

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**CALIDAD DE SUMINISTRO ELÉCTRICO.  
PENETRACIÓN DE ARMÓNICOS.  
MITIGACIÓN DE SUS EFECTOS EN LAS  
PLANTAS INDUSTRIALES**

AUTORA: Joana Rodríguez Luque

TUTOR: Fernando Soto Martos



## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	10
1.1. INTRODUCCIÓN .....	10
1.2. OBJETIVOS .....	10
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO .....	11
2. EL SISTEMA ELÉCTRICO.....	12
2.1. EL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL.....	12
2.1.1. Regulación del sector eléctrico / El mercado eléctrico .....	12
2.1.2. Generación, transporte, distribución y consumo .....	16
2.1.3. Las centrales eléctricas.....	22
3. CALIDAD DE SUMINISTRO .....	29
3.1. DEFINICIÓN.....	29
3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA .....	30
3.3. CALIDAD ONDA/PRODUCTO .....	30
3.3.1. Perturbaciones de amplitud.....	31
3.3.2. Perturbaciones de frecuencia .....	33
3.3.3. Desequilibrios de tensión o corriente .....	33
3.3.4. Perturbación en la forma de onda: Armónicos e interarmónicos .....	33
3.4. CALIDAD DE SERVICIO Y CONTINUIDAD DEL SUMINISTRO .....	34
3.5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO. MONITORIZACIÓN .....	41
4. ARMÓNICOS .....	45
4.1. INTRODUCCIÓN .....	45
4.1.1. Fuentes de armónicos .....	48
4.1.2. Efectos de los armónicos.....	48
4.2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS .....	50
4.2.1. Aplicación de la Transformada de Fourier .....	50



4.2.2. Aplicación de los filtros de Kalman .....	51
4.3. NORMATIVA ARMÓNICOS.....	52
4.4. MEDIDAS DE ARMÓNICOS .....	58
4.4.1. Razones para la medida de armónicos.....	58
4.4.2. Tipos de dispositivos de medida .....	59
4.4.2.1. Funcionamiento de los analizadores digitales y procesado de datos .....	60
4.4.3. Procedimientos de análisis de armónicos en las redes de distribución.....	60
4.4.3.1 Modo de funcionamiento .....	61
4.4.3.2. Resultado de los análisis .....	61
4.4.3.3. Uso de los dispositivos de medida.....	61
4.5. SOLUCIONES FRENTE A LOS ARMÓNICOS.....	62
4.5.1. Filtros de armónicos .....	65
5. SIDERURGIA DE ARCO ELÉCTRICO .....	71
5.1. INTRODUCCIÓN .....	71
5.2. EL ARCO ELÉCTRICO.....	74
5.3. HORNOS ALTOS Y HORNOS DE ARCO.....	75
5.3.1. Altos hornos .....	75
5.3.2. Hornos de arco .....	76
5.4. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO.....	77
5.4.1. Estructura del horno de arco.....	78
5.4.2. Etapas principales de funcionamiento del horno de arco .....	81
5.4.3. El horno de arco eléctrico de Corriente Continua (CC) y su comparación con el de Corriente Alterna (CA).....	85
5.4.4. Circuito de alimentación .....	87
5.4.5. Interacción y perturbación de la red eléctrica .....	90
5.5. MITIGACIÓN DE LAS PERTURBACIONES.....	91
6. CASO PRÁCTICO. HORNO DE ARCO CON SISTEMA DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS.....	96



---

6.1. INTRODUCCIÓN .....	96
6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ACERÍA .....	96
6.3. DESCRIPCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EXISTENTE .....	97
6.4. SOLUCIÓN ADOPTADA .....	99
6.5. CONCLUSIONES .....	102
7. PRESUPUESTO .....	103
8. CONCLUSIONES .....	104
Conclusiones técnicas .....	104
Conclusiones personales .....	105
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
10. GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	111



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clientes de la tarifa TUR y clientes de mercado.....	13
Figura 2. Organización sistema eléctrico español.....	14
Figura 3. El sistema eléctrico.....	16
Figura 4 Torres metálicas alta tensión y muestra de la altura y tensión que soportan.....	17
Figura 5 Evolución en km de la red de transporte desde el 2008 al 2012 en tensiones menores o iguales a 220kV y en 400 kV.....	17
Figura 6. Consumo de energía en España en el año 2011.....	19
Figura 7. Máxima demanda de potencia media horaria y de energía diaria.....	20
Figura 8. Demanda de energía eléctrica por sectores.....	20
Figura 9. Demanda de energía eléctrica en tiempo real.....	21
Figura 10. Esquema de una central hidroeléctrica.....	22
Figura 11. Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo.....	23
Figura 12. Esquema de una central térmica convencional de carbón.....	23
Figura 13. Esquema de una central de cogeneración mediante biomasa.....	23
Figura 14. Esquema de una central incineradora de residuos sólidos urbanos.....	24
Figura 15. Esquema de una central de ciclo combinado.....	25
Figura 16. Esquema de central de gasificación integrada con ciclo combinado.....	26
Figura 17. Esquema de una central nuclear.....	26
Figura 18. Esquema de una central eólica.....	27
Figura 19. Esquema de una central fotovoltaica.....	27
Figura 20. Esquema de una central solar térmica.....	28
Figura 21. Potencia instalada a 31 de diciembre del 2012.....	28
Figura 22. Calidad de servicio.....	29
Figura 23. Variaciones de tensión.....	31
Figura 24. Hueco de tensión.....	31
Figura 25. Sobretensión.....	32
Figura 26. Transitorio de tensión.....	32



Figura 27. Flicker, variación de tensión en la operación de un horno de arco.....	33
Figura 28. Espectro de armónicos e interarmónicos en un horno de arco eléctrico.....	34
Figura 29. Indicador TIEPI acumulado en el 2012.....	41
Figura 30. Lavado de aisladores en helicóptero.....	41
Figura 31. Representación de las ondas: fundamental, armónicos 5° y 7° y resultante. Cálculo de la distorsión total.....	45
Figura 32. Diagrama de una sola línea que muestra la impedancia del circuito de alimentación de un armónico de rango h.....	46
Figura 33. Circulación de intensidades en una red de distribución eléctrica.....	47
Figura 34. Intensidad afectada por armónicos y su descomposición en las componentes armónicas de rango 1 (fundamental), 3, 5, 7 y 9.....	50
Figura 35. Filtros utilizados a alta tensión para la mitigación de armónicos.....	58
Figura 36. Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible.....	63
Figura 37. Las cargas lineales juntas y lo más aisladas posible de las cargas sensibles.....	64
Figura 38. Cargas no lineales con alimentación independiente.....	64
Figura 39. Bloqueo de la propagación de los armónicos del 5° y 7° armónico en la red aguas arribas a través de un transformador con conexión Dyd.....	64
Figura 40. Funcionamiento de un filtro pasivo.....	65
Figura 41. Filtro sintonizado.....	66
Figura 42. Filtro de (a) 2° orden, (b) filtro tipo C y (c) 3 <sup>er</sup> orden.....	67
Figura 43. Funcionamiento de un filtro activo.....	67
Figura 44. Funcionamiento de un filtro híbrido.....	68
Figura 45. Propuesta de utilización de filtros activos, pasivos o híbridos según el $\cos \varphi$ y el orden de los armónicos a mitigar.....	69
Figura 46. Diagrama de bloques de un filtro paso bajo y curva general de respuesta.....	69
Figura 47. Diagrama de bloques de un filtro paso alto y curva general de respuesta.....	69
Figura 48. Diagrama de bloques de un filtro paso banda y curva general de respuesta .....	70
Figura 49. Un filtro paso bajo y un filtro paso alto se puede utilizar para formar un filtro paso banda.....	70
Figura 50. Curva general de la respuesta de un filtro banda eliminada.....	72
Figura 51. Producción siderúrgica en España.....	72



Figura 52. Producción mundial de acero.....	72
Figura 53. Mapa de acerías en España.....	73
Figura 54. Gases ionizados y campo eléctrico entre los electrodos.....	74
Figura 55. Características del arco entre dos electrodos idénticos Fuente: Hornos de arco para fusión de acero.....	75
Figura 56. Horno alto.....	76
Figura 57. Horno de arco de corriente alterna.....	77
Figura 58. Partes principales que constituyen el horno de arco.....	78
Figura 59. Electrodo a alta temperatura en un horno de Finlandia.....	79
Figura 60. Tapa con orificio de los tres electrodos y tubo/codo para salida de humos de la cuba al sistema de filtrado.....	80
Figura 61. Sala de control de acería.....	80
Figura 62. Pulpo electrohidráulico para chatarras.....	81
Figura 63. Cesta llena de chatarra.....	81
Figura 64. Cesta abierta para llenado de la cuba.....	82
Figura 65. Los tres rellenos de la cuba y la variación de la potencia (MW).....	83
Figura 66. Proceso a la salida del horno de cuchara.....	84
Figura 67. Etapas horno de arco eléctrico.....	84
Figura 68. Horno de arco alimentado con corriente alterna (a) y con corriente continua (b).....	85
Figura 69. Hornos de arco de corriente alterna (tres electrodos).....	86
Figura 70. Sistema eléctrico del horno de arco.....	87
Figura 71. Triángulo de potencias.....	88
Figura 72. Curva característica de carga de un HAE .....	89
Figura 73. Potencia activa y reactiva durante una colada completa.....	89
Figura 74. Variación en el tiempo del quinto armónico (a) durante la fusión y (b) durante el refinado...91	
Figura 75. SVC (Static Var Compensator).....	92
Figura 76. Tensión vs tiempo sin SVC y con SVC.....	92
Figura 77. Horno con SVC.....	93
Figura 78. Esquema compensador estático TCR.....	93



---

Figura 79. Capacidad serie (a) y reactancia serie (b) para la mitigación del efecto flicker.....	94
Figura 80. Sistema de compensación de reactiva formado por bobina controlada por tiristores (TCR) y sus filtros en paralelo. ....	100
Figura 81. Filtro pasivo tipo C. ....	101
Figura 82. Filtro pasivo tipo-c y SVC (TCR) en acería con horno de arco eléctrico.....	101
Figura 83. Corriente de red con menos nivel de armónicos como resultado de la suma de la corriente de la carga perturbadora y la corriente aportada por el filtro activo.....	102



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tensión de suministro contratada según potencia requerida.....	18
Tabla 2. Evolución de la demanda desde el año 2008 al 2012.....	19
Tabla 3. Valores de tensiones de armónicos en los puntos de suministro, expresados en porcentaje de la tensión fundamental.....	40
Tabla 4. Frecuencia y secuencia según el orden de los armónicos.....	46
Tabla 5. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión. Órdenes impares múltiplos de 3.....	53
Tabla 6. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión orden par.....	53
Tabla 7. Niveles de compatibilidad para las tasas de distorsión armónicas totales.....	53
Tabla 8. Niveles de distorsión de voltaje permisibles.....	54
Tabla 9. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 120 V a 69 kV.....	54
Tabla 10. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 69 kV a 161 kV.....	54
Tabla 11. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general >161 kV.....	55
Tabla 12. Niveles de compatibilidad de las tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de BT y MT.....	56
Tabla 13. Valores indicativos de niveles de planificación de tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de MT, AT y MAT.....	57
Tabla 14. Toneladas de acero fabricadas en España.....	73
Tabla 15. Características eléctricas horno de arco de 60MVA.....	90
Tabla 16. Contenido armónico en un horno de arco.....	95
Tabla 17. Valores indicativos de niveles de planificación de tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de MT, AT y MAT.....	97
Tabla 18. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución general de 69 kV a 161 Kv..	98
Tabla 19. Presupuesto de la realización del proyecto.....	103



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En todo sistema eléctrico su fiabilidad y su calidad del suministro son aspectos básicos a cuidar. Hay distintos motivos por los que esta calidad se ve mermada, uno de ellos es la creciente utilización de la electrónica de potencia, tanto a nivel usuario como a nivel industrial, ya que muchos procesos dependen de ella para su funcionamiento. Incluso en las fuentes generadoras y en el proceso de transporte se hace utilización de esta tecnología. Por ello se ha visto la necesidad de adoptar medidas y normativas para evitar que estas perturbaciones afecten al resto del sistema eléctrico, así como a las propias instalaciones donde se producen.

La energía eléctrica se genera a una frecuencia nominal y constante de 50Hz o 60 Hz, dependiendo de los sistemas. Pero cuando una fuente de tensión senoidal se aplica a una carga no lineal, la corriente resultante no es una senoide perfecta. Esta corriente crea a su vez una tensión no senoidal, es decir, una tensión con armónicos.

Los armónicos son una de las principales perturbaciones que afectan a la calidad del suministro eléctrico. La norma UNE EN 50160 define la tensión armónica como tensión senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación. Estos armónicos tienen múltiples orígenes y efectos, que en la medida de lo posible se intentan mitigar, gracias a la normativa vigente y a las posibles soluciones existentes como pueden ser los filtros.

En este proyecto fin de carrera se presenta y analizará un caso práctico de una posible solución a los armónicos generados por un horno de arco de corriente alterna ubicado en una acería. Los hornos de arco eléctrico son uno de los principales productores de acero y una de las principales cargas perturbadoras existentes en los sistemas eléctricos. El arco eléctrico del horno proporciona el calor necesario para la fusión del material utilizado, normalmente chatarra.

### 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es el estudio de la calidad de suministro eléctrico, así como la penetración de los armónicos y la mitigación de sus efectos en las plantas industriales.

Se realizará una descripción detallada de los armónicos así como de la normativa vigente, su medida y sus posibles soluciones.



También se describirá el horno de arco eléctrico de corriente alterna, utilizado en acerías para la fusión de chatarra, para dar a conocer una de las principales cargas perturbadoras. Se realizará un caso práctico basado en este horno de arco eléctrico donde se instalará un sistema que mitigue los armónicos creados por él.

### **1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO**

Tras la introducción y los objetivos del PFC, la estructura que sigue el proyecto se detalla a continuación:

- Capítulo 2: Se presenta la actualidad del sistema eléctrico, el mercado eléctrico así como las etapas de generación, transporte, distribución y consumo. Se exponen los distintos tipos de centrales eléctricas.
- Capítulo 3: Se realiza una descripción de la calidad de suministro y se dan a conocer distintas perturbaciones que se dan en la red eléctrica. Se explican los conceptos de la continuidad eléctrica y el mantenimiento preventivo.
- Capítulo 4: Se describen los armónicos, tanto su origen como sus efectos. Se realiza un recorrido sobre distintas normativas a cumplir, así como las técnicas de análisis y medida. Se exponen diversas soluciones que existen para la mitigación de los armónicos.
- Capítulo 5: Se hace una introducción a la siderurgia de arco eléctrico, en concreto se describe el horno de arco eléctrico del corriente alterna como fuente de armónicos y se compara con el alto horno. Para su mayor conocimiento se explica su funcionamiento y su interacción con la red eléctrica.
- Capítulo 6: Se realiza un caso práctico en el que se muestra una posible solución para la mitigación de los efectos de los armónicos creados por un horno de arco eléctrico de corriente alterna.
- Finalmente, se presenta el presupuesto del PFC, las conclusiones obtenidas, las referencias bibliográficas utilizadas durante el desarrollo del trabajo y por último un glosario de términos.



## 2. EL SISTEMA ELÉCTRICO

### 2.1. EL SISTEMA ELÉCTRICO ACTUAL

#### 2.1.1. Regulación del sector eléctrico / El mercado eléctrico

Con la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico (Ley del Sector Eléctrico o LSE) se estableció *“la regulación del sector eléctrico, con el triple y tradicional objetivo de garantizar el suministro eléctrico, garantizar la calidad de dicho suministro y garantizar que se realice al menor coste posible, todo ello sin olvidar la protección del medioambiente”*. Los principios [1] en los que se basa la reforma son:

- a) la separación entre transporte y distribución y generación y comercialización;
- b) la liberalización de la contratación y elección del suministrador de los consumidores finales;
- c) la libertad de acceso a las redes de transporte y distribución a través del pago de peajes;
- d) la aparición del operador del sistema que se encarga de la parte técnica y del operador del mercado encargado de la gestión económica del sistema.

En el año 2003, se aprobó la Directiva 2003/54/CE, donde se hacía hincapié en la liberación del sector eléctrico. Posteriormente la Ley 17/2007, de 4 de julio, donde destaca la eliminación de las tarifas integrales y la introducción de la actividad de suministro de último recurso.

#### A. PRINCIPALES SUJETOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO ESPAÑOL

La **LSE (Ley del Sector Eléctrico)** separó las actividades reguladas (transporte y distribución) de las actividades liberalizadas (generación y comercialización), que son desarrolladas por los operadores en régimen de libre competencia, rigiéndose su retribución por las leyes de la oferta y la demanda.

Los sujetos en el sector eléctrico y sus funciones se establecieron así:

- Los **productores de energía eléctrica** son los que generan la energía eléctrica, construyen, operan y mantienen las centrales de producción. En función de la tecnología de generación utilizada, los productores se dividen en productores del régimen especial y productores del régimen ordinario.
- El **transportista** se encarga de transportar la energía eléctrica, así como construir y mantener instalaciones de transporte.
- Los **distribuidores** son los que distribuyen la energía eléctrica, construyen, mantienen y operan en las instalaciones de distribución.
- Los **comercializadores** tienen como función la venta de energía eléctrica a los consumidores. Aquí también se sitúan los Comercializadores de Último Recurso (CUR), designados por el regulador y se encargan de suministrar energía a aquellos consumidores de la Tarifa de Último Recurso (TUR).



La Directiva 2003/54/CE -y posteriormente la Directiva 2009/72/CE- establece que los Estados miembros deben garantizar que los clientes domésticos, y en su caso las pequeñas empresas, tengan derecho a un suministro de electricidad de una calidad determinada, y a unos precios claramente comparables, transparentes y razonables. En España el SUR (Suministro de Último Recurso) se implantó en el sector de la electricidad el 1 de julio de 2009; consiste en el derecho de determinados clientes (actualmente los de potencia contratada menor o igual a 10 kW) a ser suministrados a precios establecidos por la Administración.

Los comercializadores de último recurso (CUR) actualmente son las siguientes empresas comercializadoras [6]:

- IBERDROLA COMERCIALIZACIÓN DE ÚLTIMO RECURSO, S. A. U. (electricidad y gas)
- ENDESA ENERGÍA XXI, S. L. U. (electricidad y gas)
- GAS NATURAL SUR, SDG, S.A. (electricidad y gas)
- HC- NATURGAS COMERCIALIZADORA DE ÚLTIMO RECURSO, S. A. (electricidad y gas)
- GAS ENERGIA SUMINISTRO SUR, S.L. (gas)
- E.ON COMERCIALIZADORA DE ÚLTIMO RECURSO, S. L. (electricidad)

Es probable que a medio plazo se reduzca el número consumidores con derecho a TUR y se incremente de forma importante el número de clientes suministrados por los comercializadores en libre competencia, siendo los consumidores quienes eligen libremente a su comercializador.

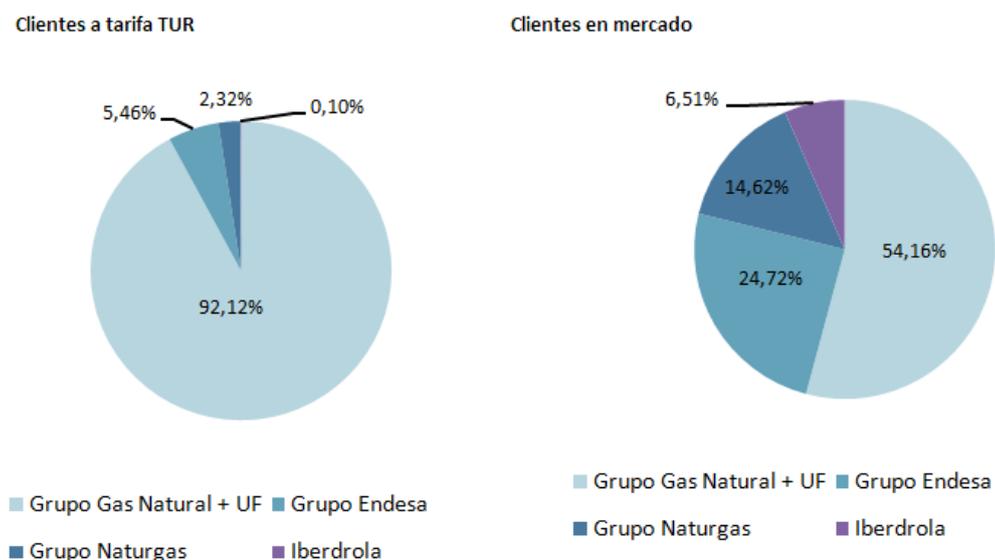


Figura 1. Clientes de la tarifa TUR y clientes de mercado. Fuente: Energía y Sociedad

- a) Los **consumidores** [1] son las personas físicas o jurídicas que compran la energía para su propio consumo. Aquellos consumidores que adquieran energía directamente en el mercado de producción se denominarán Consumidores Directos en Mercado.
- b) El **operador del mercado** (OMEL) es una sociedad mercantil que gestiona el sistema de ofertas de compra y venta de energía eléctrica.
- c) El **operador del sistema** (Red Eléctrica de España) es una sociedad mercantil que tiene como función principal llevar a cabo las actividades asociadas a la operación técnica del sistema eléctrico, garantizando la continuidad y seguridad del suministro eléctrico y la correcta coordinación de los sistemas de producción y transporte.

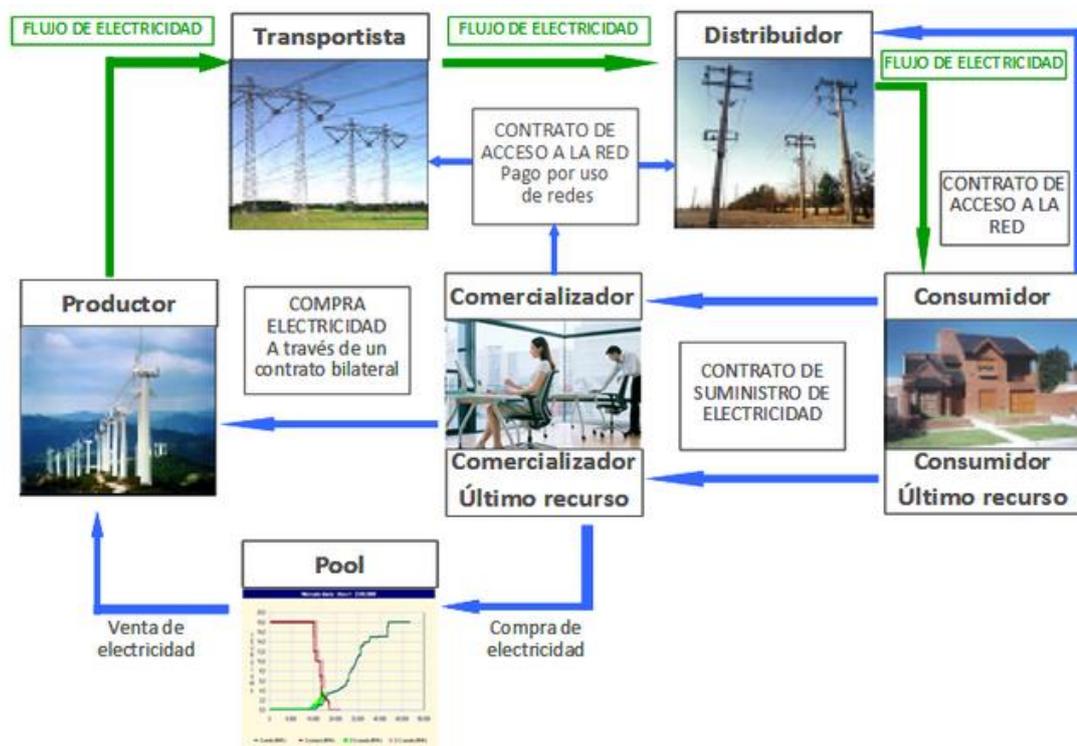


Figura 2. Organización sistema eléctrico español. Fuente: Energía y Sociedad, CNE

## B. PRODUCTORES Y COMERCIALIZADORES

La LSE impone la libertad de acceso a las redes de transporte y distribución, es decir, los agentes (productores, operadores, comercializadores y consumidores) pueden conectarse a las redes a cambio del pago de unos peajes que son fijados y actualizados por el regulador.

