	<b>0,97</b>	<b>45,3</b>	<b>1,07</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>19757</b>	<b>17139</b>	<b>0,87</b>	<b>34,3</b>	<b>1,02</b>	<b>19757</b>	<b>15311</b>	<b>0,77</b>	<b>36,5</b>	<b>1,03</b>

Tabla G.13. Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 220 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
CAN	0,0%	-3,0%	-3,0%	6,2%	1,6%
CLP	0,0%	-3,8%	-3,8%	8,7%	2,1%
CNC	0,0%	-3,0%	-3,0%	7,7%	1,7%
COS	0,0%	-2,4%	-2,4%	4,4%	1,1%
GTF	0,0%	-4,2%	-4,2%	6,0%	2,1%
HOR_A	0,0%	-2,9%	-2,9%	5,0%	1,8%
HOR_B	0,0%	-2,8%	-2,8%	7,7%	1,6%
NOR	0,0%	-2,5%	-2,5%	6,6%	1,0%
PRI	0,0%	-3,7%	-3,7%	8,7%	2,0%
VLL	0,0%	-10,7%	-10,7%	14,7%	5,7%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-2,4 %</b>	<b>-2,4 %</b>	<b>14,7 %</b>	<b>5,7 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-3,9 %</b>	<b>-3,9 %</b>	<b>7,6 %</b>	<b>2,1 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-10,7 %</b>	<b>-10,7 %</b>	<b>4,4 %</b>	<b>1,0 %</b>

Tabla G.14. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ADA	39365	35513	0,90	11,3	1,24	39365	35491	0,90	11,3	1,24
ADF	49626	46125	0,93	11,1	1,25	49626	46082	0,93	11,1	1,25
BBL	44588	40020	0,90	12,1	1,31	44588	39979	0,90	12,2	1,31
BJM_A	22585	23341	1,03	8,6	1,12	22585	23333	1,03	8,7	1,12
BJM_B	22583	23340	1,03	8,6	1,12	22583	23331	1,03	8,7	1,12
BNC	32217	28934	0,90	11,7	1,27	32217	28900	0,90	11,7	1,27
BPZ	32930	32542	0,99	9,5	1,16	32930	32525	0,99	9,6	1,16
BRJ	14274	13162	0,92	10,4	1,15	14274	13135	0,92	10,4	1,15
BUT	6252	6039	0,97	9,3	1,05	6252	6033	0,97	9,3	1,05
CAN_A	43895	40944	0,93	10,0	1,12	43895	40871	0,93	10,1	1,12
CAN_B	43903	40950	0,93	10,0	1,12	43903	40878	0,93	10,1	1,12
CCP	19229	18394	0,96	10,0	1,16	19229	18379	0,96	10,0	1,16
CHM_A	33076	30854	0,93	11,0	1,24	33076	30840	0,93	11,0	1,24
CHM_B	33076	30855	0,93	11,0	1,24	33076	30840	0,93	11,0	1,24
CLP_A	64697	65132	1,01	8,9	1,10	64697	65046	1,01	8,9	1,10
CLP_B	64687	65121	1,01	8,9	1,10	64687	65035	1,01	8,9	1,10
CNC_A	30592	28624	0,94	10,3	1,16	30592	28592	0,93	10,3	1,17
CNC_B	19232	17622	0,92	10,2	1,11	19232	17578	0,91	10,3	1,11
CNG_A	26376	22555	0,86	12,6	1,31	26376	22523	0,85	12,6	1,31
CNG_B	3942	3179	0,81	12,0	1,11	3942	3177	0,81	12,0	1,11
COS_A	45191	53626	1,19	5,4	0,94	45191	53580	1,19	5,5	0,94
COS_B	45187	53623	1,19	5,4	0,94	45187	53576	1,19	5,5	0,94
CTP	20295	18982	0,94	10,2	1,16	20295	18977	0,94	10,3	1,16
FNM	49282	46567	0,94	11,2	1,27	49282	46532	0,94	11,2	1,27
GTF	27706	25654	0,93	10,2	1,13	27706	25646	0,93	10,2	1,13
HOR_A	43336	39984	0,92	10,2	1,12	43336	39939	0,92	10,2	1,12
HOR_B	43332	39981	0,92	10,2	1,12	43332	39935	0,92	10,2	1,12
IFM	18956	17333	0,91	10,3	1,12	18956	17290	0,91	10,3	1,12
MCD_A	35830	40179	1,12	6,9	1,05	35830	40153	1,12	6,9	1,05
MCD_B	35835	40189	1,12	6,9	1,05	35835	40163	1,12	6,9	1,05
MRT	46833	40348	0,86	12,3	1,32	46833	40309	0,86	12,3	1,32
MTR	34903	30932	0,89	11,7	1,25	34903	30915	0,89	11,7	1,26

Tabla G.15 (a). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV (PARTE 1).

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
NMN_A	41908	38238	0,91	11,0	1,21	41908	38213	0,91	11,0	1,22
NMN_B	41913	38242	0,91	11,0	1,21	41913	38216	0,91	11,0	1,22
NOR_A	53584	51949	0,97	9,8	1,17	53584	51911	0,97	9,9	1,17
NOR_B	53582	51946	0,97	9,8	1,17	53582	51909	0,97	9,9	1,17
PLG	48999	43334	0,88	12,5	1,33	48999	43282	0,88	12,6	1,33
PLM	53533	49606	0,93	10,9	1,22	53533	49493	0,92	10,9	1,22
PNR_A	22070	20717	0,94	10,1	1,15	22070	20683	0,94	10,2	1,15
PNR_B	22073	20719	0,94	10,1	1,15	22073	20685	0,94	10,2	1,15
PÑL	35631	32299	0,91	11,6	1,27	35631	32282	0,91	11,6	1,27
PRI_A	53245	50022	0,94	10,7	1,21	53245	49974	0,94	10,7	1,22
PRI_B	53242	50019	0,94	10,7	1,21	53242	49971	0,94	10,7	1,22
RCL_A	43937	39631	0,90	11,9	1,30	43937	39609	0,90	12,0	1,30
RCL_B	43946	39639	0,90	11,9	1,30	43946	39617	0,90	12,0	1,30
RSL	38537	34526	0,90	12,4	1,33	38537	34508	0,90	12,5	1,33
SBL_A	37542	34223	0,91	11,2	1,23	37542	34173	0,91	11,2	1,23
SBL_B	37543	34223	0,91	11,2	1,23	37543	34173	0,91	11,2	1,23
SDG_A	52631	49529	0,94	11,0	1,25	52631	49441	0,94	11,1	1,25
SDG_B	52636	49534	0,94	11,0	1,25	52636	49445	0,94	11,1	1,25
SLM_A	51848	50247	0,97	10,4	1,23	51848	50208	0,97	10,4	1,23
SLM_B	51840	50242	0,97	10,4	1,23	51840	50202	0,97	10,4	1,23
TLF	35075	31849	0,91	11,3	1,24	35075	31807	0,91	11,3	1,24
TLS	17341	11211	0,65	14,8	1,22	17341	11206	0,65	14,8	1,22
VCL_A	38979	31772	0,82	13,0	1,30	38979	31711	0,81	13,0	1,30
VCL_B	38986	31776	0,82	13,0	1,30	38986	31714	0,81	13,0	1,30
VDB	14517	13353	0,92	10,4	1,15	14517	13326	0,92	10,4	1,15
VDL	43298	39744	0,92	11,3	1,25	43298	39667	0,92	11,3	1,25
VLD_A	26177	24734	0,94	10,3	1,18	26177	24726	0,94	10,3	1,18
VLD_B	26177	24734	0,94	10,3	1,18	26177	24726	0,94	10,3	1,18
VLL_A	56342	52148	0,93	10,5	1,17	56342	52029	0,92	10,5	1,17
VLL_B	56362	52167	0,93	10,5	1,17	56362	52049	0,92	10,5	1,17
<b>MÁXIMA</b>	<b>64697</b>	<b>65132</b>	<b>1,19</b>	<b>14,8</b>	<b>1,33</b>	<b>64697</b>	<b>65046</b>	<b>1,19</b>	<b>14,8</b>	<b>1,33</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>37698</b>	<b>35532</b>	<b>0,94</b>	<b>10,5</b>	<b>1,19</b>	<b>37698</b>	<b>35492</b>	<b>0,94</b>	<b>10,6</b>	<b>1,19</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>3942</b>	<b>3179</b>	<b>0,65</b>	<b>5,4</b>	<b>0,94</b>	<b>3942</b>	<b>3177</b>	<b>0,65</b>	<b>5,5</b>	<b>0,94</b>

