



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Eléctrica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO
DEL GRUPO MOTOR-ALTERNADOR
MG 138A-F
ANÁLISIS DE AVERÍAS Y
PROPUESTA DE SOLUCIONES**

Autor: **Miguel Martínez García-Denche**

Tutor: **Armando Fombella Cuesta**

Leganés, Diciembre de 2010

Título: ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL GRUPO MOTOR-ALTERNADOR
MG138A-F. ANÁLISIS DE AVERÍAS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

Autor: Miguel Martínez García-Denche

Director: Armando Fombella Cuesta

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ___ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

RESUMEN

Este trabajo es un estudio sobre el grupo motor-alternador (GMA) modelo *MG 138A-F* de *MITSUBISHI*. Se aplica la teoría de máquinas eléctricas al GMA para comprender su funcionamiento y poder predecir sus principales magnitudes de tensión, intensidad, potencia, pérdidas... Además se realiza un análisis sobre la avería más repetida que sufre el GMA, el cortocircuito entre espiras en el devanado shunt. Tras un estudio sobre la resistencia del cobre se llega a la conclusión que los valores de resistencia son más bajos que los especificados en el diseño y esto aumenta la temperatura de funcionamiento. Para corregir este problema se propone un reajuste del potenciómetro conectado en serie al devanado shunt.

Además se hace un resumen sobre los métodos de alimentación de los servicios auxiliares en locomotoras en España y una descripción de la locomotora de la serie 269.2, que utiliza GMA *MG 138A-F*.

Palabras clave: GMA, motor-alternador, MG 138A-F, servicios auxiliares, locomotora 269, locomotora 251, cortocircuito entre espiras.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	7
1.1 INTRODUCCIÓN.....	7
1.2 OBJETIVOS.....	8
1.3 FASES DEL DESARROLLO.....	8
1.4 MEDIOS EMPLEADOS.....	9
1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	9
CAPÍTULO 2. HISTORIA DE LOS SERVICIOS AUXILIARES EN LOCOMOTORAS.....	10
2.1 LA LOCOMOTORA DE VAPOR.....	10
2.2 LAS PRIMERAS LOCOMOTORAS ELÉCTRICAS.....	11
2.3 LA LOCOMOTORA DIÉSEL.....	12
2.4 EL NUEVO IMPULSO A LA TRACCIÓN ELÉCTRICA.....	13
2.5 TRENES DE ÚLTIMA GENERACIÓN.....	14
CAPÍTULO 3. LOCOMOTORAS QUE USAN GMA MG138A-F.....	16
3.1 LA LOCOMOTORA 269.....	16
3.1.1 HISTORIA DE LA LOCOMOTORA 269.....	16
3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LOCOMOTORA 269.2.....	17
3.1.2.1 EL SISTEMA MECÁNICO.....	18
3.1.2.1.1 LOS BOGIES.....	18
3.1.2.2 EL SISTEMA ELÉCTRICO.....	21
3.1.2.2.1 EL CIRCUITO PRINCIPAL DE POTENCIA.....	21
3.1.2.2.2 EL CIRCUITO DE SERVICIOS AUXILIARES.....	23
3.1.2.2.3 EL CIRCUITO DE CONTROL.....	25
3.1.2.3 EL SISTEMA NEUMÁTICO.....	26
3.1.2.4 EL PUPITRE DE CONDUCCIÓN.....	27
3.2 LA LOCOMOTORA 251.....	29
3.2.1 HISTORIA DE LA LOCOMOTORA 251.....	29
3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LOCOMOTORA 251.....	30
3.3 TABLA DE COMPARACIÓN DE LAS LOCOMOTORAS 269.2 Y 251.....	31
CAPÍTULO 4. EL GRUPO MOTOR-ALTERNADOR MG 138A-F.....	33
4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	33
4.2 MOTOR C.C.....	33
4.2.1 EL ESTATOR.....	33
4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.....	34
4.2.2 EL ROTOR.....	35
4.2.2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.....	36
4.2.3 ESQUEMA ELÉCTRICO.....	38
4.3 EL GENERADOR SÍNCRONO.....	39
4.3.1 EL ROTOR.....	39
4.3.2 ESTATOR.....	40
4.3.3 ESQUEMA ELÉCTRICO.....	41
4.4 SISTEMA MECÁNICO.....	41
4.4.1 CONJUNTO CARCASA + ESTATOR.....	41
4.4.2 CONJUNTO EJE + ROTOR.....	42
4.5 REGULADORES.....	43
4.5.1 EL AFR.....	43
4.5.2 EL AVR.....	44
4.6 LAS CARGAS.....	44

4.7 EL ARRANQUE.....	45
4.8 PROTECCIONES.....	46
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO.....	47
5.1. MOTOR C.C. Y AFR.....	47
5.1.1 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ.....	47
5.1.2 EL CIRCUITO MOTOR.....	48
5.1.3 EL PAR MOTOR.....	50
5.1.4 LA POTENCIA DEL MOTOR.....	51
5.1.5 EL FLUJO MAGNÉTICO.....	51
5.1.5.1 REACCIÓN DE INDUCIDO.....	54
5.1.6 RESISTENCIAS A TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO.....	54
5.1.7 FUNCIONAMIENTO SIN REGULACIÓN.....	56
5.1.7.1 CURVA PAR-VELOCIDAD.....	56
5.1.8 EL REGULADOR AFR Y EL FLUJO EXTERNO.....	57
5.1.8.1 FUNCIONAMIENTO DEL AFR.....	58
5.2 EL GENERADOR SINCRONO Y EL AVR.....	60
5.2.1 FUNCIONAMIENTO EN VACIO.....	60
5.2.2 FUNIONAMIENTO EN CARGA Y LA REACCIÓN DE INDUCIDO.....	61
5.2.2.1 LA CAÍDA DE TENSIÓN EN EL GENERADOR.....	63
5.3 LAS PÉRDIDAS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	65
5.3.1 LAS PÉRDIDAS DEL MOTOR C.C.....	65
5.3.2 LAS PÉRDIDAS EN EL AFR.....	65
5.3.3 LAS PÉRDIDAS EN EL GENERADOR.....	65
5.3.4 PÉRDIDAS EN EL AVR.....	65
5.3.5 LAS PÉRDIDAS MECÁNICAS.....	66
5.3.6 LA EFICIENCIA DEL GMA.....	67
5.3.7 TABLAS DE PÉRDIDAS Y EFICIENCIA.....	67
5.4 CÁLCULO DE MAGNITUDES.....	69
5.5 RESULTADOS.....	72
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE AVERÍAS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES.....	75
6.1 PROCESO DE REPARACIÓN.....	75
6.2 IDENTIFICACIÓN DE AVERÍAS.....	76
6.3 CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS EN EL DEVANADO SHUNT.....	79
6.3.1 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DEVANADO SHUNT.....	79
6.3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL DEVANADO SHUNT.....	80
6.3.2.1 PROCESO DE BOBINADO.....	81
6.3.3 DEFINICIÓN DE LA AVERÍA.....	82
6.3.3.1 ENVEJECIMIENTO DEL AISLANTE.....	82
6.3.4 ANÁLISIS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA BOBINA AVERIADA.....	83
6.3.5 LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO.....	85
6.3.6 LA VIDA DEL AISLANTE.....	88
6.3.7 ESTUDIO SOBRE LA RESISTENCIA DEL COBRE.....	89
6.3.7.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL COBRE.....	89
6.3.7.1.1 CÁLCULO DE LAS LONGITUDES DE HILO DE COBRE.....	90
6.3.7.1.2 LA CALIDAD DEL COBRE.....	93
6.3.7.2 LA RESISTENCIA DEL COBRE EN DEVANADOS SHUNT NUEVOS.....	94
6.3.7.3 MEDIDAS REALIZADAS EN BOBINAS NUEVAS LISTAS PARA MONTAR.....	98
6.3.8 IMPACTO DE LA RESISTENCIA DEL COBRE EN LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO.....	98
6.3.9 COSTES.....	100
6.4 PROPUESTA DE SOLUCIONES.....	102

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	105
7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO.....	105
7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS EN EL DEVANADO SHUNT.....	105
7.3 FUTURAS ACTUACIONES.....	106
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	107
GLOSARIO DE SÍMBOLOS.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: GMA.....	7
Figura 2: Serie 1700 de MZA (ref. [1]).....	10
Figura 3: Serie 276 de RENFE (ref. [19]).....	11
Figura 4: Esquema GMG.....	12
Figura 5: Serie 333 de RENFE (ref. [3]).....	13
Figura 6: Esquema diésel.....	13
Figura 7: Serie 250 de RENFE (ref. [19]).....	14
Figura 8: Esquema 25 kV.....	15
Figura 9: Serie 102 de RENFE (ref. [19]).....	15
Figura 10: Serie 269.2. Fotografía (ref. [7]).....	17
Figura 11: Serie 269.2. Dimensiones (ref. [7]).....	18
Figura 12: Serie 269.2. El bogie (ref. [7]).....	18
Figura 13: Serie 269.2. Bastidor del bogie (ref. [7]).....	19
Figura 14: Serie 269.2. Equipo reductor 1 (ref. [7]).....	19
Figura 15: Serie 269.2. Equipo reductor 2 (ref. [7]).....	20
Figura 16: Serie 269.2. Suspensión primaria 1 (ref. [7]).....	20
Figura 17: Serie 269.2. Suspensión primaria 2 (ref. [7]).....	20
Figura 18: Serie 269.2. Suspensión secundaria (ref. [7]).....	21
Figura 19: Serie 269.2. Barra de tracción (ref. [7]).....	21
Figura 20: Serie 269.2. Circuito principal (ref. [7]).....	22
Figura 21: Serie 269.2. Pantógrafo (ref. [7]).....	22
Figura 22: Serie 269.2. Árbol de levas.....	23
Figura 23: Serie 269.2. Circuito de auxiliares (ref. [7]).....	24
Figura 24: Serie 269.2. Pupitre de conducción (ref. [7]).....	27
Figura 25: Serie 269.2. Combinador principal (ref. [7]).....	28
Figura 26: Serie 269.2. Bloque central (ref. [7]).....	28
Figura 27: Serie 269.2. Indicadores eléctricos (ref. [7]).....	29
Figura 28: Serie 269.2. Indicadores neumáticos (ref. [7]).....	29
Figura 29: Serie 251. Fotografía (ref. [19]).....	30
Figura 30: Estator. Fotografía.....	34
Figura 31: Motor c.c.. Plano (mm).....	34
Figura 32: Motor c.c.. Estator.....	35
Figura 33: Rotor. Fotografía.....	35
Figura 34: Motor c.c.. Dimensiones de las ranuras (mm).....	36
Figura 35: Motor c.c.. Devanado inducido.....	36
Figura 36: Motor c.c.. Disposición ondulada.....	37
Figura 37: Motor c.c.. Colector y escobillas (mm).....	38
Figura 38: Motor c.c.. Esquema eléctrico.....	39
Figura 39: Generador síncrono. Rotor.....	40
Figura 40: Generador síncrono. Dimensiones del rotor (mm).....	40
Figura 41: Generador síncrono. Dimensiones del estator (mm).....	41
Figura 42: Generador síncrono. Esquema eléctrico.....	41
Figura 43: Carcasa GMA.....	42
Figura 44: GMA. Acceso a anillos rozantes.....	42
Figura 45: AVR (1).....	43
Figura 46: AVR (2).....	43
Figura 47: AVR (1).....	44
Figura 48: AVR (2).....	44

Figura 49: Arranque.....	45
Figura 50: Esquema del análisis de funcionamiento.....	47
Figura 51: Motor de doble colector.....	48
Figura 52: Esquema motor.....	49
Figura 53: Motor. Flujo magnético.....	52
Figura 54: Motor. Gráfica de saturación del núcleo.....	53
Figura 55: Motor. Curva par-velocidad sin regulación.....	57
Figura 56: Curva AFR.....	59
Figura 57: Curva AFR (2).....	59
Figura 58: Esquema generador.....	60
Figura 59: Generador. Devanado inductor.....	60
Figura 60: Generador. Funcionamiento en vacío.....	61
Figura 61: Generador. Diagrama vectorial.....	62
Figura 62: Generador. Cálculo de la reacción de inducido.....	63
Figura 63: Generador. Cálculo de la inductancia.....	64
Figura 64: Generador. Cálculo de la caída de tensión.....	64
Figura 65: Pérdidas mecánicas-velocidad de giro.....	67
Figura 66: Conexión shunt.....	79
Figura 67: Conjunto de bobinas inductoras.....	81
Figura 68: Proceso de bobinado.....	81
Figura 69: Cortocircuito entre espiras.....	82
Figura 70: Corte transversal.....	83
Figura 71: Corte transversal (2).....	83
Figura 72: Corte transversal (3).....	83
Figura 73: Zona 1.....	84
Figura 74: Caída de tensión en la bobina.....	84
Figura 75: Zona 2.....	85
Figura 76: Temperatura-Calor generado.....	87
Figura 77: Coeficiente de convección-Velocidad de giro.....	88
Figura 78: Sección y número de vueltas.....	89
Figura 79: Cálculo de longitudes. Devanado sustractivo (mm).....	90
Figura 80: Sección bobina sustractiva (mm).....	91
Figura 81: Bobina cuadrado (mm).....	91
Figura 82: Bobina triángulo (mm).....	91
Figura 83: Resistencia del cobre en devanados shunt nuevos.....	94
Figura 84: Aditivo vs Sustractivo. Recta teórica.....	95
Figura 85: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos.....	96
Figura 86: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos (2).....	96
Figura 87: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos y recta teórica.....	97
Figura 88: Shunt vs Aditivo. Valores medidos y recta teórica.....	97
Figura 89: Resistencia del cobre con diámetro IEC.....	98
Figura 90: Potenciómetro MGFR (ref. [6]).....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Serie 269.2. Consumo de los servicios auxiliares.....	25
Tabla 2: Serie 251. Consumo de los servicios auxiliares.....	31
Tabla 3: Comparación de las locomotoras 269.2 y 251.....	31
Tabla 4: Motor. F.M.M. en el ensayo de vacío.....	53
Tabla 5: Flujo en el ensayo de vacío.....	53
Tabla 6: Motor. F.M.M. en el ensayo de plena carga.....	55
Tabla 7: Motor. F.E.M. en el ensayo de plena carga.....	55
Tabla 8: Motor. Rs en el ensayo de plena carga.....	55
Tabla 9: Motor. Rsh en el ensayo de vacío.....	56
Tabla 10: Motor. F.M.M. externa en los ensayos de vacío y plena carga.....	58
Tabla 11: Motor. F.M.M. externa en los ensayos de vacío y plena carga (2).....	58
Tabla 12: Funcionamiento AVR.....	62
Tabla 13: Funcionamiento AVR.....	62
Tabla 14: Potencia entrante en el ensayo de vacío.....	66
Tabla 15: Pérdidas mecánicas en el ensayo de vacío.....	66
Tabla 16: Pérdidas mecánicas-velocidad de giro.....	67
Tabla 17: Pérdidas y eficiencia.....	68
Tabla 18: Pérdidas y eficiencia, continuación.....	68
Tabla 19: Tensión en bornes obtenida vs real.....	69
Tabla 20: Corriente de excitación calculada vs real.....	70
Tabla 21: Corrientes en motor calculadas vs reales.....	70
Tabla 22: Cálculo de magnitudes, lado generador.....	71
Tabla 23: Cálculo de magnitudes, lado motor.....	71
Tabla 24: Averías del GMA.....	76
Tabla 25: Averías ordenadas por repeticiones.....	78
Tabla 26: Rsh en el ensayo de plena carga.....	86
Tabla 27: Rcobre en el ensayo de plena carga.....	86
Tabla 28: Temperatura del cobre.....	86
Tabla 29: Calor en el ensayo de plena carga.....	87
Tabla 30: Coeficiente de convección-Velocidad de giro.....	88
Tabla 31: IEC. Calidades del cobre.....	93
Tabla 32: Resistencias del cobre calculadas.....	93
Tabla 33: RENFE. Aditivo vs sustractivo.....	95
Tabla 34: IEC. Aditivo vs sustractivo.....	95
Tabla 35: R. medidas en bobinas listas para montar.....	98
Tabla 36: Resistencia del cobre a 82 °C.....	99
Tabla 37: Corriente shunt.....	99
Tabla 38: Calor generado.....	99
Tabla 39: F.m.m.....	99
Tabla 40: F.m.m. del AFR y velocidad de giro.....	100
Tabla 41: Coeficiente de convección.....	100
Tabla 42: Temperatura de funcionamiento del devanado shunt.....	100
Tabla 43: Costes.....	101
Tabla 44: Costes de reparación.....	101
Tabla 45: Coste total de una avería.....	101
Tabla 46: Propuesta de soluciones.....	104

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Un **grupo motor-alternador** (GMA) es una máquina eléctrica que se utiliza para transformar corriente continua en corriente alterna trifásica. Se compone de un motor de corriente continua unido por el eje a un generador síncrono, de forma que se suministra energía en forma de corriente continua, es transformada en energía mecánica por el motor, y esta es transformada en corriente alterna por el alternador, realizando así la conversión c.c.-c.a.. Este dispositivo pertenece a la familia de lo que se conoce como **convertidores rotativos**.

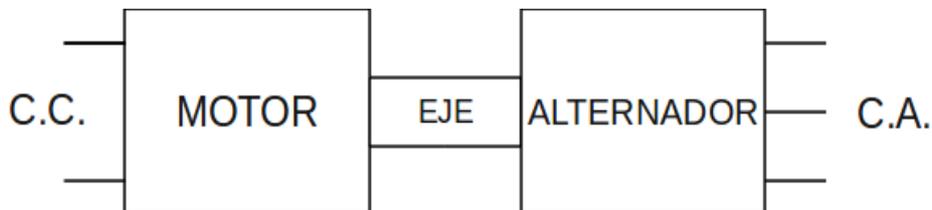


Figura 1: GMA

El sistema de alimentación de tracción más común en los ferrocarriles eléctricos es la catenaria. Ésta consta, entre otros elementos, de un hilo de cobre en tensión por el que se hace frotar una pletina de cobre o grafito instalada en el vehículo ferroviario. En el nacimiento de este sistema, se eligió mayoritariamente la alimentación en corriente continua y en alterna a frecuencia reducida por ser las más aptas para la alimentación de motores de tracción mediante los sistemas de regulación que existían en la época. Las tensiones se eligieron de tal forma que optimizaran el compromiso entre pérdidas por transmisión y necesidades de aislamiento, acabando por estandarizarse en España los 3.000V en c.c. (15kV 16 2/3Hz en Alemania/Austria/Suiza y 25kV 50 Hz como estándar en alta velocidad).

Enseguida surgió el problema de como alimentar los servicios auxiliares. Los servicios auxiliares en un tren son aquellos elementos consumidores de energía que no intervienen directamente en la tracción, algunos ejemplos son: la iluminación, el aire acondicionado, la calefacción, el ventilador de refrigeración del motor o el compresor para el circuito neumático de freno. Dado que son consumidores propios de baja tensión, era inviable alimentarlos con las características de la única fuente de energía disponible (3.000 V c.c.), por lo que había que buscar algún artilugio que redujera la tensión a un valor más manejable. Con la ausencia de convertidores estáticos, la única solución técnicamente operativa eran los convertidores rotativos.

En concreto, el GMA modelo *MG 138A-F* va montado sobre las locomotoras de las series

269 y 251, propiedad de *Renfe Operadora*. Se conecta a 3.000 V de corriente continua de catenaria y proporciona 380 V de corriente alterna trifásica a 50 HZ.

Las averías del GMA *MG 138A-F* suponen un alto coste para *Renfe Operadora*, tanto por la reparación (costes de personal, instrumentación e instalaciones) como por el impacto comercial que provocan (los servicios comerciales que quedan interrumpidos o que se dejan de hacer). Este trabajo nace con la motivación de comprender el funcionamiento del GMA *MG 138A-F*, y aprovechar el potencial que supone esta comprensión en la solución de averías, para que redunde finalmente en un mejor servicio y menores costes.

El mantenimiento de los vehículos ferroviarios de *Renfe Operadora* es realizado por la *Dirección General de Fabricación y Mantenimiento (INTEGRIA)* en la red de bases de la que dispone. La reparación concreta del GMA del que trata este estudio, así como de todas las demás máquinas eléctricas del parque de *Renfe Operadora* se efectúa en exclusividad en *La Base de Mantenimiento Integral de Madrid-Villaverde*.

1.2 OBJETIVOS

Este trabajo tiene dos objetivos:

- El primer objetivo es recopilar la información disponible acerca del diseño y funcionamiento del GMA *MG 138A-F* y aplicar la teoría de máquinas eléctricas al mismo, obteniendo las ecuaciones que rigen su funcionamiento para que, ya sea en este trabajo o en trabajos futuros, puedan aplicarse estas ecuaciones en la solución de averías.
- El segundo objetivo es realizar un análisis de las causas de avería que sufre el GMA *MG 138A-F* y elegir aquella/s más significativas/s para efectuar un estudio en profundidad de las mismas y poder llegar a proponer soluciones que reduzcan tanto las citadas averías como el impacto económico que generan éstas.

1.3 FASES DEL DESARROLLO

La primera fase del proyecto ha consistido en la lectura y comprensión de una serie de documentos relacionados con el GMA *MG 138A-F* (documentos [8] y [10]) y en la elaboración de figuras con las dimensiones del GMA *MG 138A-F* y gráficas relacionadas con su funcionamiento.

La segunda fase ha transcurrido en la base *INTEGRIA* donde se han recopilado datos sobre reparaciones hechas al GMA *MG 138A-F* y se han realizado una serie de medidas para el análisis de averías, obteniendo las conclusiones que se exponen en esta memoria.

1.4 MEDIOS EMPLEADOS

La fase de recopilación de datos ha sido posible gracias al registro situado en la base *INTEGRIA*. En esta fase se han empleado además los siguientes instrumentos:

- **Multímetro digital**
- **Termómetro**

Para la elaboración de la memoria se han empleado los siguientes programas informáticos:

- **OpenOffice.org Calc** para la elaboración de tablas y gráficas.
- **Matlab** para la elaboración de gráficas.
- **Qcad** para la elaboración de planos, esquemas y figuras.

1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En este apartado se hace una breve descripción de los capítulos que componen este trabajo.

En el capítulo 1 se expone una pequeña introducción al proyecto con los objetivos, las fases del desarrollo, los medios empleados y la estructura de la memoria.

En el capítulo 2 se hace una descripción de los medios empleados para alimentar los servicios auxiliares en locomotoras a lo largo de la historia del ferrocarril en España, incluyendo locomotoras de vapor, diésel y eléctricas.

En el capítulo 3 se hace una descripción de las locomotoras de las serie 269.2 y 251. Este capítulo contiene información sobre las dimensiones, los componentes y el funcionamiento de las locomotoras.

En el capítulo 4 se hace una descripción del GMA *MG 138A-F*. En este capítulo se tratan los aspectos constructivos, las conexiones eléctricas, los reguladores y el proceso de arranque.

En el capítulo 5 se lleva cabo el análisis de funcionamiento. En este capítulo puede encontrarse un análisis sobre el motor de corriente continua, sobre el generador síncrono y sobre los reguladores de tensión y frecuencia. Además se calcula la eficiencia del GMA y se propone un método para calcular las magnitudes de funcionamiento a partir de la potencia demandada y la tensión de entrada.

En el capítulo 6 se exponen las averías encontradas durante la recopilación de datos y se realiza un análisis de la avería más repetida: El cortocircuito entre espiras en el devanado shunt. Por último se propone una solución para reducir el número de veces que se repite esta avería y su impacto económico.

En el capítulo 7 se exponen las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 2. HISTORIA DE LOS SERVICIOS AUXILIARES EN LOCOMOTORAS

La manera de alimentar los servicios auxiliares ha sido, y sigue siendo, aprovechar la misma fuente de energía utilizada para la tracción, por eso la historia de los servicios auxiliares está muy ligada a la historia de la tracción en el ferrocarril, que ha pasado del vapor al diésel y a la electricidad.

2.1 LA LOCOMOTORA DE VAPOR

El primer ferrocarril llegó a la península en el año 1848 con la construcción de la línea Barcelona-Mataró y con la compra de las primeras locomotoras de vapor de fabricación británica (ref. [1]).

En este primer periodo las empresas que gestionaban el ferrocarril operaban a nivel local, estas eran: *La Compañía de Ferrocarriles Andaluces*, *La Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA)*, *La Compañía de los Caminos de Hierro del Norte* y algunas más. Aunque en la mayoría de los casos se encargaba el diseño y la fabricación de material ferroviario a empresas extranjeras cabe destacar una empresa española que sobresalió en la fabricación de material ferroviario: *La Maquinista terrestre y Marítima (MTM)*.

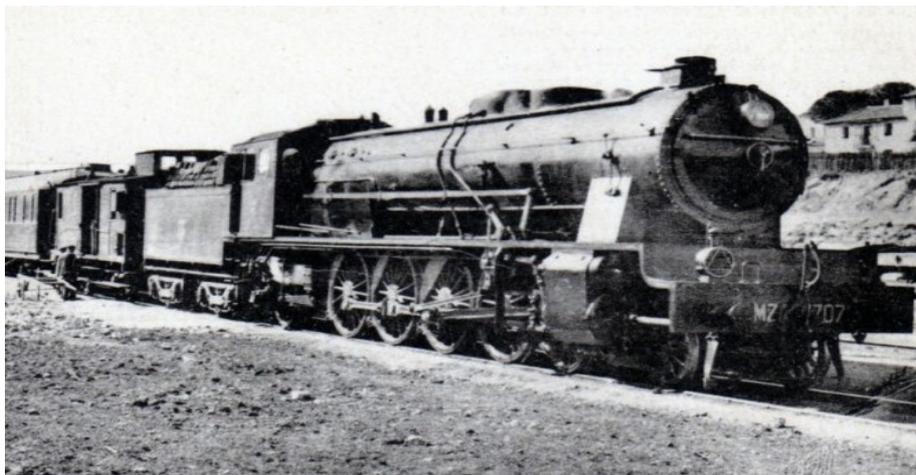


Figura 2: Serie 1700 de MZA (ref. [1])

Las locomotoras de vapor disponían de una caldera donde se quemaba carbón o madera para calentar agua y producir vapor, este vapor caliente a presión movía la máquina gracias a unas turbinas.

El frenado se conseguía con un sistema neumático que empujaba las zapatas contra las

ruedas, este podía ser de aire comprimido o de vacío. En el freno de vacío el elemento encargado de crear el vacío era un eyector accionado por el vapor procedente de la caldera. En el caso del freno por aire comprimido el elemento encargado de aumentar la presión era un compresor accionado también por vapor de la caldera (ref. [2]).

En trenes de pasajeros se aprovechaba parte de la energía liberada por la caldera para la calefacción de los vagones. Una pequeña parte del vapor se desviaba, se reducía su presión por medio de una válvula de estrangulación y se conducía a través de unas tuberías hasta el final del tren. Este sistema requería que todos los vagones dispusieran de instalación y una conexión entre vagones (ref. [2]).

Con la entrada de las locomotoras diésel y eléctricas el uso del vapor fue disminuyendo progresivamente hasta 1975, cuando se sacó de servicio la última locomotora de vapor.

2.2 LAS PRIMERAS LOCOMOTORAS ELÉCTRICAS

En 1911 se electrifica la primera línea de ferrocarril en España, la línea Gergal-Santa Fe, con corriente alterna trifásica. Debido a los problemas que suponía la instalación con tres hilos esta fue la primera y la última electrificación de este tipo (ref. [1]).

En 1925 se electrifica la línea del Puerto de Pajares a 3.000 V de corriente continua y comienza un fuerte impulso al ferrocarril eléctrico. Desde 1925 hasta 1960 se realizan numerosas electrificaciones a 1.500 V y 3.000 V de corriente continua por todo España y entre las diversas compañías se compran 339 locomotoras de tracción eléctrica en varias series (ref. [1]). La serie más numerosa de este periodo fue la serie 276 con 136 unidades, diseño de la empresa francesa *ALSTOM*.



Figura 3: Serie 276 de RENFE (ref. [19])

En 1941 sucede un hecho importante en la historia del ferrocarril español. Se decide crear una única compañía ferroviaria que opere en todo el territorio, para ello se fusionan las compañías locales creando la *RENFE* (Red Nacional de Ferrocarriles Españoles).

La tensión en catenaria, de 1.500 ó 3.000 V, era una tensión muy elevada para alimentar los pequeños elementos que constituyen los servicios auxiliares, así que el problema estaba en como bajar la tensión a un valor adecuado. Este problema se resolvió con un grupo motor generador o GMG. El GMG puede decirse que es el padre del GMA, se trata de un motor de corriente continua unido por el eje a un generador de corriente continua. Aunque ya no se fabrican aún quedan en activo locomotoras con GMG.

Este es el esquema básico de una locomotora con GMG (los valores de tensión son orientativos):

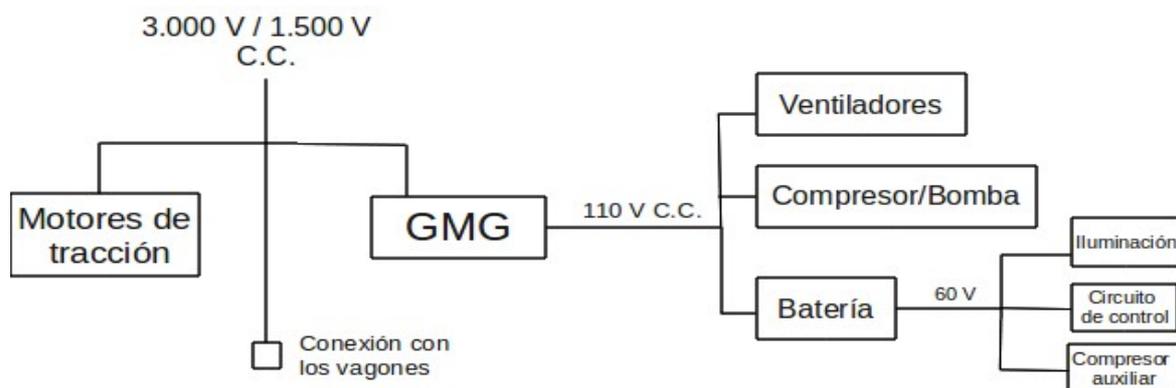


Figura 4: Esquema GMG

El GMG alimenta directamente a los ventiladores y al compresor (o bomba de vacío dependiendo de si el freno es por aire comprimido o por vacío), y además carga la batería. La batería proporciona energía cuando no hay tensión, y se utiliza para la iluminación, para el circuito de control y para el compresor auxiliar.

Gracias a una conexión en los extremos de la locomotora se puede dar tensión (1.500 ó 3.000 V) a los vagones. De esta forma se crea una línea, llamada línea de tren, que recorre el tren a través de los vagones hasta el final. Esta línea se usaba normalmente para la calefacción de pasajeros por medio de resistencias (ref. [4]).

2.3 LA LOCOMOTORA DIÉSEL

Entre 1950 y 1976 *RENFE* compra un gran número de locomotoras de tipo diésel-eléctricas, es decir, motor diésel y transmisión eléctrica. Este periodo se le conoce como dieselización (ref. [1]).

En EEUU la tracción diésel había alcanzado un gran desarrollo y había demostrado ser un sistema muy eficiente. En esta época el ferrocarril español se encontraba dividido en líneas a 3.000 V, líneas a 1.500 V y líneas sin electrificar. Al contrario que las locomotoras eléctricas las locomotoras diésel podían circular por cualquier vía y superaban con creces al vapor, por lo que se convirtieron en la opción favorita.

La siguiente fotografía muestra una locomotora diésel de la serie 333, fabricada por la empresa española *MACOSA* (*Material y Construcciones S.A.*) a partir de un modelo de *General Motors* (ref. [3]):



Figura 5: Serie 333 de RENFE (ref. [3])

Como norma general las locomotoras llevan un solo motor diésel que alimenta la tracción y los servicios auxiliares. En el caso de la serie 333 el motor diésel lleva un alternador para la tracción, un alternador para los servicios auxiliares y un tercer alternador para dar 3.000 V a la línea de tren (ref. [4]).