Los **productores de energía eléctrica incluidos en el Régimen Ordinario** perciben ingresos por la venta de energía y capacidad en función de los precios fijados en los mercados spot.

Los **productores de electricidad incluidos en el Régimen Especial** gozan de un régimen económico y jurídico distinto al del resto de productores incluidos en el



régimen ordinario. Estos productores pueden elegir entre volcar a la red su producción -a cambio de una tarifa regulada- o bien venderla en el mercado.

Los **comercializadores que operan en el mercado libre** compran energía a precios de mercado y venden esa energía a los consumidores a precios pactados libremente por ambas partes, que incluyen un margen por los servicios prestados.

Los **Comercializadores de Último Recurso**, por otra parte, perciben por la energía que venden a los clientes que se acogen a esta modalidad de consumo un precio fijado por la Administración (la Tarifa de Último Recurso) y se aprovisionan en las subastas de energía para el suministro de último recurso (subastas CESUR) y en el mercado diario de electricidad.

### C. PRINCIPALES INSTITUCIONES NACIONALES

Las instituciones más importantes relacionadas con el sector energético español son las siguientes:

**El Parlamento y el Gobierno.** Establecen la política energética nacional, aprobando las leyes y los reales decretos.

**Ministerio de Industria, Energía y Turismo (MINETUR).** Donde se crean normas en materia energética y se formulan propuestas sobre: estructura de tarifas y precios de los productos energéticos y peajes, la conservación y ahorro de energía, el fomento de energías renovables, planificación en materia energética y aplicación de medidas para asegurar el abastecimiento energético.

**Comisión Nacional de Energía (CNE).** Es un organismo público adscrito al Ministerio de Industria Turismo y Comercio con plena capacidad de actuación en los sectores de electricidad, gas e hidrocarburos.

Sus funciones son, entre otras, la del desarrollo y ejecución de las normas contenidas en los Reales Decretos y Órdenes del Ministerio de Economía; la elaboración de los proyectos sobre determinación de tarifas, peajes y retribución de las actividades energéticas; velar para que los sujetos que actúen en los mercados energéticos lleven a cabo su actividad respetando los principios de libre competencia; resolver los conflictos que le sean planteados respecto de los contratos relativos al acceso a las redes de transporte o en relación con la gestión económica y técnica del sistema y el transporte; inspeccionar las condiciones técnicas de las instalaciones, la continuidad del suministro de energía eléctrica, la calidad del servicio, etc.

## 2.1.2. Generación, transporte, distribución y consumo

En la figura 3 se muestra la constitución del sistema eléctrico.

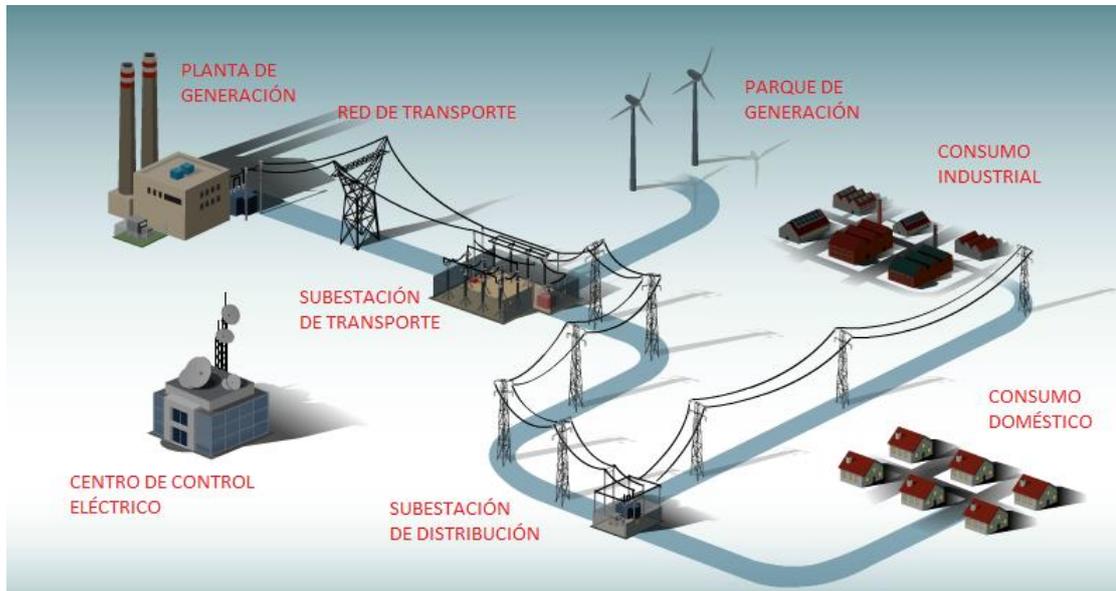


Figura 3. El sistema eléctrico. Fuente: Red Eléctrica de España

### A. Generación

Consiste en la producción de energía eléctrica. Suele estar en lugares apartados de los centros de consumo, cerca de las fuentes de energía.

### B. Transporte

Es la transmisión de energía eléctrica con el fin de suministrarla desde los centros productores hasta las zonas consumidoras.

En España el transporte se realiza a 400 y 220 kV. Suele realizarse a tensiones muy elevadas para así reducir las pérdidas. Esta red de transporte está formada por las líneas aéreas (conductor de aluminio – acero) y cables (normalmente de cobre o aluminio), y las subestaciones de transporte o interconexión, cuya función consiste en conectar varios elementos de la red. En la figura 4 que se muestra a continuación pueden observarse los diferentes tipos de torres metálicas de alta tensión.

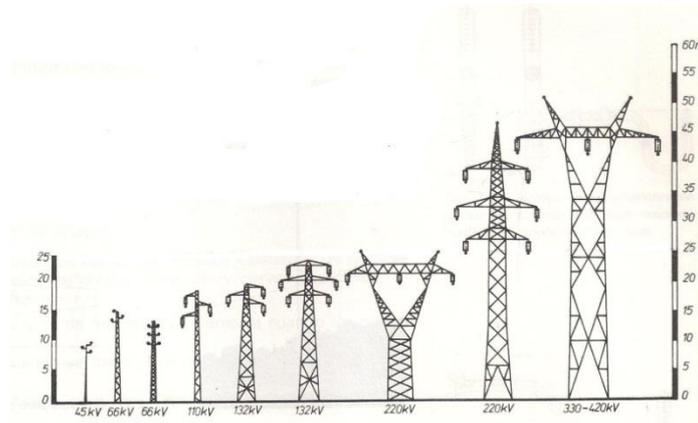


Figura 4 Torres metálicas alta tensión y muestra de la altura y tensión que soportan. Fuente: Tecnología Electricidad. Ed. edebé

Hasta esta subestación llegan altas tensiones (220-400kV) y en ella se reducen estos niveles para poder iniciar su transporte como se muestra en la figura 5.

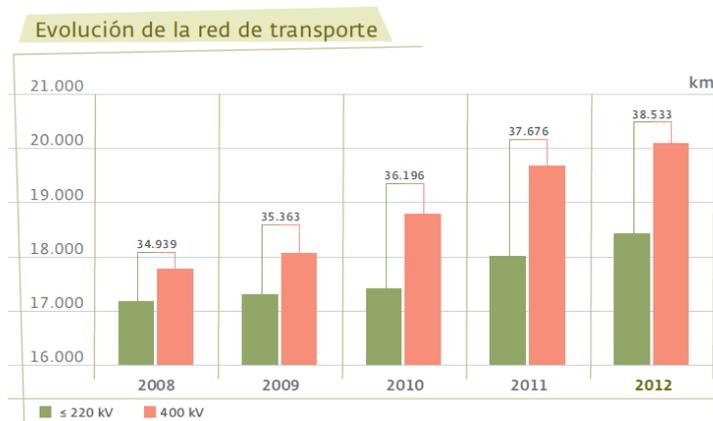


Figura 5 Evolución en km de la red de transporte desde el 2008 al 2012 en tensiones menores o iguales a 220kV y en 400 kV. Fuente: Red Eléctrica de España

### C. Distribución

Su actividad básica es el suministro de energía eléctrica desde la red de transporte hasta los consumidores finales.

Se centra en la construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones de distribución destinadas a suministrar la energía eléctrica en los puntos de consumo. En este punto se encuentran con las subestaciones de distribución a una tensión máxima de 132kV y pueden distribuir desde esa misma cantidad a 15-20kV e incluso a tensiones menores.

Estos usuarios o clientes finales pueden ser industrias o consumo doméstico que requiere baja tensión a 380V (entre fase y fase) o 220V (entre fase y neutro). En ocasiones, se suministra directamente a las industrias desde las centrales de transporte o interconexión.



Las industrias por lo general se alimentan a los niveles de 132kV, 66kV, 45kV y 20kV según la potencia que necesiten para realizar sus operaciones. Las industrias siderúrgicas que se abordarán más adelante se suelen alimentar a 220kV y 132kV.

La tensión de suministro va en función de la potencia contratada, como se indica en la tabla 1.

POTENCIA CONTRATADA	TENSIÓN DE SUMINISTRO
Hasta 20 MW	22 kV
de 20MW a 50 MW	66 kV
A partir de 50MW	132 kV

Tabla 1. Tensión de suministro contratada según potencia requerida. Fuente: Iberdrola S.A.

El centro de control eléctrico es el encargado de la coordinación en tiempo real de las instalaciones de generación y transporte.

#### D. Consumo

Debido a que la energía eléctrica únicamente es almacenable a una escala tan pequeña [1] que resulta inservible para casi cualquier propósito práctico, debe existir un equilibrio constante entre demanda y generación. Se ha de elaborar informes de las previsiones de evolución de la demanda eléctrica a medio y largo plazo. Estas previsiones son fundamentales para la elaboración de los planes de desarrollo de la red de transporte para los próximos años, aprobados por Minetur.

La gestión de la demanda es la planificación e implementación de distintas medidas destinadas a influir en el modo de consumir energía para que se modifique el perfil de consumo diario. Estas medidas contribuyen a:

- la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>
- a la mejor integración de las energías renovables en el sistema eléctrico
- a una mayor eficiencia energética del sistema en su conjunto

El consumo de energía final en España [5] durante 2011 fue un 4,4% inferior al de 2010. Esta evolución se ha debido a la situación económica, junto con las distintas condiciones climáticas y de la actividad laboral entre los dos años.

Después del incremento del año 2010, se ha producido un descenso de la demanda energética en la industria en 2011, al bajar su actividad, que continúa en 2013. El IRE (Índice Red Eléctrica) es el índice de consumo eléctrico de grandes consumidores y muestra que en el último año ha descendido un 1,7 % el consumo eléctrico del conjunto de empresas que tienen un consumo eléctrico medio/alto, o lo que es lo mismo, una potencia contratada de más de 450 kW.

En los sectores residencial y terciario, la demanda ha bajado por la menor actividad. Al igual que en el transporte.

En la figura 6 se resume el consumo de energía en España atendiendo al origen de la misma.

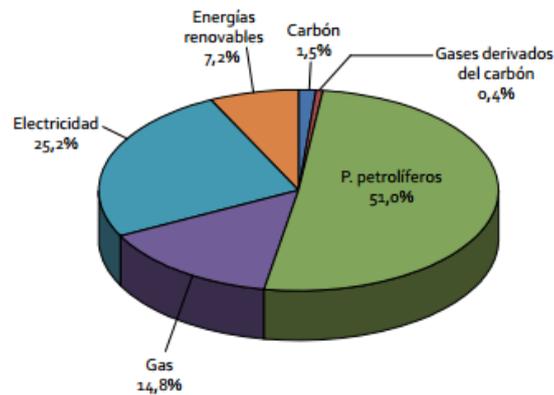


Figura 6. Consumo de energía en España en el año 2011. Fuente: Minetur

La demanda final de energía eléctrica a nivel peninsular en 2012 fue de 252.191GWh, que supone un descenso del 1.2% respecto a la del año anterior y de un 3.2% frente al año 2010. Como se puede ver en la siguiente tabla, el año 2009 sufrió un descenso del 4.7% respecto a 2008 debido a la crisis económica.

### Evolución de la demanda

Año	GWh	$\Delta$ Anual (%)	$\Delta$ Anual corregido <sup>(*)</sup> (%)
2008	265.206	1,1	0,7
2009	252.660	-4,7	-4,7
2010	260.530	3,1	2,7
2011	255.373	-2,0	-1,1
<b>2012</b>	<b>252.191</b>	<b>-1,2</b>	<b>-1,7</b>

(\*) Por los efectos de laboralidad y temperatura.

Tabla 2. Evolución de la demanda desde el año 2008 al 2012

Fuente: Red Eléctrica de España. Avance del informe 2012

En la figura 7, que aparece a continuación, se puede visualizar cómo, desde el año 2010, en España está disminuyendo progresivamente la demanda de potencia media horaria y de energía diaria.

Máxima demanda de potencia media horaria y de energía diaria

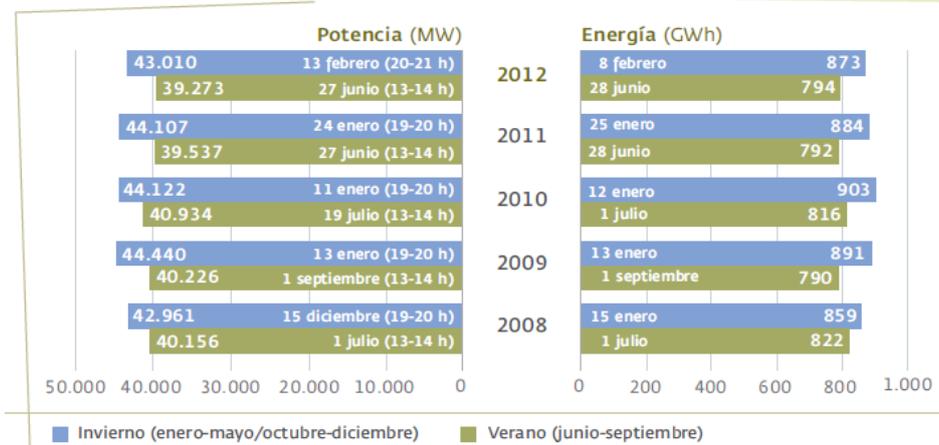


Figura 7. Máxima demanda de potencia media horaria y de energía diaria.

Fuente: Red Eléctrica de España. Avance del informe 2012

En el año 2011, según información de UNESA, se ha estimado la siguiente distribución sectorial del consumo que muestra la figura 8:

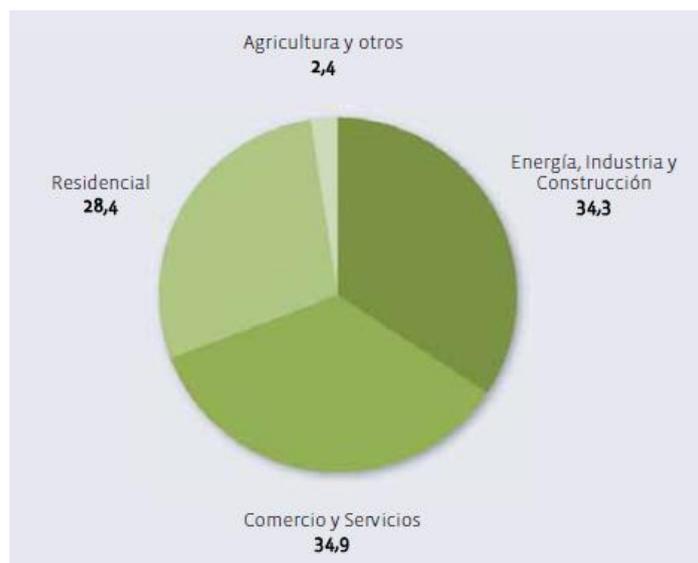


Figura 8. Demanda de energía eléctrica por sectores. Fuente: Unesa

En dicho año el número de clientes del mercado eléctrico fue de 27,2 millones, de los cuales el 99,6% tiene su suministro en baja tensión. En el año 2011 el número de clientes sufrió una caída del 1,6%.

En el bloque de alta tensión, entre los años 2001 y 2011, la potencia contratada por cliente oscilaba alrededor de los 305 MW.

Otra información de interés está recogida en la página web de Red Eléctrica, donde se representa en gráficos, la demanda de energía que se está produciendo en el sistema eléctrico peninsular en tiempo real (Figura 9). Incluye datos de la demanda



real, prevista y programada así como los valores de máximos y mínimos de la demanda diaria. Además hace una previsión de la demanda.

Junto a las curvas, se presenta información de las distintas tecnologías de producción o componentes de generación necesarios para cubrir la demanda en tiempo real, incluyendo la energía destinada a la exportación y a los consumos en bombeo.

La demanda real (curva amarilla) refleja el valor instantáneo de la demanda de energía eléctrica.

- La previsión de la demanda (curva verde) es elaborada por Red Eléctrica con los valores de consumo en periodos precedentes similares, elaborándola con una serie de factores que influyen en el consumo como son la actividad laboral, la climatología y la actividad económica.
- La programación horaria operativa (línea escalonada roja) es la producción programada para los grupos de generación a los que se haya adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados diario e intradiario, así como en los mercados de gestión de desvíos y regulación terciaria. Estos dos últimos son gestionados por Red Eléctrica teniendo en cuenta la evolución de la demanda.

En la figura 9 queda recogido lo anteriormente expuesto.

Junto a la estructura de generación se presenta el total de emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por el parque de generación peninsular español y el detalle por fuentes de energía. Son calculadas asociando a cada tecnología el factor de emisión recogido en el Plan Español de Energías.

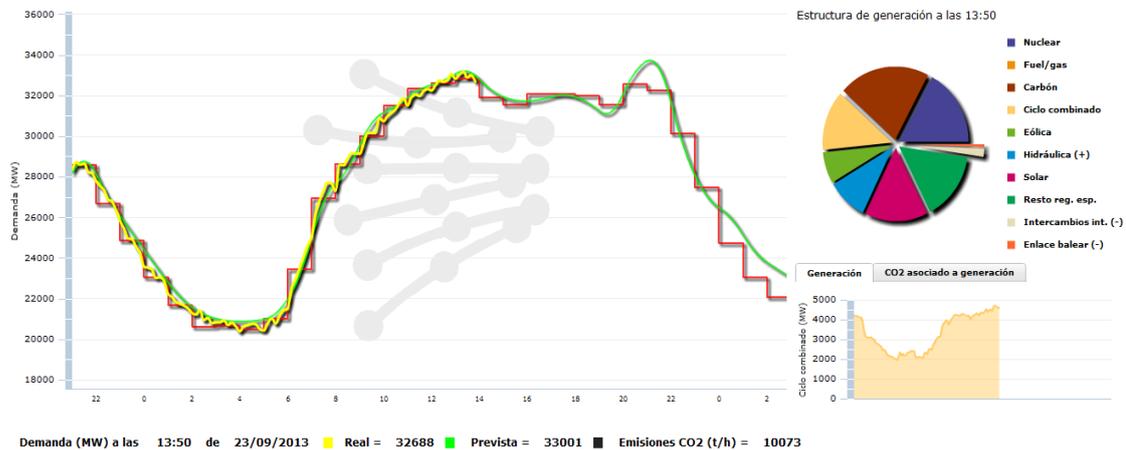


Figura 9. Demanda de energía eléctrica en tiempo real. Fuente: Red Eléctrica de España

### 2.1.3. Las centrales eléctricas

Son las instalaciones en la que se produce la energía eléctrica. Aunque se pueden encontrar diferentes formas de clasificar las centrales, la más aceptada lo hace en cuatro grandes grupos:

#### 2.1.3.1. Centrales hidroeléctricas

##### A. Centrales hidroeléctricas convencionales

Su producción de electricidad se basa en la transformación de la energía cinética [2] de un cierto caudal de agua que mueve una turbina hidráulica, en energía eléctrica. La energía cinética del agua puede obtenerse directamente del caudal de un río o bien aprovechando o creando un desnivel suficiente en su cauce mediante una presa o un canal. En la figura 10 quedan representadas las partes fundamentales de una central hidroeléctrica.

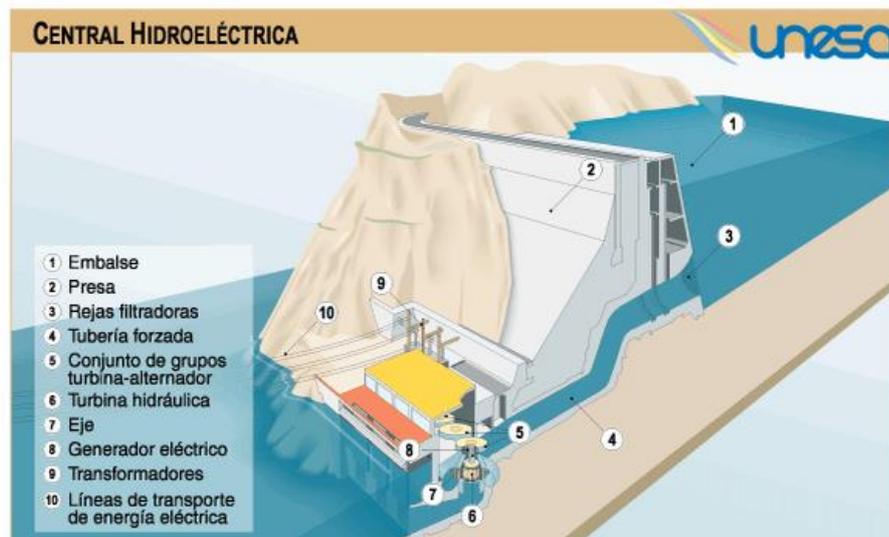


Figura 10. Esquema de una central hidroeléctrica. Fuente: Unesa

##### B. Centrales hidroeléctricas de bombeo

La central hidroeléctrica de bombeo simbolizada en la figura 11 es un tipo especial de central hidroeléctrica que tiene dos embalses. El agua contenida en el embalse situado en el nivel más bajo, es bombeada durante las horas de menor demanda eléctrica al embalse superior. Almacenan electricidad en forma de agua embalsada en el depósito superior. Es en la actualidad la forma más económica de almacenar energía eléctrica.



Figura 11. Esquema de una central hidroeléctrica de bombeo. Fuente: Unesa

### 2.1.3.2 Centrales térmicas

#### A. Centrales térmicas convencionales

Las centrales térmicas convencionales producen energía eléctrica a partir de la quema de combustibles fósiles, como son el carbón, el fuelóleo o el gas. El vapor de agua a alta presión acciona la turbina de vapor, convirtiendo la energía calorífica en energía mecánica, la cual da lugar a energía eléctrica. En la figura 12 se representan las partes fundamentales de este tipo de centrales.

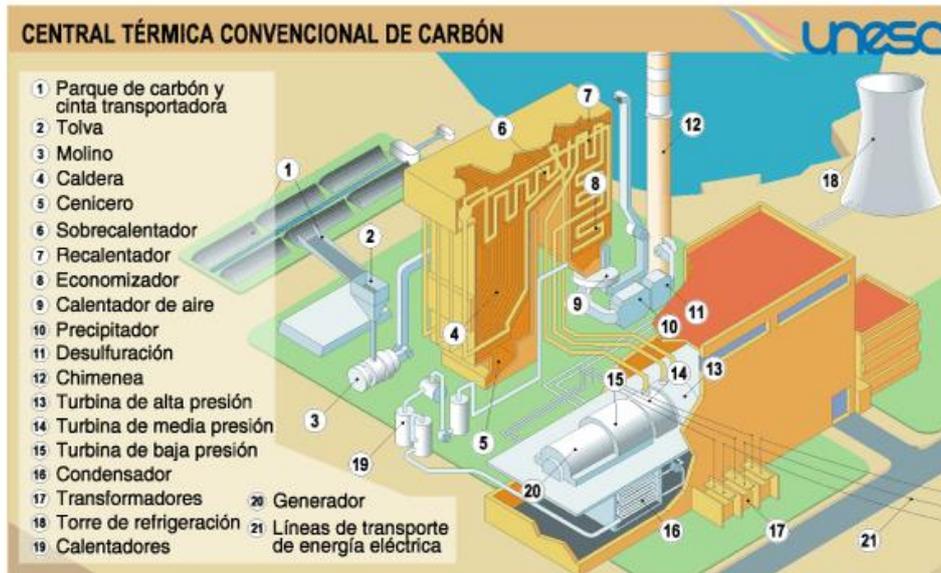


Figura 12. Esquema de una central térmica convencional de carbón. Fuente: Unesa

## B. Centrales de biomasa

Utilizan la biomasa para la producción [3] de electricidad. Tienen un ciclo térmico parecido al de las centrales térmicas convencionales: la energía calorífica es transformada en energía mecánica rotatoria mediante una turbina y, posteriormente, en energía eléctrica a través de un generador. La principal diferencia está en que el combustible principal utilizado son principalmente los residuos forestales, los cultivos de plantas energéticas, o los residuos agrícolas. Se pueden observar las partes de esta central en la figura 13.