Tabla G.15 (b). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV (PARTE 2).

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ADA	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
ADF	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
BBL	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
BJM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
BJM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
BNC	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
BPZ	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
BRJ	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
BUT	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
CAN_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
CAN_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
CCP	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
CHM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
CHM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
CLP_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,3%	0,1%
CLP_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,3%	0,1%
CNC_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
CNC_B	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,4%	0,2%
CNG_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
CNG_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
COS_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,3%	0,0%
COS_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,3%	0,0%
CTP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
FNM	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
GTF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
HOR_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
IFM	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,2%
MCD_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
MCD_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
MRT	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
MTR	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%

Tabla G.16 (a). Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 1)

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi} / I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
NMN_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
NMN_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
NOR_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
NOR_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
PLG	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
PLM	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,5%	0,2%
PNR_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
PNR_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
PÑL	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
PRI_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
PRI_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
RCL_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
RCL_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
RSL	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,0%	0,0%
SBL_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
SBL_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,1%
SDG_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
SDG_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
SLM_A	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
SLM_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
TLF	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
TLS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VCL_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,2%	0,1%
VCL_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,2%	0,1%
VDB	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
VDL	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,1%
VLD_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLD_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLL_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,5%	0,3%
VLL_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,5%	0,3%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,5 %</b>	<b>0,3 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>0,2 %</b>	<b>0,1 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>

Tabla G.16 (b). Variación relativa de los principales parámetros entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración MALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 2)

## G.2.2. Resultados por nodo de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA

Nodo de la red de 220 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CAN	32752	32916	1,01	42,5	1,06	32752	32018	0,98	44,8	1,07
CLP	34868	36048	1,03	39,7	1,02	34868	34762	1,00	42,9	1,05
CNC	29718	31845	1,07	37,0	1,03	29718	30952	1,04	39,6	1,05
COS	34833	34038	0,98	44,6	1,06	34833	33284	0,96	46,5	1,07
GTF	22917	19740	0,86	54,1	1,08	22917	18980	0,83	56,9	1,10
HOR_A	23985	22064	0,92	49,3	1,07	23985	21522	0,90	51,2	1,09
HOR_B	29706	32356	1,09	35,5	1,03	29706	31483	1,06	38,1	1,04
NOR	31642	34808	1,10	34,6	1,02	31642	33976	1,07	36,8	1,03
PRI	33993	35476	1,04	38,9	1,02	33993	34245	1,01	42,0	1,04
VLL	18533	14412	0,78	61,2	1,13	18533	12657	0,68	69,2	1,20
<b>MÁXIMA</b>	<b>34868</b>	<b>36048</b>	<b>1,10</b>	<b>61,2</b>	<b>1,13</b>	<b>34868</b>	<b>34762</b>	<b>1,07</b>	<b>69,2</b>	<b>1,20</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>29295</b>	<b>29370</b>	<b>0,99</b>	<b>43,7</b>	<b>1,05</b>	<b>29295</b>	<b>28388</b>	<b>0,95</b>	<b>46,8</b>	<b>1,07</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>18533</b>	<b>14412</b>	<b>0,78</b>	<b>34,6</b>	<b>1,02</b>	<b>18533</b>	<b>12657</b>	<b>0,68</b>	<b>36,8</b>	<b>1,03</b>

Tabla G.17. Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 220 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	Δ I <sub>3φ</sub> (%)	Δ I <sub>1φ</sub> (%)	Δ (I <sub>1φ</sub> /I <sub>3φ</sub> ) (%)	Δ V <sub>0</sub> (%)	Δ K <sub>PAT</sub> (%)
CAN	0,0%	-2,7%	-2,7%	5,5%	1,4%
CLP	0,0%	-3,6%	-3,6%	8,0%	2,1%
CNC	0,0%	-2,8%	-2,8%	7,0%	1,7%
COS	0,0%	-2,2%	-2,2%	4,1%	1,1%
GTF	0,0%	-3,9%	-3,9%	5,2%	2,0%
HOR_A	0,0%	-2,5%	-2,5%	4,0%	1,5%
HOR_B	0,0%	-2,7%	-2,7%	7,2%	1,6%
NOR	0,0%	-2,4%	-2,4%	6,4%	1,0%
PRI	0,0%	-3,5%	-3,5%	8,0%	2,0%
VLL	0,0%	-12,2%	-12,2%	13,2%	6,3%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-2,2 %</b>	<b>-2,2 %</b>	<b>13,2 %</b>	<b>6,3 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-3,8 %</b>	<b>-3,8 %</b>	<b>6,8 %</b>	<b>2,1 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-12,2 %</b>	<b>-12,2 %</b>	<b>4,0 %</b>	<b>1,0 %</b>