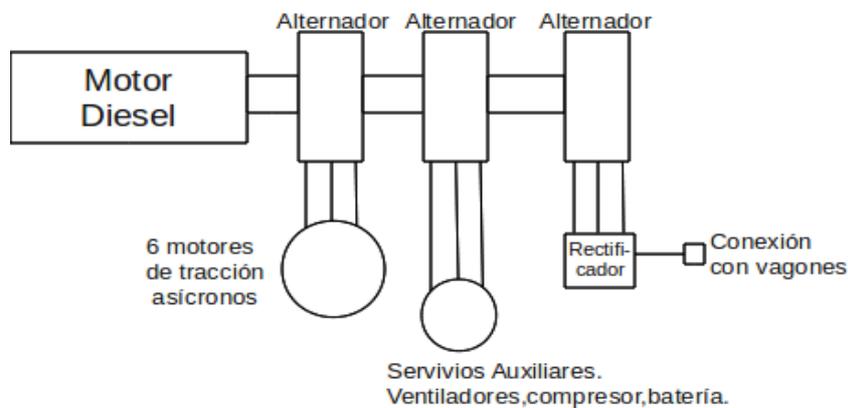


Figura 6: Esquema diésel

2.4 EL NUEVO IMPULSO A LA TRACCIÓN ELÉCTRICA

En 1974 se crea un plan para electrificar 2.322 km de vía a una tensión de 3.000 V, y se procede a eliminar las antiguas electrificaciones a 1.500 V (ref. [1]). Así que poco a poco se van sacando de servicio las locomotoras de 1.500 V y se compran nuevas locomotoras de 3.000 V, las series 269, 250, 251, 252 y 253.

En cuanto a los servicios auxiliares se refiere esta generación de locomotoras aporta grandes

novedades. La subserie 269.2 en 1980 fue la primera locomotora en alimentar los servicios auxiliares con corriente alterna trifásica gracias al GMA, concretamente el modelo *MG 138A-F* que es el objeto del estudio. Más tarde también la haría la serie 251, ambas locomotoras diseñadas por la empresa japonesa *Mitsubishi*.

El GMA no varía el esquema de la figura 4 salvo por que necesita un rectificador para la carga de batería. La principal ventaja que ofreció el GMA fue el poder cambiar todos los motores de corriente continua, en los ventiladores y en el compresor, por motores asíncronos, que son más baratos de mantener. El salto del GMG al GMA fue posible gracias a la tecnología japonesa en electrónica que permitía una regulación eficaz de la velocidad giro ante cambios de tensión para asegurar 50 Hz en el alternador.

El uso del GMA se reduce a estas dos series ya que poco después se comienza a utilizar la electrónica de potencia para crear corriente alterna trifásica. La primera locomotora en usar la electrónica de potencia para alimentar los servicios auxiliares es la serie 250, diseñada por las empresas *Krauss-Maffei* y *Brown-Boveri*, alemana y suiza respectivamente (ref. [4]).



Figura 7: Serie 250 de RENFE (ref. [19])

Nuevas mejoras en la electrónica de potencia han permitido la utilización de motores asíncronos para la tracción en lugar de motores de corriente continua, este es el caso de las series 252 de *Siemens* y *Krauss-Maffei* y 253 de *Bombardier*.

2.5 TRENES DE ÚLTIMA GENERACIÓN

En 1992 se abre la línea Madrid-Sevilla, electrificada a 25 kV de corriente alterna, la primera línea AVE (Alta Velocidad Española). En 2008 se termina la línea Madrid-Barcelona y para finales de 2010 se pretende acabar la línea Madrid-Valencia. Además según el “Plan Estratégico de Infraestructura y Transporte” se pretende abarcar todo el territorio con 10.000 Km de línea en 2020.

Los trenes que circulan por estas vías son de última generación, por ejemplo, la cabeza tractora del tren de la serie 102 se vale de transistores IGBT para el control de tracción y para alimentar los servicios auxiliares. A continuación se muestra un esquema típico del circuito principal en trenes de esta generación (los valores de tensión son orientativos):

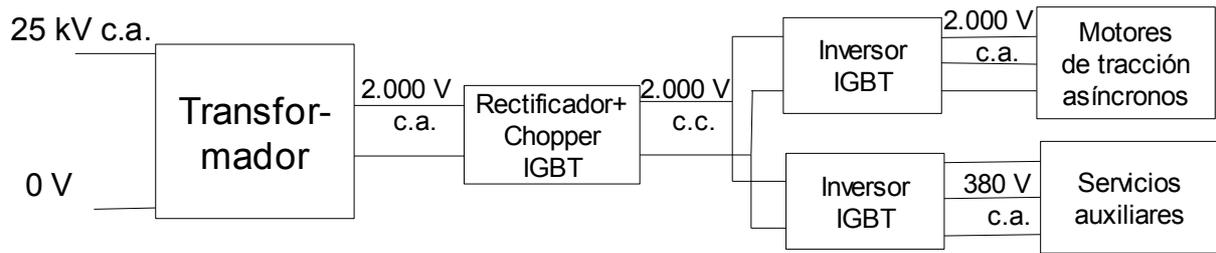


Figura 8: Esquema 25 kV



Figura 9: Serie 102 de RENFE (ref. [19])

Esta tecnología permite controlar la frecuencia en el circuito de auxiliares para mejorar el rendimiento. Por ejemplo, cuando el tren se encuentra funcionando a la mitad de su capacidad se reduce el régimen de giro de los ventiladores para ahorrar energía.

CAPÍTULO 3. LOCOMOTORAS QUE USAN GMA MG138A-F

En España solo dos series de locomotoras han utilizado y utilizan el GMA *MG 138A-F*, estas son la 269 (de serie alta) y la 251. A continuación se hace un resumen de los aspectos históricos y de las características de las locomotoras de las series 269 y 251.

3.1 LA LOCOMOTORA 269

3.1.1 HISTORIA DE LA LOCOMOTORA 269

Las locomotoras de la serie 269 fueron adquiridas por RENFE entre los años 1973 y 1985, muy parecidas a las de la series anteriores 279 y 289 pero monotensión a 3.000 V (las series 279 y 289 eran bitensión 3.000 V/1.500 V). La construcción de estas locomotoras fue encargada a la empresa española *Construcciones y auxiliar de ferrocarriles (CAF)* la parte mecánica, y a la americana *Westinghouse S.A.* las partes eléctricas. Sin embargo el diseño es de la empresa japonesa *Mitsubishi*, de ahí su apodo, *la japonesa* (ref. [3]).

El lote total fue de 263 locomotoras, aunque adquiridas en varias subseries que presentan diferencias. Las subseries se definen a continuación:

Subserie 269.0

Subserie formada por 108 locomotoras entregadas entre 1973 y 1978 con GMG para los servicios auxiliares (ref. [3]).

Subserie 269.5

Subserie formada por 22 locomotoras entregadas entre 1974 y 1979 con GMG para los servicios auxiliares (ref. [3]).

Subserie 269.2

La subserie más numerosa, formada por 131 locomotoras entregadas entre 1980 y 1985. Los servicios auxiliares se alimentan por primera vez con corriente alterna trifásica gracias al GMA.

Subserie 269.6

Subserie formada por 4 locomotoras entregadas entre 1981 y 1982 con GMA para los servicios auxiliares. Esta subserie fue la primera locomotora en utilizar chopper para el control de tracción. La serie 269.6 es un anticipo de lo que será la próxima serie, la 251.

Las subseries 269.0 y 269.5 se las conoce como “serie baja”, y a las subseries 269.2 y 269.6 como “serie alta”. Todas estas subseries han sufrido diversas modificaciones a lo largo de los años formando nuevas subseries como la 269.4 o la 269.9 (ref. [3]).

La subserie más relevante, por numerosa y por usar GMA, es la subserie 269.2. En el próximo apartado se describen sus características. Se trata de una locomotora versátil que ha sido utilizada en todos los ámbitos; trenes de pasajeros, transporte de mercancías y trenes de cercanías, aunque en la actualidad solo se utiliza para el transporte de mercancías.

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LOCOMOTORA 269.2

Se trata de un locomotora tipo B-B, que significa que lleva dos bogies con dos ejes por bogie. Está preparada para circular a una tensión de 3.000 V en ancho ibérico, 1.668 mm. Su potencia en régimen continuo es de 3.100 kW (ref. [6]).



Figura 10: Serie 269.2. Fotografía (ref. [7])

Tiene dos cabinas de conducción, una en cada extremo. El peso total es de 88 toneladas y sus dimensiones son 3,126 m de ancho por 4,289 m de alto con el pantógrafo bajado. Véase la siguiente figura:

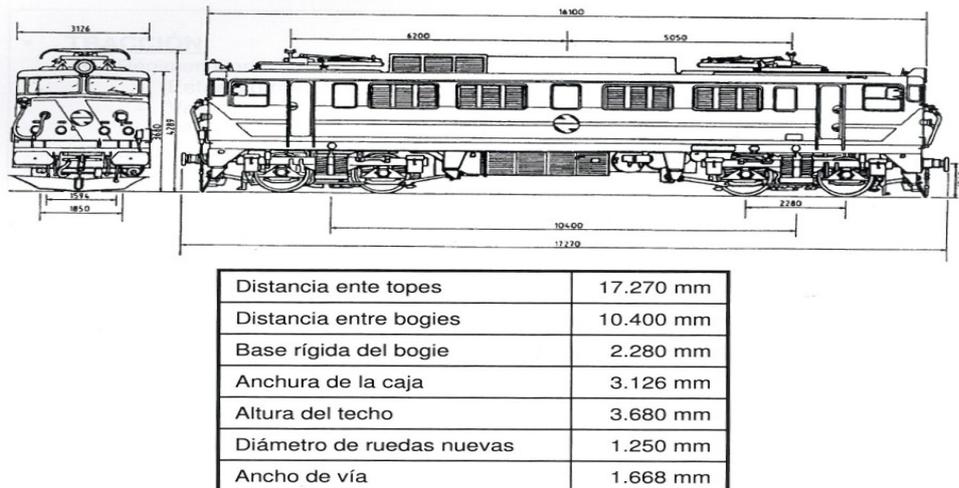


Figura 11: Serie 269.2. Dimensiones (ref. [7])

3.1.2.1 EL SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico puede dividirse fácilmente en dos: la caja y los bogies. La caja es la estructura rectangular que alberga la sala de máquinas y las cabinas de conducción.

En los bogies se encuentra la complejidad del sistema mecánico.

3.1.2.1.1 LOS BOGIES

Cada bogie tiene dos ejes, un motor y un equipo de reducción. Las reductoras unen mecánicamente el motor a los ejes. Además los bogies contienen los elementos de suspensión.

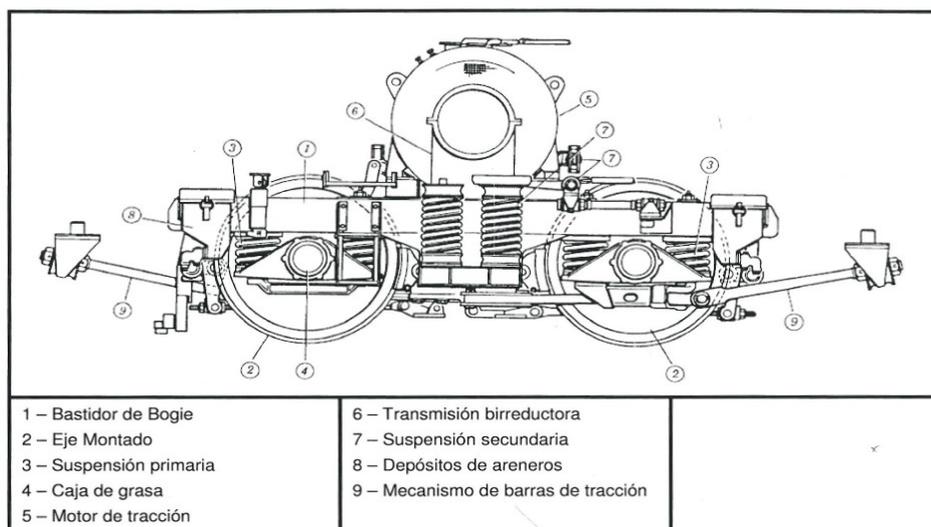


Figura 12: Serie 269.2. El bogie (ref. [7])

Los depósitos areneros están dispuestos para soltar arena delante de la rueda cuando la locomotora necesita mayor agarre, por ejemplo en un frenado de emergencia.

Bastidor del bogie

El bastidor del bogie es la estructura que sostiene todos los elementos.

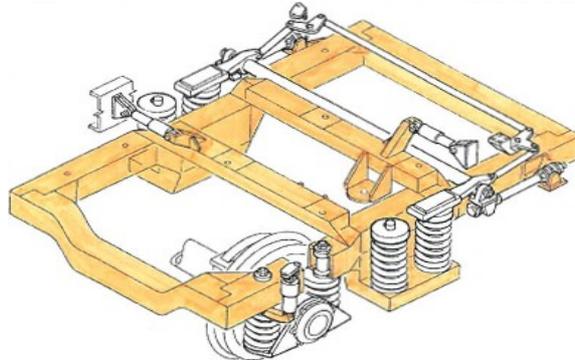


Figura 13: Serie 269.2. Bastidor del bogie (ref. [7])

Equipo reductor

El esfuerzo de tracción se transmite a los ejes a través de el equipo reductor, que se compone de una caja de engranajes acoplada al motor, una caja de engranajes acoplada al eje y un acoplamiento elástico para aislar el motor de las vibraciones.

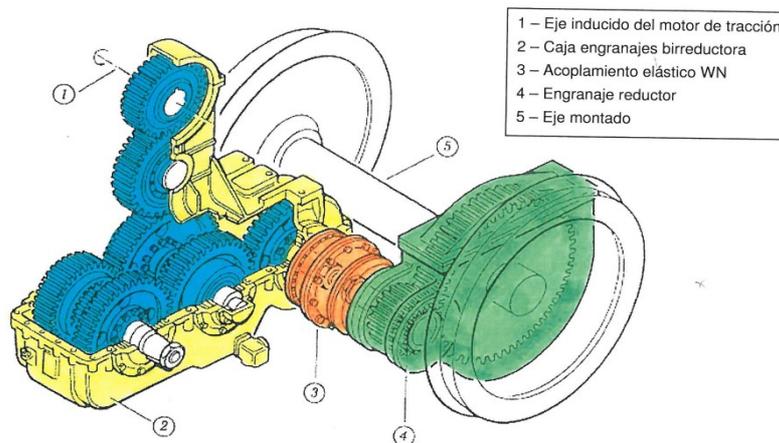


Figura 14: Serie 269.2. Equipo reductor 1 (ref. [7])

La caja birreductora se llama así por que tiene dos juegos de engranajes, como dos “marchas” si se tratara de un automóvil. Esto permite a la locomotora circular en dos modos, uno para transportar trenes de pasajeros cuya velocidad máxima es 160 Km/h, y otro para mercancías a una velocidad máxima de 100 Km/h.

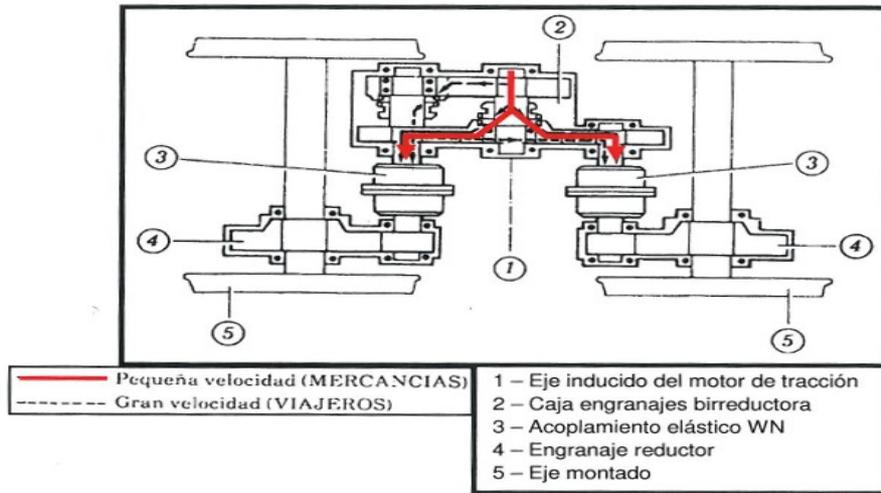


Figura 15: Serie 269.2. Equipo reductor 2 (ref. [7])

Sistema de suspensión

En cuanto a la suspensión pueden distinguirse dos tipos, la suspensión primaria y la suspensión secundaria. La suspensión primaria amortigua vibraciones entre el eje y el bastidor del bogie. En total se compone de ocho muelles por bogie.

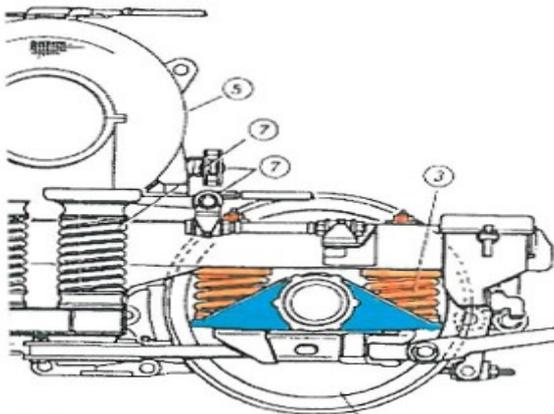


Figura 16: Serie 269.2. Suspensión primaria 1 (ref. [7])



Figura 17: Serie 269.2. Suspensión primaria 2 (ref. [7])

La suspensión secundaria amortigua las vibraciones entre el bastidor del bogie y la caja. Se compone de 4 muelles, 2 amortiguadores verticales de tipo hidráulico, 2 amortiguadores horizontales y un amortiguador antilazo o antiserpenteo.

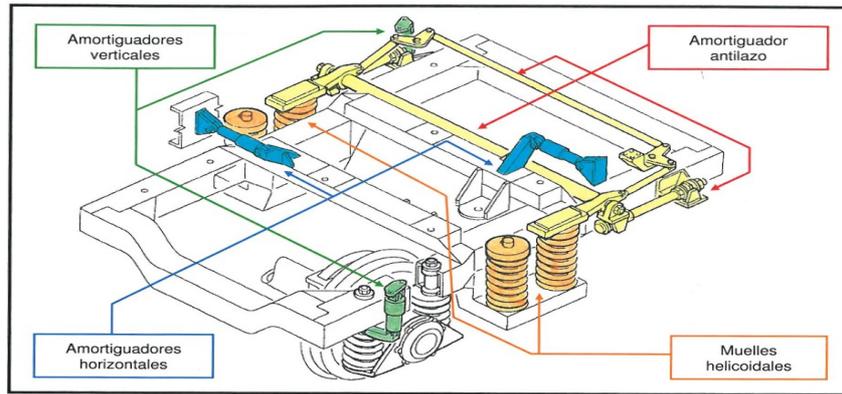


Figura 18: Serie 269.2. Suspensión secundaria (ref. [7])

Barra de tracción

La barra de tracción es el mecanismo por el cual se transmiten los esfuerzos de tracción y de freno del bogie a la caja. Sus uniones son flexibles en ambos extremos para no influir en el sistema de suspensión.

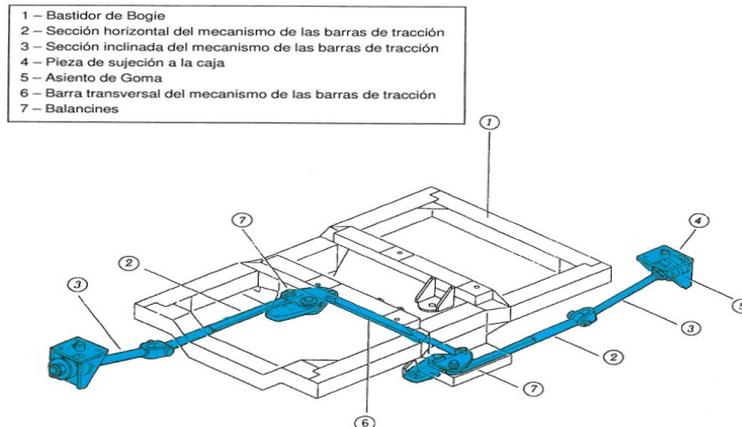


Figura 19: Serie 269.2. Barra de tracción (ref. [7])

3.1.2.2 EL SISTEMA ELÉCTRICO

Pueden distinguirse tres subsistemas eléctricos:

- El circuito principal de potencia. Por el cual se transmite la energía desde la catenaria hasta los motores de tracción.
- El circuito de servicios auxiliares. Por el cual se alimentan ventiladores, compresores y batería.
- El circuito de control. Se alimenta de la tensión de batería y sirve para que el maquinista pueda dar ordenes a la locomotora, por ejemplo acelerar, frenar, subir pantógrafo, etc.

3.1.2.2.1 EL CIRCUITO PRINCIPAL DE POTENCIA

El circuito principal recibe la energía de la catenaria y la conduce hasta los motores de tracción. Comienza en el pantógrafo, situado en el techo, que recibe la tensión de catenaria a

3.000 V, recorre el circuito y termina en las ruedas que transmiten la corriente a los raíles, a 0 V, donde la corriente se dispersa en tierra. Las ruedas, elementos móviles, se conectan al circuito a través de unas escobillas.

La siguiente figura es un esquema del circuito principal:

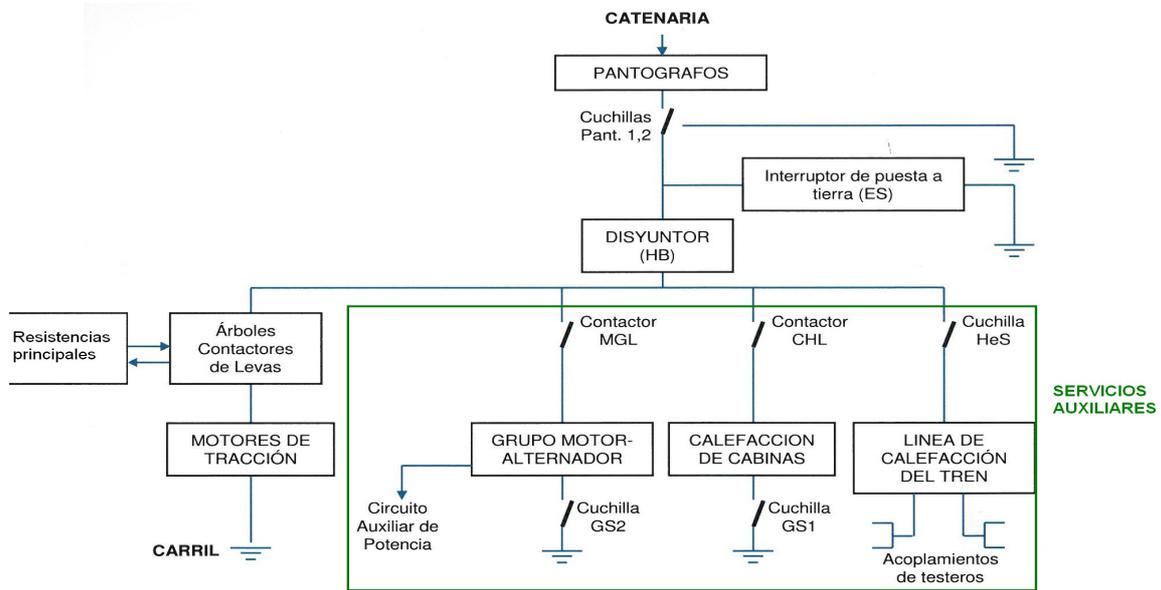


Figura 20: Serie 269.2. Circuito principal (ref. [7])

Pantógrafo

El pantógrafo es un mecanismo situado en el techo capaz de subir o bajar, por accionamiento neumático, para tomar contacto con la catenaria. Durante la marcha de la locomotora el pantógrafo y la catenaria friccionan.

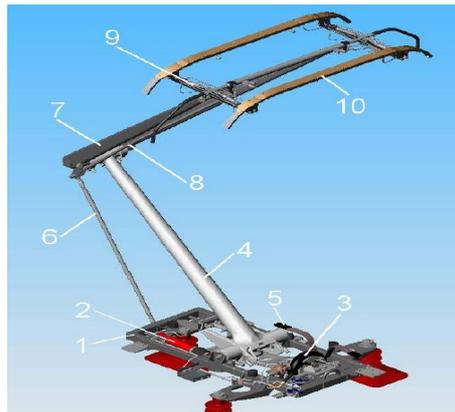


Figura 21: Serie 269.2. Pantógrafo (ref. [7])

Cada locomotora tiene dos pantógrafos, uno de ellos de reserva ya que es un elemento muy susceptible a sufrir golpes con desperfectos de la catenaria.

Disyuntor extrarrápido

El disyuntor es el elemento encargado de abrir el circuito ante un fallo.

Árbol de contactores

El árbol de contactores de levas es un mecanismo con varias posiciones. Según la posición conecta o desconecta resistencias en serie a los motores de tracción, para que funcionen a una velocidad u otra. Se trata del sistema de control de la velocidad de la locomotora.



Figura 22: Serie 269.2. Árbol de levas

Motores de tracción

Los motores de tracción son dos motores de corriente continua. Se trata de motores dobles, cada motor posee dos devanados inducidos y dos inductores. Sus características se exponen a continuación (ref. [6]):

- Potencia: 1.550 kW
- Tensión: 3.000 V
- Corriente nominal: 550 A
- Velocidad de giro: 950 r.p.m.
- Corriente máxima: 750 A

Interruptor de puesta a tierra

El interruptor de puesta a tierra permite poner a tierra el circuito de alta tensión para realizar trabajos de mantenimiento o de reparación.

3.1.2.2.2 EL CIRCUITO DE SERVICIOS AUXILIARES

Según la alimentación puede diferenciarse entre la calefacción, que se alimenta directamente a 3.000 V de c.c., y el resto de servicios auxiliares que se alimentan a 380 V c.a. gracias al GMA.

Calefacción de cabinas

La calefacción se consigue gracias a unas resistencias eléctricas que se conectan directamente a 3.000 V (ref. [6]).

Línea de tren

Se trata de una conexión entre la locomotora y el tren. Al acoplarse la locomotora y el tren esta conexión proporciona al tren 3.000 V generalmente para la calefacción del tren. Aunque actualmente esta aplicación está en desuso ya que la serie 269.2 remolca exclusivamente trenes de mercancías.

Grupo motor alternador (GMA)

Convertidor rotativo por el cual se alimentan el resto de servicios auxiliares con corriente alterna trifásica a 380 V. Se trata del modelo *MG 138A-F* con valores nominales (ref. [6]):

- Potencia: 170 kW
- Tensión de entrada: 3.000 V
- Tensión de salida: 380 V
- Velocidad de giro: 1.500 r.p.m.

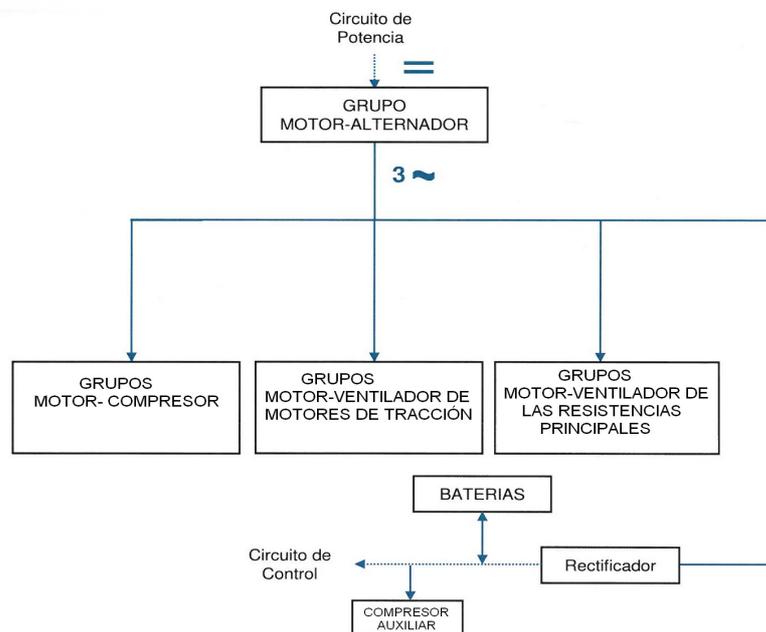


Figura 23: Serie 269.2. Circuito de auxiliares (ref. [7])

Grupos motor compresor

Son dos grupos cuya función es dar presión (9 bares) al circuito neumático principal. Cada grupo tiene un motor asíncrono cuyos valores nominales son (ref. [7]):

- Potencia nominal: 18,5 kW
- Tensión nominal: 380 V
- N° de polos: 6
- Frecuencia nominal: 50 Hz

Grupos motor ventilador de los motores de tracción

Son dos grupos, uno por cada motor de tracción. Su función es proporcionar refrigeración a los motores de tracción. Cada grupo tiene un motor asíncrono cuyos valores nominales son (ref. [7]):

- Potencia nominal: 18,5 kW

- Tensión nominal: 380 V
- N° de polos: 4
- Frecuencia nominal: 50 Hz

Grupos motor ventilador de las resistencias principales

Las resistencias son elementos que transforman energía eléctrica en calor, por lo tanto necesitan de un sistema de refrigeración. Esta refrigeración se consigue gracias a cuatro grupos motor ventilador. Cada grupo tiene un motor asíncrono cuyos valores nominales son (ref. [7]):

- Potencia nominal: 5,5 kW
- Tensión nominal: 380 V
- N° de polos: 4
- Frecuencia nominal: 50 Hz

Rectificador y batería

La carga de la batería es posible gracias a un rectificador de diodos. La batería, de tensión nominal 72 V (ref. [7]), alimenta la iluminación, el compresor auxiliar y el circuito de control, principalmente elementos electrónicos y relés.

El compresor auxiliar

Cuando el tren se encuentra estacionado con el pantógrafo bajado es imposible arrancar el tren ya que los compresores principales necesitan que el pantógrafo este elevado para poder funcionar, y para elevar el pantógrafo es necesario que el circuito neumático tenga presión, es decir, que los compresores funcionen.

Para solventar este problema la locomotora lleva un compresor auxiliar que funciona con la tensión de batería, 72 V. Este motor, de colector y escobillas, no está en funcionamiento durante la marcha normal de la locomotora, sino únicamente durante el arranque.

La siguiente tabla resume el consumo de los servicios auxiliares conectados al GMA:

Grupo:	Potencia (kW)
Motor compresor 1	18,5
Motor compresor 2	18,5
Ventilador motor 1	18,5
Ventilador motor 2	18,5
ventilador resistencias 1	5,5
ventilador resistencias 2	5,5
ventilador resistencias 3	5,5
ventilador resistencias 4	5,5
Batería	<1
Total:	96

Tabla 1: Serie 269.2. Consumo de los servicios auxiliares

3.1.2.2.3 EL CIRCUITO DE CONTROL

El circuito de control se alimenta de los 72 V de batería. Los elementos que forman el circuito de control son:

- Sistemas de comunicación.
 - Radio
- Los sistemas de seguridad.
 - ASFA
 - Hombre muerto
- Aquellos elementos que dan control remoto al maquinista, principalmente relés y contactores.

Radio

La locomotora tiene un sistema de radio para comunicarse con el puesto de mando o con otras locomotoras.

El equipo ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático)

Se trata del sistema de seguridad principal de la locomotora. Se compone de los siguientes elementos:

- Tacogenerador o sensor de velocidad
- Antena o captador de balizas
- Unidad central

Las balizas son aparatos electrónicos situados en la vía con información sobre la situación de la vía, libre u ocupada, y de la máxima velocidad permitida. Cuando la locomotora pasa por encima de una baliza el captador de balizas lee esta información y se la envía a la unidad central. La unidad central compara la señal del captador con la del sensor de velocidad, si la locomotora va más rápido de lo permitido el equipo ASFA actúa sobre el freno del tren.