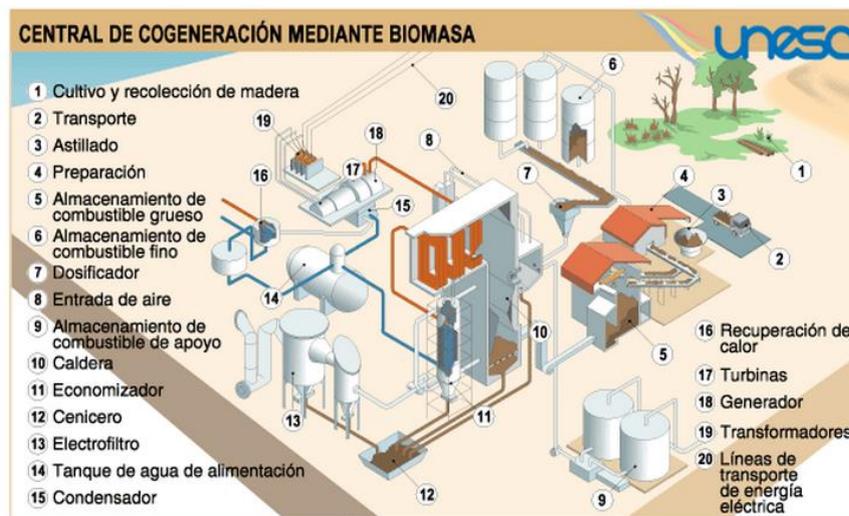


Figura 13. Esquema de una central de cogeneración mediante biomasa. Fuente: Unesa

## C. Centrales de residuos sólidos urbanos (RSU)

Utilizan la misma manera de generar electricidad que las centrales de biomasa, y únicamente se diferencian en los combustibles utilizados. Las partes de esta central se observan en la figura 14.



Figura 14. Esquema de una central incineradora de residuos sólidos urbanos. Fuente: Unesa

#### D. Centrales térmicas de ciclo combinado

Tienen un mejor aprovechamiento de la energía que en los ciclos térmicos convencionales, porque utilizan dos ciclos termodinámicos:

- Un primer ciclo Bryton, para la combustión del gas natural en una turbina de gas.
- Un segundo ciclo de vapor (convencional), que aprovecha el calor residual de los gases para generar vapor y expandirlo en una turbina de vapor.

La turbina de gas consta de un compresor de aire, una cámara de combustión y la cámara de expansión. El compresor comprime el aire a alta presión para mezclarlo posteriormente en la cámara de combustión con el gas. En esta cámara se produce la combustión del combustible en unas condiciones de temperatura y presión que permiten mejorar el rendimiento del proceso, con el menor impacto ambiental posible. Consta de diferentes elementos que se pueden ver en la figura 15.



Figura 15. Esquema de una central de ciclo combinado. Fuente: Unesa

#### E. Centrales de gasificación integrada con ciclo combinado

Utilizan combustibles (carbón, coque de petróleo, etc.) que son primero gasificados en la propia central. El gas obtenido se expande posteriormente en una turbina de gas y se aprovecha el calor para alimentar una turbina de vapor. La energía eléctrica final que se produce es la suma de la generada en el grupo tradicional y de la producida en la unidad de gas.

Las diferentes partes de esta central quedan expuestas en la figura 16.



Figura 16. Esquema de central de gasificación integrada con ciclo combinado. Fuente: Unesa

### 2.1.3.3. Centrales nucleares

Son un tipo de centrales de producción de energía eléctrica similares a las centrales térmicas convencionales y se basan en un ciclo de agua/vapor en el que una turbina de vapor mueve el alternador que genera la energía eléctrica. La diferencia está en la caldera en la que se quema el combustible para producir ese vapor y que en las centrales nucleares es el reactor nuclear; en él, la energía liberada por la fisión de los núcleos de uranio del combustible es la que produce el calor necesario para generar el vapor.

Los elementos más representativos de este tipo de central se encuentran en la figura 17.

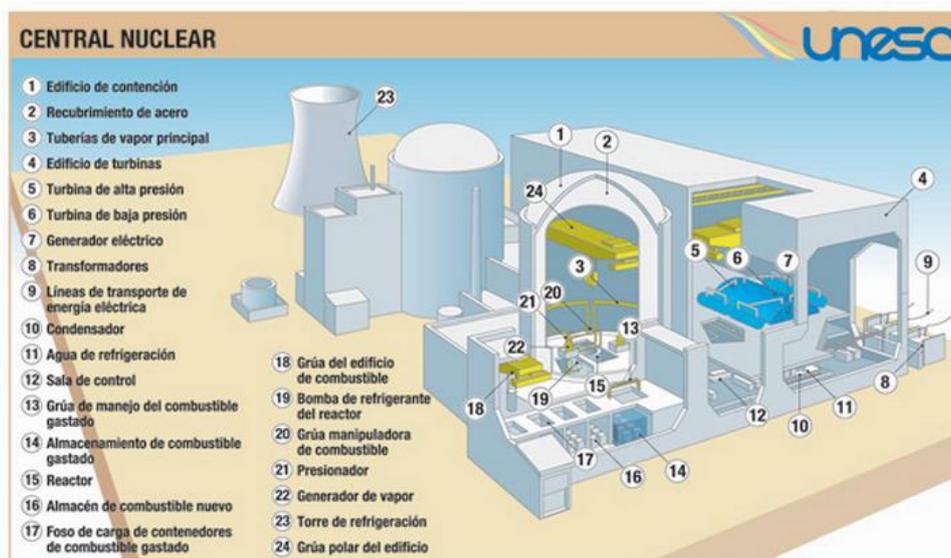


Figura 17. Esquema de una central nuclear. Fuente: Unesa

### 2.1.3.4. Centrales de energías renovables

#### A. Centrales eólicas

Consiste en que la energía del viento se transforma directamente en energía mecánica rotatoria mediante un aerogenerador, como se indica en la figura 18.

Actualmente se basa en su transformación en electricidad a través de los aerogeneradores que convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Se pueden agrupar varios aerogeneradores, formando parques eólicos.

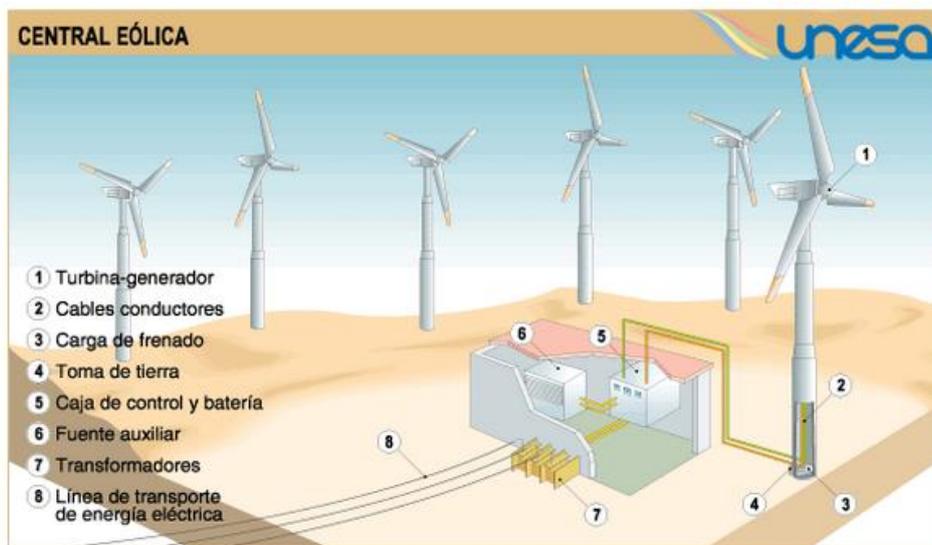


Figura 18. Esquema de una central eólica .Fuente: Unesa

#### B. Centrales solares

Existen dos tipos de centrales solares:

- **Solares foltovoltaicas:** conjunto de células fotovoltaicas, que captan la energía solar, transformándola en corriente eléctrica, como en la figura 19.



Figura 19. Esquema de una central foltovoltaica. Fuente: Unesa

- **Solares térmicas:** la energía del sol calienta un fluido que, a su vez, transforma en vapor un segundo fluido que circula por una serie de conductos. Es un proceso parecido al de las centrales termoeléctricas convencionales: la energía calorífica es transformada en energía mecánica mediante una turbina y, posteriormente, en energía eléctrica mediante un alternador.

Sus partes quedan representadas en la figura 20:

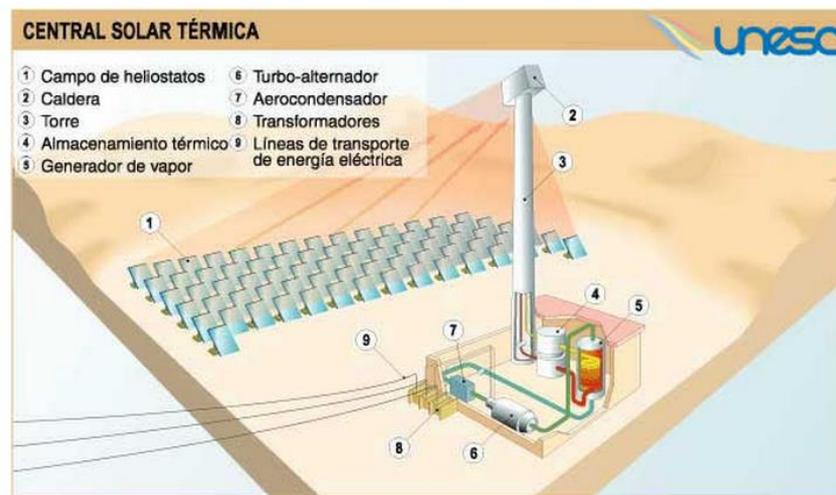


Figura 20. Esquema de una central solar térmica. Fuente: Unesa

La diferencia es que, mientras en las centrales termoeléctricas convencionales el foco calorífico se consigue por medio de la combustión de una fuente fósil de energía (carbón, gas, fuelóleo), en las solares se obtiene mediante la acción de la radiación solar que incide sobre un fluido.

En la figura 21 que se muestra a continuación se recoge el porcentaje de potencia que aportan los diferentes tipos de centrales a la potencia total en el año 2012.

Potencia instalada a 31 de diciembre del 2012 (102.524 MW)

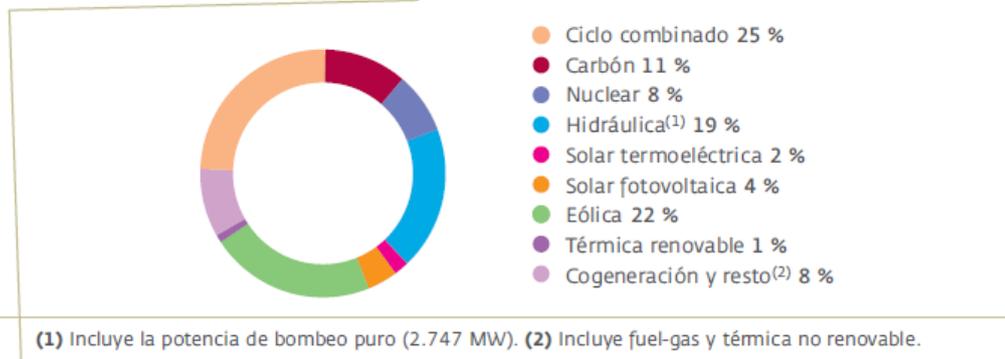


Figura 21. Potencia instalada a 31 de diciembre del 2012. Fuente: Red Eléctrica de España. Avance del informe 2012

### 3. CALIDAD DE SUMINISTRO

#### 3.1. DEFINICIÓN

La calidad de servicio es el conjunto de características técnicas y comerciales que son exigidas por los sujetos, clientes y por la Administración como se muestra la figura 22.

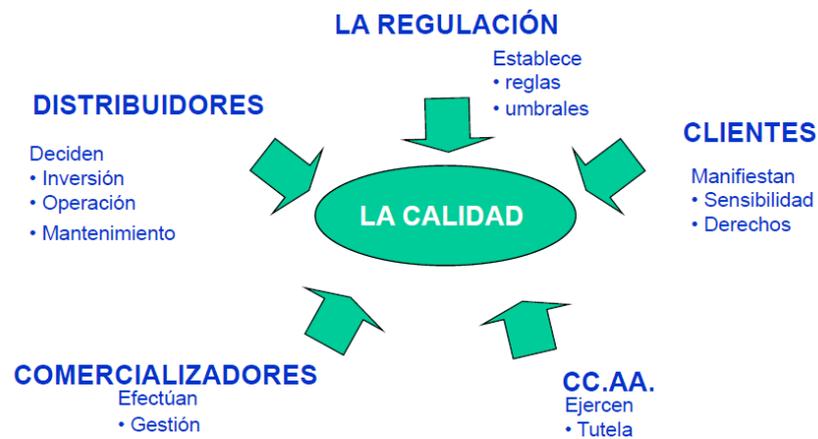


Figura 22. Calidad de servicio. Fuente: CNE

La continuidad de suministro se define con la duración y número de las interrupciones del suministro. Su objetivo principal [13] es limitar a un máximo permisible los periodos y número de interrupciones que puedan afectar al consumo conectado a una red de distribución y transporte.

La calidad del producto es el conjunto de características de la onda de tensión, las cuáles se ven afectadas por las variaciones del valor eficaz de la tensión, la frecuencia y por los huecos de tensión.

La calidad en la atención y relación con el cliente: su objetivo es establecer los plazos con carácter de máximos para las respuestas que debe proporcionar la distribuidora las solicitudes, reclamaciones, consultas y peticiones de información.

Según la estimación realizada por la organización “The Leonardo Power Quality Initiative” [10], la mala calidad de la energía cuesta a la industria y al comercio en la Unión Europea cerca de 10.000 millones de euros al año, mientras que sólo se invierten en medidas preventivas menos de un 5% de esa cantidad.

La calidad de la energía eléctrica [11] es la ausencia de interrupciones, sobretensiones, armónicos y variaciones de tensión en la señal eléctrica suministrada al usuario.

Esta calidad se ha visto mermada al aparecer cargas sensibles en los sistemas eléctricos, se suelen llamar cargas perturbadoras, y normalmente tienen características no lineales. La conexión de dispositivos de electrónica de potencia a elementos de distribución, ha provocado un aumento en la distorsión de la tensión y de la corriente.



La calidad de la energía [12] se está convirtiendo en un tema estratégico para las compañías del sector eléctrico esencialmente por los siguientes motivos:

- La necesidad económica de aumentar la competitividad.
- La generalización del uso de equipos sensibles a las perturbaciones y el uso cada vez más frecuente de cargas no lineales.
- La liberalización del mercado eléctrico.

Por ello cada vez es más importante la optimización del funcionamiento de las instalaciones eléctricas. Con la posibilidad de elegir proveedor de energía, la calidad de la energía eléctrica es un factor diferencial y su garantía es un factor importante a la hora de la elección.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

La potencia de cortocircuito  $S_{cc}$  en un punto determinado de la red [67], viene definida por:

$$S_{cc} = UI_{cc}\sqrt{3}$$

Siendo  $U$  el valor eficaz de la tensión nominal de la red a la que pertenece ese punto e  $I_{cc}$  la intensidad de cortocircuito correspondiente a ese nudo.

Esta expresión de la potencia de cortocircuito implica, por definición, que  $S_{cc}$  es variable, en un punto determinado de la red, ya que depende de la impedancia de la red y de la generación acoplada en cada momento. Así,  $S_{cc}$  es la potencia de cortocircuito en un determinado nudo o punto de la red, y se mide en kVA o MVA.

Un valor típico para una red de distribución en media tensión, es de 500 MVA.

Es de gran importancia para identificar la robustez de la red del sistema eléctrico, ya que cuanto más robusta sea, mayor será su capacidad de soportar las perturbaciones eléctricas existentes. Esta robustez es mayor conforme aumenta la potencia de cortocircuito en el nudo de la red. Dicha capacidad permite disponer de una elevada calidad de suministro, cuando el nudo o punto del sistema tiene una elevada  $S_{cc}$ . Las perturbaciones armónicas generales [22] aumentan a medida que disminuye la potencia de cortocircuito.

Es tal la importancia, que en España [5] se realizan grandes inversiones económicas para disponer de una red robusta, mallada y fiable.

### 3.3. CALIDAD ONDA/PRODUCTO

Se pueden producir cuatro tipos de perturbaciones eléctricas basadas en la señal de alimentación de tensión o corriente [6]:

### 3.3.1. Perturbaciones de amplitud

Se producen cuando sobre la señal existen variaciones de tensión.

La figura 23 muestra una representación de las variaciones de tensión que se pueden producir en el suministro de electricidad, debido a las perturbaciones eléctricas.

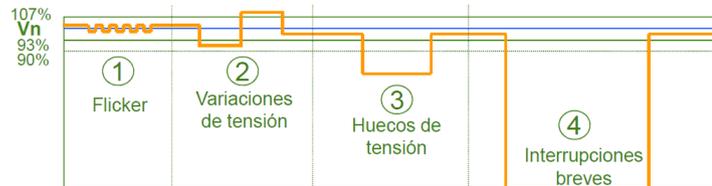


Figura 23. Variaciones de tensión. Fuente: [2]

Entre ellos existen:

- Los huecos de tensión: se entiende como la disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado [14] entre el 90% y el 1% de la tensión de alimentación, representada en la figura 24.

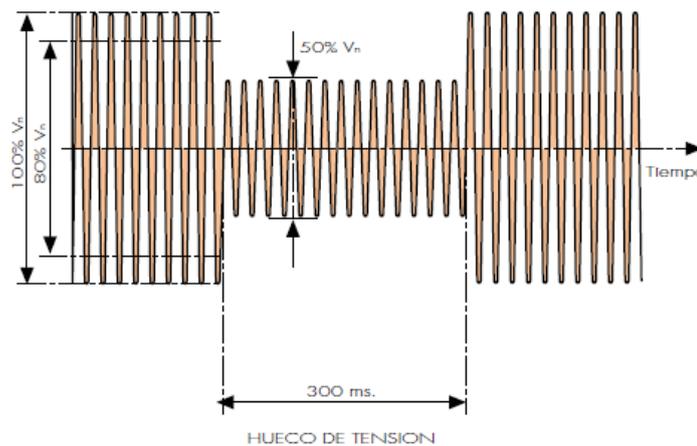


Figura 24. Hueco de tensión. Fuente: [6]

- Interrupción de la alimentación: ocurre cuando la tensión es inferior al 1% de la tensión de alimentación.
- Sobretensión: aumento temporal [9] del valor eficaz de la tensión en un punto de la red de alimentación eléctrica por encima de un umbral inicial especificado siendo este el 110 % de la tensión de referencia, como se muestra en la figura 25:

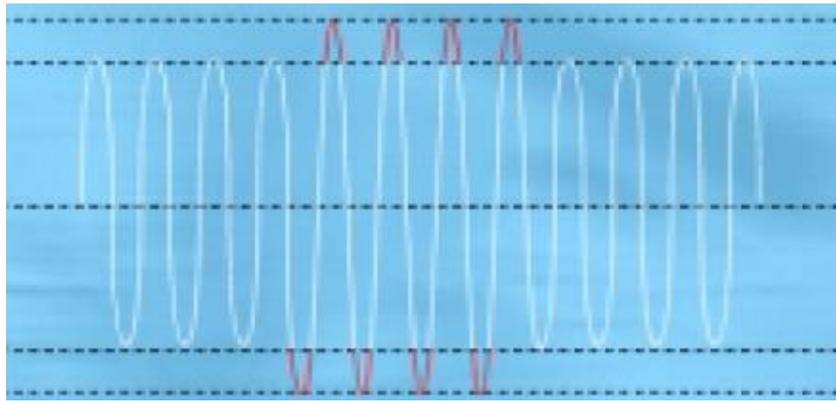
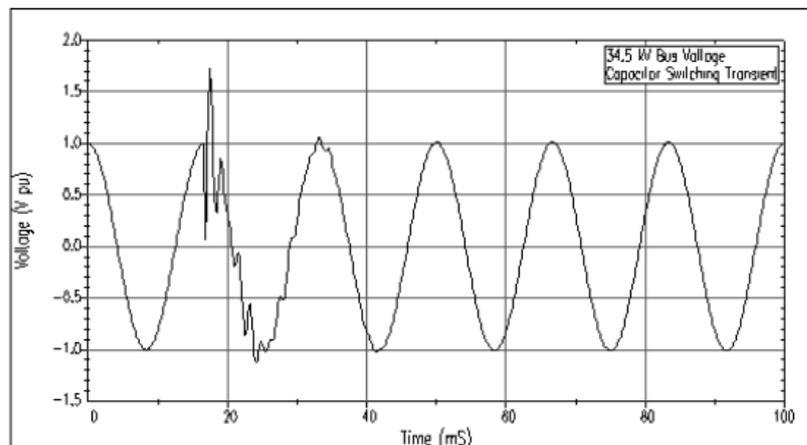


Figura 25. Sobretensión. Fuente: [12]

- Transitorios: son sobretensiones de corta duración que duran como máximo algunos milisegundos. Los transformadores y motores soportan bien estos impulsos pero su vida útil puede verse afectada. A este tipo de perturbaciones son muy sensibles los equipos de electrónica de potencia, fuentes de alimentación, etc. En la figura 26 se representa la tensión y el tiempo en milisegundos para observar los transitorios medidos en la energización de un banco de condensadores.



Low Frequency Oscillatory Transient Caused by Capacitor-Bank Energization

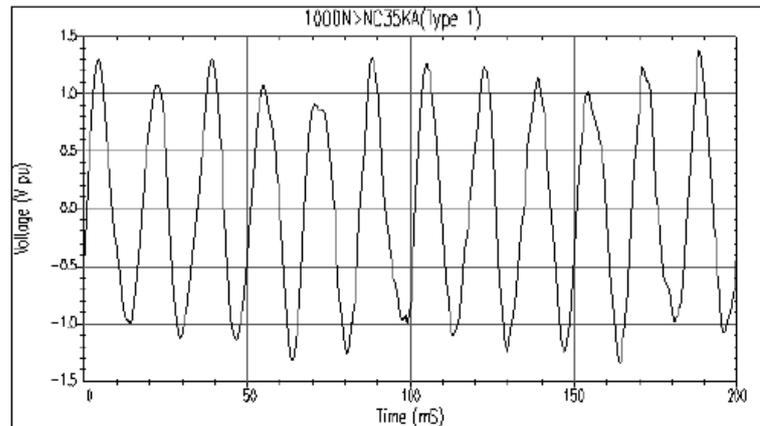
Figura 26. Transitorio de tensión. Fuente: Norma IEEE Estándar 1159

- Flicker: también llamado parpadeo, son fluctuaciones rápidas de tensión de pequeña amplitud. Representado en la figura 27.  
El horno de arco es el principal generador de flicker. Su normal funcionamiento provoca unas fluctuaciones de tensión, que se sienten tanto más cuanto más elevada es la potencia de los hornos.

En esta definición del flicker sólo se incluyen las fluctuaciones:

- de amplitud < 10%,
- de período < 1 hora.

Normalmente estas fluctuaciones son provocadas por la variación fluctuante de potencia que absorben diversos receptores: hornos de arco, máquinas de soldar, motores, etc. Y pueden provocar variaciones de luminancia en lámparas [9].



Voltage Flicker Caused by Arc Furnace Operation

Figura 27. Flicker, variación de tensión en la operación de un horno de arco. Fuente: Norma IEEE Estándar 1159

### 3.3.2. Perturbaciones de frecuencia

Son variaciones [6] en la frecuencia de la señal. Y su principal origen son las averías en los sistemas de producción y transporte de energía eléctrica. Provocan el mal funcionamiento de motores síncronos y asíncronos.