Tabla G.18. Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ADA	7520	7551	1,00	9,5	1,17	7520	7533	1,00	9,5	1,17
ADF	8798	9553	1,09	7,2	1,01	8798	9529	1,08	7,3	1,01
BBL	8026	7858	0,98	9,5	1,13	8026	7834	0,98	9,5	1,13
BJM_A	4913	5036	1,02	8,4	1,06	4913	5036	1,02	8,4	1,06
BJM_B	4913	5036	1,02	8,4	1,06	4913	5036	1,02	8,4	1,06
BNC	6165	7132	1,16	6,4	1,05	6165	7132	1,16	6,4	1,05
BPZ	7251	7225	1,00	9,1	1,11	7251	7227	1,00	9,1	1,11
BRJ	8292	8413	1,01	8,5	1,04	8292	8382	1,01	8,5	1,04
BUT	6246	6031	0,97	9,3	1,05	6246	6025	0,96	9,3	1,05
CAN_A	6260	7095	1,13	6,7	1,04	6260	7095	1,13	6,7	1,04
CAN_B	9417	9444	1,00	8,6	1,01	9417	9405	1,00	8,7	1,01
CCP	7600	7755	1,02	8,4	1,04	7600	7731	1,02	8,4	1,04
CHM_A	7629	7362	0,96	9,8	1,15	7629	7360	0,96	9,8	1,15
CHM_B	3582	3786	1,06	7,7	1,00	3582	3785	1,06	7,7	1,00
CLP_A	9113	9967	1,09	7,0	0,96	9113	9938	1,09	7,1	0,96
CLP_B	9147	9997	1,09	7,1	0,97	9147	9970	1,09	7,1	0,97
CNC_A	8403	8896	1,06	7,8	1,03	8403	8870	1,06	7,8	1,03
CNC_B	9553	9621	1,01	8,5	1,00	9553	9580	1,00	8,6	1,00
CNG_A	8320	7994	0,96	9,5	1,09	8320	7932	0,95	9,6	1,10
CNG_B	3940	3177	0,81	12,0	1,11	3940	3175	0,81	12,0	1,11
COS_A	7569	10271	1,36	2,5	0,88	7569	10270	1,36	2,5	0,88
COS_B	7534	10220	1,36	2,5	0,88	7534	10218	1,36	2,5	0,88
CTP	5519	5641	1,02	8,3	1,04	5519	5641	1,02	8,3	1,04
FNM	8450	9121	1,08	7,6	1,06	8450	9100	1,08	7,6	1,06
GTF	11415	11323	0,99	8,8	1,01	11415	11325	0,99	8,8	1,01
HOR_A	9398	9955	1,06	7,6	0,98	9398	9921	1,06	7,7	0,98
HOR_B	9240	9163	0,99	8,8	1,01	9240	9158	0,99	8,8	1,01
IFM	9489	9555	1,01	8,5	1,01	9489	9515	1,00	8,6	1,01
MCD_A	6651	8155	1,23	5,4	1,04	6651	8154	1,23	5,4	1,04
MCD_B	7144	9585	1,34	2,9	0,93	7144	9584	1,34	2,9	0,93
MRT	9180	8541	0,93	10,2	1,14	9180	8470	0,92	10,3	1,14
MTR	7937	8110	1,02	8,4	1,06	7937	8092	1,02	8,5	1,06

Tabla G.19 (a). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 1).

Nodo de la red de 45 kV	Estado del arrollamiento de estabilización de los transformadores 220/45 kV									
	Arrollamiento estabilización CERRADO					Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
NMN_A	8238	8438	1,02	8,4	1,05	8238	8418	1,02	8,4	1,05
NMN_B	7603	7654	1,01	9,4	1,17	7603	7636	1,00	9,4	1,17
NOR_A	3889	4088	1,05	7,8	0,98	3889	4087	1,05	7,8	0,98
NOR_B	3878	4077	1,05	7,8	0,98	3878	4076	1,05	7,8	0,98
PLG	8217	7053	0,86	12,0	1,25	8217	7004	0,85	12,1	1,25
PLM	11231	10146	0,90	10,4	1,08	11231	10050	0,89	10,5	1,08
PNR_A	7858	7998	1,02	8,5	1,05	7858	7971	1,01	8,5	1,05
PNR_B	7035	7390	1,05	8,2	1,09	7035	7372	1,05	8,2	1,09
PÑL	8843	8791	0,99	9,1	1,10	8843	8759	0,99	9,1	1,10
PRI_A	10429	10478	1,00	8,6	1,01	10429	10428	1,00	8,7	1,02
PRI_B	10428	10477	1,00	8,6	1,01	10428	10427	1,00	8,7	1,02
RCL_A	6952	7048	1,01	10,0	1,24	6952	7036	1,01	10,1	1,24
RCL_B	3784	3971	1,05	7,8	1,00	3784	3970	1,05	7,8	1,00
RSL	7636	7395	0,97	10,2	1,21	7636	7374	0,97	10,3	1,21
SBL_A	6360	7452	1,17	6,0	1,02	6360	7451	1,17	6,0	1,02
SBL_B	9414	8499	0,90	10,6	1,15	9414	8429	0,90	10,8	1,15
SDG_A	10349	9323	0,90	10,5	1,12	10349	9240	0,89	10,7	1,13
SDG_B	8478	9141	1,08	7,5	1,04	8478	9117	1,08	7,5	1,04
SLM_A	8448	9111	1,08	7,6	1,06	8448	9090	1,08	7,6	1,06
SLM_B	3698	3899	1,05	7,7	1,00	3698	3899	1,05	7,7	1,00
TLF	6188	7107	1,15	6,6	1,05	6188	7106	1,15	6,6	1,05
TLS	8765	6375	0,73	13,4	1,17	8765	6336	0,72	13,5	1,18
VCL_A	5660	5361	0,95	9,7	1,09	5660	5361	0,95	9,7	1,09
VCL_B	10345	9322	0,90	10,5	1,12	10345	9239	0,89	10,7	1,13
VDB	8360	8473	1,01	8,5	1,04	8360	8442	1,01	8,6	1,04
VDL	10618	9607	0,90	10,4	1,10	10618	9520	0,90	10,5	1,11
VLD_A	8732	8774	1,00	8,8	1,07	8732	8775	1,00	8,7	1,07
VLD_B	6741	7213	1,07	7,8	1,07	6741	7199	1,07	7,8	1,07
VLL_A	9847	9452	0,96	9,4	1,03	9847	9369	0,95	9,5	1,03
VLL_B	11594	10463	0,90	10,4	1,06	11594	10361	0,89	10,5	1,07
<b>MÁXIMA</b>	<b>11594</b>	<b>11323</b>	<b>1,36</b>	<b>13,4</b>	<b>1,25</b>	<b>11594</b>	<b>11325</b>	<b>1,36</b>	<b>13,5</b>	<b>1,25</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>7810</b>	<b>7954</b>	<b>1,03</b>	<b>8,4</b>	<b>1,06</b>	<b>7810</b>	<b>7928</b>	<b>1,02</b>	<b>8,5</b>	<b>1,06</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>3582</b>	<b>3177</b>	<b>0,73</b>	<b>2,5</b>	<b>0,88</b>	<b>3582</b>	<b>3175</b>	<b>0,72</b>	<b>2,5</b>	<b>0,88</b>

Tabla G.19 (b). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 2).