El equipo hombre muerto

Se trata de un sistema electrónico que asegura que el maquinista está consciente en todo momento. Cada minuto el maquinista debe pulsar un botón, si esto no ocurre el sistema actúa sobre el freno del tren.

Relés y contactores

La batería proporciona la energía para excitar los numerosos relés y contactores del vehículo. La mayoría de estos relés sirven para el accionamiento remoto (desde cabina) de elementos del circuito principal y de los servicios auxiliares.

3.1.2.3 EL SISTEMA NEUMÁTICO

Dentro del sistema neumático existen tres circuitos separados (ref. [7]):

- Circuito neumático principal.
- Circuito neumático de reserva.
- Tubería de freno automático (TFA).

Circuito neumático principal

Está conectado a los compresores principales, y mantiene su presión constante a 9 bares. Se trata del circuito madre del que se alimentan los demás circuitos.

Circuito neumático de reserva

Recibe aire del circuito principal y del compresor auxiliar. Alimenta los pantógrafos y el disyuntor extrarrápido.

Tubería de freno automático (TFA)

Recibe aire del circuito principal. Se trata de la tubería que controla el freno neumático. Proporciona la presión para empujar las zapatas de freno contra las ruedas.

El maquinista tiene control de la presión de esta tubería por medio de un manipulador situado en cabina. Además los sistemas de seguridad ASFA y Hombre muerto también tienen control sobre esta tubería.

3.1.2.4 EL PUPITRE DE CONDUCCIÓN

El pupitre de conducción, situado en cabina, es desde donde el maquinista tiene un control sobre los elementos de la locomotora.



Figura 24: Serie 269.2. Pupitre de conducción (ref. [7])

Combinador principal

Se trata del panel desde donde el maquinista controla la tracción y el freno eléctrico.

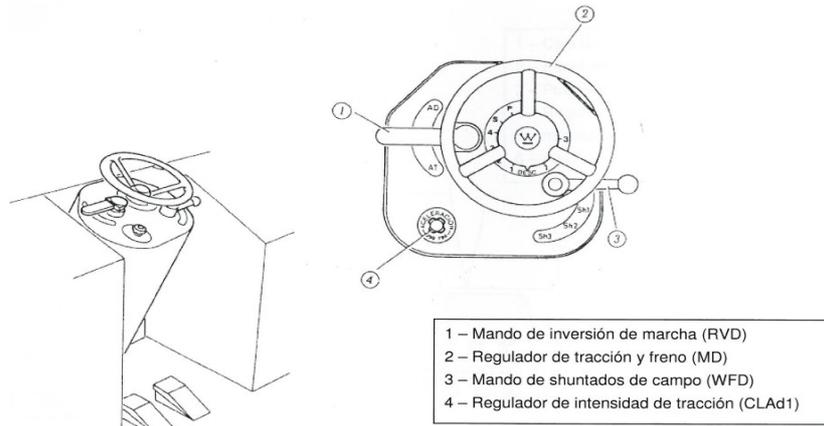


Figura 25: Serie 269.2. Combinador principal (ref. [7])

El elemento más importante es el regulador de tracción y freno. Este accionamiento con forma de volante controla directamente el árbol de contactores de levas.

En el combinador principal se encuentran además otros accionamientos:

- El mando de inversión de la marcha (marcha atrás).
- El regulador de intensidad de tracción. Se trata de un limitador de corriente que la aceleración de la locomotora.
- Mando de shuntado de campo. Sirve para reducir el campo magnético en el motor y conseguir un plus de velocidad.

Bloque central

Se trata de un panel de interruptores. Desde el bloque central se controla:

- Subida/bajada de pantógrafo.
- Cierre/apertura del disyuntor.
- Arranque del GMA.
- Arranque de los compresores.
- Otros: Calefacción, faro, luces etc...

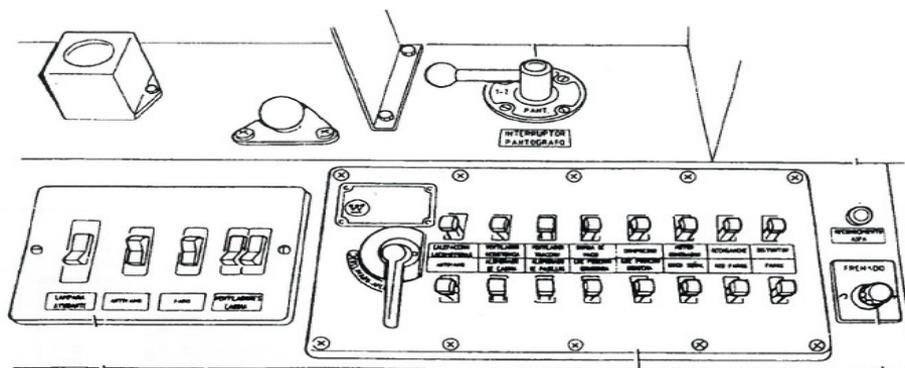


Figura 26: Serie 269.2. Bloque central (ref. [7])

Panel de indicadores

Desde el panel de indicadores se controlan las principales magnitudes eléctricas y neumáticas.

Indicadores eléctricos:

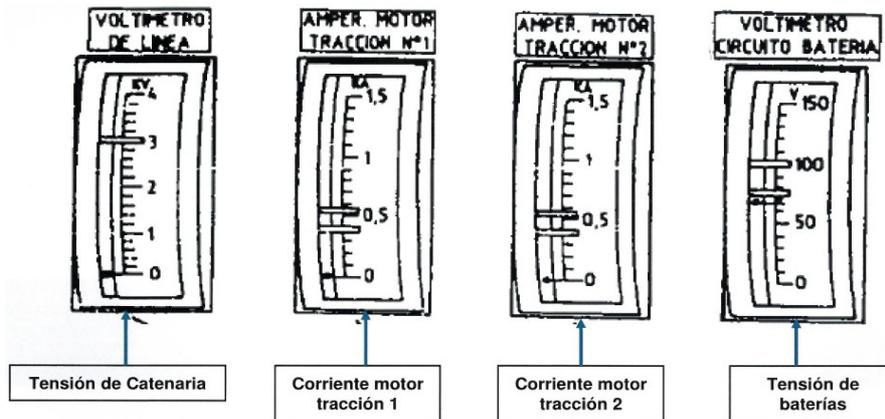


Figura 27: Serie 269.2. Indicadores eléctricos (ref. [7])

Indicadores neumáticos:

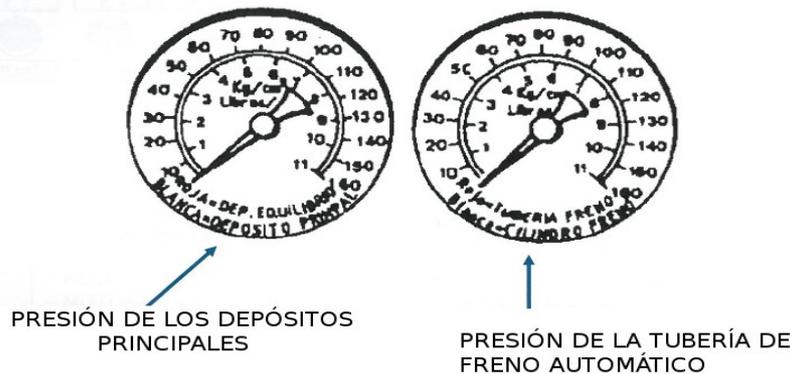


Figura 28: Serie 269.2. Indicadores neumáticos (ref. [7])

Este panel es especialmente útil para la localización de averías.

3.2 LA LOCOMOTORA 251

3.2.1 HISTORIA DE LA LOCOMOTORA 251

A finales de los años 70 *RENFE* decidió hacerse con una nueva serie de locomotoras de gran potencia. Las condiciones que debían cumplir eran: que tuvieran una potencia igual o superior a 4.500 kW, que fueran capaces de transportar trenes de viajeros a una velocidad de 160 Km/h, y que fuera capaz de remolcar trenes de mercancías de 1.000 toneladas por rampas de 20 milésimas (ref. [3]). Para ello se realizaron dos pedidos paralelos, la series 250 y 251.

Para la serie 251 *RENFE* decide volver a confiar en el diseño Mitsubishi. Entre 1982 y 1984 se recibieron las 30 unidades que conforman esta serie. Las dos primeras locomotoras fueron construidas por la propia empresa Mitsubishi Electric Corporation. Después, 18 locomotoras fueron construidas en España por *CAF* y 10 por *Material y Construcciones S.A.* (MACOSA) (ref. [3]).

Aunque diseñadas para transportar pasajeros y mercancías en la actualidad solo se dedican a remolcar trenes de mercancías.



Figura 29: Serie 251. Fotografía (ref. [19])

Esta serie lleva el apodo de *japonesa y media*, debido a que recuerda a la serie 269 pero de mayores dimensiones y potencia.

Debido a su similitud con la serie 269 no se va a realizar una descripción tan extensa sino simplemente se va a describir sus características generales.

3.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA LOCOMOTORA 251

Se trata de una locomotora diseñada para circular por el ancho de vía español, 1.668 mm, y a una tensión de catenaria de 3.000 V de c.c.. Su potencia de tracción es de 4.650 kW y su velocidad máxima de 160 km/h (ref. [3]).

Es tipo B-B-B, es decir, con tres bogies y dos ejes por bogie. Los bogies de los extremos son de las mismas características que los de la serie 269.2, de hecho son intercambiables, incluido el motor (ref. [7]).

Para la tracción en lugar de árbol de contactores de levas utiliza chopper. Se trata de un dispositivo electrónico que permite realizar la transformación c.c.-c.c. variando la tensión. De esta forma se controla la tensión de los motores de tracción y así la velocidad.

Al igual que la 269.2 tiene dos tipos de freno, el freno neumático y el eléctrico.

Los servicios auxiliares se alimentan con corriente alterna trifásica. La serie 251 necesita de mayor potencia para los servicios auxiliares que la 269.2, por este motivo utiliza dos GMAs.

El GMA utilizado es el mismo modelo, el *MG 138A-F*, por lo tanto es también intercambiable con la serie 269.2 y la 269.6.

La siguiente tabla resume el consumo de los servicios auxiliares en la locomotora 251:

Grupo:	Potencia (kW)
Motor compresor	37
Ventilador 1 de motor de tracción	25
Ventilador 2 de motor de tracción	25
Ventilador 3 de motor de tracción	25
Ventilador 1 de resistencia de freno	31
Ventilador 2 de resistencia de freno	31
Ventilador 3 de resistencia de freno	31
Ventilador 1 del convertidor choper	6
Ventilador 2 del convertidor choper	6
Ventilador 3 del convertidor choper	6
Calefacción cabina	2
Aire acondicionado 1	4
Aire acondicionado 2	4
Batería	<1
Total:	233

Tabla 2: Serie 251. Consumo de los servicios auxiliares

A diferencia de la 269.2, la calefacción se conecta al GMA (380 V c.a.).

3.3 TABLA DE COMPARACIÓN DE LAS LOCOMOTORAS 269.2 Y 251

La siguiente tabla compara las características principales de las dos series:

	269.2	251	U.
Nº de locomotoras en el lote	131	30	
Años de recepción	1980-85	1982-84	
Longitud total	17,23	20,7	m
Peso total	88	138	Ton.
Potencia de tracción	3100	4650	kW
Nº de bogies	2	3	
Nº de motores	2	3	
Potencia del motor	1550	1550	kW
Velocidad máxima	160	160	km/h
Control de tracción	Resistencias	Chopper	
Freno eléctrico	Reostático	Reostático	
Potencia consumida en los servicios auxiliares	96	233	kW
Nº de GMAs	1	2	
Tensión de batería	72	110	V

Tabla 3: Comparación de las locomotoras 269.2 y 251

Cabe destacar que la diferencia en el consumo de servicios auxiliares es relativamente grande, pasa de 96 kW en la serie 269.2 a 233 kW en la serie 251, un aumento del 143%, mientras que la potencia de tracción aumenta un 50% (de 3.100 kW a 4.650 kW). Esto se debe al consumo de la refrigeración de la resistencia de freno (freno reostático) que en la 251 consta de tres ventiladores de 31 kW (en total 93 kW) mientras que en la 269.2 comparte refrigeración con las resistencias principales, cuatro ventiladores de 5,5 kW (en total de 22 kW).

CAPÍTULO 4. EL GRUPO MOTOR-ALTERNADOR MG 138A-F

El objetivo de este capítulo es describir las características del GMA modelo *MG 138A-F*. Los siguientes apartados son el resultado de la recopilación y selección de información contenida en el documento [8] sobre el GMA *MG 138A-F*.

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El GMA *MG 138A-F* está diseñado para trabajar con una tensión de entrada de entre 2.000 y 3.600 V de c.c., debe asegurar una tensión de salida de entre 342 y 399 V y una frecuencia de salida en el rango de 45 a 52,5 Hz. Para asegurar estos valores de salida lleva dos reguladores electrónicos, el **AFR** (Automatic Frequency Regulator), y el **AVR** (Automatic Voltage Regulator).

El GMA *MG 138A-F* puede dividirse en: motor de c.c., generador síncrono, sistema mecánico y reguladores.

4.2 MOTOR C.C.

Se trata de un motor de c.c. de doble colector y excitación compuesta. Sus valores nominales son: 170 kW, 3.000 V, 57 A y 1.500 r.p.m.. Como cualquier máquina eléctrica rotativa se compone de un estator y un rotor.

4.2.1 EL ESTATOR

El estator consta de cuatro polos principales y cuatro polos auxiliares. La siguiente fotografía tomada en taller muestra medio estator.



Figura 30: Estator. Fotografía

Alrededor de los polos principales se arrollan los devanados inductores de flujo. El *MG-138A-F* usa cuatro devanados inductores: Por un lado están el devanado **serie** y el devanado **shunt**, habituales en motores de c.c.; y por otro lado están el devanado **aditivo** y el devanado **sustractivo** que se conectan al regulador AFR para aplicar el control de velocidad. El devanado aditivo induce flujo en la misma dirección que los devanados shunt y serie, mientras que el sustractivo induce flujo en el sentido opuesto.

Por último, el estator tiene un devanado de compensación y un devanado de conmutación.

4.2.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Los ocho polos, cuatro principales y cuatro auxiliares, están fabricados con chapa de acero laminada y van atornillados a la carcasa. La siguiente figura ha sido realizada a partir de las dimensiones que marca el documento [8], al igual que el resto de figuras en este capítulo.

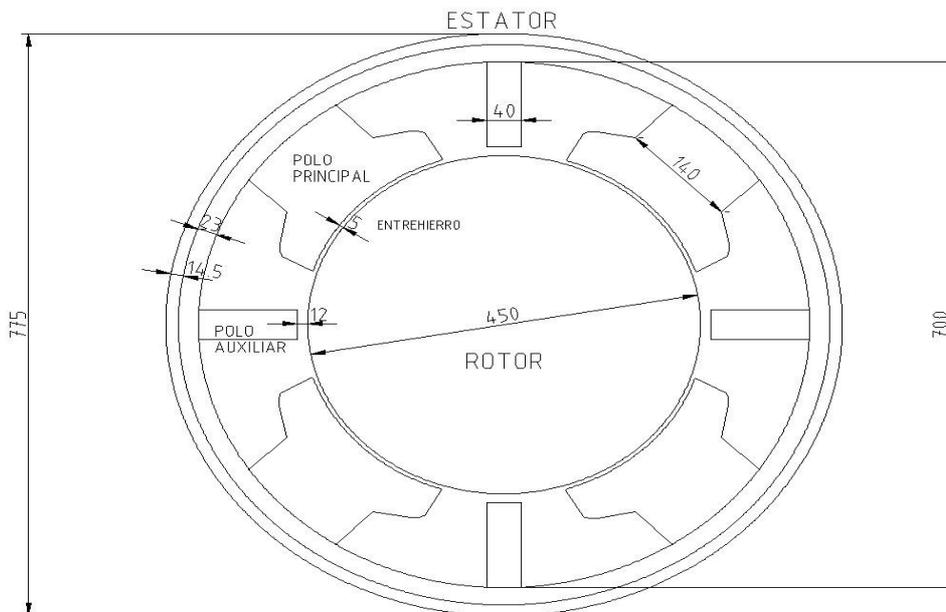


Figura 31: Motor c.c.. Plano (mm)

La siguiente figura representa la colocación de los devanados del estator:

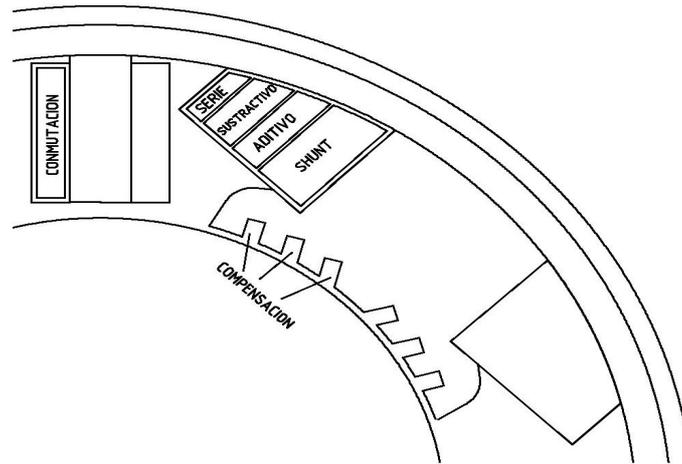


Figura 32: Motor c.c.. Estator

Alrededor del polo principal se arrollan de manera concéntrica los cuatro devanados inductores de flujo (shunt, aditivo, sustractivo y serie). El devanado de conmutación va montado sobre los polos auxiliares. Las seis ranuras en el extremo del polo principal alojan el devanado de compensación.

4.2.2 EL ROTOR

El rotor es de doble colector, es decir, tiene dos colectores y dos devanados inducidos en un solo núcleo magnético.

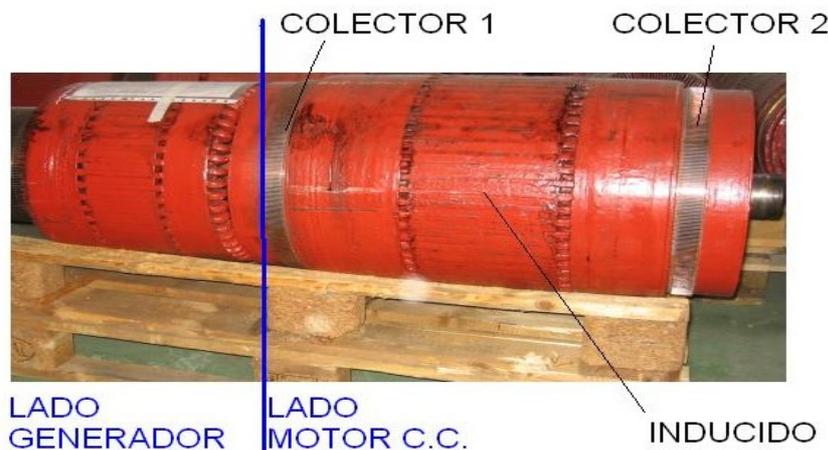


Figura 33: Rotor. Fotografía

Los colectores están situados a ambos lados del rotor y en medio se encuentra el núcleo magnético. Los inducidos, en disposición de tipo ondulado, se cruzan en el núcleo y vuelven a su colector correspondiente. En adelante se hablará de colector 1 e inducido 1, colector 2 e inducido 2.

4.2.2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

El núcleo magnético

El núcleo del rotor va calado al eje. Está formado por piezas de chapa de acero al silicio que dan forma a 61 ranuras para alojar los dos devanados inducidos. En la siguiente figura se aprecian las dimensiones de una ranura y el espacio entre ranuras.

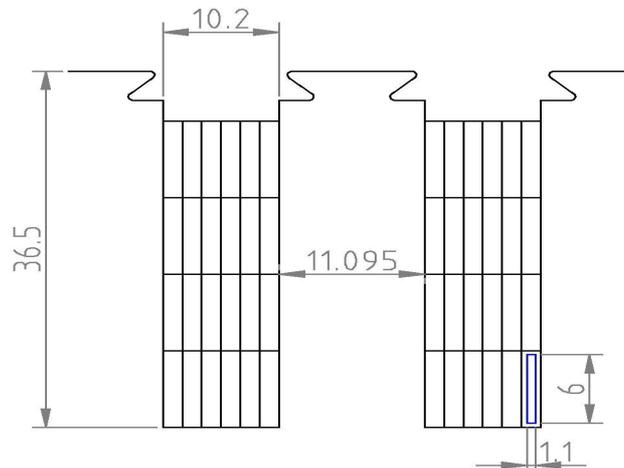


Figura 34: Motor c.c.. Dimensiones de las ranuras (mm)

El devanado inducido

El inducido se aloja en las ranuras del núcleo en disposición ondulada. Cada ranura tiene dos zonas, la zona 1 para el inducido 1 y la zona 2 para el inducido 2. Cada zona tiene doble capa y 6 secciones (figura 35). En total hacen un total de 24 conductores por ranura.

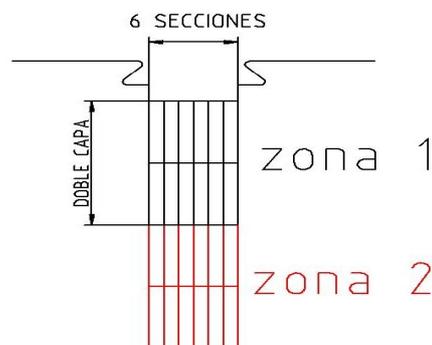


Figura 35: Motor c.c.. Devanado inducido

Ambos inducidos son idénticos, simplemente uno va montado encima del otro. A continuación expone un desarrollo para definir la disposición del inducido:

El número total de secciones (S) será el nº ranuras (R) por el nº de secciones por ranura (s):

$$S = R \cdot s = 61 \cdot 6 = 366 \quad (4.1)$$

A cada delga le corresponde inevitablemente una sección, es decir, el número de delgas en

el colector es igual al número de secciones (ref. [9]).

$$D=S \quad (4.2)$$

Sin embargo nuestro colector tiene 365 delgas, así que esta igualdad no se cumple. Cuando esto sucede es por que hay una sección muerta, es decir, una hueco vacío en una de las ranuras (ref. [9]). A partir de ahora se asume que el número total de secciones es $S=365$.

El paso de una espira de delga a delga (P) es:

$$P=\frac{D-1}{2}=\frac{365-1}{2}=182 \text{ secciones} \quad (4.3) \text{ (es igual expresarlo en secciones que en delgas)}$$

El paso de ranura a ranura (P_1) será:

$$P_1=\frac{R}{2 \cdot p}=\frac{61}{4}=15,24 \sim 15 \text{ ranuras}=90 \text{ secciones} \quad (4.4)$$

Donde $2p$ es el número de polos, en este caso igual a 4.

El paso entre delga y ranura (P_2) será:

$$P_2=\frac{P-P_1}{2}=\frac{182-90}{2}=46 \text{ secciones} \quad (4.5)$$

La siguiente figura pretende aclarar esto gráficamente por medio de un esquema rectangular :

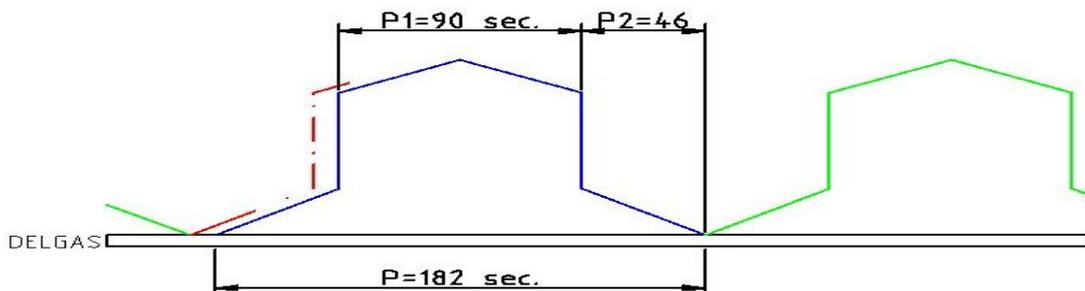


Figura 36: Motor c.c.. Disposición ondulada

La segunda espira (en verde) acaba una delga antes de la que empieza la primera (en azul) y hay nace la tercera (en rojo), y así continua sucesivamente hasta completar todas las secciones. La última espira, que será la número 365, acabará donde empieza la primera y se cerrará el devanado tras haber dado 182 vueltas.

Colectores y escobillas

Como ya se ha dicho hay dos colectores, ambos son idénticos con las siguientes características:

- Diámetro exterior: 382 mm
- N° de delgas: 365

Las delgas son de aleación de plata y cobre aisladas entre si con segmentos de mica. La superficie de una delga es: $67 \times 3,021 \text{ mm}^2$.

A cada colector le corresponden 4 juegos de escobillas. La superficie de un juego de escobillas es: $32 \times 16 \text{ mm}^2$.

Tomando los datos acerca de las dimensiones de las escobillas y de las delgas del colector se ha realizado la siguiente figura:

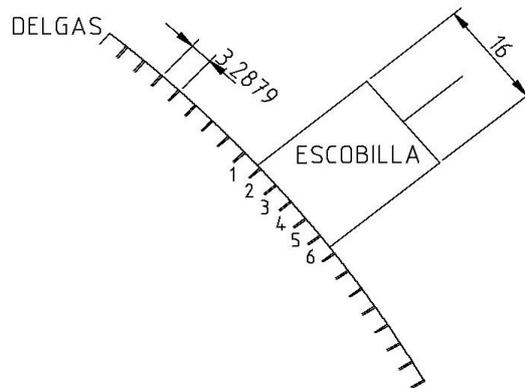


Figura 37: Motor c.c.. Colector y escobillas (mm)

Un juego de escobillas está en contacto con 6 delgas a la vez.

4.2.3 ESQUEMA ELÉCTRICO

En la figura 38 pueden verse como van conectados los elementos del motor de c.c., estos son los dos colectores, los cuatro devanados inductores, el devanado de conmutación y compensación y algunas resistencias.

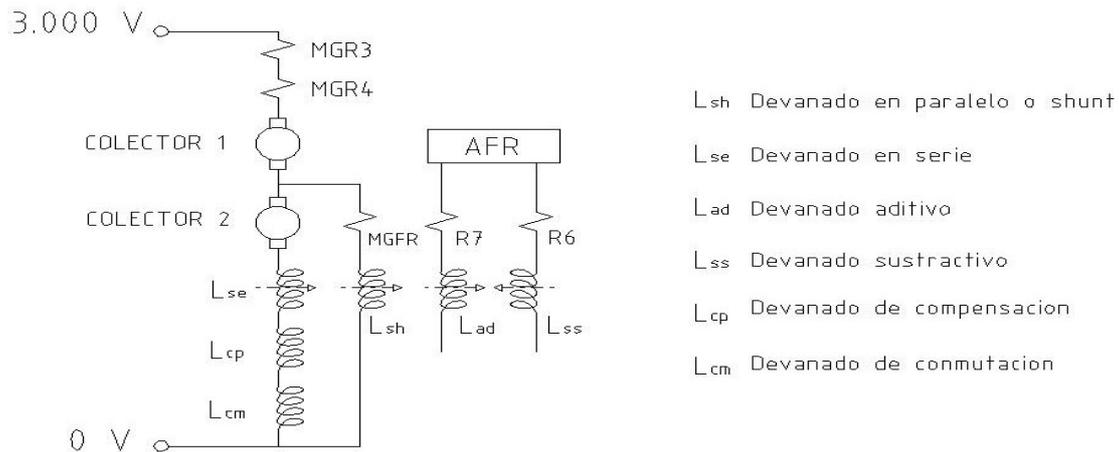


Figura 38: Motor c.c.. Esquema eléctrico

Las características de los devanados (su número de espiras y su resistencia óhmica) se exponen en la tabla 1 del anexo 1. Los valores de las resistencias MGR3, MGR4, MGFR, R7 Y R6 se encuentran en la tabla 3 del anexo 1.

Habitualmente, en motores de c.c. el devanado shunt se conecta en paralelo al motor. En este caso, al haber dos colectores, es posible conectarlo en paralelo a un solo colector.

4.3 EL GENERADOR SÍNCRONO

En el extremo opuesto al motor se encuentra el generador síncrono. Los valores nominales del generador síncrono son:

- Potencia aparente (S) 160 KVA
- Tensión de línea (V) 380 V
- Corriente de línea (I) 243 A
- Frecuencia (f) 50 HZ
- Factor de potencia (fp) 0,85

Al igual que el motor, el generador síncrono tiene un rotor y un estator, estando en este caso el devanado inductor en el rotor y el devanado inducido en el estator.

4.3.1 EL ROTOR

El núcleo magnético

El núcleo magnético va calado a presión en el eje y está formado por chapas cortadas de acero al silicio con un total de 32 ranuras para alojar el devanado inductor. Se trata de un rotor ranurado liso (en lugar de ser de polos salientes) como muestra la siguiente figura:

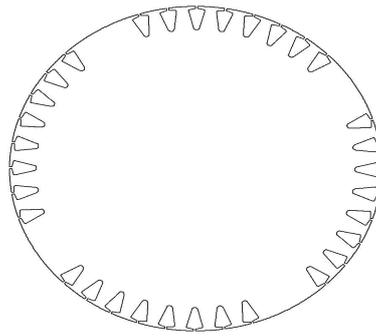


Figura 39: Generador síncrono. Rotor

Las ranuras no se encuentran homogéneamente repartidas sino que se concentran en cuatro zonas para la generación de cuatro polos. Las dimensiones de las ranuras del rotor pueden apreciarse en la siguiente figura:

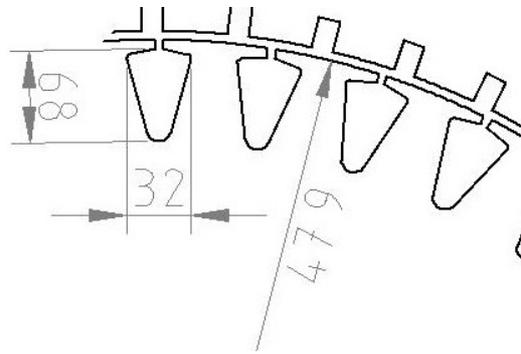


Figura 40: Generador síncrono. Dimensiones del rotor (mm)

Devanado inductor o de excitación

Se trata de dos hilos de cobre en paralelo. Sus características (resistencia y diámetro del cobre) pueden encontrarse en la tabla 2 del anexo 1.

Anillos rozantes y escobillas

Se trata de dos anillos de acero inoxidable y cuatro juegos de escobillas que permiten la alimentación del devanado inductor mientras este gira con el eje.

4.3.2 ESTATOR

El núcleo magnético

El núcleo magnético está formado por chapas troqueladas de acero al silicio con un total de 54 ranuras para alojar el devanado.

El radio del estator y las dimensiones de cada ranura pueden apreciarse en la siguiente figura:

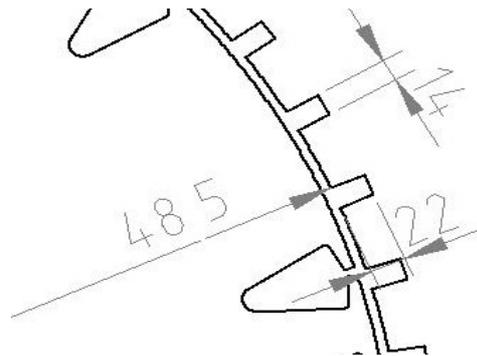


Figura 41: Generador síncrono. Dimensiones del estator (mm)

Devanados estáticos

Los devanados estáticos son tres, uno por fase. Las características de estos devanados pueden encontrarse en la tabla 2 del anexo 1.