### 3.3.3. Desequilibrios de tensión o corriente

Los desequilibrios de tensión se producen cuando en un sistema trifásico hay diferencias entre los valores eficaces de las tensiones en cada una de las tres fases (R,S,T). Los de corriente cuando la intensidad que circula por las tres fases no es igual, lo que provoca que por el neutro la corriente no sea cero.

### 3.3.4. Perturbación en la forma de onda: Armónicos e interarmónicos

Una perturbación armónica es una deformación de la forma de onda respecto a la senoidal pura teórica. Las perturbaciones de la forma de onda se deben sobre todo a la conexión de equipos cuya relación tensión-corriente no es lineal. Tanto los armónicos como los interarmónicos son perturbaciones de baja frecuencia ( $f < 2500$  Hz).

- Interarmónicos: son tensiones o corrientes cuya frecuencia [39] es un múltiplo no entero de la frecuencia fundamental de suministro. Han adquirido mayor importancia desde la presencia cada vez más habitual de la electrónica de potencia en las instalaciones industriales.

Entre las fuentes básicas de esta perturbación se encuentran los arcos eléctricos y los convertidores estáticos. La figura 28 muestra la existencia de interarmónicos en un horno de arco eléctrico, donde predominan más en la fase inicial de la fusión.

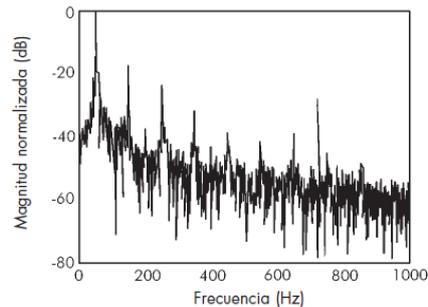


Figura 28. Espectro de armónicos e interarmónicos en un horno de arco eléctrico. Fuente: [39]

Se ampliará la información sobre los armónicos en el punto 4 del proyecto.

### 3.4. CALIDAD DE SERVICIO Y CONTINUIDAD DEL SUMINISTRO

La normativa aplicable a nivel estatal en España sobre calidad del suministro eléctrico está formada por:

- Ley 54/1997 del Sector Eléctrico.
- Real Decreto 1955/2000.
- Norma europea UNE-EN 50160.

A continuación se hará una descripción de las anteriores normas.

#### Ley 54/1997 del Sector Eléctrico [7]

En esta ley, en el capítulo de suministro eléctrico, se define que el suministro de la energía se hace por las empresas que tengan autorizaciones con las características y continuidad según la zona del territorio nacional. Y estas empresas deben tener el personal y los medios necesarios para garantizar la calidad del servicio.

La Administración General del Estado establece las líneas de actuación en materia de calidad de servicio, para ello se crean programas de actuación en colaboración con las Comunidades autónomas. Asimismo, determina unos índices de calidad de



servicio y unos valores o márgenes en los que pueden moverse y que deben cumplirse. Estos índices tienen en cuenta:

- La continuidad del suministro, refiriéndose al número y duración de las interrupciones.
- La calidad del producto, refiriéndose a las características de la tensión.

El suministro de energía eléctrica sólo podrá suspenderse cuando exista dicha posibilidad en el contrato de suministro o por causa de fuerza mayor o situaciones de las que se puedan derivar amenaza para la seguridad de las personas o cosas. No obstante, podrá suspenderse temporalmente cuando sea imprescindible para el mantenimiento, seguridad del suministro, reparación de instalaciones o mejora del servicio. La suspensión requerirá autorización administrativa y comunicaciones a los usuarios de forma reglamentaria.

Las instalaciones de producción, transporte y distribución de energía eléctrica; los equipos de consumo; y partes técnicas, deben cumplir las reglamentaciones de seguridad y calidad industriales:

- Proteger las personas y bienes que pueden ser afectados por las instalaciones
- Conseguir regularidad en el suministro eléctrico
- Facilitar la inspección de instalaciones
- Mejorar el aprovechamiento técnico/económico de las instalaciones
- Facilitar una mayor fiabilidad de las instalaciones
- Lograr una mayor calidad de los suministros
- Proteger el medio ambiente
- Defender los derechos de los consumidores y usuarios
- Conseguir mejoras en eficiencia energética

#### Real Decreto 1955/2000 [8]

En España la calidad del suministro viene definida en el *Real Decreto 1955/2000* por el que se regulan las actividades del transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. Además, determina que la calidad del producto seguirá los criterios de la norma europea UNE-EN 50160, cuya última actualización vigente es del año 2011.

La calidad de servicio comprende tres puntos básicos:

- Continuidad del suministro eléctrico, referido al número y duración de las interrupciones.
- Calidad del producto, relativo a las características de la onda de tensión.
- Calidad de atención y relación con el cliente, ya sea información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

La calidad de servicio en la red de transporte será de aplicación a los transportistas, el operador del sistema, el gestor de la red de transporte y los agentes conectados



a la red de transporte del sistema eléctrico (productores, autoproductores, distribuidores y consumidores conectados a la red). Las instrucciones técnicas complementarias, los índices y procedimientos de cálculo y medida de calidad de servicio deben ser las que aprueba el Ministerio de Economía.

La calidad de servicio se basa en:

- La continuidad del suministro. Se refiere a las veces y duración de las interrupciones tanto en la distribución como en los consumidores conectados a la red de transporte.
- Calidad del producto. Basándose en las características de la onda de tensión.
- Indisponibilidad de las instalaciones de la red de transporte.
- Niveles de tensión y frecuencia de los puntos de frontera del transporte.

La continuidad del suministro de la energía eléctrica se refiere al número de interrupciones y a la duración de las mismas, que se mide en los parámetros:

- a) Tiempo de interrupción: medido en minutos desde que se inicia hasta que finaliza. El total es la suma de todos los tiempos de interrupción.
- b) Número de interrupciones: la suma de dichas interrupciones en un periodo de tiempo.

En ocasiones se programan interrupciones para realizar trabajos en la red; para ello deben ser reconocidos tanto el operador del sistema como el gestor de la red de transporte, y comunicadas por los transportistas al órganos competente de la administración autonómica y a los clientes conectados a la red.

No se consideran las interrupciones de duración inferior a un minuto, pues se deben a la correcta actuación de las protecciones del sistema de transporte.

“La calidad del producto hace referencia al conjunto de características de la onda de tensión. Los índices de calidad del producto de establecerán en las Instrucciones Técnicas Complementarias correspondientes”

La *Calidad de servicio* se refiere al “conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración”.

La calidad del servicio se basa en:

- Continuidad del suministro, referente al número de interrupciones y su duración.
- Calidad del producto, es decir las características de la onda de tensión.
- Calidad en la atención y relación con el cliente, su información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación.

Existen dos tipos de calidad de servicio:

- a) Calidad individual: a cada uno de los consumidores.
- b) Calidad zonal: zona geográfica, atendida por un único distribuidor.



La clasificación por zonas es la siguiente:

- a) Zona urbana: municipios con más de 20.000 suministros, incluyendo a capitales de provincia que no lleguen a la cantidad anterior.
- b) Zona semiurbana: municipios con número de suministros que oscilan entre 2.000 y 20.000, excluyendo capitales de provincia.
- c) Zona rural:
  - Zona rural concentrada: municipios de provincia con número de suministros entre 200 y 2.000.
  - Zona rural dispersa: municipios con menos de 200 suministros, así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.

El *Real Decreto* define:

- Consumidor: cliente que compra para su propio consumo
- Tensión de alimentación: valor eficaz de la tensión en un punto de suministro y medido en un intervalo de tiempo concreto.
- Tensión nominal de una red de distribución: tensión que caracteriza a la red.
- Tensión de alimentación declarada: es la tensión nominal de la red.
- Interrupción de alimentación: situación en la que la tensión no supera el 10 % de la tensión declarada. Pueden ser largas (duración >3 minutos) o cortas (igual o < 3 minutos).
- TIEPI: es el tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión (1 kV R V « 36 kV). Sólo se consideran las interrupciones largas para este cálculo.

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \times H_i)}{\sum PI}$$

Donde:

*RPI = suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).*

*PI<sub>i</sub> = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» de duración H<sub>i</sub> (en kVA).*

*H<sub>i</sub> = tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia PI<sub>i</sub> (en horas).*

*K = número total de interrupciones durante el período Considerado*

- *NIEPI*: es el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada en media tensión (1 kV R V « 36 kV). Sólo se consideran las interrupciones largas para este cálculo.



$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k PI_i}{\sum PI}$$

Donde:

*RPI = suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).*

*PI<sub>i</sub> = potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» (en kVA).*

*K = número total de interrupciones durante el período considerado.*

La *continuidad del suministro eléctrico* se basa en el número de las interrupciones y su duración. Estas interrupciones pueden ser imprevistas o programadas; éstas, que son para realizar trabajos programados, deben ser autorizadas por la administración competente y los consumidores deben ser avisados con antelación.

La continuación del suministro se basa en dos parámetros:

- a) Tiempo de interrupción: medido en minutos desde que se inicia hasta que finaliza. El total es la suma de todos los tiempos de interrupción.
- b) Número de interrupciones: la suma de dichas interrupciones en un periodo de tiempo.

En ocasiones se programan interrupciones para realizar trabajos en la red, para ello deben ser reconocidas tanto el operador del sistema como el gestor de la red de transporte, y comunicadas por los transportistas al órgano competente de la administración autonómica y a los clientes conectados a la red.

No son interrupciones las de duración inferior a un minuto ya que son debido a la correcta actuación de las protecciones del sistema de transporte

“La calidad del producto hace referencia al conjunto de características de la onda de tensión, la cual puede verse afectada, principalmente, por las variaciones del valor eficaz de la tensión y de la frecuencia y por las interrupciones de servicio y huecos de tensión de duración inferior a tres minutos”.

“Para la determinación de los aspectos de la calidad del producto se seguirán los criterios establecidos en la norma UNE-EN 50.160 o norma que la sustituya y las instrucciones técnicas complementarias que se dicten por el Ministerio de Economía, previo informe de la Comisión Nacional de Energía, en desarrollo del presente Real Decreto”.

La calidad del producto se ve afectada por las variaciones del valor eficaz de la tensión, las interrupciones de servicio inferiores a tres minutos, los huecos de tensión, la distorsión armónica en tensión y las sobretensiones transitorias.



Además la onda de tensión puede verse variada por las modificaciones de la carga, perturbaciones emitidas por los equipos, etc.

## UNE-EN 50160

Define las características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.

La norma Europea establece los límites mínimos de Calidad de Producto y describe los valores exactos de armónicos, frecuencia, flicker, variaciones de la tensión y desequilibrio. Y no exactos de huecos de tensión, interrupciones leves (duración menor de 3 minutos como determina el RD 1955/2000) y sobretensiones transitorias.

Esta norma diferencia para baja ( $U_n \leq 1\text{kV}$ ), media (tensión cuyo calor eficaz nominal es de 1kV a 36kV) y alta tensión de alimentación ( $36\text{kV} < U_n \leq 150\text{kV}$ ). Este PFC toma como referencia este último escalón de tensión, ya que es el nivel de tensión más frecuente de utilización de hornos de arco eléctrico.

Según evolucione con el tiempo la tensión de suministro, se distinguen dos tipos de fenómenos:

- Continuos: desviaciones que se producen de manera continua en el tiempo. Suelen ser por el tipo de carga, variaciones de carga o cargas no lineales.
- Eventos de tensión: variaciones bruscas según la forma de onda normal o deseada. Suelen ser por eventos imprevisibles como las faltas o por causas externas como las condiciones climáticas.

Para los fenómenos continuos se definen:

1. Frecuencia: la frecuencia nominal de la tensión suministrada debe ser de 50 Hz, con intervalos de tolerancia según la red que esté conectada.
2. Variaciones de la tensión suministrada: no se dan límites de la tensión suministrada en esta norma ya que los usuarios de redes de alta tensión son limitados y están sujetos bajo contratos individuales.
3. Variaciones rápidas de tensión:
  - Variación rápida de tensión individual: son causadas principalmente por las variaciones de la carga en las instalaciones de los usuarios de la red, o por las maniobras en la red o por faltas.

Flicker: por cada periodo de una semana, el nivel de severidad de flicker de larga duración  $P_{1t}$  debe ser menor o igual a 1 durante el 95% del tiempo



$$P_{it} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Calculada a partir de la secuencia de 12 valores de  $P_{st}$ , siendo la severidad de duración breve, medida en un periodo de 10 minutos.

Para información de técnicas de ensayo y medida del Flicker existe la norma de compatibilidad electromagnética (CEM) UNE-EN 61000-4-15.

4. Desequilibrio en la tensión de alimentación: durante cada periodo de una semana, el 95% de los valores eficaces promediados en 10 minutos de la componente de secuencia de fase negativa de la tensión de alimentación debe situarse entre el 0% y el 2% de la componente de secuencia de fase positiva.
5. Armónicos de tensión: semanalmente, el 95% de los valores eficaces de cada tensión armónicos debe ser menor o igual a los valores indicados en la siguiente tabla:

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Tensión relativa $u_h$	Orden h	Tensión relativa $u_h$	Orden h	Tensión relativa $u_h$
5	5%	3	3% <sup>a</sup>	2	1,9%
7	4%	9	1,3%	4	1%
11	3%	15	0,5%	6 .. 24	0,5%
13	2,5%	21	0,5%		
17	en estudio				
19	en estudio				
23	en estudio				
25	en estudio				

NOTA 1 Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente pequeñas y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia, no están indicados en esta tabla.

NOTA 2 Los armónicos no múltiplos de 3 que son superiores al de orden 13 están en estudio.

NOTA 3 En algunos países, los límites de los armónicos ya están definidos.

<sup>a</sup> Según el diseño de la red, el valor del armónico de orden 3 puede ser mucho más bajo.

Tabla 3. Valores de tensiones de armónicos en los puntos de suministro, expresados en porcentaje de la tensión fundamental. Fuente: UNE-EN 50160

6. Tensiones interarmónicas: debido a la baja frecuencia de resonancia de las redes de alta tensión, no se especifica ningún valor para las tensiones interarmónicas.

En los eventos de tensión se definen:

1. Interrupciones en la tensión de alimentación: son muy imprevisibles y variables por lo que no es posible dar resultados estadísticos totalmente representativos.
2. Huecos/sobretensiones de la tensión de alimentación: los huecos de tensión ocurren normalmente por faltas en la red general o las instalaciones de los usuarios de red y las sobretensiones son debidas a maniobras y desconexiones de cargas. Ambos son imprevisibles. Deben detectarse según la norma EN 61000-4-30.

### 3.5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO. MONITORIZACIÓN

El mantenimiento preventivo [71] surge de la necesidad de rebajar todo mantenimiento correctivo, reduciendo la reparación mediante la rutina de inspecciones periódicas y la renovación de los elementos dañados.

En la figura 29 se muestra el indicador TIEPI (Tiempo medio de interrupción de suministro) de la calidad de suministro acumulado en el año 2012 por Iberdrola [2]. Su valor es de 58 minutos, lo que supone el mismo valor que el año pasado. Como muestra el figura 29:

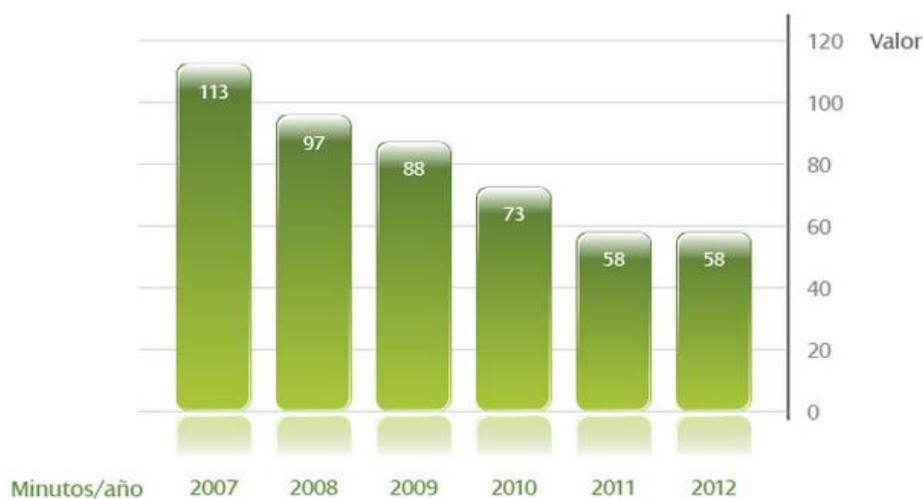


Figura 29. Indicador TIEPI acumulado en el 2012. Fuente: Iberdrola

Un muestra de la importancia del mantenimiento de la calidad de suministro es que gracias a la inversión de más de 2.000 millones de euros desde 2001 para la mejora y ampliación de la red de distribución, Iberdrola, compañía eléctrica líder en la Comunidad de Madrid, duplicó en 2011 los niveles TIEPI de 2007 y cuadruplicó los de 2001 consiguiendo un valor de 32 minutos, nivel equiparable a los niveles de servicio de las ciudades europeas más avanzadas.

Para mantener la calidad de suministro, algunas de las acciones [5] que se llevan a cabo para el mantenimiento preventivo en las compañías eléctricas son:

- Mantenimiento de líneas: con inspecciones periódicas -tanto a pie como en helicóptero- y tratamientos como el de protección anticorrosiva, lavado de aisladores -como se muestra en la figura 30-, revisión termo gráfica de cables, terminales y líneas, tala y poda de vegetación, etc.



Figura 30. Lavado de aisladores en helicóptero. Fuente: Red Eléctrica

- Mantenimiento de subestaciones: evaluando todas las máquinas y elementos del sistema, como el análisis de aceite en máquinas de potencia, análisis de respuesta en frecuencia, seguimiento del comportamiento de los transformadores de medida, programa de prevención de fallos con rotura en transformadores de intensidad, tele diagnóstico de interruptores, inspección termográfica para detectar puntos calientes a distancia, mantenimiento de elementos (transformadores, aisladores, pararrayos, interruptores, seccionadores, etc.).
- Mantenimiento de los sistemas de protección y medida: revisiones programadas, verificar equipos de medida y de convertidores, tele gestión de los equipos de protección, aplicaciones informáticas para gestionar información de los elementos del sistema, seguimiento en campo y pruebas de evaluación, utilización de simuladores digitales en tiempo real para pruebas de equipo, etc.
- Tan importante es este mantenimiento preventivo que, desde enero de 2008, funciona la Escuela de Mantenimiento de Red Eléctrica para garantizar que los técnicos tengan la máxima cualificación y actualización profesional para conseguir un óptimo nivel de conservación de las instalaciones y evitar así posibles indisponibilidades.

Algunas de las medidas futuras [5] que quieren implantar las compañías eléctricas para mejorar la calidad de suministro son:

- Gestión Inteligente de la demanda.
- Implantar equipos innovadores que aporten nuevas funciones y soluciones alternativas al desarrollo convencional de la red de transporte, aumentando su flexibilidad y fiabilidad. Y con ellos controlar los niveles de tensión en las subestaciones, asegurar un nivel de potencia de cortocircuito máximo, aumentar la capacidad de las líneas aéreas y de las soterradas, reducir el tiempo



de indisponibilidad tras avería de transformador de potencia normalizado de 200MVA, etc.

- Nuevas soluciones en la red de transporte para el control de los parámetros eléctricos, incremento de su capacidad y reducción de la indisponibilidad de la misma.
- Mejoras en la operación del sistema para una gestión más eficiente del mismo, asegurando los actuales niveles de seguridad y fiabilidad. Con ayuda de herramientas basadas en criterios probabilísticos, evaluar la implantación de un mercado de contratación y gestión de reserva de potencia adicional en el sistema, etc.
- Mejoras en la operación del sistema: con la mejora en la predicción de la demanda y de la generación de renovable, mejora del conocimiento del estado de la red, mejora de las herramientas de planificación, cobertura, programación y reposición, etc.

Desde el año 2011 Iberdrola ha implantado en Castellón la Red Inteligente. Es un sistema ubicado en el Proyecto STAR (Sistemas de Telegestión y Automatización de la Red), y mejora la calidad del suministro eléctrico al disminuir las incidencias. Este sistema permite hacer acciones a distancia como lectura de equipos de medida, modificación de potencia contratada, etc. Utiliza modernas tecnologías de monitorización, sistemas de información y telecomunicaciones. Sistema de gran inversión económica que muestra la importancia de los sistemas de mejora de la calidad.

Existen varias normativas vigentes de procedimientos de operación para el mantenimiento de la calidad eléctrica:

- El Plan de mantenimiento de las unidades de producción (Resolución de 17-03-2004, BOE 16/04/04) comprende un Plan Anual de Descargos -que será revisado bimestralmente-, un Plan Semanal y una programación cuyo ámbito temporal es inferior a una semana, denominada de corto plazo, que termina en el tiempo real. Red Eléctrica de España, en su condición de operador del sistema y gestor de la red de transporte es el encargado de este plan anual.
- La Programación del mantenimiento de la red de transporte (Resolución de 20-07-2004, BOE 03/08/04) y la Programación de mantenimiento de la red de distribución que afecta a la operación del sistema eléctrico (Resolución de 28-07-2006 BOE 14/08/06) describen los flujos de información y procesos necesarios para la tramitación y autorización, en su caso, de los planes de mantenimiento de las instalaciones de la red de distribución y de transporte respectivamente en los horizontes anual, bimestral, semanal y de corto plazo cuando su descarga afecte sensiblemente a la operación del sistema para que de este modo:
  - Se asegure su compatibilidad con los planes de mantenimiento de las unidades de producción y de la Red de Transporte.



- Se minimicen las restricciones técnicas que afecten a los medios de producción.
- Se obtenga un estado de disponibilidad de la red que garantice la seguridad y la calidad de abastecimiento de la demanda.

El Real Decreto 1955/2000 determina en su artículo 18 que los titulares de instalaciones de transporte tendrán el derecho y la obligación de maniobrar y mantener las instalaciones de su propiedad, con la coordinación del operador del sistema y gestor de la red de transporte, cumpliendo los procedimientos de operación aprobados al efecto.

## 4. ARMÓNICOS

### 4.1. INTRODUCCIÓN

La norma UNE EN 50160 define la tensión armónica como tensión senoidal cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación [6] [24]. En la figura 31 se muestran estas ondas:

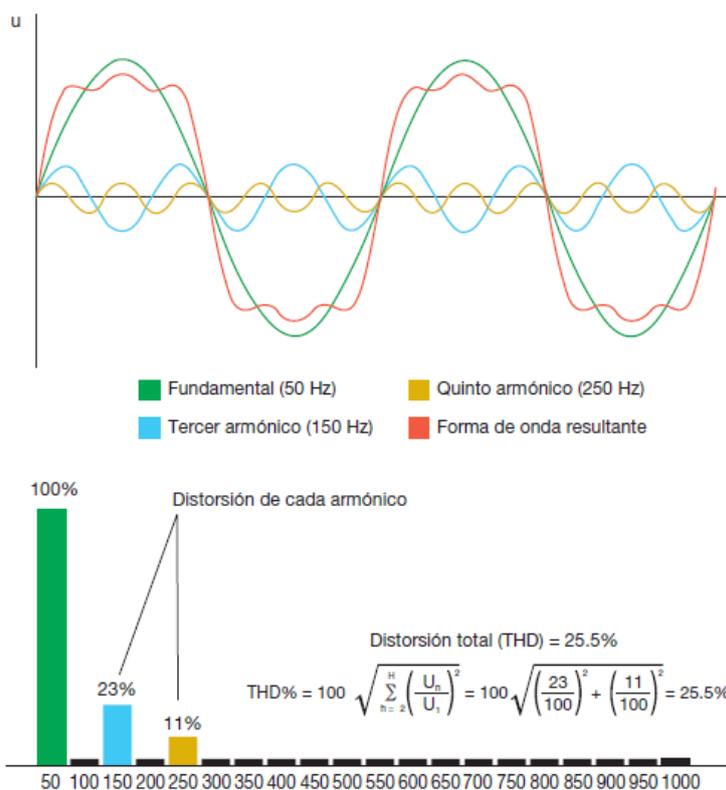


Figura 31. Representación de las ondas: fundamental, armónicos 5° y 7° y resultante. Cálculo de la distorsión total. Fuente: [23]

Los armónicos se clasifican [11] por su orden, frecuencia y secuencia. La tasa de armónico de orden n es la relación entre el valor eficaz de la componente de orden n y el valor eficaz de la componente fundamental de esa misma onda, expresado en tanto por cien, como indica la siguiente expresión:

$$\left(\frac{U_n}{U_1}\right) \cdot 100$$

Donde  $U_1$  es la amplitud de la componente fundamental y  $U_n$  es la amplitud del armónico de orden n.