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ADA	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,0%
ADF	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,0%
BBL	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,4%	0,0%
BJM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BJM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BNC	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BPZ	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BRJ	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,7%	0,1%
BUT	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
CAN_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAN_B	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,8%	0,1%
CCP	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,0%
CHM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CHM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CLP_A	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,8%	0,1%
CLP_B	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,7%	0,0%
CNC_A	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,0%
CNC_B	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,9%	0,2%
CNG_A	0,0%	-0,8%	-0,8%	1,4%	0,4%
CNG_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
COS_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
COS_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
CTP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
FNM	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	-0,1%
GTF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_A	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,8%	0,1%
HOR_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
IFM	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,9%	0,2%
MCD_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MCD_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
MRT	0,0%	-0,8%	-0,8%	1,3%	0,4%
MTR	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,0%

**Tabla G.20 (a). Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 1)**

Nodo de la red de 45 kV	Arrollamiento estabilización CERRADO VS Arrollamiento estabilización ABIERTO				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
NMN_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,0%
NMN_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,3%	0,0%
NOR_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
NOR_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PLG	0,0%	-0,7%	-0,7%	0,8%	0,2%
PLM	0,0%	-1,0%	-1,0%	1,5%	0,6%
PNR_A	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,0%
PNR_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,0%
PÑL	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,5%	-0,1%
PRI_A	0,0%	-0,5%	-0,5%	0,9%	0,1%
PRI_B	0,0%	-0,5%	-0,5%	0,9%	0,1%
RCL_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,1%	-0,1%
RCL_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RSL	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,2%	-0,1%
SBL_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SBL_B	0,0%	-0,8%	-0,8%	1,2%	0,4%
SDG_A	0,0%	-0,9%	-0,9%	1,3%	0,4%
SDG_B	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,0%
SLM_A	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	-0,1%
SLM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TLF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TLS	0,0%	-0,6%	-0,6%	0,6%	0,3%
VCL_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VCL_B	0,0%	-0,9%	-0,9%	1,3%	0,4%
VDB	0,0%	-0,4%	-0,4%	0,7%	0,1%
VDL	0,0%	-0,9%	-0,9%	1,4%	0,5%
VLD_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLD_B	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,0%
VLL_A	0,0%	-0,9%	-0,9%	1,6%	0,7%
VLL_B	0,0%	-1,0%	-1,0%	1,5%	0,7%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>1,6 %</b>	<b>0,7 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>0,5 %</b>	<b>0,1 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-1,0 %</b>	<b>-1,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,1 %</b>

Tabla G.20 (b). Variación relativa entre los escenarios de arrollamiento de estabilización cerrado y arrollamiento de estabilización abierto en la simulación de la red URBANA en estado de explotación NORMAL y configuración DESMALLADA. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 2)

### G.2.3. Resultados por nodo de la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA y configuración DESMALLADA

De igual forma que en la red rural, se considerará también en la red urbana un caso representativo de red en explotación ante contingencia. El escenario ante contingencia analizado será la situación N-1 de fallo del transformador CLP\_T2 de 220/45 kV en configuración desmallada y con arrollamientos de estabilización abiertos. Dicho transformador alimenta las subestaciones RCL\_A, VLD\_B y SDG\_B que, en el escenario N-1, serán alimentadas respectivamente por los transformadores NOR\_T2 (RCL\_B), GTF (VLD\_B) y PRI\_T1 (SDG\_B).

Nodo de la red de 220 kV	Estado de explotación de la red									
	Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de CLP_T2 (N-1)				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
CAN	32752	32018	0,98	44,8	1,07	32752	32006	0,98	44,8	1,07
CLP	34868	34762	1,00	42,9	1,05	34868	34665	0,99	43,2	1,05
CNC	29718	30952	1,04	39,6	1,05	29718	30937	1,04	39,6	1,05
COS	34833	33284	0,96	46,5	1,07	34833	33272	0,96	46,5	1,07
GTF	22917	18980	0,83	56,9	1,10	22917	18976	0,83	56,9	1,10
HOR_A	23985	21522	0,90	51,2	1,09	23985	21522	0,90	51,2	1,09
HOR_B	29706	31483	1,06	38,1	1,04	29706	31464	1,06	38,1	1,04
NOR	31642	33976	1,07	36,8	1,03	31642	33950	1,07	36,9	1,03
PRI	33993	34245	1,01	42,0	1,04	33993	34174	1,01	42,2	1,04
VLL	18533	12657	0,68	69,2	1,20	18533	12657	0,68	69,2	1,20
MÁXIMA	34868	34762	1,07	69,2	1,20	34868	34665	1,07	69,2	1,20
PROMEDIO	29295	28388	0,95	46,8	1,07	29295	28362	0,95	46,9	1,08
MÍNIMA	18533	12657	0,68	36,8	1,03	18533	12657	0,68	36,9	1,03

Tabla G.21. Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 220 kV	Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
CAN	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
CLP	0,0%	-0,3%	-0,3%	0,6%	0,2%
CNC	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
COS	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
GTF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_B	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,1%	0,0%
NOR	0,0%	-0,1%	-0,1%	0,2%	0,0%
PRI	0,0%	-0,2%	-0,2%	0,4%	0,2%
VLL	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>MÁXIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,6 %</b>	<b>0,2 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>0,2 %</b>	<b>0,0 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>0,0 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>-0,3 %</b>	<b>0,0 %</b>	<b>0,0 %</b>

Tabla G.22. Variación relativa en la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 220 kV.

Nodo de la red de 45 kV	Estado de explotación de la red									
	Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de CLP_T2 (N-1)				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
ADA	7520	7533	1,00	9,5	1,17	7520	7533	1,00	9,5	1,17
ADF	8798	9529	1,08	7,3	1,01	8798	9528	1,08	7,3	1,01
BBL	8026	7834	0,98	9,5	1,13	8026	7833	0,98	9,5	1,13
BJM_A	4913	5036	1,02	8,4	1,06	4913	5036	1,02	8,4	1,06
BJM_B	4913	5036	1,02	8,4	1,06	4913	5036	1,02	8,4	1,06
BNC	6165	7132	1,16	6,4	1,05	6165	7131	1,16	6,4	1,05
BPZ	7251	7227	1,00	9,1	1,11	7251	7227	1,00	9,1	1,11
BRJ	8292	8382	1,01	8,5	1,04	8292	8382	1,01	8,5	1,04
BUT	6246	6025	0,96	9,3	1,05	6246	6025	0,96	9,3	1,05
CAN_A	6260	7095	1,13	6,7	1,04	6260	7095	1,13	6,7	1,04
CAN_B	9417	9405	1,00	8,7	1,01	9417	9405	1,00	8,7	1,01
CCP	7600	7731	1,02	8,4	1,04	7600	7731	1,02	8,4	1,04
CHM_A	7629	7360	0,96	9,8	1,15	7629	7360	0,96	9,8	1,15
CHM_B	3582	3785	1,06	7,7	1,00	3582	3785	1,06	7,7	1,00
CLP_A	9113	9938	1,09	7,1	0,96	9740	10559	1,08	7,3	1,01
CLP_B	9147	9970	1,09	7,1	0,97	9147	9970	1,09	7,1	0,97
CNC_A	8403	8870	1,06	7,8	1,03	8403	8869	1,06	7,8	1,03
CNC_B	9553	9580	1,00	8,6	1,00	9553	9579	1,00	8,6	1,00
CNG_A	8320	7932	0,95	9,6	1,10	8320	7932	0,95	9,6	1,10
CNG_B	3940	3175	0,81	12,0	1,11	3940	3175	0,81	12,0	1,11
COS_A	7569	10270	1,36	2,5	0,88	7569	10270	1,36	2,5	0,88
COS_B	7534	10218	1,36	2,5	0,88	7534	10218	1,36	2,5	0,88
CTP	5519	5641	1,02	8,3	1,04	5519	5641	1,02	8,3	1,04
FNM	8450	9100	1,08	7,6	1,06	8450	9099	1,08	7,7	1,06
GTF	11415	11325	0,99	8,8	1,01	11414	11325	0,99	8,8	1,01
HOR_A	9398	9921	1,06	7,7	0,98	9398	9921	1,06	7,7	0,98
HOR_B	9240	9158	0,99	8,8	1,01	9240	9158	0,99	8,8	1,01
IFM	9489	9515	1,00	8,6	1,01	9489	9515	1,00	8,6	1,01
MCD_A	6651	8154	1,23	5,4	1,04	6651	8154	1,23	5,4	1,04
MCD_B	7144	9584	1,34	2,9	0,93	7144	9584	1,34	2,9	0,93
MRT	9180	8470	0,92	10,3	1,14	9180	8470	0,92	10,3	1,14
MTR	7937	8092	1,02	8,5	1,06	7937	8092	1,02	8,5	1,06