4.3.3 ESQUEMA ELÉCTRICO

La siguiente figura representa la conexión de los elementos del generador síncrono:

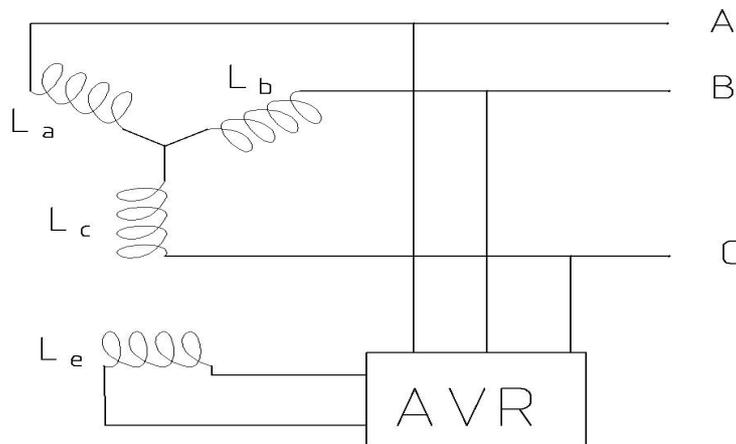


Figura 42: Generador síncrono. Esquema eléctrico

L_a , L_b y L_c son los devanados inducidos o fases.

L_e es el devanado de excitación.

Los devanados inducidos del estator se conectan en estrella ofreciendo una toma para el cable neutro. El devanado de excitación se conecta al AVR para la regulación de la tensión

4.4 SISTEMA MECÁNICO

4.4.1 CONJUNTO CARCASA + ESTATOR

La carcasa y el estator forman el conjunto fijo del grupo. Su peso total es de 1.805 kg. La carcasa, con forma cilíndrica, esta provista de patas para su fijación al suelo y sus laterales están abiertos para permitir el flujo de aire que genera el ventilador.



Figura 43: Carcasa GMA

Además la carcasa tiene aperturas que permiten el acceso a los colectores y a los anillos rozantes. Estas aperturas tienen como fin el facilitar las labores de mantenimiento.



Figura 44: GMA. Acceso a anillos rozantes

4.4.2 CONJUNTO EJE + ROTOR

Los dos rotores se calan al eje formando un solo conjunto. Este conjunto debe girar a una velocidad de 1.500 r.p.m. durante el funcionamiento. Sus principales características son:

- Peso: 1.085 kg.
- Longitud: 1,67 m.
- Diámetro lado motor: 450 mm.
- Diámetro lado generador: 479 mm.

Se apoya en la carcasa por medio de rodamientos de rodillo tipo NU.

Además el eje lleva acoplado un ventilador para la refrigeración del grupo.

4.5 REGULADORES

Los reguladores son dos, el AVR y el AFR. Se trata de dos dispositivos de electrónica analógica.

4.5.1 EL AFR

El AFR trabaja para que la frecuencia de salida sea constante a 50 Hz, para ello ha de mantener al eje-rotor girando a 1.500 r.p.m.. Se conecta a la salida del generador, hace una lectura de la frecuencia, y aplica flujo al motor por medio de los devanados aditivo y sustractivo para influir en su velocidad.

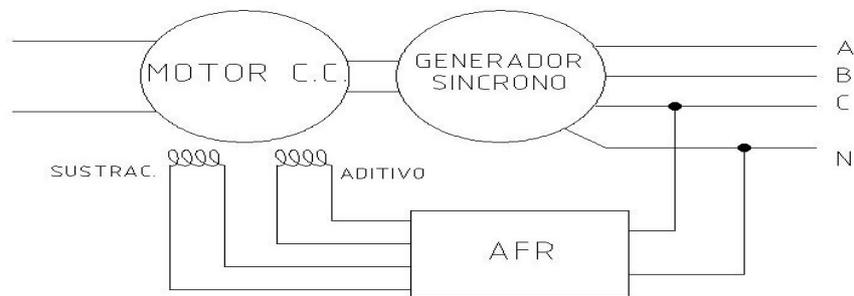


Figura 45: AFR (1)

Se conecta a una fase y al neutro en la salida del generador, con doble objetivo. Primero para obtener el valor de la frecuencia que se desea controlar, y segundo para proveer de energía a los devanados y al circuito de control.

La siguiente figura muestra de forma muy resumida la composición del AFR:

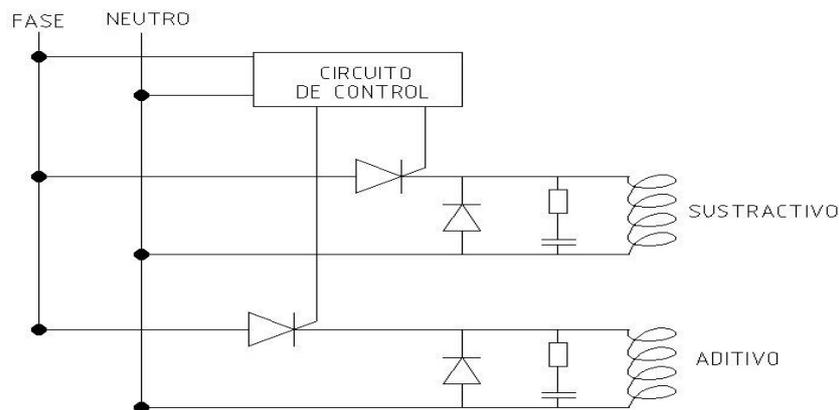


Figura 46: AFR (2)

Se trata de dos rectificadores monofásicos de media onda controlados con tiristores, con sus correspondientes diodos de libre circulación y condensadores para estabilizar la tensión.

4.5.2 EL AVR

El AVR trabaja para tener una tensión de salida constante de 380 V. Se alimenta a la salida del generador, hace una lectura de la tensión, y controla la intensidad en el devanado inductor del generador.

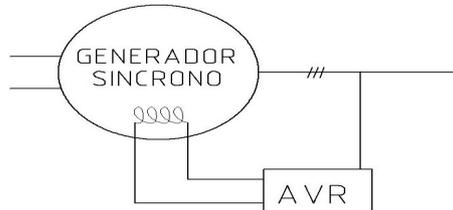


Figura 47: AVR (1)

La siguiente figura muestra de forma muy resumida la composición del AVR:

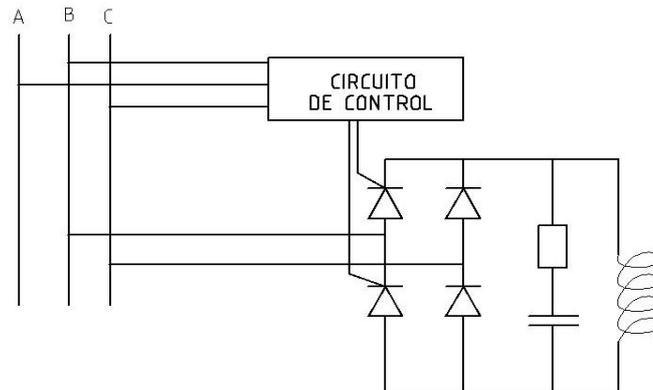


Figura 48: AVR (2)

Se trata de un rectificador monofásico de onda completa controlado, compuesto por dos tiristores, dos diodos y condensador para estabilizar la tensión. El circuito de control se conecta a las tres fases y el rectificador a dos.

4.6 LAS CARGAS

El GMA alimenta los servicios auxiliares de la locomotora. Depende de si se trata de la serie 269.2 o de la 251 alimenta unas carga u a otras.

En el caso de la locomotora 269.2 el GMA debe suministrar una potencia de 96 kW (ver tabla 1).

Los servicios auxiliares de la locomotora 251 tienen un consumo total de 233 kW (ver tabla 2). Por ello lleva dos GMA, y cada uno suministra una potencia de $233/2 = 116,5$ kW.

4.7 EL ARRANQUE

A continuación se va a describir el proceso de arranque del GMA. Si estando en reposo se conectara directamente a los 3.000 V de catenaria se alcanzarían unos picos de corriente muy elevados, por eso se hace un arranque escalonado mediante dos resistencias. Por supuesto durante el arranque las cargas están desconectadas.

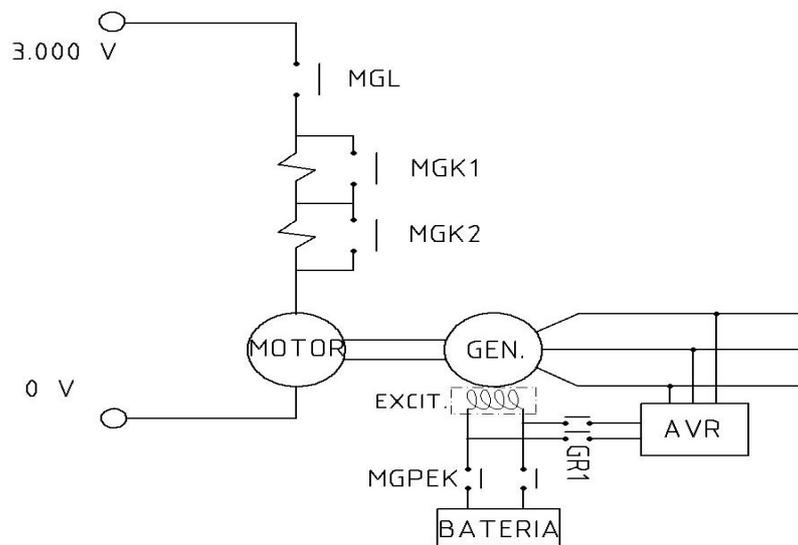


Figura 49: Arranque

El proceso de arranque es el siguiente:

- Se ordena el arranque del GMA mediante su interruptor correspondiente situado en la cabina de conducción. Dicho interruptor realiza las siguientes acciones:
 - Excita el relé contactor MGL que conecta el GMA.
 - Excita el relé contactor MGPEK para alimentar el devanado de excitación del alternador con tensión de batería.
 - Conecta el temporizador.
- En 2,2 segundos el temporizador ordena anular la primera resistencia mediante el contactor MGK1.
- En los siguientes 2,2 segundos el temporizador ordena dos acciones:
 - Anular la segunda resistencia mediante el contactor MGK2.
 - Excitar el relé GR1 para conectar el AVR que regula la corriente de excitación.

Tras este proceso el GMA se encuentra funcionando a 380 V y 50 Hz. Una vez arrancado se pueden conectar las cargas.

4.8 PROTECCIONES

En el entorno del GMA *MG-138A-F* existen una serie de elementos que protegen el grupo en caso de que se produjera un fallo o imprevisto. Estos elementos son:

El filtro

Protege a todo el circuito principal de potencia (motores de tracción y al GMA) absorbiendo picos de tensión y corriente.

Relé de sobreintensidad

Va en el lado de continua. Se trata de un relé que salta si detecta corrientes de cortocircuito. Cuando salta ordena directamente la apertura del disyuntor.

Grupo de diodos

Cuatro diodos en serie en el lado de continua impiden el paso de corriente en el sentido contrario. Se colocan para bloquear el funcionamiento del motor de c.c. como generador tras una caída brusca de tensión.

Protección de sobrevelocidad

Se trata de un pequeño generador tacométrico independiente al resto de circuitos y montado sobre el eje. Si detecta una sobrevelocidad ordena la apertura del contactor MGL.

Protección de sobretensión

Se coloca en el lado de alterna a la salida del generador. Si la tensión de salida es muy elevada ordena la apertura del contactor MGL.

Además todas las cargas tienen su propio interruptor magneto-térmico que protegen al GMA de sobreintensidades en el lado generador.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se van a aplicar los conocimientos teóricos sobre circuitos y máquinas eléctricas al *MG 138A-F* para comprender su funcionamiento. Para ello se hará uso de los ensayos realizados por *MITSUBISHI* presentes en el documento [10] y que se recogen en el anexo 2.

En el *MG 138A-F*, y en cualquier GMA, el lado de continua y el lado de alterna están separados eléctricamente, es decir, no existe ninguna conexión entre ellos. Además la regulación se realiza también por separado, el AFR trabaja exclusivamente con el motor para conseguir una velocidad de giro constante de 1.500 r.p.m (que se traducen en 50 Hz) y el AVR trabaja exclusivamente con el generador, para conseguir 380 V. La unión entre estos dos sistemas es el sistema mecánico (figura 50).



Figura 50: Esquema del análisis de funcionamiento

En este capítulo se va a desarrollar el conjunto motor y AFR por un lado, y el conjunto generador síncrono y AVR por otro.

5.1. MOTOR C.C. Y AFR

5.1.1 LA FUERZA ELECTROMOTRIZ

En motores de c.c. la fuerza electromotriz (f.e.m.) aparece cuando el devanado gira dentro de un campo magnético según la conocida fórmula (ref. [11]):

$$E = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (5.1)$$

Donde E es la fuerza electromotriz, ω es la velocidad de giro, Φ es el flujo magnético y K es una constante que depende de la disposición del inducido en el núcleo.

El motor de c.c. del *MG 138A-F* es un motor de doble colector. Esto significa que conviven dos colectores y dos inducidos en el mismo eje. Puede entenderse como dos motores, uno enfrente del otro, empujando el mismo eje. La figura 51 representa esta idea de forma simplificada, como si cada colector llevara una sola espira.

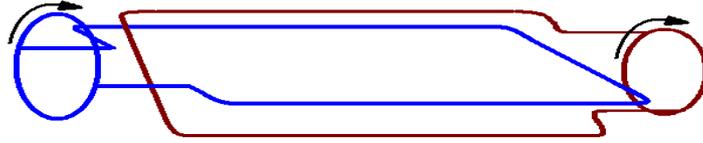


Figura 51: Motor de doble colector

Sobre los dos devanados inducidos se produce dos fuerzas electromotrices separadas:

$$E_1 = K_1 \cdot \phi_1 \cdot \omega_1 \quad E_2 = K_2 \cdot \phi_2 \cdot \omega_2 \quad (5.2)$$

Ambos colectores se conectan en serie (figura 38), así que la fuerza electromotriz total es la suma de ambas fuerzas electromotrices:

$$E = E_1 + E_2 = K_1 \cdot \phi_1 \cdot \omega_1 + K_2 \cdot \phi_2 \cdot \omega_2 \quad (5.3)$$

Como se vio en el apartado 4.2.2.1 los dos inducidos son idénticos, luego $K_1 = K_2$, además van montados sobre el mismo núcleo magnético, los atraviesa el mismo flujo ($\phi_1 = \phi_2$) y tienen la misma velocidad angular ($\omega_1 = \omega_2$). Entonces puede afirmarse que en todo momento se cumple:

$$E_1 = E_2 = \frac{E}{2} \quad (5.4)$$

La ecuación (5.3) se convierte en:

$$E = 2 \cdot E_1 = 2 \cdot K_1 \cdot \phi_1 \cdot \omega_1 = K \cdot \phi \cdot \omega \quad (5.5)$$

Teniendo en cuenta:

$$K = K_1 + K_2 = 2 \cdot K_1 \quad \phi = \phi_1 = \phi_2 \quad \omega = \omega_1 = \omega_2 \quad (5.6)$$

5.1.2 EL CIRCUITO MOTOR

De la figura 38 del capítulo anterior, que representa las conexiones de los elementos del motor, pueden deducirse las ecuaciones de las corrientes eléctricas. Para ello hay que tener en cuenta los valores resistivos de los devanados y combinarlos, cuando se pueda, con las resistencias en serie. Además se eliminan las inductancias, ya que se trata de corriente continua y no afectan a la corriente en régimen permanente.

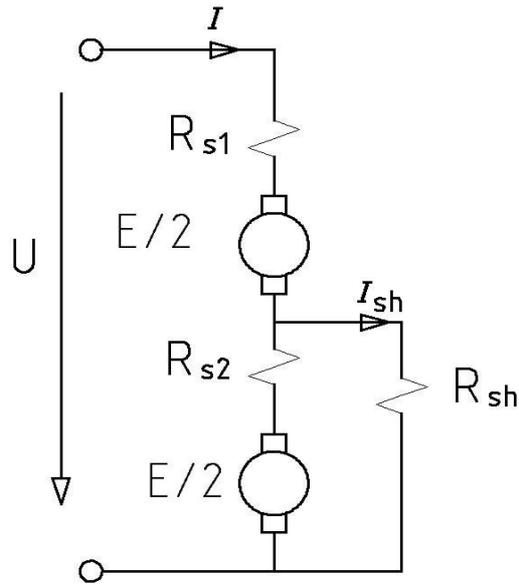


Figura 52: Esquema motor

R_{s1} es la suma de las resistencia MGR3, MGR4 y la resistencia del inducido 1 (anexo 1):

$$R_{s1} = 0,715 + 2,863 + 0,43 = 4,01 \Omega \quad (5.7)$$

R_{s2} es el valor de la resistencia del inducido 2, más las resistencias de los devanados de conmutación, compensación y serie:

$$R_{s2} = 0,43 + 0,61 = 1,04 \Omega \quad (5.8)$$

R_{sh} es la suma de la resistencia MGFR y de la resistencia del devanado shunt:

$$R_{sh} = 812 + 575 = 1.387 \Omega \quad (5.9)$$

Las ecuaciones resultado de este esquema son:

$$U = I \cdot R_{s1} + (I - I_{sh}) \cdot R_{s2} + E \quad (5.10)$$

$$I_{sh} \cdot R_{sh} = U - I \cdot R_{s1} - E/2 \quad (5.11)$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones y dos incógnitas, I y I_{sh} :

$$I = \frac{U \cdot \left(1 + \frac{R_{s2}}{R_{sh}}\right) - E/2 \cdot \left(2 + \frac{R_{s2}}{R_{sh}}\right)}{R_{s1} + R_{s2} + \frac{R_{s1} \cdot R_{s2}}{R_{sh}}} \quad (5.12)$$

Es una ecuación bastante aparatosa pero teniendo en cuenta la siguientes igualdades:

$$\frac{R_{s2}}{R_{sh}} = \frac{1,04}{1.387} = 7,5 \cdot 10^{-4} \qquad \frac{R_{s2} \cdot R_{s1}}{R_{sh}} = \frac{1,04 \cdot 4,01}{1.387} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Luego es posible despreciar estos términos y (5.12) queda:

$$I = \frac{U - E}{R_{s1} + R_{s2}} = \frac{U - E}{R_s} \quad (5.13)$$

Donde $R_s = R_{s1} + R_{s2} = 4,01 + 1,04 = 5,05 \Omega$. La ecuación (5.13) es la ecuación de corriente habitual en motores eléctricos. Combinando (5.13) y (5.11) la corriente en el devanado shunt queda:

$$I_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{s1} - R_s/2)}{R_{sh}} \quad (5.14)$$

Aunque si se pretende estimar I_{sh} sin conocer la corriente principal (I) puede usarse la siguiente fórmula:

$$I_{sh} = \frac{U}{2 \cdot R_{sh}} \quad (5.15)$$

Ya que $I \cdot (R_{s1} - R_s/2) \approx 57 \cdot (4,01 - 5,05/2) = 84 V$ es relativamente pequeño en comparación con $U/2 \approx 1.500 V$.

5.1.3 EL PAR MOTOR

Cuando por el inducido, rodeado por un campo magnético, circula una corriente eléctrica se crea en él un par mecánico según la conocida fórmula (ref [11]):

$$T = K \cdot \phi \cdot I \quad (5.16)$$

En nuestro caso tenemos dos inducidos, cada uno ejerce su par mecánico que sumados forman el par mecánico total:

$$T = T_1 + T_2 = K_1 \cdot \phi \cdot I_1 + K_2 \cdot \phi \cdot I_2 \quad (5.17)$$

Como se vio en (5.6) $K_1 = K_2 = K/2$ luego:

$$T = \frac{K}{2} \cdot \phi \cdot I_1 + \frac{K}{2} \cdot \phi \cdot I_2 \quad (5.18)$$

Si bien los dos inducidos son simétricos en fuerza electromotriz según (5.4), la conexión del devanado shunt al punto intermedio crea una asimetría en la corriente ya que no circula la misma corriente por los dos inducidos ($I_1 \neq I_2$). De la figura 52 puede obtenerse que $I_1 = I$ y $I_2 = I - I_{sh}$; la ecuación (5.18) queda:

$$T = \frac{K}{2} \cdot \phi \cdot I + \frac{K}{2} \cdot \phi \cdot (I - I_{sh}) = K \cdot \phi \cdot I - \frac{I_{sh}}{2} \cdot K \cdot \phi \quad (5.19)$$

El término $\frac{I_{sh}}{2} \cdot K \cdot \phi$ expresa el par mecánico que le sustrae el devanado shunt al segundo colector.

5.1.4 LA POTENCIA DEL MOTOR

La potencia del motor es la potencia transformada de potencia eléctrica a potencia mecánica, y viene definida por la ecuación (ref. [11]):

$$P_m = E \cdot I \quad (5.20)$$

En nuestro caso, con dos inducidos:

$$P_m = E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = \frac{E}{2} \cdot I + \frac{E}{2} \cdot (I - I_{sh}) = E \cdot I - \frac{I_{sh}}{2} \cdot E \quad (5.21)$$

El término $\frac{I_{sh}}{2} \cdot E$ es la potencia que le sustrae el devanado shunt al motor. Utilizando la ecuación (5.15) para estimar la corriente en el devanado shunt sin conocer la corriente principal:

$$P_m = E \cdot I - \frac{E \cdot U}{4 \cdot R_{sh}} \quad (5.22)$$

Combinando esta ecuación con (5.13) obtenemos la potencia del motor en función únicamente de la tensión de entrada y de la corriente principal:

$$P_m = (U - I \cdot R_s) \cdot I - \frac{(U - I \cdot R_s) \cdot U}{4 \cdot R_{sh}} \quad (5.23)$$

O en función de la tensión de entrada y de la f.e.m.:

$$P_m = E \cdot \frac{U - E}{R_s} - \frac{E \cdot U}{4 \cdot R_{sh}} \quad (5.24)$$

5.1.5 EL FLUJO MAGNÉTICO

El flujo magnético Φ aparece en el interior de una bobina cuando sobre ella circula corriente. Se define fuerza magnetomotriz (f.m.m.) al producto del número de espiras y la corriente $N_i \cdot I_i$. Cuando no hay saturación la relación entre la f.m.m. y el flujo es lineal (ref. [12]):

$$\phi = \frac{1}{R_m} \cdot \sum N_i \cdot I_i \quad (5.25)$$

Donde R_m es la resistencia magnética. Sin embargo en el funcionamiento normal de los motores existe cierta saturación del núcleo y el flujo se rige por una función no lineal (ref. [12]):

$$\phi = f(\sum N_i \cdot I_i) \quad (5.26)$$

El objetivo de este apartado es encontrar la relación entre el flujo (Φ) y la fuerza magnetomotriz ($\sum N_i \cdot I_i$).

El flujo lo crean los devanados inductores que van arrollados alrededor de los polos principales en el estator. Cuando hay cuatro polos principales, como en el motor que estudiamos, el flujo forma cuatro circuitos:

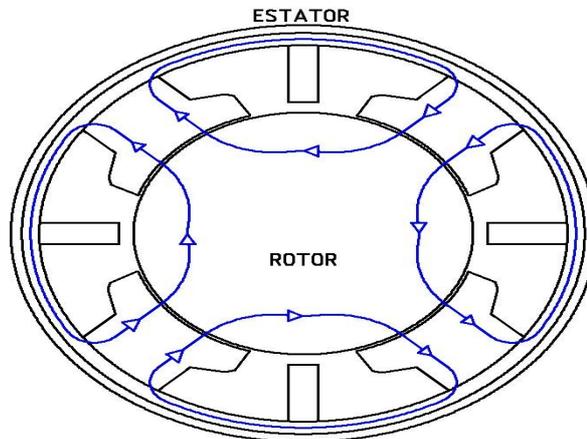


Figura 53: Motor. Flujo magnético

Se trata de un motor de devanado compuesto con un devanado shunt y uno serie, así que la f.m.m. que crea del motor será (ver figura 38):

$$(N \cdot I)_{motor} = N_{sh} \cdot I_{sh} + N_{se} \cdot (I - I_{sh}) \quad (5.27)$$

Además el AFR aplica una f.m.m. externa para la regulación de velocidad:

$$(N \cdot I)_{AFR} = N_{ad} \cdot I_{ad} - N_{ss} \cdot I_{ss} \quad (5.28)$$

Y la f.m.m. total será:

$$(N \cdot I)_{total} = (N \cdot I)_{motor} + (N \cdot I)_{AFR} = (N_{sh} \cdot I_{sh} + N_{se} \cdot (I - I_{sh}) + N_{ad} \cdot I_{ad} - N_{ss} \cdot I_{ss}) \quad (5.29)$$

Para obtener la relación entre el flujo y la fuerza magnetomotriz se hará uso de los valores de intensidad de los ensayos de vacío del anexo 2.

En primer lugar se ha calculado la fuerza magnetomotriz a partir de los valores de corriente (anexo 2) y los números de vueltas (anexo 1) y la ecuación (5.29):

Ensayo	U (V)	SERIE (N=11)		SHUNT (N=4.635)		SUSTRAC. (N=177)		ADITIVO (N=218)		NI total (A vuelta)
		I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	
VACIO	2.000	3,87	42,57	0,63	2.920,05	2,3	-407,1	0,6	130,8	2.686,32
	2.500	3,23	35,48	0,78	3.592,13	0,4	-70,8	0,1	21,8	3.578,6
	3.000	3,07	33,72	0,94	4.333,73	1	-177	3,4	741,2	4.931,64
	3.600	2,88	31,68	1,12	5.191,2	2,9	-513,3	10,8	2.354,4	7.063,98

Tabla 4: Motor: F.M.M. en el ensayo de vacío

Además, gracias a la ecuación (5.5) se sabe que $K \cdot \phi = E / \omega$, y a la ecuación (5.13) que $E = U - I \cdot R_s$. La velocidad del rotor puede obtenerse a partir de la frecuencia en el lado generador según la ecuación (ref. [11]):

$$\omega = \frac{f \cdot 4 \cdot \pi}{2 \cdot p} \quad (5.30)$$

Donde 2p es el número de polos del generador, en nuestro caso 2p=4.

Aplicando las ecuaciones (5.5), (5.13) y (5.30):

Ensayo	U (V)	I (A)	E (V)	frecuencia (Hz)	Velocidad (rad/seg)	K*Flujo (Nm/A)
VACIO	2.000	4,5	1.980,02	49,3	154,88	12,78
	2.500	4	2.482,24	49,8	156,45	15,87
	3.000	4	2.982,24	50,8	159,59	18,69
	3.600	4	3.582,24	52	163,36	21,93

Tabla 5: Flujo en el ensayo de vacío

La siguiente gráfica representa la magnitud $K \cdot \phi$ (que es proporcional al flujo) en función de la f.m.m. ($\sum N_i \cdot I_i$) (tabla 4). Cuando $\sum N_i \cdot I_i$ es cero $K \cdot \phi$ también debe ser cero según la ecuación (5.25), así que se ha añadido el punto [0,0] a la gráfica.

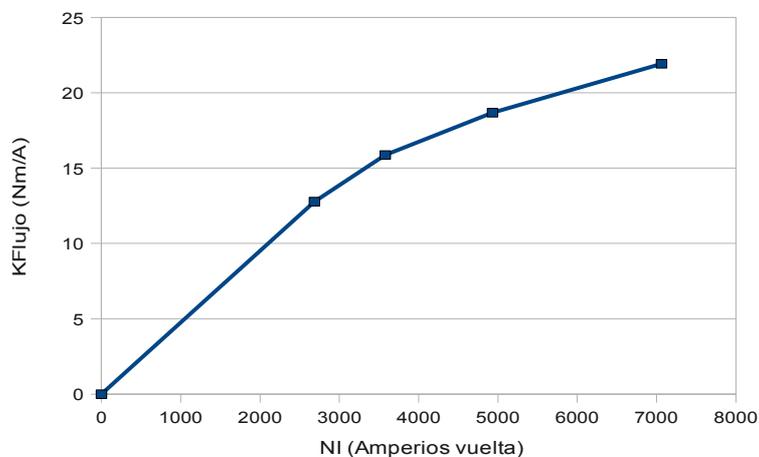


Figura 54: Motor. Gráfica de saturación del núcleo

Puede verse como el flujo crece linealmente con la fuerza magnetomotriz hasta los 3.500 A vuelta y después comienza una pequeña disminución en la pendiente debido a la saturación.

La curva de la figura 54 puede aproximarse con las siguientes cuatro ecuaciones lineales:

Intervalo:	Ecuación:	
$0 < NI < 2.686$	$k \cdot \phi = 4,759 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I)$	(5.31)
$2.686 < NI < 3.579$	$k \cdot \phi = 3,454 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 3,506$	(5.32)
$3.579 < NI < 4.932$	$k \cdot \phi = 2,085 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 8,406$	(5.33)
$4.932 < NI < 7.064$	$k \cdot \phi = 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 11,19$	(5.34)

5.1.5.1 REACCIÓN DE INDUCIDO

Cuando el motor funciona en carga la corriente que circula por el devanado inducido crea su propia f.m.m. que distorsiona la onda de flujo magnético en el entrehierro.

Una de las consecuencias de la reacción de inducido es el desplazamiento de la línea neutra (ref. [11]). Para corregir este desplazamiento se utiliza el **devanado de conmutación** montado sobre los polos auxiliares. Este devanado mejora la conmutación anulando la inductancia en las espiras del inducido que están siendo conmutadas.

Otra consecuencia de la reacción de inducido es que crea una sobresaturación del núcleo. Para reducir este problema se utiliza el **devanado de compensación** que recorre los polos principales paralelo al inducido del rotor, y conectado en serie al él. De esta forma imita el flujo del inducido pero en el sentido contrario con objeto de anularlo.

5.1.6 RESISTENCIAS A TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO

Los valores de las resistencias del cobre del anexo 1 son valores a una temperatura de 20 °C. Sin embargo durante el funcionamiento la máquina alcanza temperaturas superiores a 20 °C y las resistencias de los devanados aumentan considerablemente.

Resistencia en serie (R_s)

En este apartado se pretende calcular la resistencia R_s a temperatura de funcionamiento del GMA, para ello es necesario calcular la f.e.m. y aplicar la fórmula (5.13) $R_s = \frac{U - E}{I}$.

A partir del ensayo de plena carga del anexo 2 y de la ecuación (5.29) se ha calculado la f.m.m. total:

Ensayo	SERIE(N=11)			SHUNT(N=4.635)		SUSTRAC. (N=177)		ADITIVO(N=218)		NI total (A vuelta)
	U (V)	I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	I (A)	NI (A vuelta)	
Plena carga	2.000	97,46	1.072,06	0,540	2.502,90	12,00	-2.124,00	2,90	632,20	2.083,16
	2.500	67,29	740,14	0,715	3.314,03	8,00	-1.416,00	2,00	436,00	3.074,16
	3.000	54,12	595,27	0,885	4.101,98	3,40	-601,80	0,90	196,20	4.291,64
	3.600	44,42	488,62	1,080	5.005,80	1,10	-194,70	3,80	828,40	6.128,12

Tabla 6: Motor. F.M.M. en el ensayo de plena carga

A partir de la f.m.m. y las ecuaciones (5.31-34) puede obtenerse el término ($K \cdot \phi$) y por lo tanto la f.e.m. $E = K \cdot \phi \cdot \omega$ (ecuación (5.5)).

NI (A vuelta)	K F (Nm/A)	Frec. (Herz)	W (rad/seg)	E (V)
2.083,16	9,92	47,5	149,23	1.480,32
3.074,16	14,14	47,8	150,17	2.123,38
4.291,64	17,32	48,5	152,37	2.639,01
6.128,12	20,5	51	160,22	3.284,54

Tabla 7: Motor. F.E.M. en el ensayo de plena carga

Aplicando la ecuación (5.13) :

U (V)	I (A)	E (V)	R _s (Ω)
2.000	98,0	1.480,32	5,30
2.500	68,0	2.123,38	5,54
3.000	55,0	2.639,01	6,56
3.600	45,5	3.284,54	6,93
Promedio:			6,05

Tabla 8: Motor. R_s en el ensayo de plena carga

Como se esperaba la resistencia obtenida es superior a los 5,05 Ω de temperatura ambiente. Se puede estimar que la resistencia en serie es de unos 6,05 Ω, el promedio de los cuatro ensayos. Esto equivale a un aumento del 20 %.