Los armónicos impares son los que se encuentran en las instalaciones eléctricas y edificios comerciales.

Los armónicos pares sólo se crean cuando se produce una asimetría en la señal, la cual es debida a la componente continua. Para conocer la frecuencia y la secuencia según el orden de los armónicos existe la tabla 4

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	N
Frec.	50	100	150	200	250	300	350	400	450	50xn
Secu.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	....

Tabla 4. Frecuencia y secuencia según el orden de los armónicos. Fuente: [11]

Los armónicos se consideran como un [60] tipo de perturbación que afecta a la calidad de la onda de la tensión suministrada por las compañías eléctricas. Se producen por cargas no lineales, cargas que son alimentadas con una tensión senoidal pero que dan por respuesta una onda de intensidad deformada. Las tensiones armónicas son producidas por las corrientes armónicas a través de las impedancias de los circuitos de alimentación (transformadores, red de distribución, etc.) como muestra la figura 32:

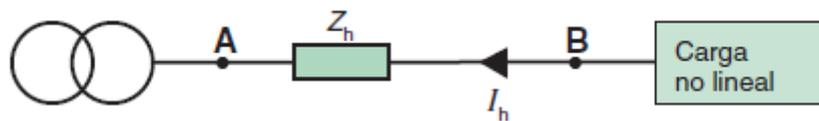


Figura 32. Diagrama de una sola línea que muestra la impedancia del circuito de alimentación de un armónico de rango h. Fuente: [22]

Para cada intensidad armónica (rango h), existe una impedancia  $Z_h$  en el circuito de alimentación. Cuando la intensidad armónica de rango h circula a través de la impedancia  $Z_h$  crea una tensión armónica  $U_h$ , por tanto la tensión en el punto B se distorsiona. Los dispositivos o usuarios que se alimentan a través del punto B reciben una tensión distorsionada. Las cargas no lineales actúan aguas arriba inyectando las intensidades armónicas, hacia la red de distribución de la energía eléctrica.

A una mayor circulación de corriente armónica existirá una mayor caída de tensión [26]. Cuanto más alejados del PCC (Punto de Conexión Común) y más próximos a las cargas que crean esas perturbaciones, mayor será esta caída de tensión.

Al conectar cargas sensibles alejadas del PCC y cercanas a dichas cargas distorsionantes, el nivel de distorsión que tendrán puede estar por encima de los límites permitidos y provocar un mal funcionamiento de dichas cargas sensibles. Un procedimiento importante es verificar la tensión en el PCC, tanto en vacío como en carga. Si al comparar los niveles de distorsión de la tensión en vacío y en carga, la distorsión no varía, significa que la distorsión en tensión es de origen externo. Pero si aumenta la distorsión en tensión proporcional a la corriente consumida, es un indicio de que la distorsión es de origen interno, de nuestra instalación. La siguiente figura muestra esta circulación de intensidades por la red.

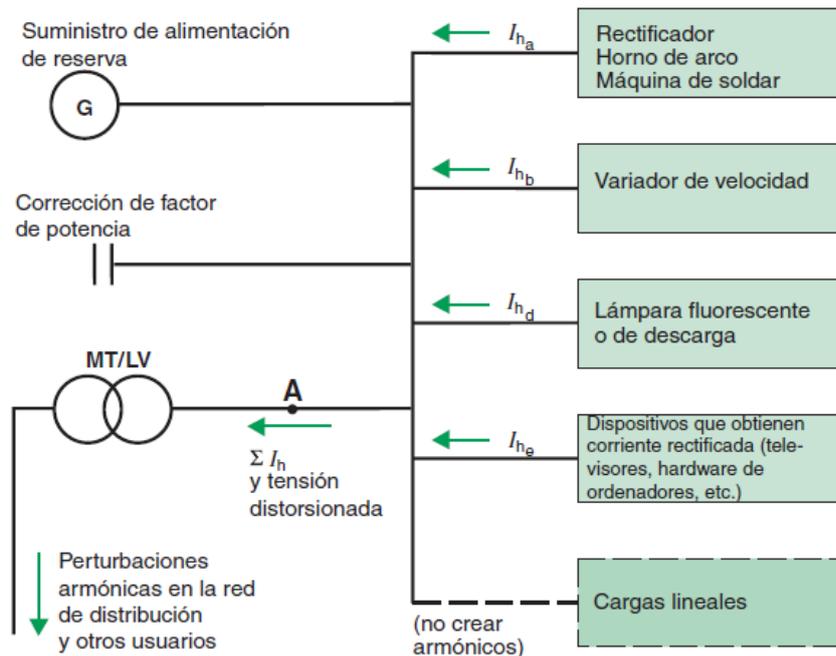


Figura 33. Circulación de intensidades en una red de distribución eléctrica. Fuente: [22]

Los armónicos más frecuentes en las redes de distribución trifásicas [22] suelen ser en general los armónicos impares: tercero, quinto...y su amplitud disminuye al ir aumentando el orden del armónico. Por encima del armónico 50° su valor suele ser insignificante, por lo que se suele medir en muchos casos hasta el armónico de orden 30°. Normalmente es suficiente con supervisar los armónicos hasta el del orden 13°. Conociendo las características de los generadores de armónicos, se puede decir que se pueden reducir los armónicos a valores insignificantes pero la eliminación total es casi imposible.

Las cargas más insensibles a los armónicos [31] son las térmicas o los hornos como el de arco eléctrico, y las más sensibles son las que requieren una alimentación con una onda senoidal perfecta, un ejemplo de ello son los equipos de comunicaciones, proceso de datos, control de procesos o equipos electrónicos en general.



### 4.1.1. Fuentes de armónicos

Los dispositivos y sistemas que crean armónicos suelen estar en todos los sectores, desde el industrial, el comercial y el residencial. Algunas cargas no lineales son:

- Variadores de velocidad para motores CC o asíncronos.
- SAI (sistema de alimentación ininterrumpida)
- Equipos de oficina: ordenadores, fotocopiadoras, faxes, etc.
- Equipo industrial: soldadoras, hornos de arco, hornos de inducción, rectificadores, convertidores estáticos [23], motores de inducción [24], etc.
- Electrodomésticos: televisores, hornos microondas, lámparas fluorescentes (sobretudo crea armónicos de orden 3 [11]).
- Algunos dispositivos con saturación magnética como transformadores.

### 4.1.2. Efectos de los armónicos

- Perturbaciones creadas por los armónicos

Los armónicos reducen la calidad de la energía eléctrica [22]. Los efectos negativos más comunes son:

- Sobrecargas en las redes de distribución debido al aumento en la corriente.
- Sobrecargas en los conductores neutros debido al aumento acumulativo en los armónicos de tercer orden creados por cargas monofásicas.
- Sobrecargas, vibración y envejecimiento prematuro de generadores, transformadores y motores, así como aumento del ruido del transformador.
- Sobrecargas y envejecimiento prematuro de los condensadores utilizados en la corrección del factor de potencia.
- Distorsión de la tensión de alimentación que puede perturbar las cargas sensibles: como dispositivos de regulación de temperatura, hardware informático, dispositivos de control y supervisión como los relés de protección.
- Perturbaciones en las redes de comunicación y en las líneas telefónicas.
- En equipos de consumo [25]: cambios de dimensión y brillo en receptores de televisión, calentamiento excesivo de lámparas fluorescentes, ordenadores, en equipos de convertidores que varía el instante de encendido de los semiconductores, etc.

- Efectos en las instalaciones

Las principales consecuencias en las instalaciones son:

- Incremento de las pérdidas que pueden ser de un orden de hasta un 20%:
  - a) Las corrientes armónicas producen un aumento de las pérdidas por efecto Joule en los conductores por donde circulan, y un aumento de la temperatura en cables, dispositivos, transformadores, etc.
  - b) Se producen pérdidas en las máquinas asíncronas ya que las tensiones asíncronas producen en el rotor corrientes con frecuencia superior a 50 Hz lo que crea pérdidas.



- c) En máquinas rotativas: originan pérdidas adicionales [25] en las bobinas del estator, en los circuitos del rotor y en el hierro.
- d) En transformadores: El efecto de los armónicos en transformadores es doble [15]: las corrientes armónicas causan un incremento de las pérdidas en el cobre, y las tensiones armónicas causan un incremento de las pérdidas en el hierro. El efecto total es un incremento de las pérdidas por histéresis y por Foucault [24] al ser comparado con una operación puramente sinusoidal (fundamental).
- Sobrecargas en equipos: se producen en generadores, transformadores, SAI, máquinas asíncronas, condensadores.
- Resonancia: El uso de dispositivos capacitivos e inductivos produce en las redes resonancia paralela y en serie, que crean impedancias muy altas y muy bajas.
- Impacto económico.
  - Pérdidas energéticas: como las de efecto Joule
  - Incremento de los costes de contratación: pueden suponer la necesidad de aumento de la potencia contratada, por lo que los costes aumentan.
  - Sobredimensionamiento de los equipos: en los equipos sobre los que circulan corrientes armónicas. La circulación de armónicos por el conductor neutro significa que hay que sobredimensionar ya que la mayoría de los equipos conectados a la red [60] están diseñados para trabajar con tensiones senoidales.
  - Errores en la medición [30] de la potencia y energía lo que provoca consecuencias disparos intempestivos en los equipos de protección además de pérdidas económicas para clientes y suministradores.
  - Mal funcionamiento de las instalaciones eléctricas y de control, ya que ciertos dispositivos responde de forma diferente a la prevista.

- Impacto económico

Hace unos años los armónicos no se consideraban problemas muy importantes, pero la introducción de forma masiva de la electrónica de potencia en los equipos utilizados, ha hecho que sea un problema grave incluida su repercusión económica. Alguna muestra de este impacto económico se muestra en:

- El envejecimiento prematuro o reducción de la vida útil del equipo, que hace que se tenga que sustituir con más frecuencia. Esto ocurre cuando el nivel de distorsión llega al 5% para transformadores, 18% para máquinas trifásicas y 32,5 % para monofásicas. Para evitarlo habría que sobredimensionar los equipos.
- Las sobrecargas en la red de distribución pueden llegar a necesitar niveles de contratación de potencia superiores y aumentar las pérdidas.
- La perturbación de las ondas de corriente produce disparos imprevistos en los interruptores automáticos que pueden llegar a detener la producción lo que produce grandes pérdidas así como el coste y el tiempo de volver a poner en funcionamiento la instalación. En siderurgias los hornos de arco han supuesto en ocasiones la destrucción de transformadores. Para transformadores de entre

1.500 y 2.500 kVA, el coste de la interrupción en la producción se estima en 20.000€/hora [22].

## 4.2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

### 4.2.1. Aplicación de la Transformada de Fourier

Las series de Fourier (Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)) surgen [28] con la importante tarea de representar funciones periódicas generales. Según el desarrollo de las series de Fourier cualquier señal periódica [6] por compleja que sea, se puede descomponer en suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental como se muestra en la figura 34.

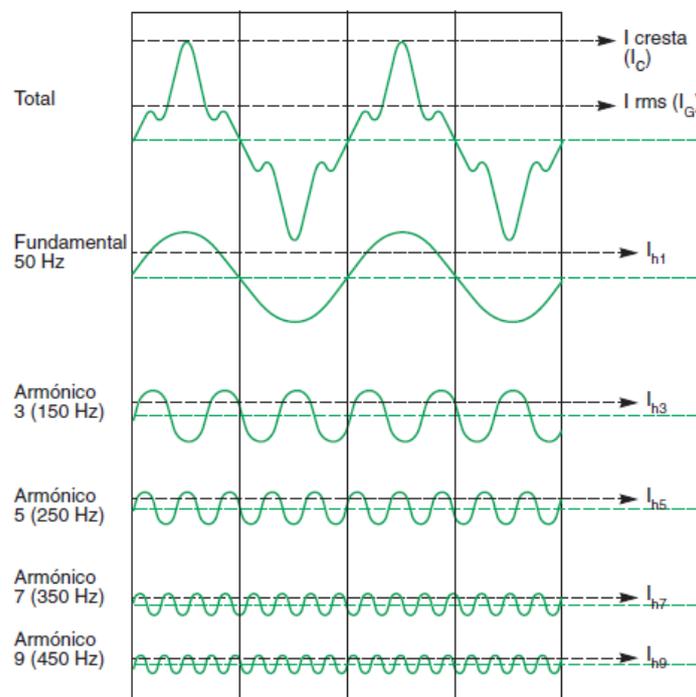


Figura 34. Intensidad afectada por armónicos y su descomposición en las componentes armónicas de rango 1 (fundamental), 3, 5, 7 y 9. Fuente: [27]

En la práctica, no siempre las funciones son continuas [24], en vez de eso la información se muestra caracterizada por una serie de valores de la amplitud de la función a intervalos fijos de duración limitada. En este caso la Transformada de Fourier se convierte en la Transformada Discreta de Fourier (DFT). Y la puesta en práctica del DFT se realiza mediante el algoritmo denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT), que forma la base [29] de los sistemas de análisis espectrales y armónicos más modernos

Al utilizar esta técnica se ha comprobado que cuando se analizan ondas que contienen componentes de frecuencia inferior a la fundamental y armónicos e interarmónicos de



frecuencias superiores, como es el caso del horno de arco eléctrico, la Transformada de Fourier no da resultados del todo exactos.

Los nuevos modelos de instrumentos de la norma UNE-EN 61000-4-7 están basados en la transformada discreta de Fourier (DFT), utilizándose normalmente el algoritmo transformada rápida de Fourier (FFT) para poder obtener una estimación de los valores de cada una de las componentes espectrales que conforman la señal. Esta parte de la norma CEI 61000 se centra en la instrumentación destinada a la medida de las componentes espectrales en el margen de frecuencias hasta 9kHz que se superponen a la frecuencia fundamental de las redes de suministro de 50 y 60Hz.

El análisis por la transformada de Fourier supone que la señal es estacionaria [16] por lo que únicamente produce resultados precisos para señales en régimen permanente. La amplitud de la señal de la tensión en la red puede fluctuar y por tanto estas señales en las que la amplitud varía con el tiempo no pueden describirse únicamente por sus componentes armónicas. Cuando se hacen medidas sobre potencias fluctuantes y por tanto una corriente fundamental fluctuante, se suelen utilizar una combinación de técnicas de promediado y de ciclos de medida suficientemente largos. La norma UNE-EN 61000-4-7 ofrece en consecuencia un método simplificado.

#### **4.2.2. Aplicación de los filtros de Kalman**

Hay otros métodos, para obtener el espectro de frecuencias de las tensiones y de las corrientes a partir de muestras discretas de las señales, como la aplicación de los filtros de Kalman, que es un estimador de mínimos cuadrados que se aplica a sistemas dinámicos. Los resultados obtenidos demuestran que el método es útil en el seguimiento de armónicos en los que la amplitud varía con el tiempo.

Una de las principales ventajas que tiene la técnica del Kalman frente a la de Fourier es ser capaz de: detectar las variaciones de amplitud de la componente fundamental y de realizar una buena estimación cuando la señal viene acompañada de ruido, por lo que lo hace muy interesante para casos en los que los armónicos sean rápidamente variables con el tiempo, como es el caso de los hornos de arco eléctrico. Por ello, el filtro de Kalman [54] se aplica para identificar los parámetros de la corriente de arco en los hornos de arco eléctrico.

Se ha realizado [29] un estudio comparativo de las técnicas convencionales empleando el método de Fourier y otro utilizando técnicas basadas en los filtros de Kalman y la conclusión ha sido que este último presenta una mayor capacidad de resolución temporal para señales con perturbaciones.



### 4.3. NORMATIVA ARMÓNICOS

Las normas internacionales [36] como la IEEE 519–92 [15] o las normas de la serie IEC 61000 [3], recomiendan los límites permisibles de distorsión en las redes eléctricas para reducir los efectos nocivos de la circulación de armónicos por dichas redes y sus componentes. A continuación se dan unas reseñas de esta familia de normas.

Normas de compatibilidad para redes de distribución (61000-2-2, 61000-2-4):

- UNE-EN 61000-2-2:2003 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión [38].

Esta norma se refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 0 kHz a 9 kHz, con una extensión hasta 148,5 kHz para los sistemas de transmisión de señales en la red. Se dan los valores numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución pública de corriente alterna en baja tensión, con una tensión nominal máxima de 420 V monofásica, o 690 V trifásica, y una frecuencia nominal de 50 Hz o 60 Hz.

- UNE-EN 61000-2-4:2004 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.

Esta parte de la norma se refiere a las perturbaciones conducidas en el rango de frecuencias de 0kHz a 9kHz. Fija valores numéricos de los niveles de compatibilidad para las redes de distribución de energías industriales y no públicas a tensiones nominales de hasta 35kV y frecuencias de 50 o 60 Hz.

Clases de entornos electromagnéticos definidos en esta norma:

- Clase 1: redes protegidas con niveles de compatibilidad inferiores a los de la redes de distribución pública. Ciertos equipos de automatización, instrumentación eléctrica en los laboratorios tecnológicos, algunos ordenadores, etc. Generalmente de baja tensión.
- Clase 2: PCC y PCI (Punto de Conexión Interno) de redes industriales en general públicas y no públicas.
- Clase 3: sólo PCI en entornos industriales. Mayores niveles de compatibilidad que los de la clase 2 para algunos tipos de perturbaciones. Entra en esta clase cuando: la mayor parte de la carga se alimenta con convertidores, hay máquinas de soldar, los grandes motores se arrancan asiduamente, cargas que varían rápidamente.

Los hornos de arco y grandes convertidores, cargas altamente perturbadoras, que son alimentadas generalmente por barras separadas, presentan casi siempre



niveles de perturbación mayores que los de la clase 3. Por lo que deberían ser motivo de acuerdo los correspondientes niveles de compatibilidad con los responsables de la distribución eléctrica.

Orden $h$	Clase 1 $U_h$ %	Clase 2 $U_h$ %	Clase 3 $U_h$ %
3	3	5	6
9	1,5	1,5	2,5
15	0,3	0,4	2
21	0,2	0,3	1,75
$21 < h \leq 45$	0,2	0,2	1

NOTA 1 – Estos niveles se aplican a los armónicos homopolares.  
NOTA 2 – En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que concierne a la inmunidad de los equipos que están conectados. Sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la Norma CEI 61000-2-2 y en la Norma CEI 61000-2-12.

Tabla 5. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión. Órdenes impares múltiplos de 3. Fuente: [17]

Orden $h$	Clase 1 $U_h$ %	Clase 2 $U_h$ %	Clase 3 $U_h$ %
2	2	2	3
4	1	1	1,5
6	0,5	0,5	1
8	0,5	0,5	1
10	0,5	0,5	1
$10 < h \leq 50$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$	1

NOTA – En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que concierne a la inmunidad de los equipos que están conectados. Sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la Norma CEI 61000-2-2 y en la Norma CEI 61000-2-12.

Tabla 6. Niveles de compatibilidad de armónicos. Componentes armónicas de tensión orden par. Fuente: [17]

	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Tasa de distorsión armónica total (THD)	5%	8%	10%

NOTA – En algunos casos en que una parte de la red industrial está dedicada a las cargas no lineales importantes, los niveles de compatibilidad de la clase 3 para esa parte de la red pueden valer 1.2 veces los valores arriba indicados. Entonces se deberían tomar las precauciones necesarias en lo que concierne a la inmunidad de los equipos que están conectados. Sin embargo, en el PCC (red pública), prevalecen los valores de los niveles de compatibilidad dados en la Norma CEI 61000-2-2 y en la Norma CEI 61000-2-12.

Tabla 7. Niveles de compatibilidad para las tasas de distorsión armónicas totales. Fuente: [17]

Normas basadas en las emisiones de armónicos por parte de los equipos (EN 50160, IEEE 519)

- IEEE Std 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System



La norma americana IEEE Std 519-1992 IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System [15] expone la limitación de las tasas armónicas y la distorsión de corriente que los usuarios pueden inyectar en un PCC (y las distorsiones que pueden/deben existir en cualquier punto de la red).

El que los niveles de perturbaciones de la tensión estén dentro de ciertos límites es responsabilidad tanto de la compañía eléctrica como de los usuarios.

Por ello esta norma también establece límites para los niveles de distorsión de corriente que puede ser inyectada por parte de los usuarios.

Tensión de barra en el PCC	Armónica individual (%)	THD (%)
$V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$V > 161 \text{ kV}$	1	1,5

Tabla 8. Niveles de distorsión de voltaje permisibles. Fuente: [15] y elaboración propia

Máxima distorsión de corriente armónica (en % de $I_L$ ) / Orden armónico individual (impares)						
$I_{cc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

$I_L$  = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.  
 $I_{cc}$  = máxima corriente de cortocircuito en el PCC.  
 TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima  
 Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares  
 Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de  $I_{cc}/I_L$

Tabla 9. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 120 V a 69 kV. Fuente: [15] y elaboración propia

Máxima distorsión de corriente armónica (en % de $I_L$ ) / Orden armónico individual (impares)						
$I_{cc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

$I_L$  = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.  
 $I_{cc}$  = máxima corriente de cortocircuito en el PCC.  
 TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima  
 Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares  
 Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de  $I_{cc}/I_L$

Tabla 10. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 69 kV a 161 kV. Fuente: [15] y elaboración propia



Máxima distorsión de corriente armónica (en % de $I_L$ ) / Orden armónico individual (impares)						
$I_{cc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

$I_L$  = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.  
 $I_{cc}$  = máxima corriente de cortocircuito en el PCC.  
 TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima  
 Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares  
 Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de  $I_{cc}/I_L$

Tabla 11. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general >161 kV. Fuente: [15] y elaboración propia

- **Suministrador.** Es su responsabilidad que en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje THD se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.
- **Usuarios.** Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo

#### Recomendaciones de las empresas de distribución (61000-3-2 y 3-12)

- UNE-EN 61000-3-2:2006/A1/A2 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase) [18].

A nivel europeo también hubo una preocupación por la posible falta de calidad de la energía y en 1975, el *Comité Europeo para la Estandarización en Electrotécnica* (CENELEC) creó la norma EN50006, posteriormente en 1991 se aprobó el estándar IEC-555-2, la equivalente europea a la IEEE Std 519-1992. Después de varias modificaciones y revisiones en la actualidad es el estándar europeo EN 61000-3-2.

Esta parte de la norma trata de la limitación de las corrientes armónicas inyectadas en la red pública.



- UNE-IEC/TR 61000-3-6:2006 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión.

Esta parte de la norma determina los requisitos a cumplir en las conexiones de las cargas perturbadoras de gran potencia (produciendo armónicos y/o interarmónicos) en la red en general.

La decisión final de la conexión de las instalaciones, incluyendo las cargas perturbadoras, es siempre competencia del distribuidor.

Es importante saber que se llama *carga* a la instalación completa del usuario y que el sistema de tensiones es el siguiente:

- Baja tensión (BT)  $U_n \leq 1\text{kV}$
- Media tensión (MT)  $1\text{kV} < U_n \leq 35\text{ kV}$
- Alta tensión (AT)  $35\text{ kV} < U_n \leq 230\text{ kV}$
- Muy alta tensión (MAT)  $U_n > 230\text{kV}$

Órdenes impares no múltiplos de 3		Órdenes impares múltiplos de 3		Órdenes pares	
Orden h	Tensión armónica %	Orden h	Tensión armónica %	Orden h	Tensión armónica %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
> 25	0,2 + $1,3 \cdot (25/h)$				

NOTA Tasa total de distorsión armónica (THD): 8%.

Tabla 12. Niveles de compatibilidad de las tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de BT y MT. Fuente: [21]

Caber decir que esta tabla 13 está también presente en la norma UNE-EN 50160.



Órdenes impares no múltiplos de 3			Órdenes impares múltiplos de 3			Órdenes pares		
Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %	
	MT	AT-MAT		MT	AT-MAT		MT	AT-MAT
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
> 25	0,2 +	0,2 +						
	$0,5 \frac{25}{h}$	$0,5 \frac{25}{h}$						

NOTA Tasa total de distorsión armónica (THD): 6,5% en redes de MT y 3% en redes de AT.