Tabla G.23 (a). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 1)

Nodo de la red de 45 kV	Estado de explotación de la red									
	Red en explotación normal (N)					Red ante contingencia de CLP_T2 (N-1)				
	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>	I <sub>3φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> (A)	I <sub>1φ</sub> / I <sub>3φ</sub>	V <sub>0</sub> (kV)	K <sub>PAT</sub>
NMN_A	8238	8418	1,02	8,4	1,05	8238	8418	1,02	8,4	1,05
NMN_B	7603	7636	1,00	9,4	1,17	7603	7636	1,00	9,4	1,17
NOR_A	3889	4087	1,05	7,8	0,98	3889	4087	1,05	7,8	0,98
NOR_B	3878	4076	1,05	7,8	0,98	3878	4076	1,05	7,8	0,98
PLG	8217	7004	0,85	12,1	1,25	8217	7004	0,85	12,1	1,25
PLM	11231	10050	0,89	10,5	1,08	11231	10050	0,89	10,5	1,08
PNR_A	7858	7971	1,01	8,5	1,05	7858	7971	1,01	8,5	1,05
PNR_B	7035	7372	1,05	8,2	1,09	7035	7372	1,05	8,2	1,09
PÑL	8843	8759	0,99	9,1	1,10	8838	9330	1,06	8,1	1,09
PRI_A	10429	10428	1,00	8,7	1,02	10423	11260	1,08	7,3	0,98
PRI_B	10428	10427	1,00	8,7	1,02	10422	11259	1,08	7,3	0,98
RCL_A	6952	7036	1,01	10,1	1,24	3784	3970	1,05	7,8	1,00
RCL_B	3784	3970	1,05	7,8	1,00	3784	3970	1,05	7,8	1,00
RSL	7636	7374	0,97	10,3	1,21	7633	7758	1,02	9,7	1,21
SBL_A	6360	7451	1,17	6,0	1,02	6360	7451	1,17	6,0	1,02
SBL_B	9414	8429	0,90	10,8	1,15	9414	8429	0,90	10,8	1,15
SDG_A	10349	9240	0,89	10,7	1,13	10349	9240	0,89	10,7	1,13
SDG_B	8478	9117	1,08	7,5	1,04	9004	9551	1,06	8,0	1,09
SLM_A	8448	9090	1,08	7,6	1,06	8448	9089	1,08	7,7	1,06
SLM_B	3698	3899	1,05	7,7	1,00	3698	3899	1,05	7,7	1,00
TLF	6188	7106	1,15	6,6	1,05	6188	7106	1,15	6,6	1,05
TLS	8765	6336	0,72	13,5	1,18	8765	6336	0,72	13,5	1,18
VCL_A	5660	5361	0,95	9,7	1,09	5660	5361	0,95	9,7	1,09
VCL_B	10345	9239	0,89	10,7	1,13	10345	9239	0,89	10,7	1,13
VDB	8360	8442	1,01	8,6	1,04	8360	8442	1,01	8,6	1,04
VDL	10618	9520	0,90	10,5	1,11	10618	9520	0,90	10,5	1,11
VLD_A	8732	8775	1,00	8,7	1,07	8732	8775	1,00	8,7	1,07
VLD_B	6741	7199	1,07	7,8	1,07	8731	8775	1,00	8,7	1,07
VLL_A	9847	9369	0,95	9,5	1,03	9847	9369	0,95	9,5	1,03
VLL_B	11594	10361	0,89	10,5	1,07	11594	10361	0,89	10,5	1,07
MÁXIMA	11594	11325	1,36	13,5	1,25	11594	11325	1,36	13,5	1,25
PROMEDIO	7810	7928	1,02	8,5	1,06	7809	7963	1,03	8,4	1,05
MÍNIMA	3582	3175	0,72	2,5	0,88	3582	3175	0,72	2,5	0,88

Tabla G.23 (b). Resultados de la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 2)

Nodo de la red de 45 kV	Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
ADA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
ADF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BBL	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BJM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BJM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BNC	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BPZ	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BRJ	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
BUT	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAN_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CAN_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CCP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CHM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CHM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CLP_A	6,9%	6,2%	-0,6%	2,8%	5,1%
CLP_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CNC_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CNC_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CNG_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CNG_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
COS_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
COS_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
CTP	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
FNM	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
GTF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
HOR_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
IFM	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MCD_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MCD_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MRT	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
MTR	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

**Tabla G.24 (a). Variación relativa en la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 1)**

Nodo de la red de 45 kV	Explotación NORMAL VS Explotación ANTE CONTINGENCIA				
	$\Delta I_{3\phi}$ (%)	$\Delta I_{1\phi}$ (%)	$\Delta (I_{1\phi}/I_{3\phi})$ (%)	$\Delta V_0$ (%)	$\Delta K_{PAT}$ (%)
NMN_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
NMN_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
NOR_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
NOR_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PLG	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PLM	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PNR_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PNR_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
PÑL	0,0%	6,5%	6,6%	-10,8%	-1,0%
PRI_A	-0,1%	8,0%	8,0%	-16,0%	-3,7%
PRI_B	-0,1%	8,0%	8,0%	-16,0%	-3,7%
RCL_A	-45,6%	-43,6%	3,7%	-22,1%	-19,2%
RCL_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
RSL	0,0%	5,2%	5,2%	-5,4%	0,4%
SBL_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SBL_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SDG_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SDG_B	6,2%	4,8%	-1,4%	6,7%	4,9%
SLM_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
SLM_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TLF	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TLS	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VCL_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VCL_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VDB	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VDL	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLD_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLD_B	29,5%	21,9%	-5,9%	11,6%	-0,2%
VLL_A	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
VLL_B	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>MÁXIMA</b>	<b>29,5 %</b>	<b>21,9 %</b>	<b>8,0 %</b>	<b>11,6 %</b>	<b>5,1 %</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>-0,1 %</b>	<b>0,3 %</b>	<b>0,4 %</b>	<b>-0,8 %</b>	<b>-0,3 %</b>
<b>MÍNIMA</b>	<b>-45,6 %</b>	<b>-43,6 %</b>	<b>-5,9 %</b>	<b>-22,1 %</b>	<b>-19,2 %</b>