Suponiendo que R_{s1} y R_{s2} aumenten en la misma proporción con la temperatura:

$$R_{s1} = \frac{6,05}{5,05} \cdot 4,01 = 4,8 \Omega \quad R_{s2} = \frac{6,05}{5,05} \cdot 1,04 = 1,25 \Omega \quad (5.35)$$

La Resistencia shunt (R_{sh})

La resistencia shunt, R_{sh}, se despeja de (5.14): $R_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{s1} - R_s/2)}{I_{sh}}$.

En este caso se ha considerado más adecuado usar el ensayo de vacío, ya que al ser la corriente principal menor, el resultado dependerá menos de R_s y habrá menos error:

U (V)	I (A)	I shunt (A)	R sh (Ω)
2.000	4,5	0,63	1.574,62
2.500	4,0	0,775	1.603,74
3.000	4,0	0,935	1.596,68
3.600	4,0	1,12	1.607,14
Promedio:			1.595,5

Tabla 9: Motor. Rsh en el ensayo de vacío

Puede estimarse que la resistencia shunt a temperatura de funcionamiento es de unos 1.595 Ω , bastante superior a los 1.387 Ω correspondientes a 20 °C. Esto supone un aumento del 15 %.

De ahora en adelante se utilizarán estos valores de resistencia para continuar con el análisis de funcionamiento.

5.1.7 FUNCIONAMIENTO SIN REGULACIÓN

El motor que estudiamos lleva devanado compuesto, es decir, un devanado serie y otro shunt. En motores de c.c. que no llevan el devanado shunt conectado al punto intermedio la f.m.m. puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\sum N \cdot I = N_{sh} \cdot \frac{U}{R_{sh}} + N_{se} \cdot I \quad (5.36)$$

En el caso del motor del GMA *MG 138A-F* no es exactamente así debido a la conexión al punto intermedio del devanado shunt. La f.m.m. creada por el devanado shunt sí depende de la corriente principal (véase ecuación (5.14)). Utilizando las ecuaciones (5.13), (5.14) y (5.27):

$$(N \cdot I)_{motor} = \frac{N_{sh} - N_s}{2 \cdot R_{sh}} \cdot U - \left(N_{se} - \frac{(N_{sh} - N_{se}) \cdot (R_{s1} - R_s / 2)}{R_{sh}} \right) \cdot I = 2.312 \cdot \frac{U}{R_{sh}} + 5,85 \cdot I \quad (5.37)$$

El primer término va a aportar el grueso de la f.m.m. que se mantiene constante con la tensión, mientras que el segundo aumenta la f.m.m. a medida que el motor entra en carga. Comparando (5.37) con (5.36) se llega a la conclusión que el motor equivale a un devanado compuesto normal (sin conexión intermedia) pero con 2.312 vueltas en el devanado shunt y 5,85 vueltas en el devanado serie.

5.1.7.1 CURVA PAR-VELOCIDAD

[11] da la siguiente ecuación para calcular la velocidad a partir del par y del flujo:

$$\omega = \frac{U}{(k \cdot \phi)} - \frac{R_s}{(k \cdot \phi)^2} \cdot T \quad (5.38)$$

Aplicando los siguientes comandos en matlab puede obtenerse la curva par-velocidad para

una tensión de 3.000 V:

```
>> I=[0:1:70];
>> U=3000*ones(1,71);
>> NI=1.45*U+5.85*I;
>> kfi=2.085E-3*NI+8.406;
>> T=kfi.*I;
>> Rs=6.05;
>> W=U./kfi-Rs*T./kfi.^2;
>> plot(T,W,'blue');
```

Se han repetido estos comandos para las tensiones de 2.000, 2.500 y 3.600 V. A continuación se muestran la gráfica resultante:

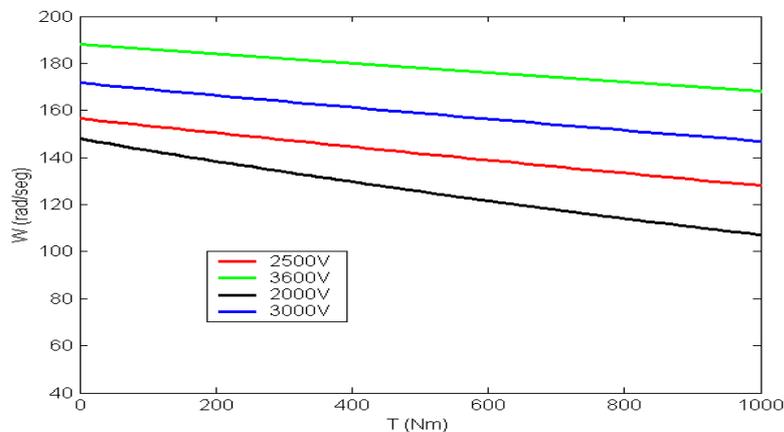


Figura 55: Motor. Curva par-velocidad sin regulación

De la figura 55 puede verse como el motor funcionaría en el rango de 105 a 189 rad/seg, que equivalen a 33 y 60 Hz en el lado generador. Para que esto no suceda el AFR tendrá que actuar.

5.1.8 EL REGULADOR AFR Y EL FLUJO EXTERNO

El AFR aplica un flujo externo por medio de los devanados aditivo y sustractivo. Al aplicar un flujo externo la ecuación (5.38) queda:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot (\phi + \phi_{ext})} - \frac{R_s}{(k \cdot (\phi + \phi_{ext}))^2} \cdot T \quad (5.39)$$

Y la velocidad de giro queda alterada.

Al aumentar el flujo aumenta la f.e.m. y la corriente principal disminuye, en consecuencia se produce una disminución del par y de la velocidad de giro (ref. [11]). De manera inversa cuando disminuye el flujo aumenta la velocidad de giro.

Así que el AFR deberá aplicar corriente al devanado aditivo para bajar la velocidad, y aplicar corriente al devanado sustractivo para subirla.

5.1.8.1 FUNCIONAMIENTO DEL AFR

El AFR hace una lectura de la frecuencia en el lado generador (que es proporcional a la velocidad de giro) y actúa sobre el devanado aditivo o el sustractivo.

Para estudiar el comportamiento del AFR se ha usado los ensayos de vacío y plena carga del anexo 2. En la siguiente tabla se exponen las corrientes de los devanados y la frecuencia:

Ensayo	I sus (A)	I ad (A)	frecuencia (Hz)
Vacío	2,30	0,60	49,3
	0,40	0,10	49,8
	1,00	3,40	50,8
	2,90	10,80	52
Plena carga	12,00	2,90	47,5
	8,00	2,00	47,8
	3,40	0,90	48,5
	1,10	3,80	51

Tabla 10: Motor. F.M.M. externa en los ensayos de vacío y plena carga

Los devanados aditivo y sustractivo tienen efectos contrarios así que va en contra de la lógica que el AFR permita corriente por ambos simultáneamente. Lo cierto es que el AFR solo activa un devanado, la corriente del otro es una corriente inducida por el rizado del rectificador.

Lo que interesa para el estudio no es la corriente sino la f.m.m. total, la aditiva menos la sustractiva, recuérdese la ecuación (5.28) $(N \cdot I)_{AFR} = N_{ad} \cdot I_{ad} - N_{ss} \cdot I_{ss}$.

Ensayo	NI sus (A vuelta)	NI ad. (A vuelta)	NI AFR (A vuelta)	frecuencia (Hz)
Vacío	407,1	130,8	-276,3	49,3
	70,8	21,8	-49	49,8
	177	741,2	564,2	50,8
	513,3	2.354,4	1.841,1	52
Plena carga	2.124	632,2	-1.491,8	47,5
	1.416	436	-980	47,8
	601,8	196,2	-405,6	48,5
	194,7	828,4	633,7	51

Tabla 11: Motor. F.M.M. externa en los ensayos de vacío y plena carga (2)

La velocidad de giro puede calcularse a partir de la frecuencia con la ecuación (5.30)

$$\omega = \frac{f \cdot 4 \cdot \pi}{2 \cdot p}$$

. La siguiente gráfica representa la f.m.m. frente a la velocidad de giro:

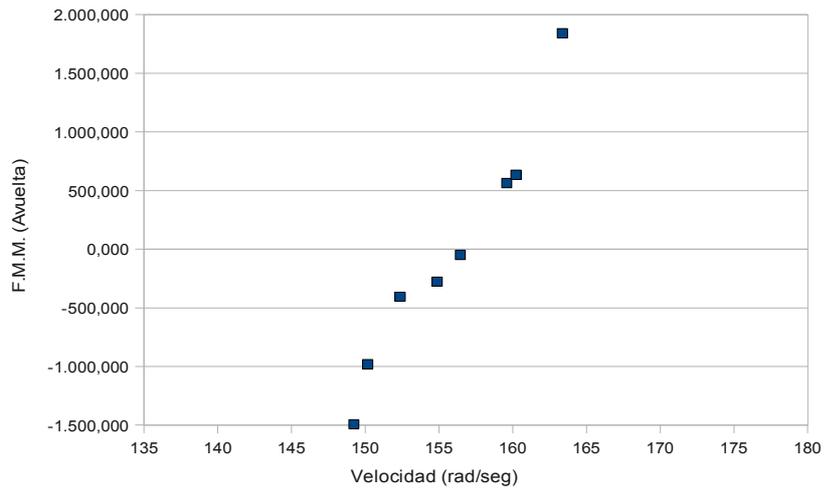


Figura 56: Curva AFR

La curva que forman los puntos es lo que se podría llamarse “curva de funcionamiento del AFR”. El AFR trata de mantener la máquina girando 157,08 rad/seg (50 Hz), cuando la máquina se encuentra girando a más velocidad aplica corriente en el devanado aditivo para frenarla. Cuando gira a menor velocidad aplica corriente en el devanado sustractivo para acelerarla.

Se ha aproximado la curva de la figura 56 con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Si } \omega > 158,57 \text{ rad/seg} \quad (N \cdot I)_{AFR} = 384,14 \cdot \omega - 60.912,7 \text{ (A vuelta)} \quad (5.40)$$

$$\text{Si } 153,54 > \omega > 158,57 \text{ rad/seg} \quad (N \cdot I)_{AFR} = 0 \text{ (A vuelta)} \quad (5.41)$$

$$\text{Si } \omega < 153,54 \text{ rad/seg} \quad (N \cdot I)_{AFR} = 345,79 \cdot \omega - 53.093 \text{ (A vuelta)} \quad (5.42)$$

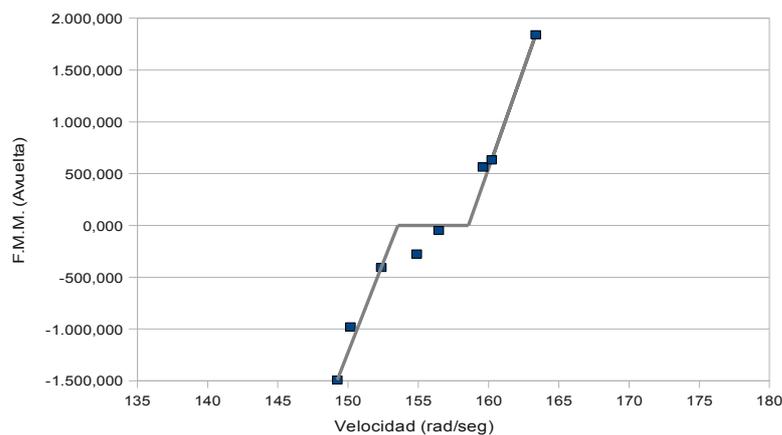


Figura 57: Curva AFR (2)

5.2 EL GENERADOR SINCRONO Y EL AVR

Se trata de un generador síncrono convencional con los devanados inducidos conectados en estrella y el el devanado inductor controlado por el regulador AVR.

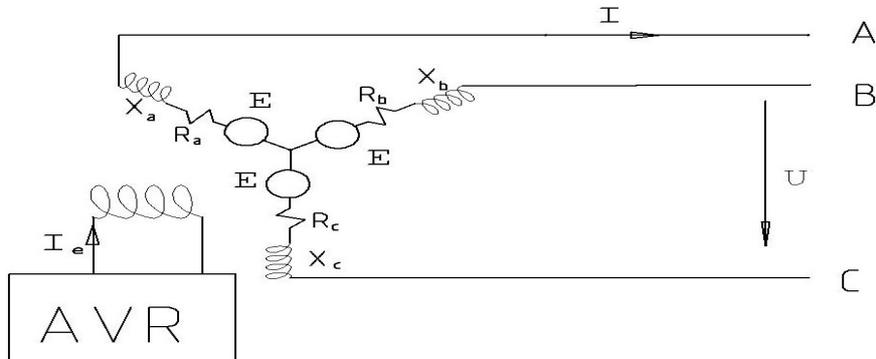


Figura 58: Esquema generador

El devanado inductor se encuentra en el rotor. Al aplicar corriente continua sobre él se crea un campo magnético y convierte al rotor en un imán de cuatro polos.

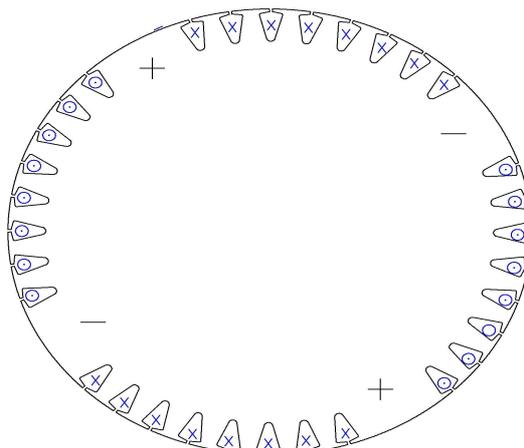


Figura 59: Generador. Devanado inductor

[13] afirma que la forma de la f.m.m. alrededor del rotor debe parecerse lo más posible a una senoide, por este motivo las ranuras no se reparten por igual en el rotor, sino que existen cuatro espacios que no llevan ranura que se corresponden con las crestas de la senoide.

5.2.1 FUNCIONAMIENTO EN VACIO

Cuando el generador funciona en vacío la corriente de fase es cero, luego la tensión en los terminales será igual a la f.e.m..

$$U_L = E_L \quad (5.43)$$

Cuando por el devanado inductor circula una corriente de excitación esta crea una f.m.m.

(F_e) que induce un campo magnético (Φ):

$$\phi = f(F_e) \quad (5.44)$$

La f.m.m. (F_e) es estrictamente proporcional a la corriente de excitación, y la siguiente simplificación sirve para facilitar los cálculos y solo supone un cambio de unidades en la f.m.m. (en Amperios en lugar de Amperios vuelta):

$$F_e = I_e \quad (5.45)$$

Cuando el rotor gira, se crea un campo magnético giratorio que induce f.e.m. en los devanados del estator. [13] afirma que la f.e.m. en los devanados inducidos será proporcional a la f.m.m. creada por el devanado de excitación multiplicada por la velocidad de giro.

$$E_L = k_g \cdot I_e \cdot \omega \quad (5.46)$$

Como la velocidad de giro es proporcional a la frecuencia:

$$E_L = k_g \cdot I_e \cdot f \quad (5.47)$$

Utilizando el ensayo de vacío a 3.000 V del anexo 2 y con las ecuaciones (5.43) y (5.47) puede deducirse la constante k_g :

f (Hz)	U (V)	I exc (A)	k (V/AHz)
50,8	390	6,3	1,22

Figura 60: Generador. Funcionamiento en vacío

Para conseguir una f.e.m. $E_L = 390$ V a 50 Hz, será necesaria una f.m.m. de 6,3 A.

5.2.2 FUNIONAMIENTO EN CARGA Y LA REACCIÓN DE INDUCIDO

Cuando el generador funciona en carga la corriente de línea crea una f.m.m. de reacción de inducido (F_r). La f.m.m. total (F_T) será la suma de las f.m.m.:

$$F_T = F_e + F_r \quad (5.48)$$

Y la ecuación (5.47) se escribe ahora:

$$E_L = k_g \cdot F_T \cdot f \quad (5.49)$$

[13] propone el siguiente diagrama vectorial:

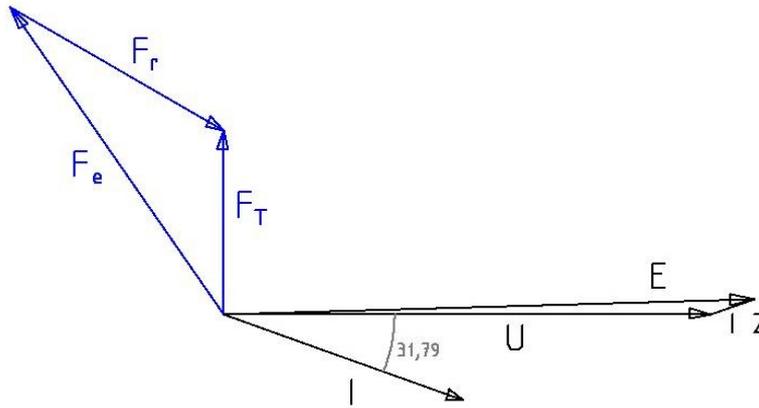


Figura 61: Generador. Diagrama vectorial

Donde F_r es paralela a la corriente de línea (I_L) y F_T es perpendicular a la f.e.m. (E_L). Todos los ensayos del anexo 2 se han hecho con un factor de potencia de 0,85, lo que equivale a un ángulo:

$$\varphi = \arccos(0,85) = 31,79^\circ \quad (5.50)$$

Teniendo en cuenta este factor de potencia la f.m.m. de reacción de inducido resta efecto a la f.m.m. de excitación. Para compensar este efecto el AVR aplica más corriente al devanado de excitación. Esto puede apreciarse en los diferentes ensayos a 3.000 V:

Ensayo	I (A)	UL (V)	I excit (A)
vacio	0	390	6,3
1/3 de carga	80	385,2	9,7
2/3 de carga	160	380,8	14
Plena carga	243	372	18,6
Sobre carga	268	368	19,8

Tabla 12: Funcionamiento AVR

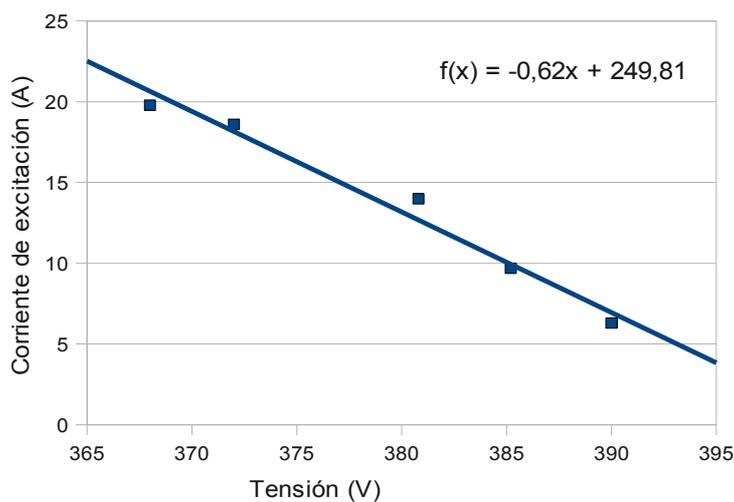


Tabla 13: Funcionamiento AVR

A medida que la corriente de línea (I_L) aumenta el AVR detecta mayor caída de tensión en el

generador y reacciona aplicando más corriente de excitación (I_e). El objetivo es que F_T no disminuya y permanezca en 6,3 A, y así la f.e.m. se mantenga en 390 V.

La siguiente ecuación es una regresión lineal de la figura 13:

$$I_e = -0,623 \cdot U_L + 249,8 (A) \quad (5.51)$$

Utilizando el ensayo de 3.000 V de plena carga del anexo 2 se va a dibujar el esquema gráfico de la f.m.m.. El objetivo es deducir la relación entre la f.m.m. F_T y la corriente de línea I_L . Para ello se necesita la corriente de excitación, el factor de potencia y suponer que la f.m.m. total es en efecto 6,3 A para asegurar una f.e.m. de 390 V.

U (V)	fp (%)	I (A)	I excit (A)
372	0,85	243	18,6

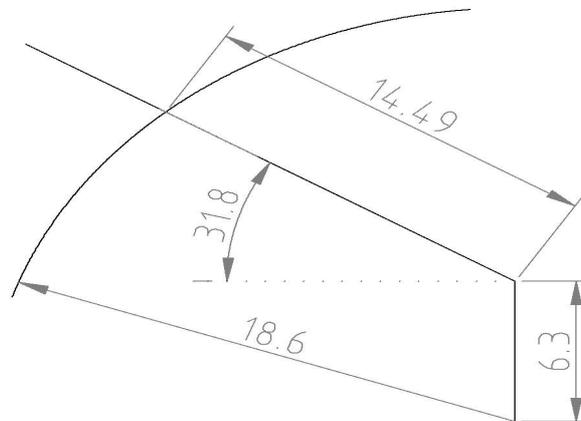


Figura 62: Generador. Cálculo de la reacción de inducido

Una corriente de línea de 243 A ha creado una f.m.m. de reacción de inducido de 14,49 A. La relación entre la f.m.m. de reacción de inducido F_r y la corriente de línea I_L será:

$$F_r = \frac{14.49}{243} \cdot I_L = 0,06 \cdot I_L \quad (5.52)$$

5.2.2.1 LA CAÍDA DE TENSIÓN EN EL GENERADOR

Cuando circula una corriente de línea por los devanados del generador se produce una caída de tensión:

$$\bar{E}_L - \bar{U}_L = \bar{I}_L \cdot \bar{Z}_{sg} \sqrt{3} \quad (5.53)$$

La impedancia Z_{sg} es una combinación entre una resistencia y una inductancia en serie al generador:

$$Z_{sg} = R_{sg} + X_{sg} \cdot i \quad (5.54)$$

La resistencia R_{sg} la podemos obtener de la tabla 2 del anexo 1, $0,017 \Omega$, aunque a una temperatura de 20°C , y es de suponer que la resistencia aumente cuando la máquina esta en funcionamiento. Al no poder calcular la resistencia en funcionamiento se ha estimado que aumentará en la misma proporción que el inducido del motor calculado en el apartado 5.1.6, es decir, un 20 %. El resultado es $R_{sg}=0,02 \Omega$.

Para calcular X_{sg} se va a utilizar de nuevo los datos del ensayo a 3.000 V de plena carga. Resolviendo la ecuación (5.53) gráficamente:

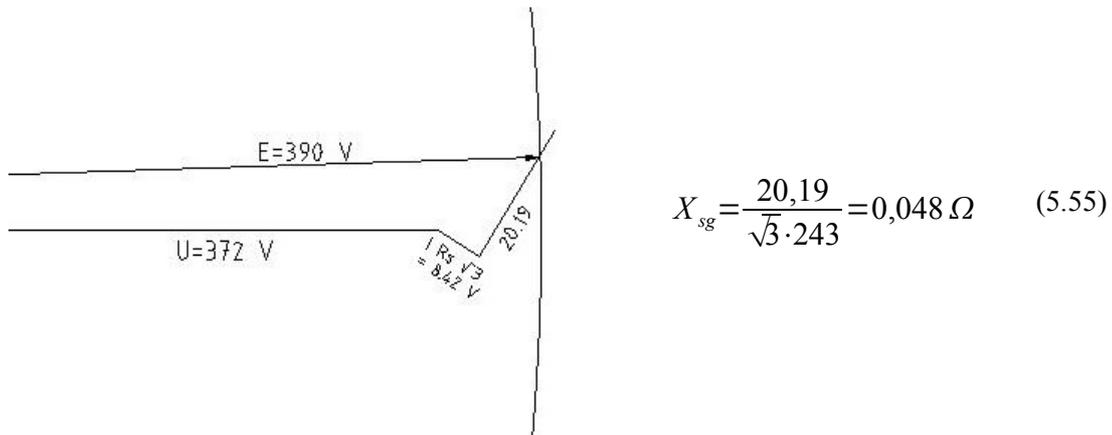


Figura 63: Generador. Cálculo de la inductancia

La impedancia y el ángulo de impedancia será:

$$\bar{Z}_{sg} = 0,02 + 0,048 \cdot i \quad |Z_{sg}| = \sqrt{0,02^2 + 0,048^2} = 0,052 \Omega \quad (5.56)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{0,02}{0,052}\right) = 67,4^{\circ} \quad (5.57)$$

Cuando la caída de tensión es muy pequeña en comparación con la f.e.m. Puede resolverse el problema con ecuaciones trigonométricas:

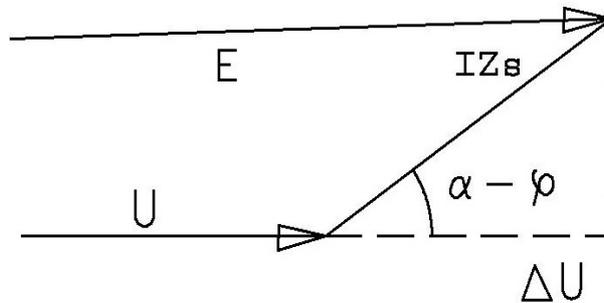


Figura 64: Generador. Cálculo de la caída de tensión

$$\Delta U_L = |\bar{E}_L| - |\bar{U}_L| \simeq Z_{sg} \cdot I_L \cdot \sqrt{3} \cdot \cos(\alpha - \varphi) = 0,09 \cdot I_L \cdot \cos(67,4 - \cos^{-1}(fp)) \quad (5.58)$$

Donde fp es el factor de potencia. La tensión de línea en bornes del generador puede calcularse utilizando la ecuación (5.58):

$$U_L = 390 - I_L \cdot 0,09 \cdot \cos(67,4 - \arccos(fp)) \quad (5.59)$$

5.3 LAS PÉRDIDAS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En este apartado se pretende establecer las formulas que definen las perdidas y la eficiencia.

5.3.1 LAS PÉRDIDAS DEL MOTOR C.C.

Con ayuda de la figura 52 pueden deducirse fácilmente las perdidas por efecto joule en el motor:

$$Pe_{mot} = I^2 \cdot R_s + I_{sh}^2 \cdot R_{sh} = I^2 \cdot 6,05 + I_{sh}^2 \cdot 1.595 \quad (5.60)$$

5.3.2 LAS PÉRDIDAS EN EL AFR

Las perdidas del AFR serán dos, las perdidas en el circuito de control y las perdidas en los devanados. Es de esperar que las perdidas en el circuito de control sean muy bajas y es posible despreciarlas.

Las perdidas en los devanados aditivo y sustractivo son perdidas por efecto joule:

$$Pe_{AFR} = P_{ss} + P_{ad} = I_{ss}^2 \cdot R_{ss} + I_{ad}^2 \cdot R_{ad} \quad (5.61)$$

R_{ss} y R_{ad} son las resistencias de los devanados sustractivo y aditivo y pueden encontrarse en el anexo 1.

$$Pe_{AFR} = P_{ss} + P_{ad} = I_{ss}^2 \cdot 3,52 + I_{ad}^2 \cdot 3,9 \quad (5.62)$$

5.3.3 LAS PÉRDIDAS EN EL GENERADOR

Las perdidas en el generador son las perdidas por efecto Joule en los devanados inducidos:

$$Pe_{gen} = 3 \cdot I_L^2 \cdot R_{sg} = 0,06 \cdot I_L^2 \quad (5.63)$$

5.3.4 PÉRDIDAS EN EL AVR

Al igual que con el AFR, se van a despreciar las perdidas del circuito de control, así que las pérdidas se encontrarán en el devanado de excitación cuya resistencia puede encontrarse en

el anexo 1:

$$Pe_{AVR} = I_e^2 \cdot R_e = I_e^2 \cdot 5,34 \quad (5.64)$$

5.3.5 LAS PÉRDIDAS MECÁNICAS

Para calcular las pérdidas mecánicas se va a hacer un balance en potencias utilizando los datos del ensayo de vacío del anexo 2.

Como en cualquier sistema:

$$P_{entrante} = P_{saliente} + P_{perdidas} \quad (5.65)$$

En el ensayo de vacío no hay potencia saliente luego:

$$P_{entrante} = P_{perdidas} \quad (5.66)$$

La potencia entrante puede calcularse aplicando al lado motor la fórmula:

$$P_{entrante} = U \cdot I \quad (5.67)$$

U (V)	I (A)	P entrante (W)
2.000	4,5	9.000
2.500	4	10.000
3.000	4	12.000
3.600	4	14.400

Tabla 14: Potencia entrante en el ensayo de vacío

Las pérdidas del GMA son:

$$P_{perdidas} = Pe_{mot} + Pe_{mec} + Pe_{AFR} + Pe_{AVR} \quad (5.68)$$

Combinando las ecuaciones (5.60), (5.61), (5.62), (5.53), (5.64) y (5.68) se obtiene la ecuación:

$$Pe_{mec} = U \cdot I - I^2 \cdot 6,05 - I_{sh}^2 \cdot 1.465 - I_{ss}^2 \cdot 3,52 - I_{ad}^2 \cdot 3,9 - I_e^2 \cdot 5,34 \quad (5.69)$$

P entrante (W)	I (A)	I sh (A)	P motor (W)	I ss (A)	I ad (A)	P AFR (W)	I e (A)	P AFR (W)	P mecánicas (W)
9.000	4,5	0,63	704,2	2,3	0,6	20,025	6,6	232,6	8.043,1
10.000	4	0,775	977,1	0,4	0,1	0,602	6,5	225,6	8.796,7
12.000	4	0,935	1.378,1	1	3,4	48,604	6,3	211,9	10.361,4
14.400	4	1,12	1.935,3	2,9	10,8	484,499	6,2	205,3	11.774,9

Tabla 15: Pérdidas mecánicas en el ensayo de vacío

Es de esperar que las pérdidas mecánicas aumenten con la velocidad de giro. La siguiente

gráfica representa las pérdidas mecánicas calculadas frente a la velocidad de giro:

P mecánicas (W)	Velocidad rad/seg
8.043,1	154,88
8.796,7	156,45
10.361,4	159,59
11.774,9	163,36

Tabla 16: Pérdidas mecánicas-velocidad de giro

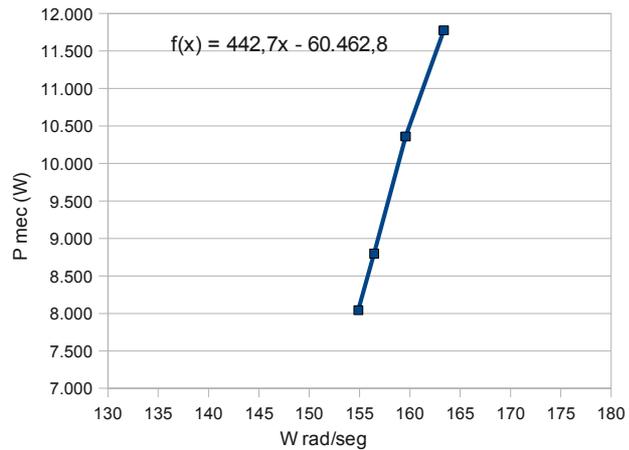


Figura 65: Pérdidas mecánicas-velocidad de giro

Puede verse que las pérdidas mecánicas aumentan con la velocidad de giro. Aunque la curva completa no será lineal, en el intervalo de funcionamiento puede aproximarse con la siguiente ecuación lineal:

$$Pe_{mec} = 442,7 \cdot \omega - 60.462,8 \quad (5.70)$$

Para simplificar las ecuaciones se va a suponer que las pérdidas mecánicas son constantes equivalentes a una velocidad de giro de 157,08 rad/seg, equivalentes a 50 Hz:

$$Pe_{mec} = 442,7 \cdot 157,08 - 60.462,8 = 9.041 \text{ W} \quad (5.71)$$

5.3.6 LA EFICIENCIA DEL GMA

La eficiencia del GMA puede definirse con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{saliente}}{P_{entrante}} = 1 - \frac{P_{perdidas}}{P_{entrante}} = 1 - \frac{Pe_{mol} + Pe_{AFR} + Pe_{gen} + Pe_{AVR} + Pe_{mec}}{P_{entrante}} \quad (5.72)$$

Aplicando la ecuaciones (5.60-5.64) y la ecuación (5.71):

$$\eta = 1 - \frac{(I^2 \cdot 6,05 + I_{sh}^2 \cdot 1.595) + (I_{ss}^2 \cdot 3,52 + I_{ad}^2 \cdot 3,9) + I_L^2 \cdot 0,06 + I_e^2 \cdot 5,34 + 9.041}{U \cdot I} \quad (5.73)$$

5.3.7 TABLAS DE PÉRDIDAS Y EFICIENCIA

Aplicando las ecuaciones deducidas en este apartado a los ensayos del anexo 2 se han elaborado las siguientes tablas de pérdidas y eficiencia:

ensayo	Lado Motor								
	Tensión (V)	Corriente ppal (A)	Potencia entrante (W)	Corriente shunt (A)	Perdidas motor (W)	I sus. (A)	I ad. (A)	Perdidas AFR (W)	Perdidas mec. (W)
plena carga	2.000	98	196.000	0,54	58.569	12	2,9	539,7	9.041
	2.500	68	170.000	0,715	28.791	8	2	240,9	9.041
	3.000	55	165.000	0,885	19.550	3,4	0,9	43,9	9.041
	3.600	45,5	163.800	1,08	14.385	1,1	3,8	60,6	9.041
2/3 de carga	2.000	58	116.000	0,58	20.889	8,2	2	252,3	9.041
	2.500	44,5	111.250	0,75	12.878	5,1	1,3	98,1	9.041
	3.000	36,5	109.500	0,9	9.352	0,3	0,1	0,4	9.041
	3.600	31	111.600	1,125	7.833	2,1	7,3	223,4	9.041
1/3 de carga	2.000	28,5	57.000	0,6	5.488	5,2	1,3	101,8	9.041
	2.500	22	55.000	0,77	3.874	2,4	0,65	21,9	9.041
	3.000	19	57.000	0,92	3.534	0,4	1,3	7,2	9.041
	3.600	16	57.600	1,12	3.550	2,5	9	337,9	9.041
sobre carga	2.000	111	222.000	0,525	74.982	13	3,1	632,4	9.041
	2.500	75	187.500	0,715	34.847	8,5	2,1	271,5	9.041
	3.000	60	180.000	0,88	23.015	4,1	1,1	63,9	9.041
	3.600	49	176.400	1,09	16.421	1,1	3,9	63,6	9.041

Tabla 17: Pérdidas y eficiencia

Lado generador					
Corriente de línea(A)	Perdidas gen. (W)	Corriente excit.(A)	Perdidas AVR (W)	Perdidas tot.(W)	Eficiencia GMA (%)
243	3.543	18,8	1.887	73.580	62,5
243	3.543	18,7	1.867	43.483	74,4
243	3.543	18,6	1.847	34.026	79,4
243	3.543	18,2	1.769	28.799	82,4
160	1.536	14,3	1.092	32.810	71,7
160	1.536	14,2	1.077	24.630	77,9
160	1.536	14	1.047	20.976	80,8
160	1.536	13,5	973	19.606	82,4
80	384	10,2	556	15.571	72,7
80	384	10	534	13.855	74,8
80	384	9,7	502	13.469	76,4
80	384	9,5	482	13.794	76,1
268	4.309	20,2	2.179	91.143	58,9
268	4.309	20	2.136	50.605	73
268	4.309	19,8	2.093	38.523	78,6
268	4.309	19,5	2.031	31.866	81,9

Tabla 18: Pérdidas y eficiencia, continuación

Las mayores eficiencias se dan en los ensayos a 3.600 V, concretamente en el ensayo de plena carga y 2/3 la eficiencia es 82,4 %. Las menores eficiencias se dan en los ensayos de 2.000 V, concretamente en el ensayo de sobrecarga la eficiencia es de 58,9 %.