1) Una tensión  $U_2$  del 1,5% puede parecer demasiado fuerte para una red de AT, pero se pueden encontrar esos valores y es conveniente recordar que la presencia de un armónico de orden 2 no está necesariamente ligado a una componente continua.

Tabla 13. Valores indicativos de niveles de planificación de tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de MT, AT y MAT. Fuente: [21]

- UNE-EN 61000-3-12:2012 Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-12: Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada  $> 16$  A y  $\leq 75$  A por fase [20].

Esta parte de la norma IEC 61000 trata de la limitación de las corrientes armónicas inyectadas en la red de suministro público. Aplicados los límites a los equipos eléctricos y electrónicos con una corriente asignada de entrada superior 16 A e inferior o igual a 75 A por fase, destinados a ser conectados a las redes de distribución pública de baja tensión en corriente alterna de los siguientes tipos:

- Tensión nominal hasta 240 V, monofásica, dos o tres conductores
- Tensión nominal hasta 690 V, trifásica, tres o cuatro conductores
- Frecuencia nominal de 50 o 60 Hz

Los equipos con corriente asignada de entrada superior a 75 A por fase se consideran en el marco de requisitos armónicos de corriente para instalaciones, véase IEC/TR 61000-3-6 y el futuro informe técnico IEC 61000-3-14.

Esta norma se aplica a los equipos conectados a los sistemas de baja tensión interconectados con la red de suministro público en el nivel de baja tensión.

#### Otras normas de interés

- UNE-EN 61642:2010 Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo

Esta norma internacional da las indicaciones para la utilización de filtros pasivos de armónicos de corriente alterna y de condensadores a instalar en paralelo

destinados a la limitación de armónicos y a la corrección del factor de potencia en instalaciones eléctricas industriales de baja y alta tensión. Se refiere a armónicos cuyo orden sea mayor que 1 e inferior o igual a 25.

El dimensionado de estos componentes debe estar basado en las peores condiciones de servicio. En el diseño del equipo de filtrado se debe tener en cuenta las corrientes armónicas generadas por las cargas así como cualquier corriente o tensión armónica que exista en la red.

Hay que asegurarse que no afecte al funcionamiento del filtro los siguientes factores: tolerancias de fabricación, influencia de la temperatura, influencia del envejecimiento, las posibles variaciones de la frecuencia de la red, etc.

A continuación se muestran los filtros utilizados en instalaciones de alta tensión:



Fig. 8a – Filtro de 1<sup>er</sup> orden



Fig. 8b – Filtro de 2<sup>o</sup> orden - filtro pasa banda

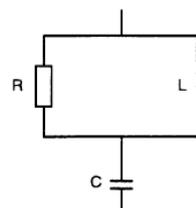


Fig. 8c – Filtro de 2<sup>o</sup> orden - filtro amortiguado con elemento resistivo

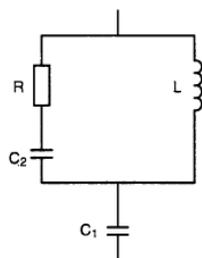


Fig. 8d – Filtro de 3<sup>er</sup> orden - filtro amortiguado

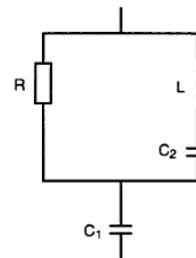


Fig. 8e – Filtro de 3<sup>er</sup> orden - filtro del tipo C

Figura 35. Filtros utilizados a alta tensión para la mitigación de armónicos. Fuente: [19]

## 4.4. MEDIDAS DE ARMÓNICOS

La medida de armónicos [11] se realiza con equipos que analizan la señal y realizan un espectro de los distintos órdenes de armónicos.

### 4.4.1. Razones para la medida de armónicos

Las siguientes son algunas razones [15] que muestran la importancia de las mediciones:

- Conocer los valores existentes de armónicos y compararlos con los niveles admisibles o recomendados.



- Identificar los equipos que generan armónicos.
- Diagnosticar y arreglar las situaciones en las que la actuación de los equipos sea inaceptable para la subestación alimentadora o del usuario.
- Realizar mediciones para la verificación de los estudios por simulación que incluyan flujo de carga armónica.

#### 4.4.2. Tipos de dispositivos de medida

Entre los métodos [27] tradicionales de medida y visualización se incluyen:

- **Osciloscopios:** visualizando la intensidad o la tensión en un osciloscopio se puede obtener una indicación inicial de la distorsión que afecta a una señal. Cuando la forma de la onda no es senoidal, indica claramente la presencia de armónicos. Se pueden observar picos de tensión y de intensidad. Permiten [6] conocer de forma rápida si en el punto de medida hay ruidos, armónicos, sobretensiones, etc., pero es necesario tener en cuenta que este método no ofrece una valoración exacta de los componentes armónicos.
- **Analizadores espectrales analógicos:** Están formados por filtros pasabanda acoplados a un voltímetro de valor eficaz. Un ejemplo son los transformadores de medida. Ofrecen un rendimiento mediocre y no dan información sobre el desplazamiento de fase. Algunos de ellos son:
  - **Analizadores de distorsión [15]:** Estos instrumentos indican directamente la distorsión armónica total (THD).
  - **Analizadores de espectro:** estos instrumentos muestran la distribución de potencia de una señal en función de la frecuencia. Un seguro rango de frecuencias es explorado, y todos los componentes, armónicos, e interarmónicos de la señal analizada son mostrados. Estos espectros [11] son la visualización de la serie de Fourier de la señal, la cual descompone la señal en la suma de varias señales distintas.
- **Analizadores armónicos o analizadores de ondas:** estos instrumentos miden la amplitud (y en más unidades complejas, el ángulo de fase) de una función periódica. Estos instrumentos proporcionan el espectro lineal de la señal observada. La salida puede ser registrada, o puede ser monitoreada por medidores analógicos o digitales.

Tan sólo los analizadores digitales más actuales pueden determinar con suficiente precisión los valores de todos los indicadores, los cuales están dotados de las últimas tecnologías.

Los microprocesadores en los analizadores digitales:

- Calculan los valores de los indicadores armónicos (factor de potencia, factor de cresta, potencia de distorsión, *THD*).



- Tiene diferentes funciones complementarias (correcciones, detección estadística, gestión de medida, visualización, comunicación, etc.).
- En los analizadores multicanal, ofrecen prácticamente en tiempo real la descomposición espectral simultánea de las intensidades y tensiones.

#### **4.4.2.1. Funcionamiento de los analizadores digitales y procesado de datos**

Las señales analógicas se convierten en series de valores numéricos o digitales.

Con estos datos digitales, un algoritmo que implementa la Transformada de Fourier o FFT (Fast Fourier Transform) calcula las amplitudes y las fases de los armónicos en un gran número de ventanas de tiempo u observaciones temporales.

La mayoría de analizadores digitales miden los armónicos hasta el orden 20 o 25 para calcular la tasa de distorsión armónica *THD*.

El procesado de los diferentes valores calculados utilizando la FFT (alisado, clasificación, estadísticas) se puede realizar mediante el dispositivo de medida o mediante software externo.

El análisis digital puede ser utilizado con dos técnicas básicas [15]:

(1) *Por medición de un filtro digital*. Este método es similar al filtrado analógico. Los analizadores de señales digitales de dos canales incluyen el filtrado digital. En el sistema para una medición particular, el rango de frecuencias será el conjunto de mediciones contenidas en los filtros digitales para dicho rango. También, el ancho de banda varía para optimizar la captura de pequeños armónicos cuando se está en presencia de una fundamental muy grande.

(2) *Técnica de la Transformada de Fourier Rápida*. La mayoría ya utiliza esta técnica como determina la norma UNE-EN 61000-4-7. Éstos métodos en tiempo real son muy rápidos, ya que realizan un análisis del espectro permitiendo la evaluación de un gran número de funciones.

#### **4.4.3. Procedimientos de análisis de armónicos en las redes de distribución**

Las mediciones se realizan en el centro industrial o comercial:

- De forma preventiva, para obtener una idea general del estado de la red y de la distribución (mapa de red).
- Para realizar una acción correctiva:
- Diagnosticar una perturbación y determinar las soluciones necesarias para eliminarla.
- Comprobar la validez de una solución (seguida de modificaciones en la red de distribución para comprobar la reducción de los armónicos).



#### 4.4.3.1 Modo de funcionamiento

Se estudia la intensidad y la tensión:

- En la fuente de alimentación.
- En las barras del cuadro de distribución principal (o en las barras de MT).
- En cada circuito aguas abajo del cuadro de distribución principal (en las barras de MT).

Para las mediciones, es necesario conocer las condiciones de funcionamiento precisas de la instalación y en particular el estado de las baterías de los condensadores (funcionamiento, sin funcionamiento, el número de escalones desconectados).

#### 4.4.3.2. Resultado de los análisis

- Determinar cualquier decalaje necesario del equipo en la instalación, o
- Cuantificar cualquier protección armónica y sistemas de filtro necesarios que deban instalarse en la red de distribución.
- Establecer una comparación entre los valores medidos y los valores de referencia de la utilidad (valores armónicos máximos, valores aceptables, valores de referencia).

#### 4.4.3.3. Uso de los dispositivos de medida

Los dispositivos de medida sirven para mostrar tanto los efectos instantáneos como a largo plazo de los armónicos. Los análisis requieren valores cuyas duraciones oscilen desde pocos segundos a varios minutos en periodos de observación de una serie de días.

Entre los valores necesarios se incluyen:

- Las amplitudes de las intensidades armónicas y las tensiones.
- El contenido armónico individual de cada rango de armónico de la intensidad y la tensión.
- La *THD* de la intensidad y la tensión.
- Cuando sea aplicable, el desplazamiento de fase entre la tensión armónica y la intensidad del mismo rango armónico y la fase de los armónicos con respecto a la referencia común (por ejemplo, la tensión fundamental).

Los indicadores de armónicos se pueden medir:

- Mediante los dispositivos instalados permanentemente en la red de distribución.
- O mediante un experto presente al menos medio día en el lugar (para una visión limitada en el tiempo).



Por varios motivos, es preferible la instalación de dispositivos de medida permanentes en las redes de distribución:

- La presencia de un experto está limitada por el tiempo. Sólo una serie de mediciones en diferentes puntos de la instalación y durante un periodo suficientemente largo (de una semana a un mes) ofrecen una visión global del funcionamiento y tienen en cuenta todas las situaciones que pueden ocurrir como pueden ser:
- Las fluctuaciones en la fuente de alimentación.
- Variaciones en el funcionamiento de la instalación.
- La colocación de nuevos equipos en la instalación.
- Los dispositivos de medida instalados en la red de distribución preparan y facilitan el diagnóstico de los expertos, reduciendo de este modo el número y la duración de sus visitas.
- Los dispositivos permanentes de medida detectan cualquier nueva perturbación que ocurra tras la instalación de un nuevo equipo, la implementación de nuevos modos de funcionamientos o fluctuaciones en el sistema de distribución.

Las ventajas de los dispositivos de medida y detección situados en un equipo de distribución eléctrica son los siguientes:

- Para una valoración global del sistema de distribución (medida preventiva), evitan:
- alquiler de los aparatos de medida,
- solicitar los servicios de expertos,
- tener que conectar y desconectar todos los aparatos de medida.
- Para una valoración con vistas a una acción de recuperación, los dispositivos situados en un equipo de distribución eléctrica ofrecen:
- indicaciones de las condiciones de operación cuando se produjo el incidente
- proporcionan un “mapa” de la instalación e indicaciones sobre la solución seleccionada.

Un diagnóstico completo, frecuentemente requerirá de información adicional proporcionada por equipos específicos adaptados al problema o situación dada.

#### **4.5. SOLUCIONES FRENTE A LOS ARMÓNICOS**

Antes de aplicar ninguna solución ante el problema de los armónicos lo ideal es realizar un análisis de los armónicos que existen en la red.

No es lo mismo el análisis de un sólo equipo o en un punto en concreto de una instalación, que el estudio de una red eléctrica industrial ya que esto último es muy

complejo. Ese es uno de los motivos fundamentales de la realización de las simulaciones.

Lo recomendable es realizar [30] simulaciones que permitan conocer la realidad de los fenómenos y estudiar las mejoras a introducir tales como filtros, etc. Los pasos fundamentales de un análisis de armónicos en la red son:

- Identificación y definición del problema: se basa en la recogida de información para saber el problema real existente y que se trata de solucionar.
- Medición de los armónicos en la instalación: una vez conocido el problema de miden los armónicos en las condiciones operacionales de la instalación.
- Diagnóstico preliminar estableciendo las posibles causas o motivos: se realiza el análisis de las posibles causas de la anomalía. Se ensayan las posibles fuentes perturbadoras y su impacto.
- Establecimiento de modelo del sistema del usuario: sirve para representar las condiciones de funcionamiento real de la instalación. La simulación permite la conexión de cualquier equipo o dispositivo que se puede encontrar en la red, como son los filtros, generadores de armónicos, interruptores, etc. Se puede realizar la simulación de sistemas trifásicos sin necesidad del esquema unifilar.
- Rodaje del modelo con las posibles soluciones correctoras: permite aplicar las soluciones correctoras y así poder seleccionar las mejores soluciones técnicas y así lograr la solución más adecuada teniendo en cuenta el punto de visto técnico-económico.

Una vez que se conoce el problema existente se aplican las soluciones más adecuadas según el caso. Las principales soluciones [22] utilizadas para paliar el efecto de los armónicos son:

1. Modificación de la instalación.
2. Utilización de dispositivos especiales en el sistema de alimentación
3. Instalación de Filtros

Para limitar la propagación de los armónicos se pueden realizar acciones como las siguientes:

- Instalación de las cargas no lineales aguas arriba: como muestra la figura 36, de este modo afecta en menor medida a las cargas sensibles.

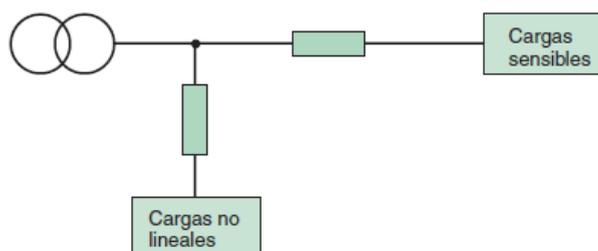


Figura 36. Cargas no lineales colocadas lo más aguas arriba posible. Fuente: [22]

- Agrupación de las cargas no lineales: se recomienda agrupar las cargas no lineales y conectarlas lo más aguas arriba posible, lo cual se muestra en la siguiente figura:

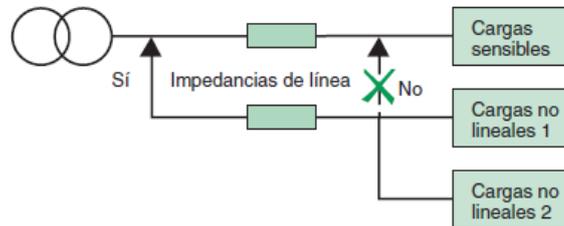


Figura 37. Las cargas lineales juntas y lo más aisladas posible de las cargas sensibles. Fuente: [22]

- Creación de fuentes separadas: alimentando las cargas no lineales desde una fuente independiente del resto de cargas de la instalación. El inconveniente es un gasto económico mayor.

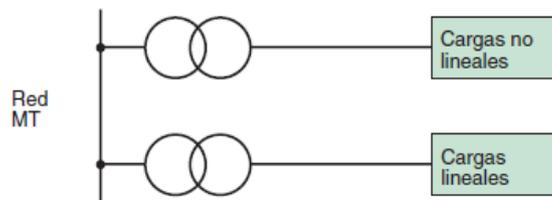


Figura 38. Cargas no lineales con alimentación independiente. Fuente: [22]

- Transformadores con conexiones especiales: existen conexiones que eliminan armónicos como pueden ser: el transformador con doble secundario con conexión Dyd eliminan los armónicos 5° y 7°, la conexión Dy el 3° armónico o el DZ el 5°.

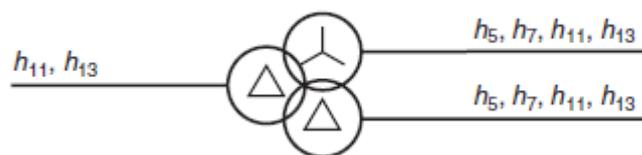


Figura 39. Bloqueo de la propagación de los armónicos del 5° y 7° armónico en la red aguas arriba a través de un transformador con conexión Dyd. Fuente: [22]

- Sobredimensionamiento de la instalación: [33] con fuentes de mayor potencia y cables de mayor sección, se consigue que el efecto de los armónicos provoque menos incidencias y su manifestación sea más tardía. A mayor potencia en la fuente, será menor la distorsión en la fuente y por tanto mayor su calidad de tensión. La impedancia de la instalación es más baja gracias al sobredimensionamiento de la fuente, lo que evita que aumenten las pérdidas por efecto Joule ocasionadas por los armónicos al ofrecer una sección mayor a los cables.

### 4.5.1. Filtros de armónicos

Debido a que las soluciones explicadas anteriormente [14] resultan muy costosas en algunos aspectos, se opta por adoptar soluciones más simples y económica como el empleo de filtros, que reduzcan los niveles de distorsión armónica a los niveles permitidos por la normativa.

Los filtros se pueden clasificar de diversas maneras, entre ellas la de la tecnología utilizada y según la gama de frecuencias a tratar (función que realizan).

- Según la tecnología utilizada existen tres tipos de filtros:
  - a) Filtros Pasivos
  - b) Filtros Activos
  - c) Filtros Híbridos

a) Filtros Pasivos: están constituidos exclusivamente por elementos pasivos como resistencias, condensadores y bobinas.

Se suelen instalar en paralelo con la carga no lineal y absorben los armónicos para evitar que circulen por la red de distribución. Se ajustan al rango de armónicos que se desea eliminar y se suelen utilizar ramificaciones de filtros en paralelo para una eliminación más global. Éstos basan su funcionamiento [35] en proporcionar a las corrientes armónicas un camino de impedancia mucho menor que la red exterior, actuando como sumideros de las mismas.

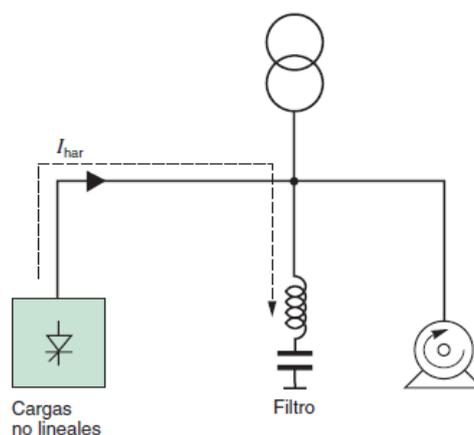


Figura 40. Funcionamiento de un filtro pasivo. Fuente: [22]

Las grandes ventajas de utilizar filtros pasivos son básicamente su bajo coste, el que pueden reducir también las tensiones armónicas de la tensión de alimentación o que ofrece tanto corrección del factor de potencia como el filtrado de corrientes; sin embargo, tienen muchos inconvenientes, entre ellos:



- Su selectividad [10] hace que no compensen todo el margen de armónicos deseado. Solamente son válidos [35] para un orden armónico determinado, mientras que los filtros activos sirven para un rango armónico que va a ser función de la frecuencia de conmutación de los elementos activos del filtro
- La resonancia serie entre el filtro y la impedancia de la fuente puede causar amplificaciones de las tensiones armónicas.
- El filtro pasivo puede provocar una resonancia paralela con la red de suministro, con amplificación de las corrientes armónicas.
- Los filtros pasivos, debido a la componente resistiva, tienen un consumo de componente fundamental, lo que provoca armónicos de tensión.
- El número de secciones del filtro será tanto más elevado cuanto mayor sea el número de armónicos a eliminar, lo que supone aumentar los problemas anteriormente mencionados.
- El filtro de absorción (que es, generalmente, el utilizado a nivel industrial), está adaptado a una configuración concreta de red y estado de cargas. Por lo tanto, no podrán eliminarse ni añadirse cargas a un grupo compensado de esta forma.

Las aplicaciones típicas son las instalaciones industriales, instalaciones que requieren una corrección del factor de potencia, instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar a las cargas sensibles o instalaciones en las que se debe reducir la distorsión de corriente para evitar sobrecargas.

Dentro de los filtros pasivos [24] se pueden encontrar encontrar:

- Filtros sintonizados: En los filtros sintonizados o filtros paso banda , el circuito serie está formado por una inductancia en serie a una resistencia de bajo valor. Estos filtros se utilizan para eliminar armónicos [36] de orden bajo.

Se conecta en paralelo con la carga no lineal [37] y consigue atrapar la componente armónica con frecuencia igual a la frecuencia de sintonía. A continuación se muestra un ejemplo de circuito sintonizado.



Figura 41. Filtro sintonizado. Fuente: [36]

- Filtros amortiguados: los filtros amortiguados o paso alto más empleados son los de 2º y 3º orden y el filtro tipo C. El filtro tipo C tiene como mayor ventaja

que una considerable reducción de las pérdidas debido a que C2 y L están sintonizados en serie a la frecuencia fundamental y R cortocircuitada. En la siguiente figura se muestran estos tres circuitos.

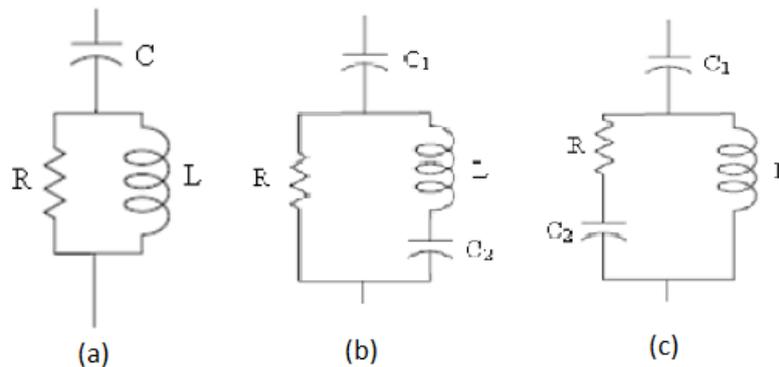


Figura 42. Filtro de (a) 2° orden, (b) filtro tipo C y (c) 3er orden. Fuente: [36]

- b) Filtros activos: constan de elementos pasivos asociados con otros activos de electrónica de potencia como pueden ser los amplificadores operacionales, los cuales necesitan alimentación externa para su funcionamiento, siendo uno de sus mayores inconvenientes.

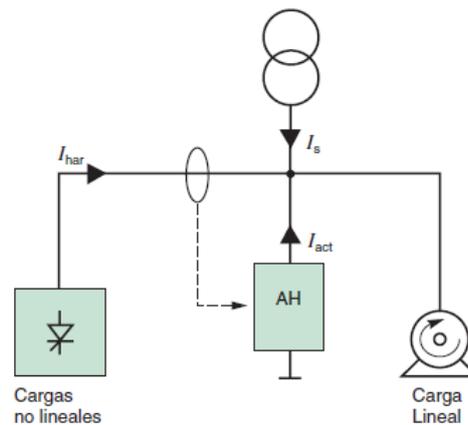


Figura 43. Funcionamiento de un filtro activo. Muestra un compensador activo de armónicos conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ( $I_{har} = -I_{act}$ ). Inyecta en la fase opuesta los armónicos de la carga no lineal, de forma que la corriente de línea  $I_s$  permanece senoidal. Fuente: [22]

Los filtros activos inyectan a la red [14] intensidades a la red con un valor y una frecuencia determinada que cancelan los armónicos de intensidad que están presentes en la red. Esta corriente es igual a la diferencia entre la corriente de carga y la intensidad fundamental, de manera que la resultante será una corriente senoidal igual a la intensidad fundamental de la fuente.

Se deben conectar en paralelo [10] entre las cargas perturbadoras o no lineales y el sistema eléctrico. Que su funcionamiento sea el correcto depende fundamentalmente del dimensionamiento del filtro y de una coordinación eficaz entre el cálculo de la corriente de referencia y el control de la corriente del filtro.

Entre sus ventajas están: que filtran un amplio rango de frecuencias, se pueden adaptar a cualquier tipo de cargas, que proporcionan una gran amplificación de la señal de entrada (ganancia), lo que es importante si se trabaja con señales a niveles muy bajos o que aportan gran facilidad de ajuste, actuando simplemente sobre el elemento activo.

Las aplicaciones más típicas es en instalaciones comerciales o instalaciones en las que se debe evitar la distorsión de corriente para evitar sobrecargas.