Tabla G.24 (b). Variación relativa en la simulación de la red URBANA en estado de explotación ANTE CONTINGENCIA (del transformador 220/45 kV CLP\_T2) y configuración DESMALLADA con arrollamientos de estabilización de los transformadores 220/45 kV ABIERTOS. Efecto sobre la red de 45 kV. (PARTE 2)



## Bibliografía

- [1] Blackwell, F.O. "Y or D Connection of Transformers". AIEE Transactions, vol. 22, pp. 385-406, Jul. 1903.
- [2] Rushmore, D.B. "Electrical Connections for Power Stations". AIEE Transactions, vol. 25, pp. 559-584, May. 1906.
- [3] Peck, J.S. "Relative Advantages of One-Phase and Three-Phase Transformers". AIEE Transactions, vol. 26, pp. 467-471, May. 1907.
- [4] Tobey, H.W. "Relative Merits of Three-Phase and One-Phase Transformers". AIEE Transactions, vol. 26, pp. 463-465, May. 1907.
- [5] Blume, L.F. "Influence of Transformers Connections on Operation". AIEE Transactions, vol. 33, pp. 753-770, May. 1914.
- [6] U.S. Patent 1,173,094 by L.F. Blume. "Tertiary Winding" United States Patent Office, Feb. 1916.
- [7] Peters, J.F. "Harmonics in Transformer Magnetizing Currents". AIEE Transactions, vol. 34, pp. 2157-2182, Sep. 1915.
- [8] Robinson, L.N. "Phenomena Accompanying Transmission with Some Types of Star Transformer Connections". AIEE Transactions, vol. 34, pp. 2183-2195, Sep. 1915.
- [9] Robinson, L.N. "Phenomena Accompanying Transmission with Some Types of Star Transformer Connections – Part II". AIEE Transactions, vol. 36, pp. 1081-1111, Dec. 1917.
- [10] Peters, J.F.; Skinner, M.E. "Transformers for Interconnecting High-Voltage Transmission Systems for Feeding Synchronous Condensers from a Tertiary Winding". AIEE Transactions, vol. 40, pp. 1181-1199, Jun. 1921.
- [11] Copley, A.W. "Transformers for High-Voltage Systems". AIEE Transactions, vol. 42, pp. 1068-1069, Oct. 1923.
- [12] Mini Jr, J.; Moore, L.J.; Wilkins, R. "Performance of Auto Transformers with Tertiaries Under Short-Circuit Conditions". AIEE Transactions, vol. 42, pp. 1060-1068, Oct. 1923.
- [13] Gould, K.E. "Instability in Transformer Banks". AIEE Transactions, vol. 46, pp. 676-682, May. 1927.
- [14] Boyajian, A. "Inversion Currents and Voltages in Auto-Transformers". AIEE Transactions, vol. 49, pp. 810-818, Jan. 1930.
- [15] Boyajian, A.; McCarty, O.P. "Physical Nature of Neutral Instability". AIEE Transactions, vol. 50, pp. 317-327, Jul. 1931.
- [16] Charley, R.M. "Recent Progress in Large Transformers". Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 69, nº 418, pp. 1189-1207, Oct. 1931.

- [17] St. Clair, H.P. "The Use of Multiwinding Transformers With Synchronous Condensers for System Voltage Regulation". AIEE Transactions, vol. 59, pp. 212-217, Apr. 1940.
- [18] Garin, A.N. "Zero-Phase Sequence Characteristics of Transformers. Part I: Sequence Impedances of a Static Symmetrical Three-Phase Circuit and of Transformers". General Electric Review, vol. 43, n° 3, pp. 131-136, Mar. 1940.
- [19] Garin, A.N. "Zero-Phase Sequence Characteristics of Transformers. Part II: Equivalent Circuits for Transformers". General Electric Review, vol. 43, n° 4, pp. 174-179, Apr. 1940.
- [20] Blume, L.F.; Boyajian, A; Camilli, G.; Lennox, T.C.; Minneci, S.; Montsinger, V.M. "Transformer Engineering. A Treatise on the Theory, Operation and Application of Transformers". John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> ed. 1951 (1<sup>st</sup> ed. 1931).
- [21] Boyajian, A.; Cogbill, B.A. "The Whys of the Wyes. The Behavior of Transformer Y Connections". Publication General Electric Company GEA-6605 / GET-3388B, 1957.
- [22] Kapp, R.O.; Pearson, A.R. "The Performance of Star-Star Transformers". Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 1, n° 6, pp. 9-12, Jan. 1955.
- [23] Cogbill, B.A. "Are Stabilizing Windings Necessary In All Y-Connected Transformers?" AIEE Transactions Power Apparatus And Systems, vol. 78, n° 3, pp. 963-970, Oct. 1959.
- [24] Farry, O.T. "Tertiary Windings in Autotransformers". AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 80, n° 3, pp. 78-85, Apr. 1961.
- [25] Alexander, G.W.; McNutt, W.J. "EHV Application of Autotransformers". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-86, n° 8, pp. 995-1000, Aug. 1967.
- [26] Iliceto, F. "Considerazioni sulla Possibilità di Renunciare all'Avvolgimento Terziario negli Autotrasformatori di Interconnessione Tra Reti". L' Elettrotecnica, vol. 7, n° 10, 1965.
- [27] Balp, E. "Alcuni Aspetti Specifici dei Problemi di Corto Circuito e del Dimensionamento dell'Avvolgimento Terziario dei Grandi Autotrasformatori add Altissima Tensione". Rendiconti della LXVII Riunione Annuale AEI, 1966.
- [28] Babare, A.; Bertagnolli, G.; Caprio, G.; Giannuzzi, L.; Inesi, A. "Evoluzione dell'Unificazione degli Autotrasformatori d'Interconessione". Giornata di Studio dell' AEI, 1992.
- [29] IEC 60076-1. "Power Transformers. Part 1: General". 2011.
- [30] EN 60076-1. "Transformadores de Potencia. Parte 1: Generalidades". 2013.
- [31] IEEE Std. C57.12.80. "IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers". 2010.
- [32] IEC 60076-8. "Power Transformers. Part 8: Application Guide". 1997.
- [33] UNE 207005. "Transformadores de Potencia. Guía de Aplicación". 2002.
- [34] IEEE Std. C57.105. "Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Distribution Systems". 1978 (Reaffirmed 2008).
- [35] Members of the Staff of the Department of Electrical Engineering Massachusetts Institute of Technology. "Magnetic Circuits and Transformers". John Wiley & Sons, Inc., New York, 1943.
- [36] Hobson, J.E. ; Witzke, R.L. "Electrical Transmission & Distribution Reference Book (Chapter 5: Power Transformers and Reactors)". ABB, New York, 5<sup>th</sup> ed. 1997 (1<sup>st</sup> ed. 1942).