Cuanto menor es la tensión de entrada, mayor deberá ser la corriente principal del motor, y en consecuencia mayores las pérdidas por efecto Joule. Por este motivo la eficiencia es menor a bajas tensiones.

5.4 CÁLCULO DE MAGNITUDES

Con los conceptos desarrollados en este capítulo se va a proponer un método para calcular las principales magnitudes de funcionamiento del GMA a partir de unas ciertas entradas. Después se van a comparar los valores calculados con los reales. Se ha escogido el ensayo de 2/3 de carga a 2.500 V como ejemplo. Las entradas son:

- Tensión en el motor $U=2.500$ V
- Potencia demandada por la carga $P_{\text{demand}} = 89.500$ W
- Factor de potencia de la carga $\text{fp}=0,85$

Lado generador

En la práctica, por intervención del AFR, la velocidad de giro siempre ronda muy cercana 157,08 rad/seg, por este motivo para los cálculos del generador podemos presuponer que la frecuencia es 50 Hz.

La potencia demandada por la carga será igual a la suma de la potencia generada más las pérdidas en el generador:

$$P_{\text{gen}} = P_{e_{\text{gen}}} + P_{\text{saliente}} \rightarrow \sqrt{3} \cdot E_L \cdot I_L \cdot 0,85 = I_L^2 \cdot 0,06 + P_{\text{demad}} \quad (5.74)$$

Como se vio en el apartado 5.2.2 la f.e.m. en el generador se mantiene en 390 V:

$$574,17 \cdot I_L = I_L^2 \cdot 0,06 + 89.500 \quad (5.75)$$

De (5.75) es posible despejar la corriente de línea:

$$I_L = \frac{574,17 - \sqrt{(574,17)^2 - 4 \cdot 0,06 \cdot 89.500}}{2 \cdot 0,06} = 158,5 \text{ A} \quad (5.76)$$

Puede calcularse la tensión en bornes de línea U_L aplicando la ecuación (5.59):

$$U_L = 390 - I_L \cdot 0,09 \cdot \cos(67,4 - \arccos(0,85)) = 378,4 \text{ V} \quad (5.77)$$

Comparando la tensión obtenida con la real:

U calculada (V)	U real (V)	Error(%)
378,4	380	0,42

Tabla 19: Tensión en bornes obtenida vs real

Conociendo la tensión en bornes puede calcularse la corriente de excitación aplicada por el AVR a partir de la ecuación (5.51):

$$I_e = -0,623 \cdot U_L + 249,8 \text{ (A)} = -0,623 \cdot 378,4 + 249,8 = 14 \text{ A} \quad (5.78)$$

Comparando la corriente de excitación obtenida con la real:

le calculada (A)	le real (A)	Error(%)
14	14,2	1,41

Tabla 20: Corriente de excitación calculada vs real

Las pérdidas en el generador y en el AVR pueden calcularse con las ecuaciones (5.63) y (5.64) respectivamente:

$$Pe_{gen} + Pe_{AVR} = I_L^2 \cdot 0,06 + I_e^2 \cdot 5,34 = 2.600 W \quad (5.79)$$

Sistema mecánico

En el apartado 5.3.5 se vio que se pueden estimar las pérdidas mecánicas en $Pe_{mec} = 9.041 W$.

Lado motor

La potencia eléctrica que suministrará el motor será la suma de la potencia demandada más las pérdidas en el generador más las pérdidas mecánicas:

$$P_m = P_{demand} + Pe_{gen} + Pe_{AVR} + Pe_{mec} = 89.500 + 2.600 + 9.041 = 101.141 W \quad (5.80)$$

Conociendo la potencia del motor y la tensión de entrada podemos calcular la f.e.m. (E) a partir de la ecuación (5.24):

$$E = \frac{U/R_s + \sqrt{(U/R_s)^2 - 4 \cdot P_{motor} \cdot (\frac{1}{R_s} + \frac{1}{4 \cdot R_{sh}})}}{2 \cdot (\frac{1}{R_s} + \frac{1}{4 \cdot R_{sh}})} = 2.225 V \quad (5.81)$$

Con las ecuaciones (5.13) y (5.14) puede calcularse la corriente del motor y la corriente en el devanado shunt:

$$I = \frac{U - E}{R_s} = \frac{2.500 - 2.225}{6,05} = 45,4 A \quad (5.82)$$

$$I_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{sl} - R_s/2)}{R_{sh}} = \frac{2.500/2 - 45,4 \cdot (4,8 - 6,05/2)}{1.595} = 0,73 A \quad (5.83)$$

Comparando los valor obtenidos con los reales:

	I calculada (A)	I real (A)	Error(%)
I principal	45,4	44,5	2,02
I shunt	0,73	0,75	2,67

Tabla 21: Corrientes en motor calculadas vs reales

La siguiente tabla recoge los resultados de aplicar este mismo proceso de cálculo a todos los ensayos del anexo 2:

Ensayo	Pot. Demand. (W)	factor de potencia (%)	Corriente exc. Calcada (A)	Corriente exc. Real (A)	Error (%)	Tensión en bornes calculada (V)	Tensión en bornes real (V)	Error (%)	Perdidas gen+P AVR (W)	P mec (W)
vacío	0	0,85	6,8	6,6	3,48	390	391,2	0,31	249	9.041
	0	0,85	6,8	6,5	5,08	390	391,2	0,31	249	9.041
	0	0,85	6,8	6,3	8,41	390	390	0	249	9.041
	0	0,85	6,8	6,2	10,16	390	390	0	249	9.041
1/3 de carga	45.369	0,85	10,3	10,2	1,16	384,4	386	0,41	950	9.041
	45.369	0,85	10,3	10	3,19	384,4	385,2	0,21	950	9.041
	45.369	0,85	10,3	9,7	6,38	384,4	385,2	0,21	950	9.041
	45.369	0,85	10,3	9,5	8,62	384,4	385,2	0,21	950	9.041
2/3 de carga	89.500	0,85	14,1	14,3	1,7	378,4	380	0,42	2.563	9.041
	89.500	0,85	14,1	14,2	1,01	378,4	380	0,42	2.563	9.041
	89.500	0,85	14,1	14	0,41	378,4	380,8	0,63	2.563	9.041
	89.500	0,85	14,1	13,5	4,12	378,4	382	0,94	2.563	9.041
plena carga	133.085	0,85	17,4	18,8	7,3	373	370	0,81	5.012	9.041
	133.085	0,85	17,4	18,7	6,81	373	371,2	0,48	5.012	9.041
	133.085	0,85	17,4	18,6	6,31	373	372	0,27	5.012	9.041
	133.085	0,85	17,4	18,2	4,25	373	374	0,27	5.012	9.041
sobre carga	145.001	0,85	18,5	20,2	8,33	371,2	366	1,43	5.874	9.041
	145.001	0,85	18,5	20	7,41	371,2	366	1,43	5.874	9.041
	145.001	0,85	18,5	19,8	6,48	371,2	368	0,88	5.874	9.041
	145.001	0,85	18,5	19,5	5,04	371,2	370	0,34	5.874	9.041

Tabla 22: Cálculo de magnitudes, lado generador

Tensión de entrada (V)	F.E.M. (V)	Corriente principal calculada (A)	Corriente principal real (A)	Error (%)	Corriente shunt calc. (A)	Corriente shunt real (A)	Error (%)
2.000	1.970	4,9	4,5	9,6	0,62	0,630	1,4
2.500	2.476	4	4	0,7	0,78	0,775	0,5
3.000	2.979	3,4	4	13,8	0,94	0,935	0,2
3.600	3.582	3	4	25,2	1,13	1,120	0,5
2.000	1.814	30,7	28,5	7,8	0,59	0,600	1,2
2.500	2.356	23,8	22	8	0,76	0,770	1,7
3.000	2.882	19,5	19	2,8	0,92	0,920	0,1
3.600	3.502	16,2	16	1,2	1,11	1,120	0,8
2.000	1.622	62,5	58	7,8	0,56	0,580	3,9
2.500	2.225	45,5	44,5	2,1	0,73	0,750	2,3
3.000	2.778	36,7	36,5	0,6	0,9	0,900	0
3.600	3.419	30	31	3,4	1,1	1,125	2,6
2.000	1.330	110,8	98	13,1	0,5	0,540	6,7
2.500	2.068	71,4	68	5	0,7	0,715	1,5
3.000	2.664	55,5	55	1	0,88	0,885	0,7
3.600	3.330	44,5	45,5	2,1	1,08	1,080	0,1
2.000	1.178	135,9	111	22,4	0,48	0,525	9,4
2.500	2.020	79,4	75	5,9	0,7	0,715	2,8
3.000	2.630	61,1	60	1,8	0,87	0,880	0,9
3.600	3.305	48,8	49	0,5	1,07	1,090	1,4

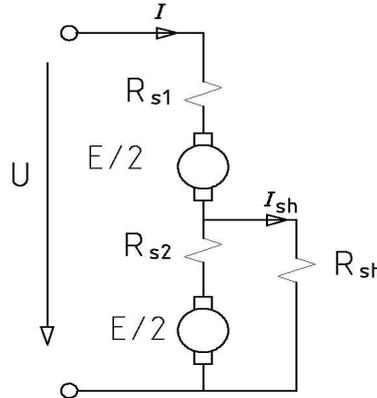
Tabla 23: Cálculo de magnitudes, lado motor

5.5 RESULTADOS

En este apartado se exponen los esquemas, las ecuaciones y las conclusiones del capítulo a modo de resumen:

LADO MOTOR

Esquema motor:



Resistencias a temperatura de funcionamiento:

$$R_s=6,05 \Omega \quad R_{s1}=4,80 \Omega \quad R_{s2}=1,25 \Omega \quad R_{sh}=1.595 \Omega$$

Ecuación de la fuerza electromotriz: $E=K \cdot \phi \cdot W$ (V)

Ecuación de la corriente principal: $I=\frac{U-E}{R_s}$ (A)

Ecuación de la corriente en el devanado shunt: $I_{sh}=\frac{U/2-I \cdot (R_{s1}-R_s/2)}{R_{sh}}$ (A)

Ecuación par mecánico: $T=K \cdot \phi \cdot I - \frac{I_{sh}}{2} \cdot k \cdot \phi$ (Nm)

Ecuación potencia motor:

- En función de la corriente: $P_{motor}=(U-I \cdot R_s) \cdot I - \frac{(U-I \cdot R_s) \cdot U}{4 \cdot R_{sh}}$ (W)
- En función de la f.e.m.: $P_{motor}=\frac{U-E}{R_s} \cdot E - \frac{E \cdot U}{4 \cdot R_{sh}}$ (W)

Ecuaciones de la curva de saturación del flujo:

$0 < NI < 2.686$ A vuelta	$k \cdot \phi = 4,759 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I)$	(Nm/A)
$2.686 < NI < 3.579$ A vuelta	$k \cdot \phi = 3,454 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 3,506$	(Nm/A)
$3.579 < NI < 4932$ A vuelta	$k \cdot \phi = 2,085 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 8,406$	(Nm/A)
$4.932 < NI < 7.064$ A vuelta	$k \cdot \phi = 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot \sum (N \cdot I) + 11,19$	(Nm/A)

F.M.M. aportada por el motor: $(N \cdot I)_{motor} = 1,45 \cdot U + 5,85 \cdot I$ (A vuelta)

Ecuación par velocidad sin regulación:

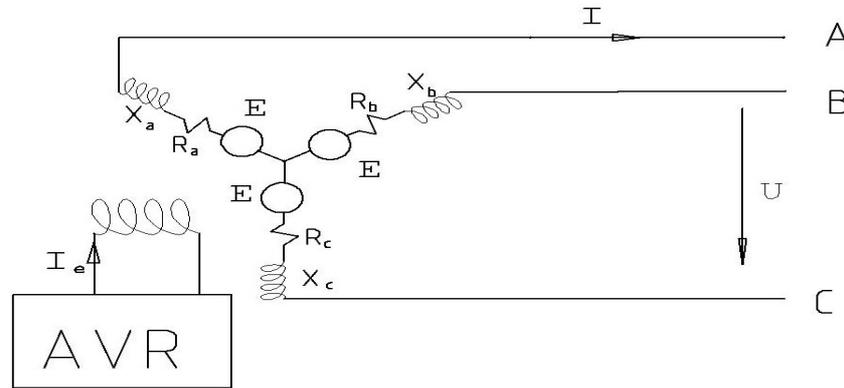
$$\omega = \frac{U}{(3,023 \cdot 10^{-3} \cdot U + 9,1)} - \frac{6,05}{(3,023 \cdot 10^{-3} \cdot U + 9,1)^2} \cdot T \quad (\text{rad/seg})$$

Curva de funcionamiento del AFR:

$\omega > 158,57 \text{ rad/seg}$	$(N \cdot I)_{AFR} = 384,14 \cdot \omega - 60.912,7$ (A vuelta)
$153,54 > \omega > 158,57 \text{ rad/seg}$	$(N \cdot I)_{AFR} = 0$ (A vuelta)
$\omega < 153,54 \text{ rad/seg}$	$(N \cdot I)_{AFR} = 345,79 \cdot \omega - 53.093$ (A vuelta)

LADO GENERADOR

Esquema generador:



F.e.m.: $E_L = 390 \text{ V}$

Corriente de excitación aplicada por el AVR en función de la tensión de línea:

$$I_e = -0,623 \cdot U_L + 249,8 \text{ (A)}$$

F.m.m. total: $F_T = |\bar{F}_e + \bar{F}_r| = 6,3 \text{ A}$

F.m.m. de reacción de inducido: $F_r = 0,06 \cdot I_L \text{ (A)}$

Resistencia serie: $R_{sg} = 0,02 \Omega$

Inductancia serie: $R_{sg} = 0,048 \Omega$

Impedancia serie / ángulo de impedancia: $Z_{sg} = 0,052 \Omega \quad \alpha = 67,4^\circ$

Tensión en los bornes: $U_L = 390 - I_L \cdot 0,09 \cdot \cos(67,4 - \text{acos}(fp)) \text{ (V)}$

LAS PÉRDIDAS Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Perdidas en el motor: $Pe_{mot} = I^2 \cdot 6,05 + I_{sh}^2 \cdot 1,595$ (W)

Perdidas en el AFR: $Pe_{AFR} = I_{ss}^2 \cdot 3,52 + I_{ad}^2 \cdot 3,9$ (W)

Perdidas en el generador: $Pe_{gen} = I_L^2 \cdot 0,06$ (W)

Perdidas en el AVR: $Pe_{AVR} = I_e^2 \cdot 5,34$ (W)

Perdidas mecánicas a 50 Hz: $Pe_{mec} = 9,041$ W (W)

Eficiencia energética del GMA:

$$\eta = 1 - \frac{(I^2 \cdot 6,05 + I_{sh}^2 \cdot 1,595) + (I_{ss}^2 \cdot 3,52 + I_{ad}^2 \cdot 3,9) + I_L^2 \cdot 0,06 + I_e^2 \cdot 5,34 + 9,041}{U \cdot I}$$

Eficiencia nominal (ensayo de plena carga a 3.000V): **79,4 %**

Máxima eficiencia (ensayo de plena carga a 3.600 V): **82,4 %**

Mínima eficiencia (ensayo de sobrecarga a 2.000 V): **58,9 %**

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE AVERÍAS Y PROPUESTA DE SOLUCIONES

El objetivo de este capítulo es definir las averías que sufre el GMA *MG 138A-F*, hacer un análisis de las más importantes y proponer soluciones para reducir el impacto económico de estas.

6.1 PROCESO DE REPARACIÓN

Las reparaciones del GMA *MG 138A-F* se realizan en *La Base de Mantenimiento Integral de Madrid-Villaverde*, aunque en adelante se hará referencia a ella como “la base *INTEGRIA*”. En este apartado se va a explicar el proceso de reparación.

Es necesario distinguir entre dos tipos de reparaciones:

- **Reparaciones de preventivo.** Se hacen aunque el grupo no halla fallado para prevenir averías. Incluyen:
 - Torneado, ranurado de colectores.
 - Equilibrado del rotor.
 - Sustitución de escobillas.
 - Engrase de rodamientos.
- **Reparaciones de correctivo.** Se hacen cuando el grupo tiene alguna avería. En este caso se hacen las operaciones que procedan para corregir el fallo, generalmente se procede a sustituir el elemento dañado.

Durante el proceso de reparación el personal debe rellenar una serie de documentos. Estas son las fases en una reparación con sus documentos correspondientes:

1. **Peritación:** Puede hacerse en cualquier taller. En la peritación se decide si el grupo ha de ser enviado a reparar a Villaverde, es decir, si tiene alguna avería o si le toca la reparación preventiva. Su documento correspondiente es el “Informe de peritación”.
2. **Transporte:** Se extrae el GMA de la locomotora y se transporta desde el punto en que se encuentre hasta el taller de Villaverde (sin documento).
3. **Desmontaje:** El grupo llega al taller y se desmonta, es decir, se extrae el rotor del interior de la carcasa (sin documento).
4. **Reparación de carcasa:** Se procede a la reparación del estator y de la carcasa y se rellena la “Ficha de reparación de carcasa”.
5. **Reparación de inducido:** Se procede a la reparación del rotor y colectores y se rellena la “Ficha de reparación de inducido”.

6. **Montaje del grupo:** Se acoplan rotor y carcasa (sin documento).
7. **Ensayo de rodamientos:** Se hace rodar el grupo a 1.500 revoluciones, se mide la temperatura de los rodamientos y se rellena el documento “Ficha de ensayo de rodamientos”.
8. **Salida del grupo:** Se hacen las comprobaciones finales y se rellena el documento “Ficha de inspección del *MG 138A-F*”.

Tras la reparación los documentos se guardan en un registro, el registro incluye reparaciones hechas a 168 grupos desde Enero del año 2.000 hasta Marzo del 2010. Gracias a este registro se ha podido realizar este trabajo.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE AVERÍAS

El primer paso es identificar las averías que sufre el GMA *MG 138A-F*. Para ello se ha analizado los informes de peritación de 33 grupos escogidos al azar. En el anexo 3 se expone el resultado de la búsqueda, con el número de grupo, la fecha de peritación y la avería detectada. Aunque hay 4 sistemas de enumeración por cuestiones internas, el GMA es el mismo modelo en todos los casos, el *MG 138A-F*.

En la siguiente tabla se expone una lista de las averías encontradas, en total 12:

AVERÍAS
Cortocircuito entre espiras en el devanado shunt
Flasheado
Rodamientos defectuosos
Estator derivado
Colectores desgastados
Inducido derivado
Anillos desgastados
Inducido quemado
Derivación en cable
Campo alternador quemado
Polo auxiliar derivado
Portaescobillas derivado

Tabla 24: Averías del GMA

Se ha realizado una pequeña investigación en taller sobre la naturaleza, las consecuencias y el procedimiento de reparación de estas averías. El documento [14] también ha sido de ayuda en esta investigación.

COLECTORES DESGASTADOS

Definición:

Cuando gira el motor los colectores entran en fricción con las escobillas, esta fricción va desgastando el colector. El colector está compuesto de dos materiales: aleación de cobre-plata (material conductor) y mica (material aislante). La mica se desgasta más despacio que la aleación creando irregularidades en el colector (ref.

[14]).

Consecuencias:

Desgaste acelerado de las escobillas. Puede producir flasheado.

Procedimiento:

Torneado y rectificado del colector. Se elimina una capa de colector más externa y se le devuelve la forma uniforme.

ANILLOS DESGASTADOS

Definición:

El anillo del lado del generador también se desgasta con el rozamiento de las escobillas, sin embargo está compuesto de un solo material y no presenta los problemas del colector.

Consecuencias:

Mal contacto eléctrico.

Procedimiento:

Sustitución del anillo.

CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS DEL DEVANADO SHUNT

Definición:

El aislamiento entre espiras pierde sus propiedades aislantes y se produce una conexión eléctrica entre espiras colindantes.

Consecuencias:

La resistencia total del devanado disminuye por lo que circulará más intensidad y la máquina se calienta más de lo normal (ref. [14]).

Procedimiento:

Sustitución de los devanados inductores (shunt, aditivo, sustractivo y serie). Los cuatro devanados vienen en el mismo bloque así que la sustitución de un devanado conlleva la sustitución de todos.

INDUCIDO DERIVADO (y resto de derivaciones)

Definición:

El aislamiento entre el cobre de los devanados y el núcleo magnético está deteriorado y se producen fugas de corriente a la chapa magnética.

Consecuencias:

Elevación de la tensión en la carcasa y resto de elementos no eléctricos suponiendo un peligro para las personas.

Procedimiento:

Sustitución del devanado, rebobinado.

FLASHEADO

Descripción:

Se produce un arco eléctrico entre el colector y las escobillas, normalmente debido a una sobrevelocidad o sobrecarga (ref. [14]).

Consecuencias:

Derivaciones a tierra y aparición de superficies quemadas por el arco eléctrico.

Procedimiento:

Eliminar la causa de la sobrevelocidad o sobrecarga.
Limpiar las superficies ennegrecidas, y sustituir los elementos dañados.

RODAMIENTOS DEFECTUOSOS

Definición:

Con el paso del tiempo los rodamientos se van desgastando debido a la fricción.

Consecuencias:

Vibraciones excesivas.
Sonido discontinuo.

Procedimiento:

Sustitución de rodamientos.

INDUCIDO QUEMADO

Definición:

Se trata de un cortocircuito entre espiras en el devanado inducido.

Consecuencias:

Sobreintensidades en el motor. Puede producir flasheado (ref. [14]).

Procedimiento:

Sustitución del devanado, rebobinado.

Para clasificar las averías en orden de importancia se ha hecho una ordenación por frecuencia de aparición:

AVERÍAS	Nº
Cortocircuito entre espiras en el devanado shunt	22
Flasheado	9
Rodamientos defectuosos	5
Inducido derivado	3
Colectores desgastados	3
Derivación en cable	2
Anillos desgastados	2
Inducido quemado	1
Estator derivado	1
Campo alternador quemado	1
Polo auxiliar derivado	1
Portaescobillas derivado	1

Tabla 25: Averías ordenadas por repeticiones

El siguiente diagrama muestra el porcentaje que le corresponde a cada avería:

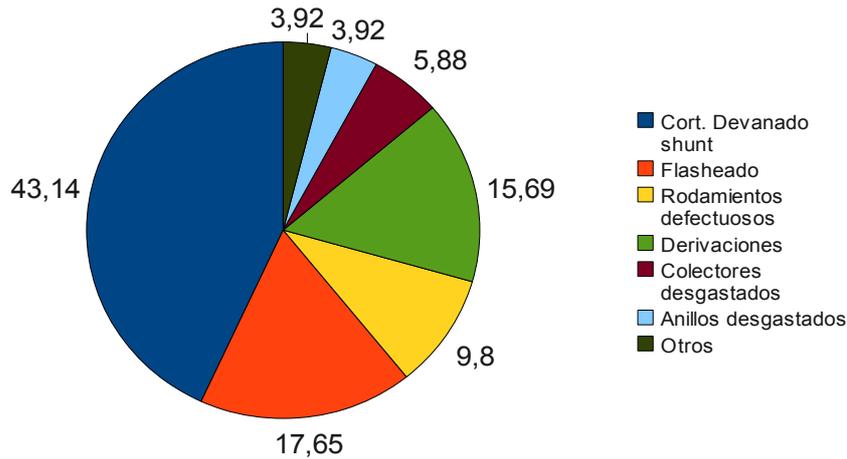


Figura 65: Averías (%)

Como puede verse un porcentaje muy alto lo abarca una sola avería, *el cortocircuito entre espiras en el devanado shunt* con un 43,14 %. Con toda probabilidad esta es la avería que genera más costes. En este trabajo se va a centrar el estudio en *el cortocircuito entre espiras en el devanado shunt*, se va a tratar de comprender la naturaleza de la avería y sus causas con el objetivo de encontrar soluciones que reduzcan la frecuencia con la que se repite.

6.3 CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS EN EL DEVANADO SHUNT

El objetivo de este apartado es estudiar el cortocircuito entre espiras del devanado shunt, averiguar las causas y proponer soluciones. Antes de comenzar a estudiar la avería, conviene conocer las características de funcionamiento y constructivas de un devanado shunt.

6.3.1 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DEVANADO SHUNT

El devanado shunt va montado sobre los polos principales del estator y podría decirse que es el devanado estático más importante ya que crea el grueso del flujo magnético. La siguiente figura recuerda como va conexasiónado el devanado shunt en el grupo, en paralelo a uno de los colectores:

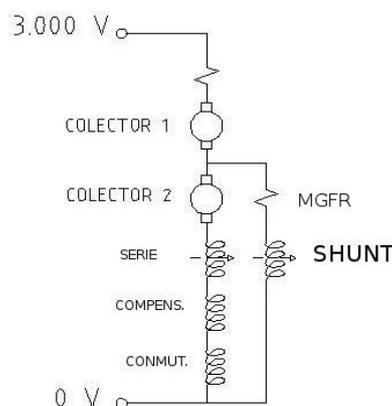


Figura 66: Conexión shunt

En el capítulo 5 se llamó R_{sh} a la suma de la resistencia del cobre (que en adelante se hará referencia a ella como R_{cobre}) más la resistencia del potenciómetro MGFR conectado en serie.

$$R_{sh} = R_{cobre} + MGFR \quad (6.1)$$

[8] establece que la resistencia del cobre a 20 °C del devanado shunt es de 812 Ω y se fija el valor del potenciómetro MGFR en 575 Ω , valor que aún en la actualidad sigue vigente.

Las características de funcionamiento del devanado shunt son:

- Debe crear una fuerza magnetomotriz de unos $2.313 \cdot \frac{U}{R_{sh}} = 4.350 \text{ A vuelta}$ (ver ecuación (5.37)) para el correcto funcionamiento del grupo.
- Se conecta a una tensión de $\frac{R_{sh} - MGFR}{R_{sh}} \cdot U / 2 = 960 \text{ V}$ de corriente continua. Una tensión muy elevada teniendo en cuenta que la asumirá entera la resistencia del cobre.
- Debe evacuar un calor de unos $\frac{960^2}{R_{sh} - MGFR} = 903 \text{ W}$.

Para los cálculos situados arriba se ha utilizado la tensión nominal del motor ($U=3.000 \text{ V}$) y R_{sh} a temperatura de funcionamiento (1.595 Ω) calculada en el apartado 5.1.6.

6.3.2 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS DEL DEVANADO SHUNT

Para satisfacer los requisitos de funcionamiento del apartado anterior el devanado shunt tiene las siguientes características constructivas:

- Esta construido con hilo de cobre muy fino (0,7 mm de diámetro) para que la resistencia sea elevada y así minimizar la intensidad y las pérdidas.
- Tiene un número de espiras muy elevado (4.635 vueltas) para crear un fuerte flujo con poca intensidad.

Lleva dos tipos de aislamiento: el aislamiento a tierra y el aislamiento entre espiras. El aislamiento a tierra rodea la bobina y se compone de KAPTON. El aislamiento entre espiras consiste en un esmaltado de poliéster.

El devanado shunt esta formado por cuatro bobinas, una por cada polo principal. Cada bobina no es un bloque independiente sino que forma parte de un conjunto con el resto de bobinas inductoras. Recuérdese que hay cuatro devanados inductores: el shunt, el aditivo, el sustractivo y el serie; cada uno con cuatro bobinas.

Un conjunto como el de la imagen contiene una bobina shunt, una aditiva, una sustractiva y una serie.



Figura 67: Conjunto de bobinas inductoras.

A partir de la información del documento [8] se ha construido un plano del conjunto, que se adjunta en el anexo 4.

La distribución de las espiras dentro de la bobina viene limitado por el proceso de fabricación de una bobina. Cuando se construye una bobina se intenta que la diferencia de tensión sea la mínima entre espiras contiguas (ref. [15]), de esta manera el aislamiento entre espiras puede ser más fino y el cortocircuito entre espiras, si se produce, es menos grave.

El siguiente apartado describe como se construye una bobina.

6.3.2.1 PROCESO DE BOBINADO

El hilo de cobre, ya recubierto de aislante, se enrolla sobre un molde. Una vez completadas todas las vueltas se fija y se retira el molde. [15] describe así la manera de bobinar un devanado estático:

Una vez montado el carrete con hilo esmaltado adecuado,...., cuidadosamente se van poniendo capas sin que haya hilos cruzados,....

Por ejemplo, en la primera capa empieza abajo y se sube colocando una espira encima de otra. Para que no haya hilos cruzados la segunda capa empieza arriba y termina abajo. Así sucesivamente se van colocando más capas.