- c) Filtros híbridos: es una combinación de los filtros pasivos y activos. Ofrece las ventajas de ambos y abarca un amplio abanico de niveles de potencia y rendimiento.

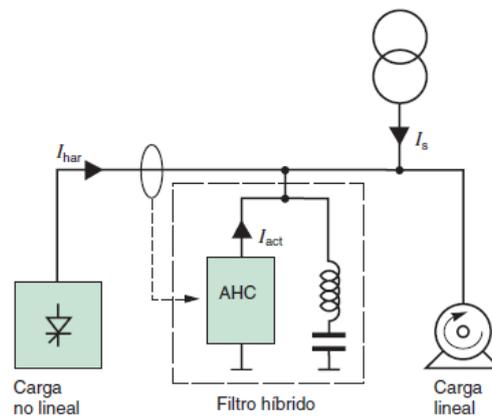


Figura 44. Funcionamiento de un filtro híbrido. Fuente: [22]

Se aplican en instalaciones industriales, en instalaciones que requieren corrección del factor de potencia, instalaciones en las que la distorsión de tensión debe reducirse para evitar perturbar las cargas sensibles, instalaciones en las que para evitar sobrecargas se debe reducir la distorsión de corriente o en instalaciones en las que se deben de cumplir de manera muy estricta los niveles de emisiones armónicas.

Schneider Electric [34] propone en sus soluciones que cuando el  $\cos \phi$  es inferior a 0,85-0,9, la solución preferible es pasiva o híbrida, la figura siguiente muestra esta propuesta.

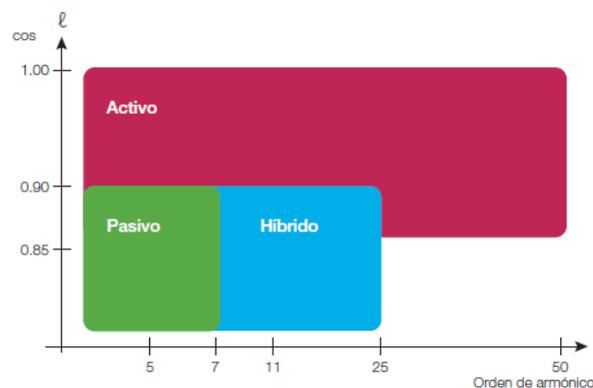


Figura 45. Propuesta de utilización de filtros activos, pasivos o híbridos según el  $\cos \phi$  y el orden de los armónicos a mitigar. Fuente: [34]

- Según la gama de frecuencias o función que realizan [61]:
  - Filtro paso bajo: deja pasar señales de bajas frecuencias desde la entrada hasta la salida mientras rechaza las frecuencias altas. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques y su curva general de respuesta.

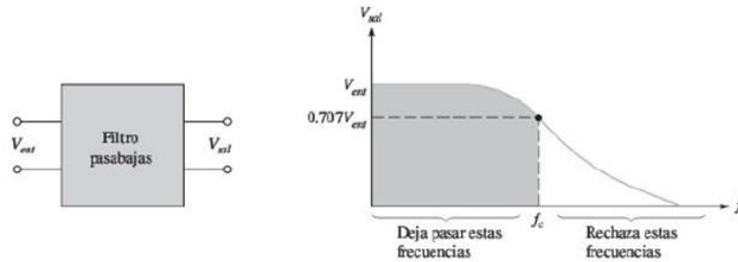


Figura 46. Diagrama de bloques de un filtro paso bajo y curva general de respuesta. Fuente: [35]

- Filtro paso alto: deja pasar las señales de alta frecuencia desde la entrada hasta la salida en tanto que rechaza las señales de baja frecuencia. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques y su curva general de respuesta.

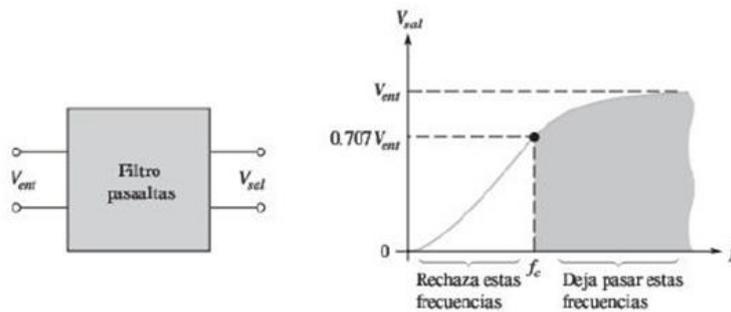


Figura 47. Diagrama de bloques de un filtro paso alto y curva general de respuesta. Fuente: [35]

- Filtro paso banda: dejar pasar cierta banda de frecuencias y atenúa o rechaza todas las frecuencias por debajo y por encima de la banda de paso. La siguiente figura muestra el diagrama de bloques y su curva general de respuesta.

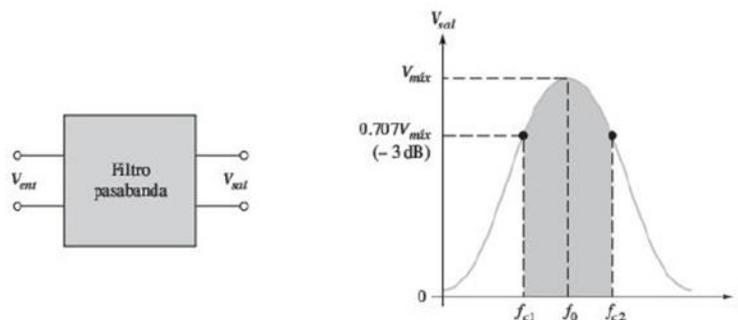


Figura 48. Diagrama de bloques de un filtro paso banda y curva general de respuesta. Fuente: [35]

A continuación se muestra cómo se puede crear un filtro paso banda con un filtro paso alto y un filtro paso bajo.

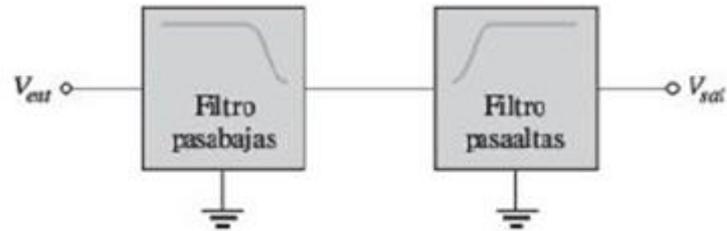


Figura 49. Un filtro paso bajo y un filtro paso alto se puede utilizar para formar un filtro paso banda. Fuente: [35]

- Filtro banda eliminada: es lo opuesto de un filtro paso banda en función de las respuestas. Deja pasar todas las frecuencias menos aquellas que quedan dentro de cierta banda de rechazo. La siguiente figura muestra su curva general de respuesta.

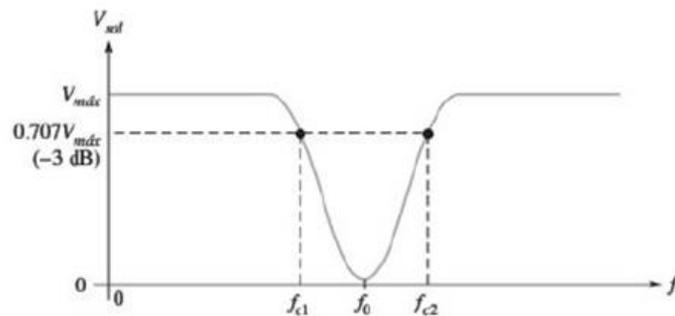


Figura 50. Curva general de la respuesta de un filtro banda eliminada. Fuente: [35]



## 5. SIDERURGIA DE ARCO ELÉCTRICO

### 5.1. INTRODUCCIÓN

([40], [41], [43])

Fue el inglés Sir Humphry Davy quien en 1800, además de crear metales alcalinotérreos por electrólisis, hizo saltar un arco entre dos electrodos de carbono para la extracción y fusión experimental de metales. Aunque, la primera fusión de acero la realizó en un laboratorio Pepys en 1815; instaló baterías de pilas y experimentó para la utilización del arco voltaico para iluminación y otros usos industriales.

En 1878 William Siemens patentó el primer horno eléctrico de arco con electrodos horizontales para fabricar acero.

Pero hay que retroceder a 1889 para conseguir la tecnología actual del horno de arco realizada por el francés Paul Heroult, que en 1902 realizó la primera fusión industrial. Hasta el año 1962 los hornos de arco eran instalaciones con mucho coste y con niveles de producción muy bajos. Las potencias que consumían no eran muy altas por lo que no suponían instalaciones que perturbasen la red eléctrica en demasía.

Poco después se empezaron a crear los hornos de potencia ultra elevada (“Ultra High Power” UHP) conectados a transformadores con mucha más potencia. Comenzaron a reducir el tiempo de colada y aumentar con ellos sus niveles de producción. Con ello se consolidó su importancia en la producción de acero y se convirtió en una de las principales cargas no lineales de la red eléctrica.

En un principio se utilizaban arcos cortos, intensidades muy elevadas y con un factor de potencia en torno al 0.6 y el 0.65. Para utilizar de manera más eficiente el transformador principal, en la actualidad se utilizan un factor de potencia entre el 0.75 y el 0.85 con tensiones más elevadas, arcos más largos y corrientes menores. Con ellos se consiguieron coladas de menor duración y un aumento por consiguiente de la producción.

Con los hornos UHP se buscaba fundir chatarra cumpliendo los siguientes objetivos:

- Una colada que durase el menor tiempo posible.
- Utilizar la mayor potencia útil posible.
- Tener los mínimos momentos sin corriente eléctrica en el horno.

Se consiguió una duración de fusión de hora u hora y media utilizándose potencias de 650 kVA/t en los hornos pequeños y 500 kVA/t en los mayores de 50t.

En España existe una asociación creada en 1968 llamada UNESID (Unión de Empresas Siderúrgicas), que reúne a las empresas productoras de acero y de productos de primera transformación del acero de nuestro país. Su función se basa en apoyar los objetivos del acero español y su representación ante las instituciones tanto en ámbito nacional como internacional. Unesid promociona a las empresas españolas en el mercado y las asesora y les da apoyo técnico. Actualmente hay más de 40 empresas asociadas con ella; entre ellas se pueden citar a Arcelormittal, Megasa Siderúrgica, Acerinox o Celsa Atlantic, S.L., etc.

Las empresas siderúrgicas en España han vivido en los últimos años un crecimiento en la competitividad y en las tecnologías utilizadas, y se han sabido adaptar a las demandas del mercado a nivel mundial. En la figura 51 se puede observar el peso relativo de la industria siderúrgica y de primera transformación por Comunidades Autónomas.

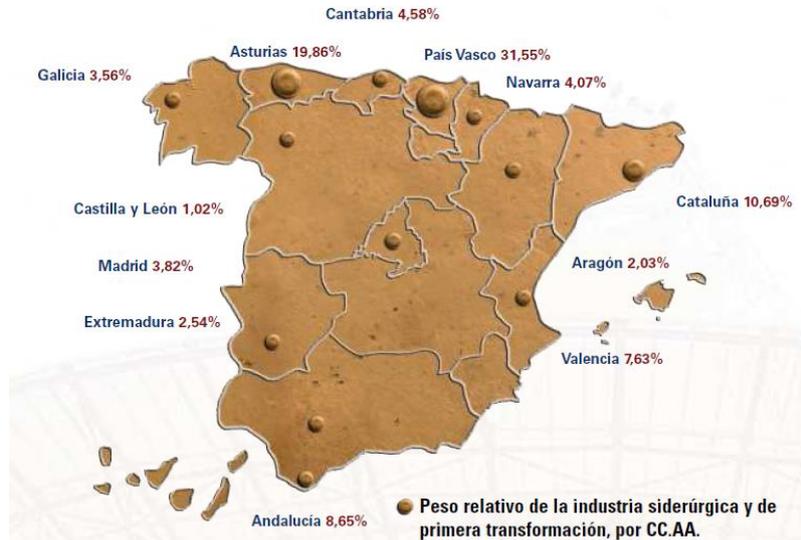


Figura 51. Producción siderúrgica en España. Fuente: Unesa

La industria siderúrgica en la actualidad [42]:

- A nivel mundial: la producción mundial de acero que se muestra en la figura 52 ha sido de 1.512 millones de toneladas en 2012, un 2,2% mayor que en el curso anterior. El 72,7 % del acero se produjo en altos hornos, a diferencia de la producción en España donde la mayor parte es en hornos de arco eléctrico. China es el líder mundial de la producción de acero con un 47% del total.

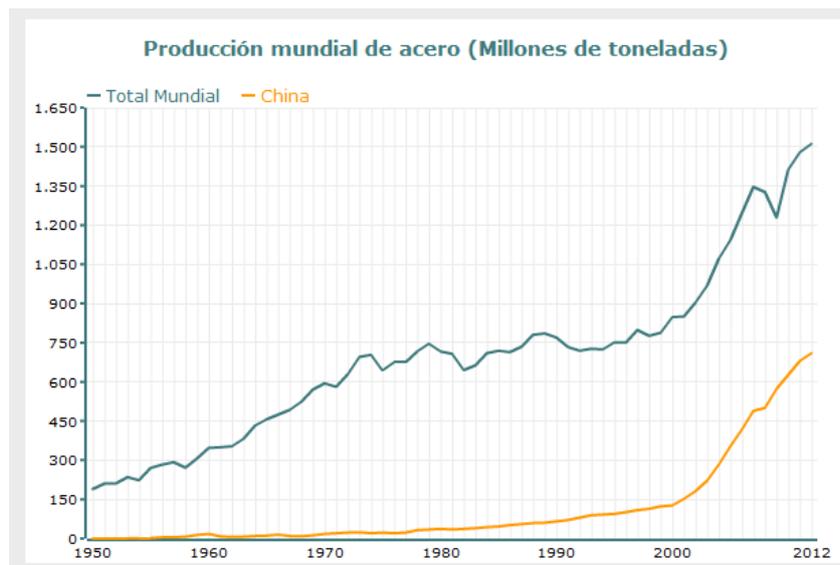


Figura 52. Producción mundial de acero. Fuente: Unesid

- A nivel nacional: par el sector siderúrgico el 2012 fue un año duro, ya que como en años anteriores se ha tenido que trabajar mucho en el ámbito exterior para compensar la disminución de demanda interior. La caída de demanda ha sido del 12% continuando así la tendencia del año anterior. La mayor parte de la producción ha sido en hornos de arco eléctrico con un porcentaje de casi el 75% de la totalidad. Este tipo de horno utiliza como materia prima la chatarra y su precio ha bajado durante este curso según datos de Eurofer (Asociación Siderúrgica Europea); a finales de año su precio se situaba sobre los 400\$/tonelada (310€/tonelada).

En 2012 se exportó 9,7 millones de toneladas de productos siderúrgicos, por lo que sufrió un descenso del 2,2% en comparación con el año 2011. Se importaron 7,8 millones de toneladas, lo que significó una caída del 12,6%. Siendo 6,3 millones importados de la Unión Europea, y Francia el primer origen siderúrgico con un valor del 30%. De los países no pertenecientes a la Unión Europea el primer importador de acero es China, que ocupa el quinto puesto a nivel mundial. En la tabla 14 se muestra el número de toneladas de acero fabricado en España y en la figura 53 el mapa de acerías de España.

ACERO (miles de toneladas)				
AÑO	Total	No aleado	Inoxidables	Aleado
2003	16.407	14.495	1.164	748
2004	17.684	15.814	1.103	766
2005	17.904	15.995	1.127	783
2006	18.401	16.397	1.257	748
2007	18.999	17.077	1.105	817
2008	18.640	16.896	998	746
2009	14.362	13.356	693	313
2010	16.343	14.838	844	660
2011	15.556	14.023	807	726
2012	13.639	12.146	844	650

Tabla 14. Toneladas de acero fabricadas en España. Fuente: Unesid



Figura 53. Mapa de acerías en España. Fuente: [46]

## 5.2. EL ARCO ELÉCTRICO

Se define el arco eléctrico [40] [49] como el paso continuo de una corriente eléctrica de alta intensidad entre dos electrodos en un medio gaseoso ionizado. Este gas se ioniza por la presencia de electrones libres, la creación de iones positivos que se dirigen al cátodo mantiene el calentamiento y la creación de iones negativos que van hacia el ánodo y provocan también su calentamiento. Es un fenómeno eléctrico y térmico según sea el gas en que se produzca así como la tensión aplicada en los electrodos.

Al aplicar la tensión, ésta hay que elevarla hasta un valor mínimo llamado tensión de cebado para que se generen los iones que puedan mantener la conducción eléctrica.

El cátodo emite electrones que se dirigen al ánodo debido al campo eléctrico creado entre los electrodos. Las moléculas del gas ionizado aceleradas por el campo eléctrico chocan contra el cátodo calentándolo lo que produce que se emitan más electrones. El arco se mantiene gracias a estos electrones en el cátodo, los cuales aumentan con la temperatura. Además del citado calor también se desprende una gran luminosidad. En este paso de corriente entre los electrodos y la carga se pueden llegar a alcanzar temperaturas superiores a 3000°C.

La zona entre los dos electrodos se divide en:

- Zona catódica: espacio [44] entre la superficie del cátodo y la nube de iones positivos donde existe un alto campo eléctrico y se produce una caída de tensión. La anchura de esta zona depende de la corriente de arco, el medio en el cual esto se quema y el material del electrodo que actúa de cátodo.
- Columna de arco: en forma de tonel [40] y con una caída de tensión progresiva, dependiente de la intensidad.
- Zona anódica: lugar donde debido a la nube de electrones existe un campo eléctrico. Se da una caída de tensión alrededor de tres veces mayor que la tensión catódica, la cual depende de la intensidad.

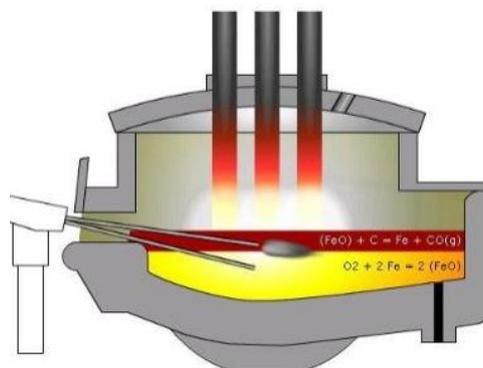


Figura 54. Gases ionizados y campo eléctrico entre los electrodos. Fuente: Proinso

Si el horno de arco es de corriente alterna existe un momento en el que desaparece el arco cuando la intensidad es cero. Esto produce periodos de discontinuidad en la intensidad del arco [43]. La longitud del arco varía continuamente, lo que produce que los hornos de arco no se comporten de manera estática sino dinámica. Las tensiones y corrientes varían constantemente por lo que estos hornos producirán armónicos, flicker y otros desequilibrios. En la figura 55 queda representado el arco eléctrico entre dos electrodos idénticos.

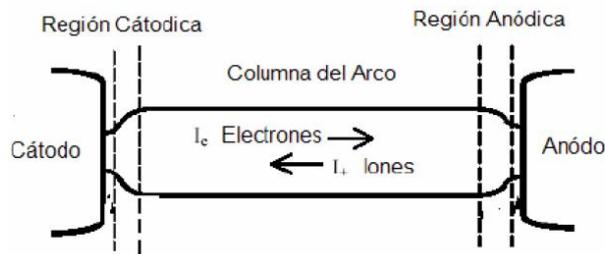


Figura 55. Características del arco entre dos electrodos idénticos Fuente: Hornos de arco para fusión de acero. Fuente: [40]

Si el horno es de corriente continua, el único electrodo actúa como cátodo, y el fondo de la cuba, de ánodo. Teniendo una longitud de arco constante, si se aumenta la intensidad disminuirá la tensión y viceversa. Si, por el contrario, el horno es de corriente alterna, los tres electrodos actúan alternativamente como ánodo y como cátodo, y el arco salta entre ellos y la propia chatarra. En los arcos eléctricos, al disminuir la distancia entre los electrodos disminuye la tensión y aumenta la intensidad.

### 5.3. HORNOS ALTOS Y HORNOS DE ARCO

#### 5.3.1. Altos hornos

Son las instalaciones industriales [41] más antiguas que siguen funcionando actualmente, pues empezaron a utilizarse a mediados del siglo XIV. Sirven para convertir el hierro en arrabio o fundición. Se pueden observar un alto horno en la figura 56.

El coque se utiliza como combustible por su alto poder calorífico; la cantidad de éste suele ser la mitad que la del mineral del hierro. Además del coque, actualmente también se utilizan de combustible hidrocarburos, ya sea fuel-oil o gas natural, ya que ayudan al propio coque a aumentar la temperatura y el control de la misma.

Al disminuir el consumo de coque, ha disminuido el porcentaje de emisiones CO (monóxido de carbono) y el volumen del resto de gases. Además de aumentar la producción de acero alrededor del 10%.

Normalmente se hacen [41] unas 6 o 10 coladas al día, con una duración de 3 horas, y la fundición sale a una temperatura de unos 1400°C. El producto que se crea en el horno se suele llamar arrabio o hierro colado y, una vez que se ha solidificado en los moldes correspondientes, “lingote de hierro”.

Por la boca del horno [53] se carga el mineral y el combustible utilizado, existen unas válvulas para que se pueda cargar sin que se salgan los gases ni el calor. La cuba tiene forma cónica con la parte inferior de mayor tamaño y en ella tienen lugar las transformaciones químicas y formación de gases (combustión del coque, reducción del hierro al separarse del oxígeno, etc.)

En la parte inferior de la cuba se encuentra el crisol, que tiene forma cilíndrica y es donde se queda la fundición en estado líquido; en la cual en la parte superior se queda la escoria por su menor densidad y debajo el arrabio, de forma que es fácil de separar. La escoria es el residuo metalúrgico de la colada, en ocasiones se utiliza para la fabricación de otros materiales como bloques, cemento, etc.



Figura 56. Horno alto. Fuente: Historia local de Baracaldo

### 5.3.2. Hornos de arco

Los hornos de arco eléctricos (HAE) se basan en la transformación de la energía eléctrica en calor. Se caracterizan por grandes consumos de potencia activa y consumos muy variables de potencia reactiva. Los componentes básicos del circuito eléctrico del horno son una línea de entrada de alta tensión, un transformador reductor y el circuito eléctrico que va desde el secundario del transformador hasta los electrodos.

Debido a que no se utilizan combustibles para su calentamiento no se producen ningún tipo de impurezas.



Las materias primas empleadas en los hornos de arco son básicamente chatarra de hierro o de acero. La chatarra de acero [53] son piezas que han terminado su vida útil por cualquier motivo como puede ser el desgaste físico. Estas piezas pueden servir para crear nuevo acero pero previamente se ha de limpiar de materiales no metálicos como plásticos. Para la formación de la escoria también se utiliza caliza, cal, arena y coque.

Las ventajas de la fabricación de acero en los hornos de arco eléctrico son, entre otras:

- La instalación es mucho menos costosa y más sencilla que otros tipos de horno como los altos hornos.
- La carga puede ser de chatarra de diversas procedencias, por lo tanto el aprovisionamiento de materias primas es más sencillo y menos costoso.
- Tiene emisiones menos contaminantes que por ejemplo los hornos de gas, ya que produce gases pero no de combustión.

En la figura 57 se muestra un horno de arco de corriente alterna.