- 
- [37] "The J&P Transformer Book. A practical Technology of the Power Transformer". Newnes-Elsevier, 13<sup>th</sup> ed. 2007 (1<sup>st</sup> ed. 1925)
- [38] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. "Transformer Engineering. Design and Practice" Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
- [39] Ras, E. "Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección" Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 7<sup>a</sup> ed. 1994 (1<sup>a</sup> ed. 1969).
- [40] Fraile Mora, J. "Máquinas Eléctricas". Servicio de Publicaciones del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2<sup>a</sup> ed. 1993.
- [41] Sanz Feito, J. "Máquinas Eléctricas". Prentice Hall, 2002.
- [42] Abetti, P.A.; Davis, H.F. "Surge Transfer in 3-Winding Transformers". AIEE Transactions, vol. 73, pp. 1395-1407, Dec. 1954.
- [43] Smith, D.R. ; Swanson, S.R. "Overvoltages With Remotely-Switched Cable-Fed Grounded Wye-Wye Transformers" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, n° 5, Sep./Oct. 1975.
- [44] CIGRE Working Group 12.07. "Resonance Behavior of High-Voltage Transformers". Paper n° 12-14, CIGRE Session 1984.
- [45] Rush, R; Good, M.L. "Wyes and Wyes Nots of Three-Phase Distribution Transformer Connections". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, n° 4, pp. 683-688, Jul./Aug. 1990.
- [46] Daay, B.P. "Ferroresonance Destroys Transformers". IEEE Proceedings of Southeastcon, vol. 1, pp. 568-578, 1991.
- [47] Bertagnolli, G.; Bergonzi, L.; Cannavale, G.; Caprio, G.; Iliceto, F.; Dilli, B.; Gülyyesil, O. "Power Transmission Reliability. Technical and Economic Issues Relating to the Short-Circuit Performance of Power Transformers". Paper n° 12-207, CIGRE Session 2000.
- [48] Lindroth, A. "Results of Survey of Short-Circuit Failures for Power Transformers Carried Out by CIGRE WG 12.19 TF#2". CIGRE Transformer Colloquium, Budapest, 1999.
- [49] Descans, F. "Transformateurs à couplage étoile-étoile". Revue ACEC-Charleroi, 1969.
- [50] Ngnegueu, T.; Mailhot, M.; Munar, A. "Zero-Phase Impedance and Tank Heating Model for Three-Phase Three-Leg Core Type Transformers Coupling Magnetic Field and Electric Circuit Equations in a Finite Element Software". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, n° 3, pp. 2068-2071, May. 1995.
- [51] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. "Stray Loss Evaluation in Power Transformers – A Review". IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 2269-2274, 2000.
- [52] Tsili, M.A.; Papathanassiou, S.A. "Analysis of a Three-Limb Core Power Transformer under Earth Fault". Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines (ICEM), Cracow, Poland, Sep. 2004.
- [53] Tsili, M.A.; Papathanassiou, S.A. "Zero-Sequence Flux Protection of a Three-Limb Core Power Transformer". Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines (ICEM), Crete Island, Greece, Sep. 2006.

- [54] Penabad-Duran, P.; Lopez-Fernandez, X.M.; Alvarez-Marino, C. "Transformer Tertiary Stabilizing Windings. Part I: Apparent Power Rating". XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2362-2368, 2012.
- [55] Penabad-Duran, P. ; Alvarez-Marino, C.; Lopez-Fernandez, X.M. "Transformer Tertiary Stabilizing Windings. Part II: Overheating Hazard on Tank Walls". XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 2369-2374, 2012.
- [56] Boyajian, A. "Theory of Three-Circuit Transformers". AIEE Transactions, vol. 43, pp. 508-529, Feb. 1924.
- [57] Estwick, C.F. "The Three-Circuit Transformer". AIEE Transactions, vol. 50, pp. 1022-1029, Sep. 1931.
- [58] Starr, F.M. "Equivalent Circuits - I". AIEE Transactions, vol. 51, pp. 287-298, Jan. 1932.
- [59] Starr, F.M. "An Equivalent Circuit for the Four-winding Transformer". General Electric Review, Vol. 36, No. 3, Mar. 1933.
- [60] Hobson, J.E.; Lewis, W.A. "Regulating Transformers in Power System Analysis". AIEE Transactions, vol. 58, pp. 874-886, Jul. 1939.
- [61] Morris, D. "Some Tests of an Exact Practical Theory of the Transformer". Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 97, nº 55, pp. 17-23, 1950.
- [62] Morris, D. "Some Practical Equivalent Circuits for Multi-Circuit Transformers". Journal of the Institution of Electrical Engineers, vol. 98, nº 62, pp. 256-261, 1951.
- [63] Brandwajn, V.; Dommel, H.W.; Dommel, I.I. "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady-State and Transient Studies". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 101, nº 6, pp. 1369-1378, Jun. 1982.
- [64] de Leon, F.; Semlyen, A. "Complete Transformer Model for Electromagnetic Transients". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, nº 1, pp. 231-239, Jan. 1994.
- [65] Narang, A.; Brierley, R.H. "Topology Based Magnetic Model for Steady-State and Transient Studies for Three-Phase Core-Type Transformers". IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, nº 3, pp. 1337-1349, Aug. 1994.
- [66] Chen, X.; Venkata, S.S. "A Three-Phase Three-Winding Core-Type Transformer Model for Low-Frequency Transient Studies". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, nº 2, pp. 775-782, Apr. 1997.
- [67] Henriksen, T. "Transformer Leakage Flux Modeling". SINTEF Energy Research, 2001.
- [68] Henriksen, T. "How to Avoid Unstable Time Domain Responses Caused by Transformer Models". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, nº 2, pp. 516-522, Apr. 2002.
- [69] Martinez, J.A.; Walling, R.; Mork, B.A.; Martin-Arnedo, J.; Durbak, D. "Parameter Determination for Modeling System Transients – Part III: Transformers". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, nº 3, pp. 2051-2062, Jul. 2005.
- [70] Corcoles, F.; Sainz, L.; Pedra, J.; Sanchez-Navarro, J.; Salichs, M. "Three-Phase Transformer Modeling for Unbalanced Conditions". IET Electric Power Applications, vol. 2, nº 2, pp. 99-112, 2008.