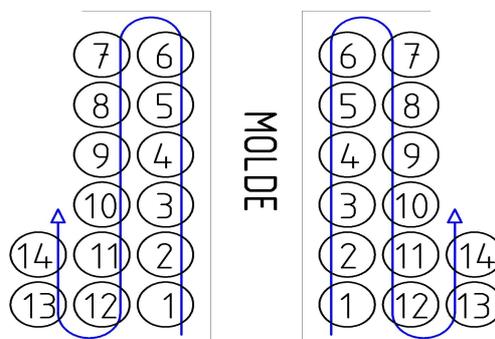


Figura 68: Proceso de bobinado

Como puede verse, bobinando de esta manera no hay hilos cruzados. La figura 68 muestra cuales serían los hilos contiguos en un corte transversal. Como se verá más adelante, la manera en la que se produce el cortocircuito está relacionada con la forma en que se construye la bobina.

6.3.3 DEFINICIÓN DE LA AVERÍA

Un cortocircuito entre espiras significa que el aislamiento entre dos o más espiras ha perdido sus propiedades aislantes y se crea una pequeña corriente que salta de una espira a otra.

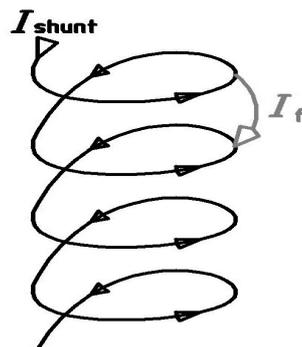


Figura 69: Cortocircuito entre espiras

Tras el primer fallo del aislante, la zona afectada se empieza a calentar y el cortocircuito se propaga a sus alrededores (ref. [16]).

El resultado inmediato es una disminución en el número de vueltas efectivas y de la resistencia del cobre, y por lo tanto, un aumento en la corriente del devanado.

Como el número de vueltas disminuye y la corriente aumenta, la fuerza magnetomotriz ($F=I \cdot N$) no se ve afectada y el motor funciona entonces con normalidad, por esta razón la avería no se detecta durante la marcha. Sin embargo el aumento de la corriente se traduce en un incremento de las pérdidas por efecto Joule y de la temperatura de funcionamiento.

Al proceso por el cual un aislante pierde sus propiedades y falla se le conoce como **envejecimiento**.

6.3.3.1 ENVEJECIMIENTO DEL AISLANTE

Un aislante envejece cuando está sometido a un cierto estrés de funcionamiento. [16] establece cinco tipos diferentes de estrés:

- **Estrés térmico.** Un aislamiento sufre estrés térmico sencillamente por trabajar por encima de una determinada temperatura.
- **Estrés eléctrico.** El aislamiento soporta grandes campos eléctricos y se crean minúsculas corrientes de fuga que deterioran el aislante.

- **Estrés ambiental.** Tales como humedad, impurezas o posibles reacciones químicas.
- **Estrés mecánico.** Debido a fuerzas centrífugas, magnéticas y vibraciones.
- **Estrés múltiple.** La combinación entre dos o más tipos de estrés.

Uno de los objetivos de este estudio es averiguar que tipo de estrés causa el fallo.

6.3.4 ANÁLISIS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA BOBINA AVERIADA

Se ha hecho un corte transversal con radial a una bobina shunt averiada para estudiar las zonas dañadas y averiguar las causas del cortocircuito. Las siguientes fotografías muestran la bobina cortada:

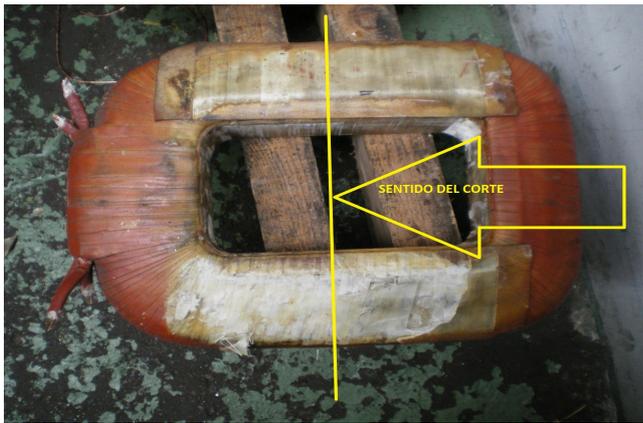


Figura 70: Corte transversal

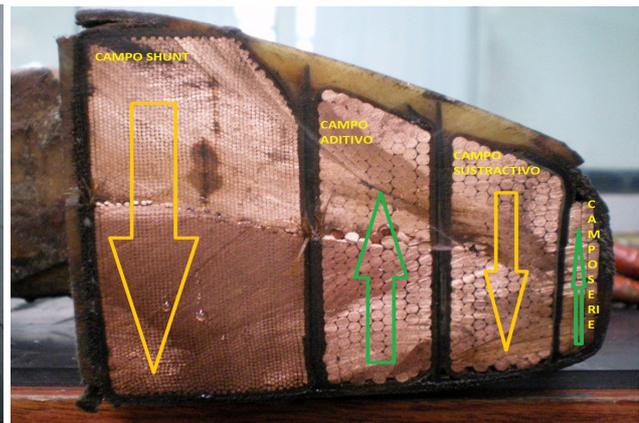


Figura 71: Corte transversal (2)

Pueden verse las cuatro bobinas: shunt, aditiva, sustractiva y serie. En la siguiente imagen se amplía el devanado shunt:

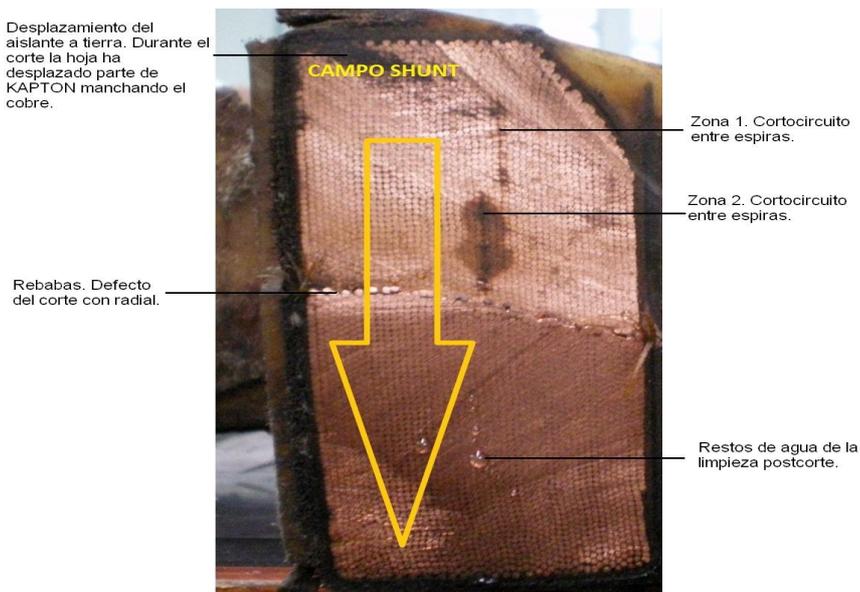


Figura 72: Corte transversal (3)

Pueden verse dos zonas de cortocircuito:

ZONA 1

La zona 1 es una mancha recta entre los hilos de cobre, es decir en el aislante. Esta mancha indica un deterioro del aislante y por lo tanto un cortocircuito entre espiras.



Figura 73: Zona 1

El cortocircuito forma una línea recta entre dos capas de cobre. Para explicar este fenómeno se va a recurrir al ejemplo de la figura 68. Si a la bobina de la figura 68 se le aplica una tensión de 14 V entre la espira 1 y la 14, la tensión caerá uniformemente así:

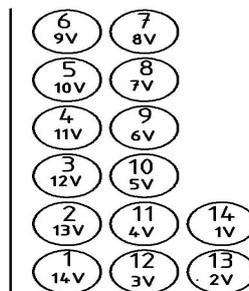


Figura 74: Caída de tensión en la bobina

Dos espiras contiguas de la misma capa tienen una caída de tensión de 1 voltio, por lo tanto el campo eléctrico que aguanta el aislante será pequeño. Sin embargo la mayor diferencia de tensión se encuentra entre dos capas, concretamente entre la espira 1 y la 12 hay una diferencia de 11 V.

A mayor diferencia de tensión mayor es el campo eléctrico que soporta el aislante. [16] afirma que en la presencia de campo eléctrico se producen minúsculas corrientes de fuga, estas corrientes de fuga van envejeciendo al aislante hasta que falla, lo que se conoce como **estrés eléctrico**.

El estrés eléctrico puede explicarse porque el cortocircuito se produce entre dos capas, sin embargo, estrictamente debería producirse en un lateral (en la figura 74 entre la espira 1 y la 12).

ZONA 2

La zona 2, al igual que la zona 1, es una línea oscura entre dos capas de hilo de cobre, lo que indica también un cortocircuito entre espiras por estrés eléctrico. Pero se diferencia en dos cosas:

- La línea está mucho más ennegrecida, el aislante está más dañado que en la zona 1.

- Alrededor de la línea de cortocircuito hay una mancha ovalada, en esta zona el cobre presenta un color más oscuro.



Figura 75: Zona 2

Estos signos indican que el cortocircuito de la zona 2 está más avanzado que el de la zona 1.

La zona 2 se encuentra cerca del centro geométrico de la bobina. El flujo de calor crea un perfil de temperaturas en la bobina, y el punto de mayor temperatura será el centro. Luego la zona 2 se encuentra en el lugar que aguanta mayores temperaturas.

Existen entonces dos características que ayudan a definir las causas del fallo:

- El cortocircuito se encuentra entre dos capas de hilo de cobre. Esto quiere decir que ha habido estrés eléctrico.
- El cortocircuito se encuentra cerca del centro geométrico de la bobina, donde la temperatura es mayor, luego el estrés térmico también ha contribuido al fallo.

Haciendo referencia al apartado 6.3.3.1 puede decirse que se trata de **estrés múltiple**, una combinación entre **estrés térmico** y **estrés eléctrico**.

Según [16] los modelos actuales para predecir la vida de un aislante bajo estrés múltiple tienden a ser complejos y, a día de hoy, poco prácticos. Por este motivo, y porque el estrés eléctrico no se puede corregir sin cambiar el diseño de la bobina, se va a tratar exclusivamente el estrés térmico, o lo que es lo mismo, se va a tratar la temperatura de funcionamiento.

6.3.5 LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO

En este apartado se definen las ecuaciones relacionadas con la temperatura de funcionamiento. Durante el funcionamiento el devanado shunt genera un calor y eleva su temperatura. La temperatura interna del devanado subirá proporcional al calor generado según la ecuación:

$$\Delta T = R_{\text{TERMICA}} \cdot Q \quad (6.2) \text{ (ref. [21])}$$

Donde Q es el calor generado, ΔT es el incremento de temperatura respecto la temperatura ambiente y R_{TERMICA} es la resistencia térmica.

Para estudiar como varía la temperatura con el calor generado se ha utilizado el ensayo de plena carga del anexo 2 y la ecuación (5.14):

$$R_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{sl} - R_s/2)}{I_{sh}} = \frac{U/2 - 1,775 \cdot I}{I_{sh}} \quad (6.3)$$

Tensión (V)	Corriente (A)	Ishunt (A)	R shunt (Ω)
2.000	98	0,540	1.529,7
2.500	68	0,715	1.579,4
3.000	55	0,885	1.584,6
3.600	45,5	1,080	1.591,9

Tabla 26: Rsh en el ensayo de plena carga

La resistencia del cobre es la resistencia shunt menos la resistencia del potenciómetro MGFR según la ecuación (6.1):

$$R_{cobre} = R_{sh} - MGFR = R_{sh} - 575 \quad (6.4)$$

R shunt (Ω)	Rcobre (Ω)
1.529,7	954,7
1.579,4	1.004,4
1.584,6	1.009,6
1.591,9	1.016,9

Tabla 27: Rcobre en el ensayo de plena carga

La siguiente ecuación representa la variación de la resistencia con la temperatura (ref. [17]):

$$R_{cobre} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (T - 20)) \quad (6.5)$$

Donde α_{20} es el coeficiente de temperatura del cobre, que tiene un valor de $0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (ref. [17]). Luego es posible conocer la temperatura del cobre a partir de su resistencia siempre que se conozca la resistencia a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$, que en el caso del devanado shunt es $812 \text{ } \Omega$.

$$T = \frac{R_{cobre} / R_{20} - 1}{\alpha_{20}} + 20 \quad (6.6)$$

Rcobre (Ω)	T (°C)
954,7	64,7
1.004,4	80,3
1.009,6	81,9
1.016,9	84,2

Tabla 28: Temperatura del cobre

Como vemos la temperatura de funcionamiento oscila entre los $64,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ y los $84,2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Por otro lado el calor generado será igual a las pérdidas por efecto Joule:

$$Q = I_{shunt}^2 \cdot R_{cobre} \quad (6.7)$$

Ishunt (A)	Rcobre (Ω)	Q(W)
0,540	954,7	278,4
0,715	1.004,4	513,5
0,885	1.009,6	790,7
1,080	1.016,9	1.186,1

Tabla 29: Calor en el ensayo de plena carga

La siguiente gráfica representa la temperatura en función del calor generado:

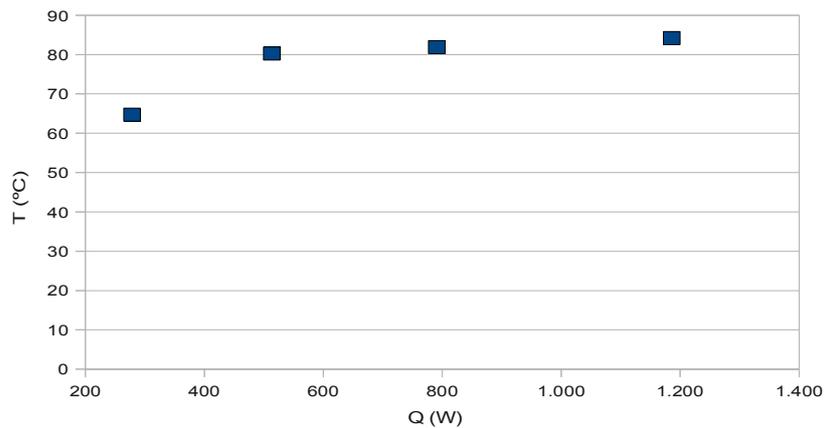


Figura 76: Temperatura-Calor generado

Los resultados no concuerdan con la ecuación (6.1) $\Delta T = R_{TERMICA} \cdot Q$ ya que la temperatura no aumenta proporcionalmente con el calor generado.

En el capítulo 4 se vio que el eje lleva acoplado un ventilador para refrigerar el grupo, de forma que la transmisión de calor se efectúa por convección forzada:

$$\Delta T = \frac{1}{H_{conv}} \cdot Q \quad (6.8) \text{ (ref. [21])}$$

Donde H_{conv} es el coeficiente de convección que variará en función de la velocidad de giro del ventilador.

$$H_{conv} = \frac{Q}{T - 20} \quad (6.9)$$

Como se hizo en el capítulo 5 se va a calcular la velocidad de giro a partir de la frecuencia en el generador con la ecuación (5.30) $\omega = \frac{f \cdot 4 \cdot \pi}{2 \cdot p}$.

T (°C)	Q(W)	H (W/°C)	W (rad/seg)
64,7	278,4	6,22	149,23
80,3	513,5	8,52	150,17
81,9	790,7	12,77	152,37
84,2	1.186,1	18,47	160,22

Tabla 30: Coeficiente de convección-Velocidad de giro

La siguiente gráfica representa como varía este coeficiente de convección con la velocidad de giro:

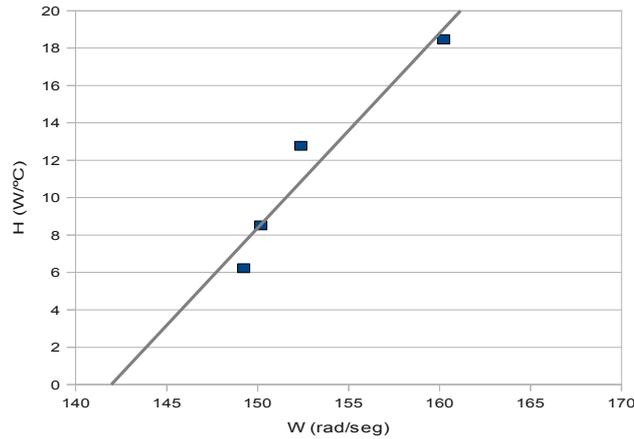


Figura 77: Coeficiente de convección-Velocidad de giro

La curva real no será lineal pero en el intervalo considerado se puede aproximar con la siguiente ecuación lineal:

$$H_{conv} = 2,057 \cdot \omega - 300,6 \quad (6.10)$$

6.3.6 LA VIDA DEL AISLANTE

Cuanto mayor sea la temperatura de funcionamiento, menor será la vida del aislante y viceversa. [16] da la siguiente aproximación para predecir la variación en la vida del aislante con la temperatura:

La vida de una bobina disminuirá un 50% por cada aumento de 10°C en la temperatura es una buena aproximación...

[18] concuerda con esta aproximación:

La generalmente aceptada “rule of thumb” es que la vida de un aislante se reduce a la mitad por cada aumento de 10 °C en la temperatura de funcionamiento.

Esta expresión es equivalente a usar la siguiente ecuación:

$$V = 2^{\frac{-\Delta T}{10}} \cdot V_0 \quad (6.11)$$

Donde V_0 es la vida del aislante antes del aumento de temperatura.

Como el número de averías es inversamente proporcional a la vida del aislante:

$$A = 2^{\frac{\Delta T}{10}} \cdot A_0 \quad (6.12)$$

La estrategia para alargar la vida del devanado shunt y reducir el número de averías deberá ser reducir la temperatura de funcionamiento.

6.3.7 ESTUDIO SOBRE LA RESISTENCIA DEL COBRE

Se ha considerado necesario realizar un estudio sobre la resistencia del cobre ya que afecta directamente a la corriente, al calor generado y a la temperatura de funcionamiento.

6.3.7.1 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL COBRE

Aunque existe un valor establecido para la resistencia del devanado shunt y el resto de devanados se va a calcular la resistencia del cobre a partir de los planos del conjunto (anexo 4) y la conocida ecuación:

$$R_{cobre} = \frac{\rho \cdot L}{S} \quad (6.13)$$

La resistividad (ρ) depende de la calidad del cobre:

$$\rho = \frac{1,724 \cdot 10^{-8}}{n} \Omega \cdot m \quad (6.14)$$

Donde $1,724 \cdot 10^{-8} \Omega m$ es el valor internacional para la resistividad del cobre (ref. [17]) y n es la calidad del cobre en tanto por uno. Combinando (6.13) y (6.14):

$$R_{cobre} = 1,724 \cdot 10^{-8} \frac{L}{n \cdot S} \quad (6.15)$$

Los devanados de los cuales se va a calcular la resistencia del cobre son: el shunt, el aditivo y el sustractivo. El cortocircuito entre espiras solo se produce en el devanado shunt pero los otros dos devanados van a ser útiles más adelante.

En el anexo 1 puede encontrarse la sección de hilo de cobre y el número de espiras de cada devanado:

Devanado	Sección (mm ²)	Nº de vueltas
Shunt	0,3848	4.635
Aditivo	4,5230	218
Sustractivo	4,5230	177

Figura 78: Sección y número de vueltas

6.3.7.1.1 CÁLCULO DE LAS LONGITUDES DE HILO DE COBRE

En este apartado se calcula la longitud de los devanados a partir del plano (anexo 4) y el número de vueltas para poder aplicar la ecuación (6.15).

DEVANADO SUSTRATIVO

En la siguiente figura puede verse la posición del devanado sustractivo (coloreado en verde):

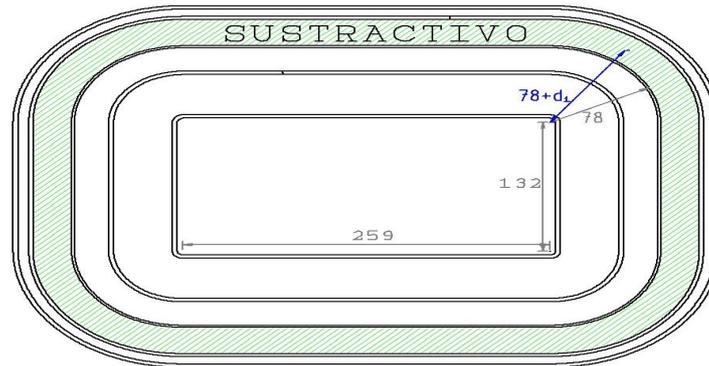


Figura 79: Cálculo de longitudes. Devanado sustractivo (mm)

Dependiendo de la posición de la espira dentro de la bobina su longitud variará, las espiras exteriores serán más largas que las interiores. La longitud de una espira “i” puede expresarse en función de su distancia “d_i” a la cara interna de la bobina:

$$l_i = 2 \cdot 259 + 2 \cdot 132 + 2 \cdot \pi (78 + d_i) = 1.272 + 2 \cdot \pi \cdot d_i \quad (6.16)$$

La longitud de hilo de cobre de una bobina es la suma de las longitudes de todas las espiras que contiene:

$$L_{bobina} = \sum l_i = N \cdot 1.272 + 2 \cdot \pi \cdot \sum d_i = N \cdot \left(1.272 + \frac{\sum d_i}{N} \cdot 2 \cdot \pi \right) \quad (6.17)$$

Donde N=177 vueltas.

$\frac{\sum d_i}{N}$ es la expresión de la distancia media de las espiras a la cara interna. Para calcular la distancia media es necesario estudiar la geometría de la sección de la bobina:

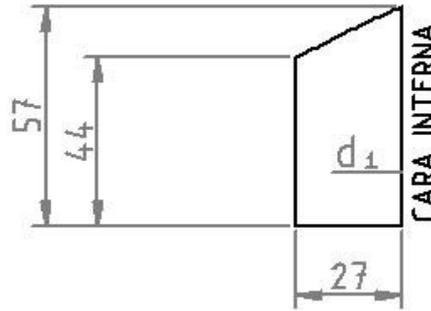
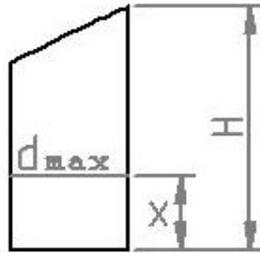


Figura 80: Sección bobina sustractiva (mm)

La distancia media a una determinada altura (x) será la mitad de la distancia máxima a esa altura:

$$d_{med.x} = \frac{d_{max}(x)}{2} \quad (6.18)$$



La media de las distancias medias en cada punto será la distancia media de la bobina:

$$d_{media} = \left(\frac{1}{A_{bobina}} \right) \cdot \int \left(\frac{d_{max}(x)}{2} \cdot d_{max} \right) \cdot dx \quad (6.19)$$

(6.19) equivale a calcular el centro geométrico de la sección.

En el caso de la bobina que estudiamos la sección puede aproximarse como la suma de un rectángulo y un triángulo, por ello se va a suponer que son dos bobinas separadas para luego sumar su longitud.

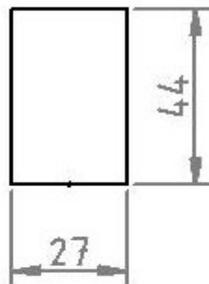


Figura 81: Bobina cuadrado (mm)

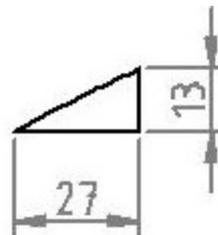


Figura 82: Bobina triángulo (mm)

El número de espiras de cada bobina será proporcional a su sección, aplicando la regla de tres:

$$N_{rect} = \frac{A_{rect}}{A_{total}} \cdot N = \frac{27 \cdot 44}{27 \cdot 44 + 27 \cdot 13/2} \cdot 177 = 154,2 \text{ vueltas} \quad (6.20)$$

$$N_{tri} = \frac{A_{tri}}{A_{total}} \cdot N = \frac{27 \cdot 13/2}{27 \cdot 44 + 27 \cdot 13/2} \cdot 177 = 22,8 \text{ vueltas} \quad (6.21)$$

Se verifica que $N_{rect} + N_{tri} = N$.

Bobina rectángulo

La distancia media del rectángulo será:

$$d_{media} = \left(\frac{1}{27 \cdot 44} \right) \cdot \int_0^{44} \left(\frac{27^2}{2} \right) \cdot dx = 27/2 = 13,5 \text{ mm} \quad (6.22)$$

Que lógicamente equivale a la mitad de su base.

Luego la longitud total de espiras dentro del cuadrado:

$$L_{rect} = N_{rect} \cdot (1 \cdot 272 + d_{media} \cdot 2 \cdot \pi) = 209,2 \text{ m} \quad (6.23)$$

Bobina triángulo

La distancia media del triángulo:

$$d_{media} = \left(\frac{1}{27 \cdot 13/2} \right) \cdot \int_0^{13} \left(\frac{(27/13 \cdot x)^2}{2} \right) \cdot dx = \frac{27}{3} = 9 \text{ mm} \quad (6.24)$$

Luego la longitud total de espiras dentro del triángulo:

$$L_{tri} = N_{tri} \cdot (1 \cdot 272 + d_{media} \cdot 2 \cdot \pi) = 30,3 \text{ m} \quad (6.25)$$

La suma de las dos longitudes nos da la longitud total de una bobina, que multiplicado por cuatro es la longitud del devanado completo:

$$L_{sust} = 4 \cdot (L_{rect} + L_{tri}) = 958 \text{ m} \quad (6.26)$$

DEVANADO ADITIVO

El proceso seguido ha sido el mismo que para la bobina sustractiva. El resultado final ha sido:

$$L_{ad} = 4 \cdot (L_{rect} + L_{tri}) = 1.031 \text{ m} \quad (6.27)$$

DEVANADO SHUNT

El proceso seguido ha sido el mismo que para la bobina sustractiva. El resultado final ha sido:

$$L_{sh} = 4 \cdot (L_{rect} - L_{tri}) = 17.711 \text{ m} \quad (6.28)$$

6.3.7.1.2 LA CALIDAD DEL COBRE

Según la ecuación (6.15) solo resta decidir que calidad del cobre utilizar para calcular la resistencia. La IEC (*International Electrotechnical Commission*) en su normativa de 2008 establece unos valores de referencia en Ω/m para la resistencia de hilo de cobre de diferentes diámetros. Las tablas IEC para la resistencia del cobre se recogen en el anexo 5. Aunque los diámetros estandarizados por la normativa no son exactamente los mismos puede deducirse la calidad del cobre a partir de diámetros cercanos:

Diámetro (mm)	Resistencia. (Ω/m)	Calidad (%)
0,71	0,0432	100,80
2,36	0,0039	101,05

Tabla 31: IEC. Calidades del cobre

Aplicando la ecuación (6.15), las longitudes calculadas, los diámetros del anexo 1 y las calidades que establece la IEC en 2008 a los devanados shunt, aditivo y sustractivo:

Devanado	Diámetro(mm)	Longitud (m)	Calidad (%)	Resis. (Ω)
Shunt	0,7	17.711	100,80	787,11
Aditivo	2,4	1.031	101,05	3,89
Sustractivo	2,4	958	101,05	3,61

Tabla 32: Resistencias del cobre calculadas

Existe una discrepancia entre los valores calculados y los establecidos por *RENFE*. Hay que tener en cuenta que estos últimos fueron establecidos en 1980, cuando llegaron los primeros GMAs, y es de esperar que la calidad del cobre fuera inferior. Si aplicamos la ecuación (6.15) obtenemos que la calidad del cobre correspondiente a los 812Ω (del devanado shunt) es de 97,7 %.

Devanado	2008		1980	
	Calidad (%)	Resis. (Ω)	Calidad (%)	Resis. (Ω)
Shunt	100,80	787,11	97,80	812,00

Tabla 33: Calidades del cobre 1980-2008

Esta bajada en la resistencia debida a las mejoras en la calidad del cobre tendrá su efecto en la temperatura de funcionamiento del devanado shunt.

6.3.7.2 LA RESISTENCIA DEL COBRE EN DEVANADOS SHUNT NUEVOS

Con este estudio se pretende averiguar cual es la resistencia del cobre con la que entran los devanados nuevos. En el anexo 6 se muestran los valores resistivos medidos en 22 devanados nuevos tomados de 22 fichas de reparación de carcasa. Se incluyen los valores de los devanados shunt, aditivo y sustractivo.

En la siguiente gráfica se muestran los valores resistivos encontrados para los devanados shunt:

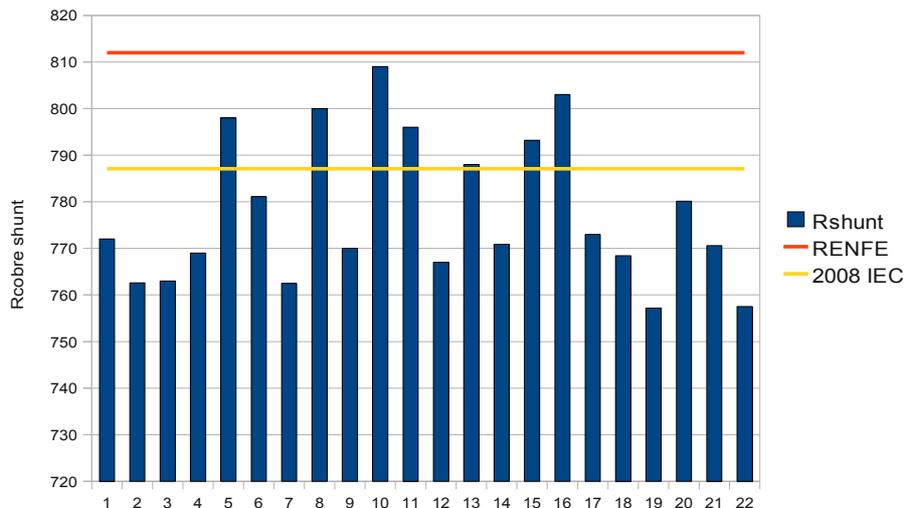


Figura 83: Resistencia del cobre en devanados shunt nuevos

De la gráfica puede destacarse un detalle importante: Absolutamente todos los valores se encuentran por debajo del valor de referencia utilizado por *RENFE*, 812 Ω, y la mayoría por debajo del valor calculado, 787 Ω.

Una explicación de por que los valores son tan bajos podría ser la temperatura ambiente, es decir, que las medidas se hayan hecho a menos de 20 °C. Pero en las fichas de reparación de carcasa no hay información sobre la temperatura ambiente por lo que para poder continuar el estudio se ha recurrido a los valores medidos para los devanados aditivo y sustractivo.

Si los valores de la resistencia del cobre del devanado shunt fueron bajos debido a bajas temperaturas, en ese caso los valores medidos para los devanados aditivos y sustractivo, que también son devanados de cobre, deberían ser también bajos por la misma razón.

Técnicamente hablando, si hay linealidad entre una resistencia (véase la ecuación (6.5)) y la temperatura, debe haber linealidad entre dos resistencias sometidas a la misma temperatura:

$$R_a = R_{a20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T) \quad \Delta T = \frac{R_a / R_{a20} - 1}{\alpha_{20}} \quad (6.29)$$

$$R_b = R_{b20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T) \quad (6.30)$$

$$R_b = R_a \cdot \left(\frac{R_{b20}}{R_{a20}} \right) \quad (6.31)$$

Se va a tratar de demostrar esta linealidad entre el devanado aditivo y el sustractivo.

RESISTENCIA DEL DEVANADO ADITIVO VS SUSTRACTIVO

Aplicando (6.31) a los devanados aditivo y sustractivo:

$$R_{ad} = R_{ss} \left(\frac{R_{ad20}}{R_{ss20}} \right) \quad (6.32)$$

Ahora es posible calcular la recta teórica. Para los valores R_{ad20} y R_{ss20} se pueden utilizar los valores establecidos por RENFE (tabla 33) o los calculados según las calidades propuesta por la IEC (tabla 34):

RENFE			
	R(Ω) a 20° C	R(Ω) a 10° C	R(Ω) a 30°
Aditivo	3,9	3,75	4,05
sustractivo	3,52	3,38	3,66

Tabla 33: RENFE. Aditivo vs sustractivo

IEC 2008			
	R(ohm) 20°	R(ohm) 10°	R(ohm) 30°
Aditivo	3,89	3,74	4,04
Sustractivo	3,61	3,47	3,75

Tabla 34: IEC. Aditivo vs sustractivo

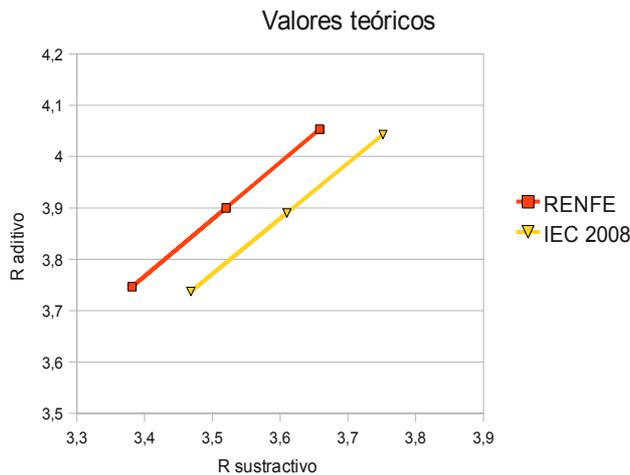


Figura 84: Aditivo vs Sustractivo. Recta teórica

Para comprobar esta linealidad en la práctica se han utilizado los valores del anexo 6:

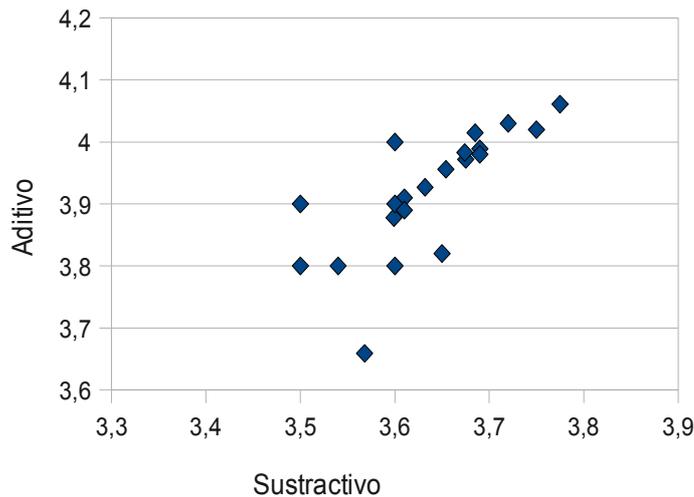


Figura 85: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos

En el anexo 6 algunos de los valores tienen dos decimales, mientras que otros llevan tan solo un decimal. Es posible que haya instrumentos de medida que den un decimal de precisión y otros que den dos decimales, o que incluso cuando el instrumento de medida da dos decimales el personal redondea la cifra a un solo decimal. El redondeo al pasar del instrumento de medida al papel es una práctica habitual en el día a día de un taller. Para comprobar esto se ha eliminado de la gráfica los valores sospechosos de haber sido redondeados (coloreados en gris en el anexo 6). La gráfica queda:

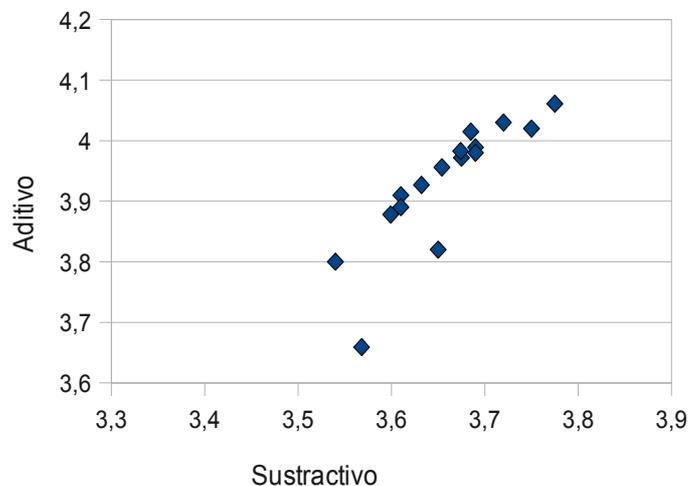


Figura 86: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos (2)

Ahora, menos dos puntos, todos los demás siguen claramente una línea recta. Estos dos puntos, que no siguen la tendencia, se van a considerar una excepción (coloreados en marrón en el anexo 6). A partir de ahora se van a descartar los valores coloreados en gris (6 medidas) y en marrón (2 medidas), y se continua el estudio con 14 medidas en lugar de 22.

Superponiendo los valores teóricos (figura 84) y los medidos (figura 86) en una sola gráfica:

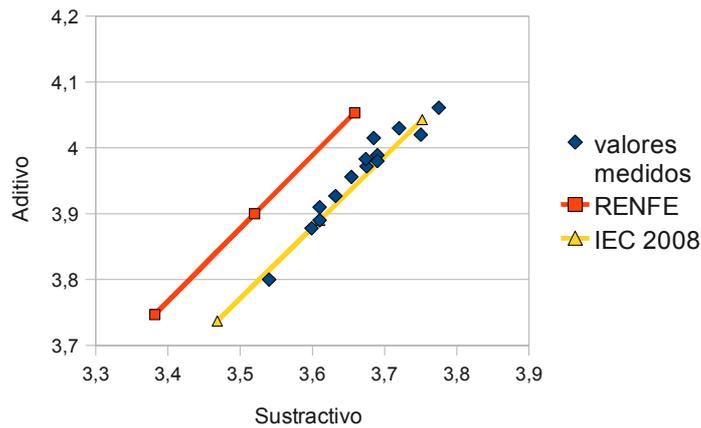


Figura 87: Aditivo vs Sustractivo. Valores medidos y recta teórica

La recta teórica según los valores establecidos por RENFE está un poco alejada de las medidas, sin embargo la recta según los valores calculados se superpone bien con las medidas.

La existencia de linealidad en las medidas entre el devanado aditivo y sustractivo implica que también debe haber linealidad entre cualquiera de estos devanados y el devanado shunt.

RESISTENCIA DEL DEVANADO SHUNT VS ADITIVO

Igual que hay linealidad entre el devanado aditivo y el sustractivo debe haber linealidad entre el devanado shunt y el aditivo. En la siguiente gráfica se exponen directamente los valores medidos con la recta teórica:

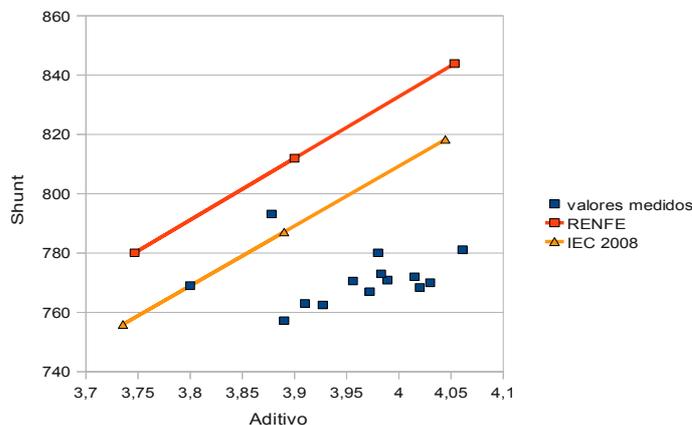


Figura 88: Shunt vs Aditivo. Valores medidos y recta teórica

Salvo dos puntos, los valores medidos se alejan bastante de las dos rectas teóricas. En conclusión, la temperatura no puede explicar los bajos valores de la resistencia del cobre en devanados shunt.

Para asegurar que la conclusión es correcta se han realizado medidas en taller de cuatro bobinas listas para montar.

6.3.7.3 MEDIDAS REALIZADAS EN BOBINAS NUEVAS LISTAS PARA MONTAR

La siguiente tabla muestra las resistencias de cuatro bobinas shunt nuevas medidas en taller a una temperatura de 29 °C. Debe recordarse que un devanado está formado por cuatro bobinas en serie, luego la suma de las cuatro bobinas medidas equivale al devanado completo.

	R (Ω) a 29 ° C
Bobina 1	198,2
Bobina 2	198,0
Bobina 3	197,4
Bobina 4	197,6
Devanado:	791,2

Tabla 35: R. medidas en bobinas listas para montar

Aplicando la ecuación (6.5) puede calcularse la resistencia a 20° C:

$$R_{20} = \frac{R_{29}}{1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T} = \frac{791,2}{1 + 0,00393 \cdot 9} = 764,2 \Omega \quad (6.33)$$

La resistencia obtenida es inferior a los 787,11 Ω que debería medir según el valor calculado y concuerda con las conclusiones del apartado anterior. La única explicación para este fenómeno es que **las dimensiones del hilo de cobre no son correctas**.

El diámetro 0,7 mm (shunt) no se encuentran dentro de los estándares de la IEC y no será tan fácil encontrarlo como los diámetros estándares. Cabe la posibilidad de que las bobinas se estén fabricando con hilo de 0,71 mm (diámetro estándar, ver anexo 5) en lugar de 0,7 mm. La siguiente tabla muestra el resultado de aplicar la ecuación (6.15) para un diámetro de 0,71 mm:

Devanado	Diám.(mm)	Longitud (m)	Calidad (%)	Resis. (Ω)
Shunt	0,71	17.711	100,80	765,09

Figura 89: Resistencia del cobre con diámetro IEC

El valor para el devanado shunt con un diámetro de 0,71 mm, 765,09 Ω, es muy cercano al valor calculado a partir de las medidas realizadas en taller, 764,2 Ω.

6.3.8 IMPACTO DE LA RESISTENCIA DEL COBRE EN LA TEMPERATURA DE FUNCIONAMIENTO

Es de esperar que este cambio en la resistencia del cobre, de los 812 Ω originales a los 764,2 Ω actuales (medidos en taller), tenga un impacto en la temperatura de funcionamiento. En este apartado se pretende estudiar este impacto, para ello se va a tomar como referencia el ensayo de plena carga a 3.000 V del anexo 2, para conocer cuales eran las condiciones originales y poder compararlas con la situación actual.

Se ha estimado una temperatura de funcionamiento de 82 °C, según los resultados del apartado 6.3.5, para los primeros cálculos, y puede estimarse la resistencia del cobre:

$$\text{Ecuación (6.5): } R_{\text{cobre}} = R_{20} \cdot (1 + 0,00393 \cdot (T - 20))$$

	Rco (Ω) a 20 °C	Rco (Ω) a 82°C
Diseño original	812	1.010
Situación actual	764,2	950

Tabla 36: Resistencia del cobre a 82 °C

Y la nueva corriente que circulará por el devanado:

$$\text{Ecuación (5.14) y (6.1): } I_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{sl} - R_s/2)}{R_{sh}} = \frac{3.000/2 - 55 \cdot 1,775}{R_{\text{cobre}} + 575}$$

	Rco (Ω) a 82°C	I shunt (A)
Diseño original	1.010	0,885
Situación actual	950	0,920

Tabla 37: Corriente shunt

Este aumento en la corriente shunt tiene dos efectos, por un lado aumentará ligeramente el calor generado en el cobre:

$$\text{Ecuación (6.7): } Q = I_{\text{shunt}}^2 \cdot R_{\text{cobre}}$$

	Rco (Ω) a 82°C	I shunt (A)	Q(W)
Diseño original	1.010	0,885	790,9
Situación actual	950	0,920	804,4

Tabla 38: Calor generado

Y por otro lado se produce un aumento en la fuerza magnetomotriz : $N_{sh} \cdot I_{sh} = 4.635 \cdot I_{shunt}$

	I shunt (A)	(NI)sh (Avuelta)
Diseño original	0,885	4.102
Situación actual	0,920	4.264

Tabla 39: F.m.m.

La f.m.m. aumentará $(4.264 - 4.102) = 162$ Avuelta .

En el ensayo de 3.000 V y plena carga el motor se encuentra girando a una velocidad de 152,37 rad/seg y el AFR aporta una f.m.m. sustractiva de -406 A vuelta. Para compensar la caída en la f.m.m. el AFR reaccionará aumentando la corriente en el devanado sustractivo y bajando ligeramente la velocidad con respecto a la velocidad original:

$$\text{Ecuación (5.42): } (N \cdot I)_{AFR} = 345,79 \cdot \omega - 53.093 \quad \omega = \frac{(N \cdot I)_{AFR} + 53.093}{345,79}$$

	(NI) afr (Avuelta)	w (rad/seg)
Diseño original	-406	152,37
Situación actual	-568	151,90

Tabla 40: F.m.m. del AFR y velocidad de giro

Como el ventilador va acoplado al eje, este cambio en la velocidad de giro provocará una reducción del coeficiente de convección:

$$\text{Ecuación (6.10): } H_{conv} = 2,057 \cdot W - 300,6$$

	w (rad/seg)	H conv(W/°C)
Diseño original	152,37	12,82
Situación actual	151,90	11,86

Tabla 41: Coeficiente de convección

Y la temperatura de funcionamiento del devanado shunt puede calcularse:

$$\text{Ecuación (6.9): } T = \frac{Q}{H_{conv}} + 20$$

	Q(W)	H conv(W/°C)	Temp(°C)
Diseño original	790,9	12,82	81,7
Situación actual	804,4	11,86	87,8

Tabla 42: Temperatura de funcionamiento del devanado shunt

Este aumento de temperatura con respecto al diseño original ($87,8 - 81,7 = 6,1 \text{ } ^\circ\text{C}$) reducirá la vida del devanado shunt según la ecuación (6.11) $\frac{V}{V_0} = 2^{\frac{-\Delta T}{10}} = 0,66$. Es decir, la vida del aislante en un devanado shunt habrá disminuido en un 34 %.

O aplicando la ecuación (6.12): $\frac{A}{A_0} = 2^{\frac{\Delta T}{10}} = 1,52$ El número de averías habrá aumentado un 52%.

6.3.9 COSTES

El proceso que conlleva una avería por cortocircuito entre espiras en el devanado shunt es el siguiente:

1. Transporte de ida
2. Desmontaje del grupo de la locomotora
3. Reparación
4. Montaje en la locomotora
5. Transporte de vuelta

Se han estimado los siguientes costes:

	€
Transporte ida y vuelta	500
Desmontaje y montaje en la locomotora	1.750
Coste operario hora	50
Devanado nuevo	6.800
Lucro Cesante	4.000

Tabla 43: Costes

El lucro cesante es el dinero que deja de producir la locomotora mientras está parada, luego es dinero que se pierde. El coste “operario hora” incluye las instalaciones y el equipo necesario para que trabaje un operario.

En algunas ocasiones la avería, además de la inmovilización de la locomotora, provoca un perjuicio en cuanto a su efecto en la explotación, puesto que el defecto se produce en plena marcha con la consiguiente necesidad de socorro por parte de otra locomotora y el retraso en la llegada de la carga. No se han tenido en cuenta estos costes por ser responsabilidad “contractual” únicamente el lucro cesante, aunque existen fórmulas para imputar al mantenedor los costes de un número de incidencias en explotación superior al pactado.

Se ha realizado una investigación sobre el proceso de reparación del devanado shunt, incluyendo tiempos y número de operarios necesarios:

	Nº de operarios	Tiempo (horas)	Coste operario hora (€/h)	Coste (€)
Desmontaje grupo	2	8	50	800
Rebobinado	2	75		7.500
Inspección de Carcasa	1	1,5		75
Montaje del grupo	2	12		1.200
Total				9.575

Tabla 44: Costes de reparación

Los costes totales serán:

Transporte ida y vuelta	Desmontaje y montaje en la locomotora	Devanado nuevo	Reparación	Lucro cesante	Costes totales
500 €	1.750 €	6.800 €	9.575 €	4.000 €	22.625 €

Tabla 45: Coste total de una avería

Entre Enero del año 2.000 y Marzo 2.010 se han producido 22 averías por cortocircuito en el devanado shunt en los 33 grupos escogidos de muestra. Extrapolando esta cifra a los 168 GMAs totales: $22 \cdot \frac{168}{33} = 112 \text{ averías}$ Lo que equivale a: $\frac{112 \text{ averías}}{10,25 \text{ años}} = 10,9 \frac{\text{averías}}{\text{año}}$.

El coste total que genera la avería es el coste de una avería multiplicado por el número de averías: $10,9 \frac{\text{averías}}{\text{año}} \cdot 22.625 \frac{\text{€}}{\text{avería}} = 246.612 \frac{\text{€}}{\text{año}}$

6.4 PROPUESTA DE SOLUCIONES

Para devolver el devanado shunt a su funcionamiento original la corriente I_{shunt} debe volver a su valor 0,885 A. Esto es posible regulando el potenciómetro MGFR conectado en serie al devanado shunt, cuyo valor actual es de 575 Ω.

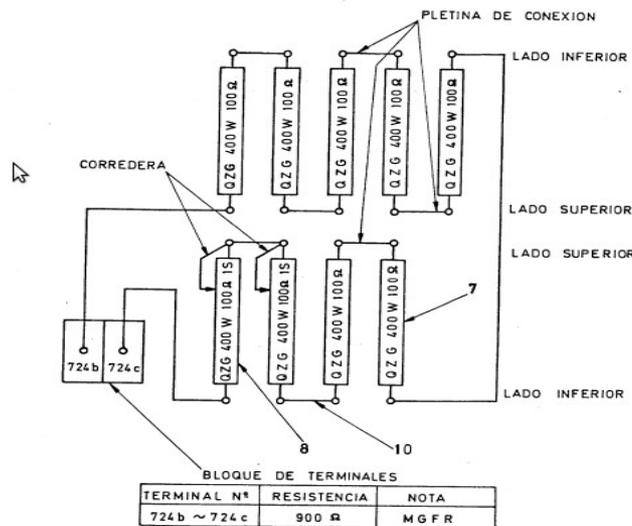


Figura 90: Potenciómetro MGFR (ref. [6])

El MGFR está formado por nueve resistencias de 100 Ω y 400 W cada una. Es posible variar la resistencia por medio de las pletinas de conexión o por medio de la corredera. La resistencia máxima ajustable es de 900 Ω.

En este apartado se pretende calcular el valor al que debe ajustarse el potenciómetro MGFR teniendo en cuenta la resistencia del cobre medida 764,2 Ω.

Si asumimos que la corriente I_{shunt} es en efecto 0,885 A, entonces la f.m.m. en el AFR, la velocidad de giro y el coeficiente de convección volverán a su valor del diseño original:

$$(NI)_{AFR} = -406 \text{ A vuelta}; \quad \omega = 152,37 \text{ rad/seg}; \quad H_{conv} = 12,82 \text{ W/°C};$$

El calor generado será (ecuación (6.7)):

$$Q = I_{shunt}^2 \cdot R_{cobre} = 0,885^2 \cdot R_{cobre} \quad (6.34)$$

Donde la resistencia del cobre variará en función de la temperatura (ecuación (6.5)):

$$R_{cobre} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot \Delta T) = 764,2 \cdot (1 + 0,00393 \cdot \Delta T) \quad (6.35)$$

La ecuación (6.9) $\Delta T = \frac{Q}{H_{conv}}$ puede combinarse con la ecuación anterior:

$$R_{cobre} = 764,2 \cdot \left(1 + 0,00393 \cdot \frac{Q}{12,82}\right) \quad (6.36)$$

Combinando las ecuaciones (6.34) y (6.36):

$$0,885^2 \cdot R_{cobre} = \left(\frac{R_{cobre}}{764,2} - 1\right) \cdot \frac{12,82}{0,00393} \quad (6.37)$$

De (6.37) es posible despejar R_{cobre} : $R_{cobre} = 936 \Omega$

Para que la corriente del devanado shunt tenga un valor de 0,885 A, será necesario una resistencia de (ecuación (5.14)):

$$R_{sh} = \frac{U/2 - I \cdot (R_{sl} - R_s/2)}{I_{sh}} = \frac{3.000/2 - 55 \cdot 1,775}{0,885} = 1.585 \Omega \quad (6.38)$$

Y el potenciómetro MGFR deberá regularse a (ecuación (6.1)):

$$MGFR = R_{shunt} - R_{cobre} = 1.585 - 936 = 649 \Omega \quad (6.39)$$

En conclusión, teniendo en cuenta los valores actuales de resistencia del cobre 764,2 Ω , el valor del potenciómetro MGFR necesario para que circule una corriente de 0,885 A a 3.000 V y plena carga es **649 Ω** .

Con esta modificación la nueva temperatura de funcionamiento será (ecuación (6.9)):

$$T = \frac{Q}{H_{conv}} + 20 = \frac{I_{shunt}^2 \cdot R_{cobre}}{12,82} + 20 = 77,1 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (6.39)$$

Lo que supone una diferencia de 10,7 $^\circ\text{C}$ con respecto la situación actual (87,8 $^\circ\text{C}$), y un aumento en la vida de: $\frac{V}{V_0} = 2^{\frac{-10,7}{10}} = 2,1$. Es decir podría duplicarse la vida del devanado

shunt, o lo que es equivalente, reducir las averías a la mitad: $\frac{A}{A_0} = 2^{\frac{-10,7}{10}} = 0,48$.

En la siguiente tabla se exponen la temperatura de funcionamiento y los costes según las diferentes situaciones; el diseño original, la situación actual y la modificación:

	MGFR (Ω)	R cobre(Ω)	T func.($^{\circ}$C)	Averias / año	Costes(€)
Diseño original	575	812	81,7	7,2	162.900
Situación actual	575	764,2	87,8	10,9	246.612
Modificación	649	764,2	77,1	5,2	117.650

Tabla 46: Propuesta de soluciones

La disminución de la resistencia del cobre en el devanado shunt es en la actualidad perjudicial, sin embargo reajustando el valor del potenciómetro MGFR en 649 Ω puede convertirse en beneficiosa, incluso respecto a la situación original.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO

Durante el capítulo 6, Análisis de Averías y Propuesta de Soluciones, se recurrió en varias ocasiones a las ecuaciones obtenidas en el capítulo 5, Análisis de Funcionamiento, es más, sin estas ecuaciones habría sido imposible llegar a las mismas conclusiones.

En definitiva, el análisis de funcionamiento ha sido necesario en el análisis de averías y al igual que se ha empleado para resolver el cortocircuito entre espiras en el devanado shunt, tiene potencial para comprender y resolver otras averías del GMA *MG 138A-F*.

7.2 CONCLUSIONES SOBRE EL CORTOCIRCUITO ENTRE ESPIRAS EN EL DEVANADO SHUNT

El cortocircuito entre espiras en el devanado shunt es la avería más repetida abarcando un 43 % de las averías totales que sufre el GMA *MG 138A-F*. Gracias al corte transversal de una bobina (figura 72) se ha visto que el cortocircuito entre espiras se produce en la zona centro por una combinación de estrés eléctrico y estrés térmico (estrés múltiple). El cortocircuito se propaga en línea recta entre dos capas de conductores.

La tabla 32 muestra que debido a las mejoras en la calidad del cobre desde 1980 hasta el año actual la resistencia del devanado shunt ha podido verse reducida de 812 Ω a 787 Ω . Sin embargo esta reducción en la resistencia no es suficiente para explicar los bajos valores encontrados en las fichas de inspección de carcasa ni los medidos en taller. Solamente pueden explicarse estos valores si las bobinas están construidas con hilo de cobre de 0,71 mm de diámetro en lugar de los 0,7 mm especificados en el diseño. Esta hipótesis gana peso si se tiene en cuenta que 0,71 mm es un diámetro estándar según la normativa IEC, y 0,7 mm no.

La nueva resistencia del cobre, 764,2 Ω según las medidas realizadas en taller, provocará un aumento en la temperatura de funcionamiento del devanado shunt de 6,1 $^{\circ}\text{C}$, que se traducirá en una disminución en la vida del aislante y en un aumento aproximado en el número de averías del 52 %.

La solución para bajar la temperatura de funcionamiento del devanado shunt es modificar la resistencia del potenciómetro MGFR de 575 Ω a 649 Ω . Con esta modificación podría bajarse la temperatura en 10,7 $^{\circ}\text{C}$ (de 87,8 a 77,1 $^{\circ}\text{C}$) con respecto a la situación actual reduciendo así las averías y los costes a la mitad.

7.3 FUTURAS ACTUACIONES

Como consecuencia de los análisis y conclusiones de este trabajo, la Jefatura de Ingeniería de zona de *INTEGRIA* ha procedido a elaborar un informe con objeto de homologar los resultados obtenidos de cara a prescribir el cambio en el valor de la resistencia MGFR en todas las locomotoras que incorporan GMA. Por otra parte se le va a solicitar un informe a los últimos fabricantes de bobinas para que confirmen los parámetros de diseño con los que están realmente trabajando.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AFR	Regulador Automático de Frecuencia.
ASFA	Anuncio de Señales y Frenado Automático.
AVE	Alta Velocidad Española.
AVR	Regulador Automático de Voltaje.
C.a.	Corriente Alterna.
C.c.	Corriente Continua.
F.e.m.	Fuerza Electromotriz.
F.m.m.	Fuerza Magnetomotriz.
GMA	Grupo Motor-Alternador.
GMG	Grupo Motor-Generador.
IEC	Comisión internacional electrotécnica.
MACOSA	Materiales y Construcciones S.A..
MGFR	Potenciómetro en serie al devanado shunt.
MTM	Maquinista Terrestre y Marítima.
MZA	Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante.
RENFE	Red Nacional de Ferrocarriles Españoles.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

A	Número de averías al año por cortocircuito entre espiras en el devanado shunt.
d_{media}	Distancia de la espira media a la cara interna del a bobina. Unidades: <i>Milímetros</i> (mm)
E	Fuerza electromotriz. Unidades: <i>Voltios</i> (V)
E_L	Fuerza electromotriz de línea en el generador. Unidades: <i>Voltios</i> (V)
F_e	Fuerza magnetomotriz en el devanado de excitación. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
F_r	Fuerza magnetomotriz de reacción de inducido. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
F_t	Fuerza magnetomotriz total en el generador. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
f	Frecuencia en el lado generador. Unidades: <i>Hertzios</i> (Hz)
fp	Factor de potencia de la carga.
H_{conv}	Coefficiente de convección del devanado shunt. Unidades: <i>Vatios/Grados entígrados</i> (W/°C)
I	Corriente principal del motor. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_{ad}	Corriente del devanado aditivo. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_e	Corriente en el devanado de excitación. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_L	Corriente de línea en el lado generador. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_{se}	Corriente del devanado serie. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_{sh}	Corriente shunt. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
I_{ss}	Corriente del devanado sustractivo. Unidades: <i>Amperios</i> (A)
K	Constante del motor de c.c.. Unidades: (N·m/A·Wb)
K_g	Constante del generador. Unidades: (V/A·Hz)
L	Longitud de hilo de cobre. Unidades: <i>Metro</i> (m)
N_{sh}	Número de espiras en el devanado shunt.
N_{ad}	Número de espiras en el devanado aditivo.
N_{ss}	Número de espiras en el devanado sustractivo.
N_{se}	Número de espiras en el devanado serie.
NI_{AFR}	Fuerza magnetomotriz creada por el AFR. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
NI_{motor}	Fuerza magnetomotriz creada por el motor sin AFR. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
NI_{TOT}	Fuerza magnetomotriz total en el motor. Unidades: <i>Amperios Vuelta</i> (A vuelta)
n	Calidad del cobre.
P_{demand}	Potencia demandada por la carga. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
P_m	Potencia motora. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
Pe_{AFR}	Pérdidas en AFR. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
Pe_{AVR}	Pérdidas en AVR. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
Pe_{gen}	Pérdidas en el generador. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
Pe_{mot}	Pérdidas en el motor. Unidades: <i>Vatios</i> (W)

$P_{e_{mec}}$	Pérdidas mecánicas. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
p	Número de pares de polos.
Q	Calor generado en el devanado shunt. Unidades: <i>Vatios</i> (W)
R	Número de ranuras en el rotor del motor de c.c..
R_{20}	Resistencia del cobre en el devanado shunt a 20 °C. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{cobre}	Resistencia del cobre en el devanado shunt. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{ad}	Resistencia del cobre devanado aditivo. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_s	Resistencia serie al motor. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{s1}	Resistencia serie al motor 1. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{s2}	Resistencia serie al motor 2. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{sh}	Resistencia shunt. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{sg}	Resistencia en serie del generador. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
R_{ss}	Resistencia del cobre devanado sustractivo. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
S	Sección de hilo de cobre. Unidades: <i>Milímetros</i> ² (mm ²)
T	Par motor. Unidades: <i>Newton metro</i> (N·m)
U	Tensión de entrada en el lado motor. Unidades: <i>Voltios</i> (V)
U_L	Tensión de línea en bornes del generador. Unidades: <i>Voltios</i> (V)
V	Vida del aislante entre espiras.
ω	Velocidad angular. Unidades: <i>Radianes/segundo</i> (rad/seg)
X_{sg}	Inductancia en serie del generador. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
Z_{sg}	Impedancia en serie del generador. Unidades: <i>Ohmios</i> (Ω)
ΔT	Diferencia de temperatura. Unidades: <i>Grados Centígrados</i> (°C) o <i>Kelvin</i> (K)
Φ	Flujo magnético. Unidades: <i>Weber</i> (Wb)
α	Ángulo de desfase entre I_L y U_L . Unidades: <i>Grados</i> (°)
α_{20}	Coefficiente de temperatura del cobre. Unidades: <i>1/Grados centígrados</i> (°C ⁻¹)
η	Rendimiento del GMA.
ρ	Resistividad del cobre. Unidades: <i>Ohmios metro</i> ($\Omega \cdot m$)
φ	Ángulo de desfase entre I_L y U_L . Unidades: <i>Grados</i> (°)

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Dolores Moreno Burgos, P. Gonard; *Guía Histórica del Ferrocarril*; Electa España; 1993
- [2] H.I. Andrews; *Railway Traction*; Elsevier; 1986
- [3] A. Maestro; M. Cano; J. L. Ordoñez; *El Gran Libro de las Locomotoras Españolas*; Risco; 2003
- [4] *Fichero Técnico. Locomotoras de línea*; RENFE; 1978
- [5] *Locomotoras eléctricas 269 y 252 para servicios de larga distancia*; Vía Libre nº 519; 2008.
- [6] *Libro de instrucciones de locomotoras eléctricas 269.2*; Westinghouse S.A..
- [7] *Curso para locomotoras 269. Descripción general*; RENFE
- [8] *DEX.2000.502.01*; RENFE
- [9] J. J. Manzano Orrego; *Mantenimiento de máquinas eléctricas V.1*; Paraninfo; 2002.
- [10] *DEX.2000.502.02*; RENFE
- [11] Jesus Fraile Mora; *Máquinas eléctricas*; McGraw-Hill; 2003.
- [12] Jesus Fraile Mora; *Electromagnetismo y circuitos eléctricos*; Colegio de Ingenieros caminos, canales y puertos; 1995.
- [13] Cortes Cherta; *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. Tomo IV. Máquinas síncronas y motores C.A. de colector*; Editorial Reverté; 1997.
- [14] J. Ramírez Vazquez; *Talleres Electro-mecánicos: Bobinados*; Ed. CEAC; 1990.
- [15] J. J. Manzano Orrego; *Mantenimiento de Máquinas Eléctricas V.2*; Paraninfo; 2002.
- [16] G. C. Stone, E. A. Bouter, I. Culbert, H. Dhirani; *Electrical insulation for rotating machines*; IEE Press; 2004.
- [17] *Copper wire tables*; National Bureau of standards handbook 100; 1966.
- [18] H. W. Penrose; *Theory of Static Winding Circuit Analysis*; 2001.
- [19] Web Ferroviaria www.wefer.com.
- [20] IEC 60317-0-1; *Especificaciones for particular types of winding wires. Chapté 0-1. General requeriments*; 2008.
- [21] Frank P. Incropera, David P. DeWitt; *Fundamentos de Transferencia de Calor* 4ª ed.; PRENTICE HALL HISPANOAMERICAN S.A.; 1999