- 
- [71] de León, F.; Martínez, J.A. "Dual Three Winding Transformer Equivalent Circuit Matching Leakage Measurements". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, nº 1, pp. 160-168, Jan. 2009.
- [72] Rifaat, R. "Considerations in Modeling and Applications of Three Winding Transformers in Industrial and Commercial Facilities". Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2010.
- [73] Alvarez-Mariño, C.; de Leon, F.; Lopez-Fernandez, X.M. "Equivalent Circuit for the Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of Terminal and Duality Models". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, nº 1, pp. 353-361, Jan. 2012.
- [74] Price, E.; Kulasek, K.; Kobet, G. "The Negative Branch Impedance in the Transformer Sequence Circuit Model". 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 118-136, 2015.
- [75] Schlosser, K. "Die Nullimpedanzen des Voll- und des Spartransformatoren (Zero-Sequence Impedance in Transformers and Autotransformers)". Brown-Boveri-Nachrichten, vol. 44, pp. 78-83, Feb. 1962.
- [76] Schlosser, K. "Eine auf Physikalischer Grundlage ermittelte Ersatzschaltung für Transformatoren mit mehreren Wicklungen (An Equivalent Circuit for Multi-Winding Transformers Derived from a Physical Basis)". Brown-Boveri-Nachrichten, vol. 45, pp. 107-132, Mar. 1963.
- [77] Christoffel, M. "Zero-Sequence Reactances of Transformers and Reactors". The Brown Boveri Review, vol. 52, nº 11/12, pp. 837-842, Nov./Dec. 1965.
- [78] Oels, K.P. "Ersatzschaltungen des Transformators für das Nullsystem (Zero-Sequence Equivalent Circuits for Transformers)" ETZ-A Bd. 89, pp. 59-62, 1968.
- [79] Coppadoro, F. "L'Impedenza alla Sequenza Zero dei Trasformatori". Elettificazione, nº2, Feb. 1970.
- [80] Arturi, C.M. "Comportamento Omopolare dei Trasformatori Trifasi con Nucleo a Tre Colonne e Due Avvolgimenti". L' Energia Elettrica, nº 1, 1987.
- [81] Allcock, R.; Holland, S.; Haydock, L. "Calculation of Zero-Phase Sequence Impedance for Power Transformers using Numerical Methods" IEEE Transactions on Magnetics, vol. 31, nº 3, pp. 2048-2051, May. 1995.
- [82] Wang, Jialong ; Lascu, R. "Zero Sequence Circuit of Three-legged Core Type Transformers". 62nd. Conference for Protective Relay Engineers, 2009.
- [83] IEEE Std. C57.12.90. "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers". 2010.
- [84] Carlson, A.; Fuhr, J.; Schemel, G.; Wegscheider, F. "Testing of Power Transformers". ABB Business Area Power Transformers, Zurich, Switzerland, 2003.
- [85] Rosselli, G. "Transformer Test to Calculate  $Z_0$  for Interconnected Windings Transformers Using Symmetrical Sequence Components" IEEE Power Engineering Society General Meeting proceedings, vol. 2, pp. 1863-1868, San Francisco, 2005.
- [86] Meng, L.W. "Measurement of Zero Sequence Impedance for Three-Winding Transformers". The Singapore Engineer, The Magazine of the Institution of Engineers, Singapore (IES), pp. 26-28, Jan. 2010.
- [87] IEEE Std. C57.12.00. "IEEE Standard for General Requirements for Liquid Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers". 2010.
-

- 
- [88] Lachman, M.F. "Low-Voltage Single-Phase Leakage Reactance Measurement on Transformers-Significance and Application, Part 1". 61th Annual International Conference of Doble Clients, 1994.
- [89] Lachman, M.F.; Shafir, Y.N. "Low-voltage single-phase leakage reactance measurement on Transformers-Influence of Magnetizing Reactance, Part 2". 62th Annual International Conference of Doble Clients, 1995.
- [90] Lachman, M.F.; Shafir, Y.N. "Influence of Single-phase Excitation on Transformer Leakage Reactance Measurement". 62th Annual International Conference of Doble Clients, 1995.
- [91] Lachman, M.F.; Shafir, Y.N. "Influence of Single-Phase Excitation and Magnetizing Reactance on Transformer Leakage Reactance Measurement". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, nº 4, pp. 1538-1546, Oct. 1997.
- [92] Ramos, A.; Burgos, J.C.; Sorrentino, E.; Moreno, A. "Determination of Parameters of Zero-Sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YN<sub>yn</sub>d Transformers Based on Onsite Low-Voltage Tests". IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, nº 3, pp. 1618-1625, Jul. 2013.
- [93] Karsai, K.; Kerenyi, D.; Kiss, L. "Large Power Transformers" Elsevier Company, New York, 1987.
- [94] Vogel, F.J.; Adolphson, E.J. "A Stray Loss Problem in Transformer Tanks". AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 73, pp. 760-764, Jan. 1954.
- [95] Valkovic, Z. "Calculation of the Losses in Three-Phase Transformer Tanks". IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 127, nº 1, pp. 20-25, Jan. 1980.
- [96] Yongbin, C.; Junyou, Y.; Hainian, Y.; Renyuan, T. "Study on Eddy Currents and Shielding Measures in Large Power Transformers". IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, nº 5, pp. 3068-3071, Sep. 1994.
- [97] Kazmierski, M.; Kozlowski, M.; Lasocinski, J. "Hot Spot Identification and Overheating Hazard Preventing when Designing a Large Transformer". CIGRE Paper nº 12-12. Aug. 1984.
- [98] Schmidt, E.; Hamberger, P. "Design Optimization of Power Transformers, Part 2- Eddy Current Analyses for Tank Wall and Core Clamping Parts". IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon), Singapore, Nov. 2004.
- [99] IEC 60076-7. "Power Transformers. Part 7: Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers". 2005.
- [100] IEEE Std. C57.91-2011. "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators". 2011.
- [101] Turowski, J. "Reluctance Networks". Chapter 4, pp. 145-178 and "Coupled Fields". Chapter 6, pp. 234-284. In book Computational Magnetics. Ed. Chapman & Hall. London 1990, editor J. Sykulski.
- [102] IEC 60076-2. "Power Transformers. Part 1: Temperature Rise". 2011.
- [103] Bertagnolli, G. "Short-Circuit Duty of Power Transformers" 3rd Revised Edition, ABB Management Services Ltd Transformers, Zurich, Switzerland, 2006.
- [104] Griscom, S.B. "Electrical Transmission & Distribution Reference Book (Chapter 18: Grounding of Power System Neutrals)". ABB, New York, 5<sup>th</sup> ed. 1997 (1<sup>st</sup> ed. 1942).
- [105] Willheim, R.; Waters, M. "Neutral Grounding in High-Voltage Transmission". Elsevier. 1956.

- 
- [106] IEEE Std. C62.92.1-2000. "IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems – Part I: Introduction". 2000.
- [107] IEEE Std. C62.92.4-1991. "IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems – Part IV: Distribution Systems". 1991.
- [108] IEEE Std. C62.92.5-2009. "IEEE Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems – Part V: Transmission Systems and Sub-transmission Systems". 2009.
- [109] "G-E Network Analyzers Manual". Application, Service and Construction Engineering Divisions, General Electric. 1950.
- [110] IEC 60071-1. "Insulation Co-ordination. Part 1: Definitions, Principles and Rules". 2006.
- [111] IEC 60071-2. "Insulation Co-ordination. Part 2: Application Guide". 1996.
- [112] Crespo, F. "Sobretensiones en las Redes de Alta Tensión". ASINEL. Mayo 1975.
- [113] Marquardt, D. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters" Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 11, nº. 2, pp. 431–441, 1963.