Figura 57. Horno de arco de corriente alterna. Fuente: [47]

#### 5.4. EL HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

### 5.4.1. Estructura del horno de arco

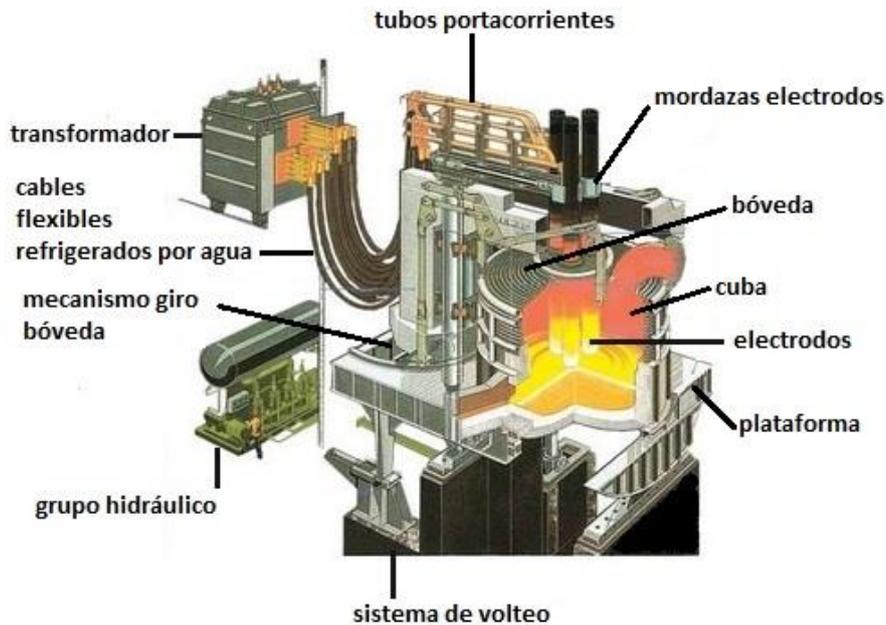


Figura 58. Partes principales que constituyen el horno de arco. Fuente: [62] y elaboración propia

Las principales partes que constituyen un horno de arco eléctrico o Electric Arc Furnace (EAF), representados en la figura 59, son:

- Los electrodos: están compuestos por grafito pues tiene una buena conductividad a altas temperaturas y no se funde. En la figura 59 se pueden ver perfectamente los electrodos con el horno en funcionamiento.

Son de forma cilíndrica y pueden medir de 1,5 a 5 metros. Hay que irlos sustituyendo ya que sus extremos se queman en el proceso y su mantenimiento se verifica a través de dispositivos automáticos.

Es uno de los mayores costes del proceso debido a que se consumen debido al desgaste en la punta por la acción del arco, rotura por el campo electromagnético, oxidación debido a la atmósfera oxidante dentro del horno, densidad de la chatarra, intensidad de la corriente, tiempo en el que soporta una intensidad máxima, tiempo entre colada y colada, etc.



Figura 59. Electrodo a alta temperatura en un horno de Finlandia. Fuente: Siemens

- La cuba: es donde se produce la fusión del metal y el recipiente que contiene dicho metal fundido. El material es de chapa de acero dulce soldada, revestida por dentro con material refractario y refrigerado por agua, con lo que se obtiene un funcionamiento más prolongado sin necesidad de reparación. La carga se hace por la bóveda superior y tiene un sistema de volcado para vaciar el contenido.
- Plataforma: su función es soportar la cuba, la bóveda, los brazos portaelectrodos, etc. a la vez que contener el sistema de basculación de la colada. También posee dispositivos para garantizar: la vuelta a la posición inicial después de la colada, evitar rotura de tuberías, que no haya fugas del metal ya fundido, etc.
- Brazos portaelectrodos: comienzan por las mordazas que sujetan a los electrodos, los tubos portacorriente y los cables flexibles refrigerados por agua. Lo normal es que sean de acero y las mordazas de cobre refrigeradas por agua con un accionamiento neumático para su afloje. Es un sistema cómodo debido al desgaste continuo de los electrodos.
- Sistema de volteo o mecanismos de basculación: mediante un grupo hidráulico se realiza la basculación. Deben permitir un volteo por lo menos del orden de 30°.
- Sistema de salida de humos: este sistema consta de un enfriador de humos, estación de filtrado con eliminación de polvos, un sistema de filtrado y un sistema de aspiración que dirige los humos hacia la chimenea de la industria. Este sistema se ve en la figura 60.



Figura 60. Tapa con orificio de los tres electrodos y tubo/codo para salida de humos de la cuba al sistema de filtrado. Fuente: [47]

- El transformador del horno: es el elemento principal del sistema eléctrico y tiene la capacidad de soportar grandes intensidades producidas sobre todo al principio de la fusión. Transforma la corriente eléctrica de alta tensión que llega al horno de unos 30kV a entre 200-1200V aproximadamente.
- Los cables flexibles: transportan la corriente desde el secundario del transformador a los electrodos.
- Sistema de control por ordenador: en un principio el operario era el que ajustaba los valores de los diferentes parámetros; en la actualidad se utilizan sistemas automatizados que muestran datos (temperatura, datos de la carga, etc,) y que es capaz de enviar las señales necesarias en cada momento (tensión, cantidad de gas y oxígeno, etc.).

Un ejemplo de este control por ordenador es el sistema ARMS (Automatic Rapid Melting System) [40] que contiene, entre otros, un microprocesador central que controla el proceso y mediciones, impresora para los partes de la operación, pantalla para la visualización del proceso, equipo de grabación, etc.



Figura 61. Sala de control de acería. Fuente: Bascotecnia Steel [47]



- Otros mecanismos de accionamiento: apertura y cierre de la puerta de la cuba, elevación y descenso de los electrodos, apertura y cierre de colada por el fondo de la cuba, etc. Gran parte de estos mecanismos están conectados al grupo hidráulico.

#### 5.4.2. Etapas principales de funcionamiento del horno de arco

Las principales fases de funcionamiento del horno de arco son, básicamente, [50] la etapa de fusión y la etapa de afino. En un principio se carga el horno con la chatarra; en los hornos pequeños, de manera manual, y en los hornos grandes, a través de la bóveda.

- Llenado de la cuba: se selecciona con anterioridad la chatarra para que no contenga otros metales como cobre, aluminio, etc. Aunque es cierto que en ocasiones se hacen ferroaleaciones con níquel, cromo, etc. para fabricar aceros especiales. En las siguientes figuras se ve el proceso de traslado de chatarra hacia la cesta con ayuda de pulpos (figura 62), cesta llena de chatarra (figura 63) y posteriormente como se abre la compuerta inferior de ésta y cae sobre la cuba (figura 64).



Figura 62. Pulpo electrohidráulico para chatarras. Fuente: Stemm [48]



Figura 63. Cesta llena de chatarra. Fuente [45]

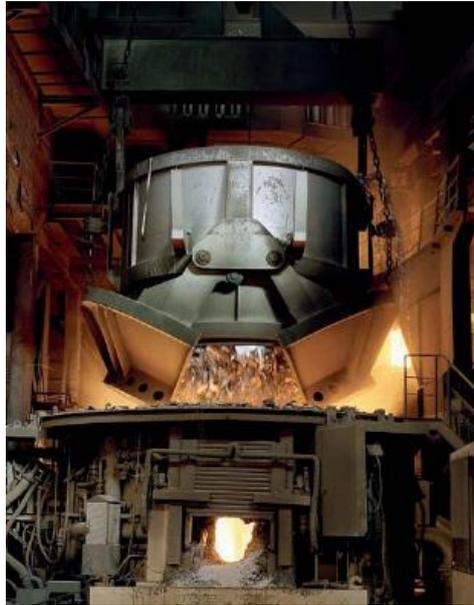


Figura 64. Cesta abierta para llenado de la cuba. Fuente: [55]

Para aprovechar la capacidad de la cuba y minimizar las variaciones de longitud del arco eléctrico se suele poner chatarra más desmenuzada en la parte superior. Para ello, anteriormente se ha clasificado el material según patrones como espesor y longitud.

Cabe decir que España es el líder europeo de reciclaje de acero, ya que el sector siderúrgico nacional aprovecha el 80% de la chatarra férrea para darle un nuevo uso, a diferencia del nivel de Europa que es del 50%.

- Etapa de fusión: tras el llenado de la cuba con la chatarra se utiliza el calor del arco eléctrico para fundirla. Se descienden los electrodos hasta el punto en el que se produzca el arco y haya la mayor cantidad de calor posible. Los electrodos sufren mucha variación de su posición ya que es muy irregular el arco eléctrico producido entre los electrodos y la propia chatarra. También produce variaciones en la longitud de los arcos los espacios que crea la chatarra ya fundida. Cuanto más material fundido más constante es el movimiento de los electrodos.

Todo el proceso lo constituyen tres fases ya que hay interrupciones para recargar la cuba con más chatarra, pues fundida ocupa menos espacio. Esta etapa es a máxima potencia -aunque no constante- en cada una de las tres fases. Durante todo este proceso es muy importante el control de temperatura y de voltaje.

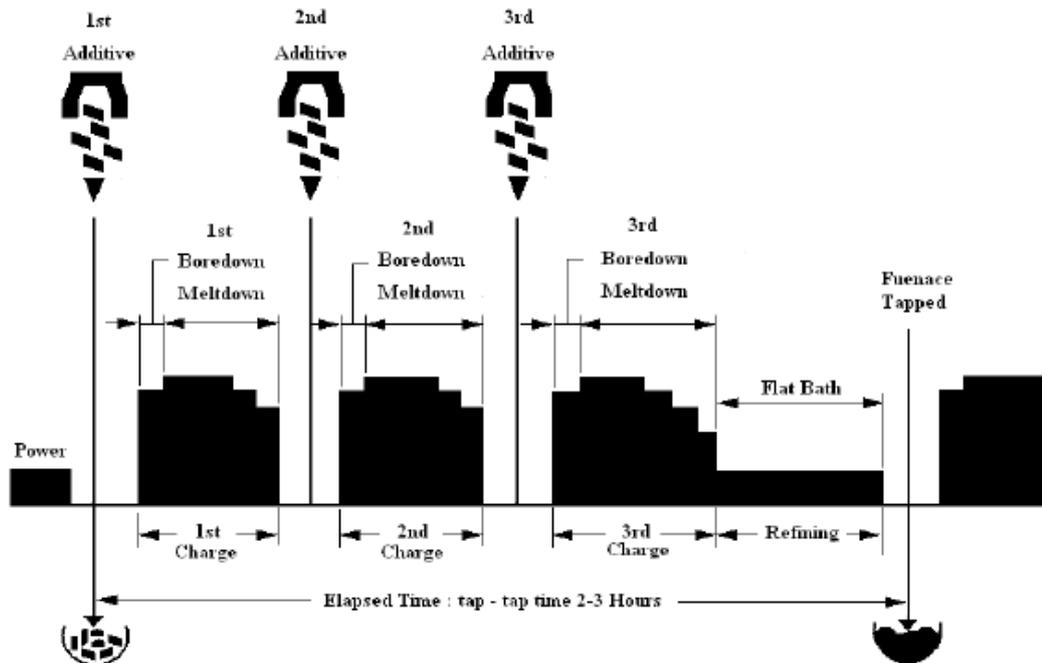


Figura 65. Los tres rellenos de la cuba y la variación de la potencia (MW). Fuente: [52]

Se desprenden componentes contaminantes como monóxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno y material particulado.

Debido a las condiciones térmicas [51], sobre todo en las paredes y fondo de la cuba, el horno está equipado con un sistema de enfriamiento por agua. La energía eléctrica se corta cuando la temperatura sea mayor aproximadamente de 105° C y volverá a restaurarse al bajar sobre los 80°C.

Para la ayuda de la fusión de los materiales se suele inyectar oxígeno a través de lanzas para facilitar la reacción entre sí. La formación de CO (monóxido de carbono) ayuda a la creación de la escoria, la cual protege al acero en estado líquido de la reacción con la atmósfera y aumenta la eficiencia eléctrica al sumergir el arco de los electrodos.

- Etapa de afino: una vez que está todo el material fundido, empieza su oxidación por la acción del oxígeno del aire, incorporando minerales de hierro y oxígeno para agilizar este proceso. Esta etapa se realiza para conseguir una composición idónea del acero y se realiza en el horno de afino u horno de cuchara.
- Colada: finalizado el afino, comienza la colada, definido como el procedimiento siderúrgico en el que el acero se vierte sobre el molde deseable cuya sección tiene la forma geométrica del producto que se desea fabricar. Posteriormente es el turno del sistema de enfriamiento, con duchas de agua fría y posteriormente con aire. Se corta con ayuda del oxicorte [53], que son unos sopletes accionados generalmente con oxígeno y propano, y usando un equipo

de medición para hacer los cortes a la medida requerida. En la figura 66 se ve el proceso del acero a la salida del horno.

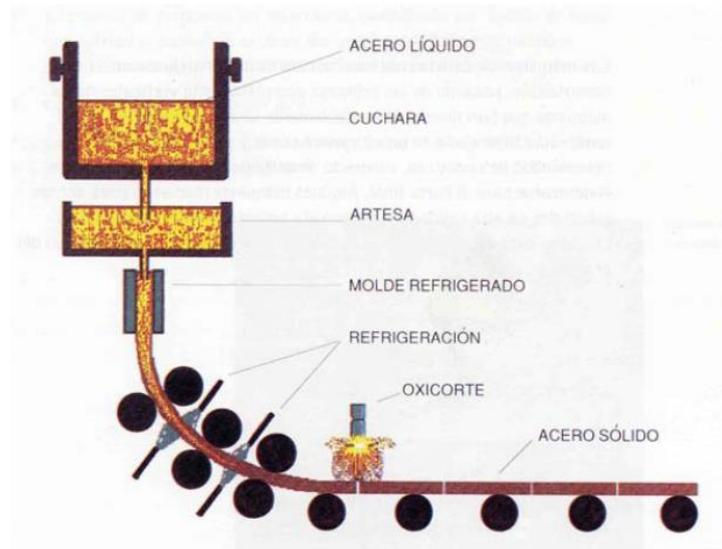


Figura 66. Proceso a la salida del horno de cuchara. Fuente: [53]

Una vez solidificado el acero líquido se le da la forma requerida por laminación o forja.

En el caso de querer productos planos se pasa el producto entre dos rodillos o cilindros que giran a la misma velocidad y sentidos contrarios, disminuyendo su sección transversal a través de la presión. Cuanto mayor sea la temperatura mayor será su capacidad de ductilidad. Este proceso se hace entre los 1250-800°C.

En la figura 67 se observa un resumen de las etapas.

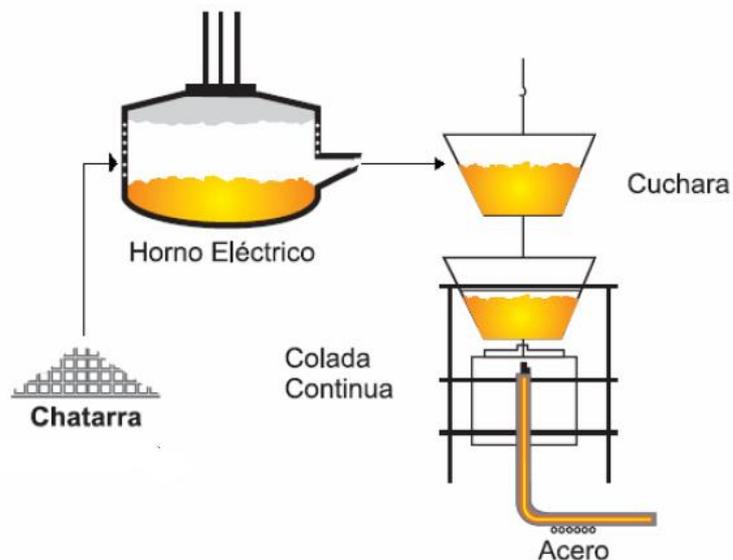


Figura 67. Etapas horno de arco eléctrico. Fuente: [68]

### 5.4.3. El horno de arco eléctrico de Corriente Continua (CC) y su comparación con el de Corriente Alterna (CA).

El horno de arco de corriente continua [40] normalmente se conecta a líneas eléctricas de 10 a 40 kV, aunque en España es muy frecuente que sea a 30 kV.

Las principales diferencias entre el de corriente alterna y el de corriente continua son las siguientes:

- En C.C. únicamente se dispone de un electrodo en la bóveda, a diferencia de en C.A., donde existen tres.
- Tiene mayor agitación en el baño al circular la corriente de manera continua, de esta manera la composición es más homogénea.
- El horno de arco de C.C., que se representa en la figura 68, contiene en sus sistema eléctrico un rectificador que convierte la corriente alterna proveniente del transformador en corriente continua.

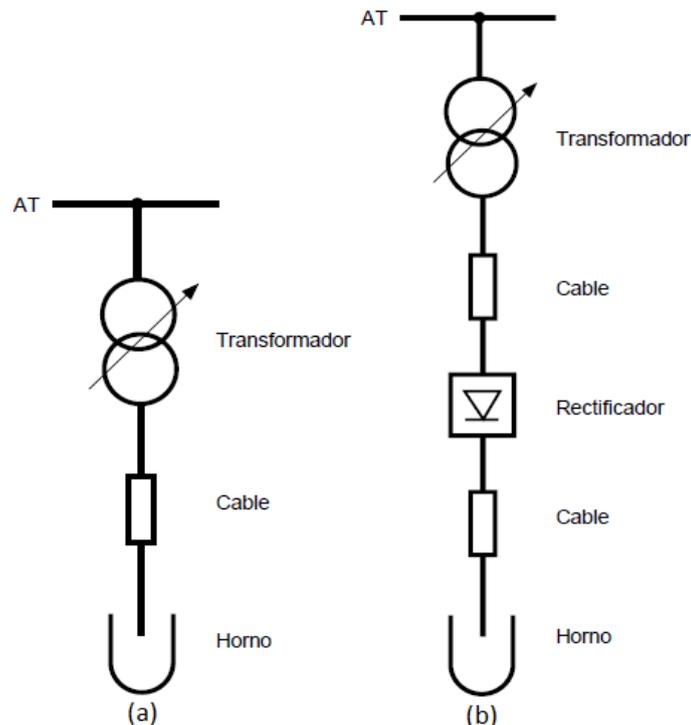


Figura 68. Horno de arco alimentado con corriente alterna (a) y con corriente continua (b). Fuente: [32]

Si se comparan el horno de arco de C.A. con el de C.C., se comprueba que, mientras el primero lleva más de 100 años de desarrollo, el de C.C. apenas lleva unos 30 en el ámbito industrial.

El horno de C.C. representado en la figura 69 tiene las siguientes ventajas:

- Menor consumo de electrodos: teniendo un tercio menos de electrodos y teniendo constancia del coste que suponen, es una ventaja clara frente al de C.A. pudiendo suponer un ahorro del 50%.
- Menor consumo de energía eléctrica: se puede suponer un ahorro en el consumo eléctrico del 5% a pesar de constar también con el rectificador de corriente.
- Menor consumo de refractario: existe menos destrucción del refractario del horno pues el electrodo está más separado de las paredes que los tres electrodos del horno de C.A. Es mucho más importante la situación óptima del refractario en los hornos de corriente continua ya que el ánodo está en el fondo del horno.

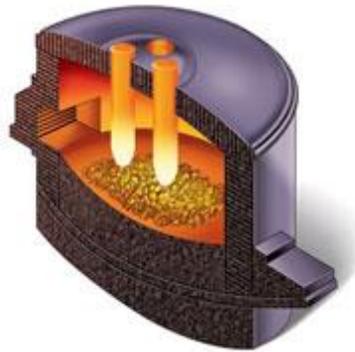


Figura 69. Hornos de arco de corriente alterna (tres electrodos). Fuente: Gas Natural Fenosa

Cabe decir que, aunque el horno de arco de C.C. tiene algunas ventajas sobre el de C.A., a día de hoy muchas industrias siderúrgicas continúan con el C.A. [55] básicamente por tres razones:

- El equipamiento del horno de corriente continua es mucho más complejo y costoso (alrededor de un 30-40%).
- Su mantenimiento también es mucho más elevado (un ejemplo de ello es que al tener el ánodo en la misma cuba se requiere mucho aporte económico para que esté en su estado óptimo de funcionamiento).
- Las industrias tienen sistemas automatizados y equipos de mantenimiento adaptados al de corriente alterna y no se plantean un cambio tan global.

Todos estos aspectos hacen que aunque el horno de arco de corriente continua tenga ventajas a día de hoy no resulte rentable para muchas industrias.

#### 5.4.4. Circuito de alimentación

El circuito eléctrico contiene resistencias, reactancias y condensadores que determinan el funcionamiento de la instalación. Dichos parámetros son, entre otros:

- la tensión e intensidad de la corriente;
- las potencias activas a la entrada y en el arco; y
- los factores de potencia

Estos parámetros permiten determinar las condiciones óptimas de funcionamiento:

- Máxima producción, es decir, que procederá de la mayor potencia en el arco.
- Máximo rendimiento, o sea, mínimas pérdidas energéticas respecto a la potencia consumida, normalmente es un punto de funcionamiento a potencia en el arco algo inferior a la máxima.
- Mínimo coste de funcionamiento, lo que implica, no sólo el coste de la energía sino otros (consumo de electrodos y de refractario, carga, mano de obra, etc.).

El sistema eléctrico del horno de arco se constituye en la figura 70.

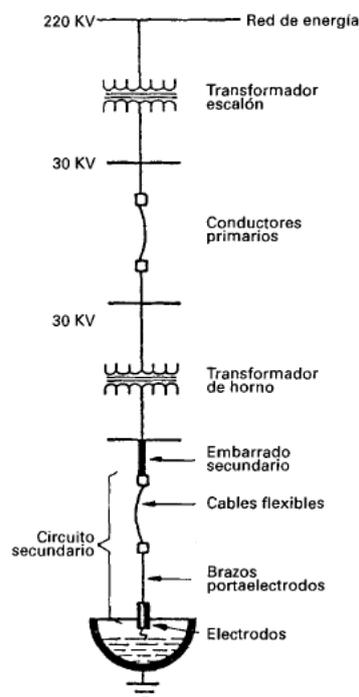


Figura 70. Sistema eléctrico del horno de arco. Fuente: [40]

El factor de potencia [40] o  $\cos \phi$  se utiliza para saber qué cantidad de energía se ha convertido en trabajo y es el cociente entre la potencia activa  $P$  (MW) y la potencia aparente  $S$  (MVA).

$$FP = \frac{P}{S}$$

El factor de potencia será igual al  $\cos \phi$ , o el coseno del ángulo que forman  $P$  y  $S$  en el triángulo de potencias:

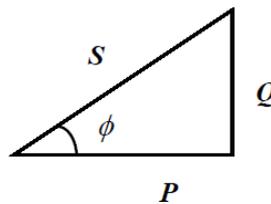


Figura 71. Triángulo de potencias. Fuente: [40]

El valor idóneo es 1 y significa que toda la energía consumida ha sido transformada en trabajo y que la potencia reactiva  $Q$  es nula.

Si el factor de potencia (f.d.p.), o  $\cos \phi$ , es menor que 1 significa [63] que la potencia reactiva no es nula, y la potencia activa y aparente no son iguales. Por tanto la intensidad que circula por los cables es mayor que la estrictamente necesaria para la potencia útil demandada en la instalación. Comparado con el caso que  $fdp=1$ , existen mayores pérdidas y calentamientos en los cables, se pierde capacidad de transportar potencia en la instalación y se producen mayores caídas de tensión.

Si el factor de potencia (f.d.p.), o  $\cos \phi$ , se aleja mucho del valor 1 es necesaria la compensación de la energía reactiva para evitar penalizaciones en la factura eléctrica, y sobrecargas y caídas de tensión en la instalación eléctrica.

En la figura 72 se observa la curva característica de la carga de un horno de arco eléctrico.

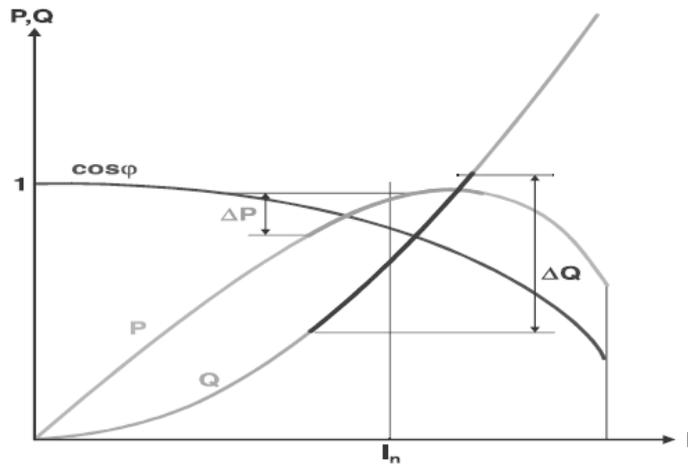


Figura 72. Curva característica de carga de un HAE. Fuente: [56]

Se puede interpretar de la figura que, en el momento de fusión,  $\Delta Q$  es mucho mayor que  $\Delta P$ . Cuando no está adaptado el sistema para suministrar potencia reactiva con variaciones tan drásticas, la tensión en la barra que alimenta el horno de arco, sufre grandes variaciones de tensión. En la figura 73 se puede observar durante una colada completa las variaciones de la potencia Activa y Reactiva.

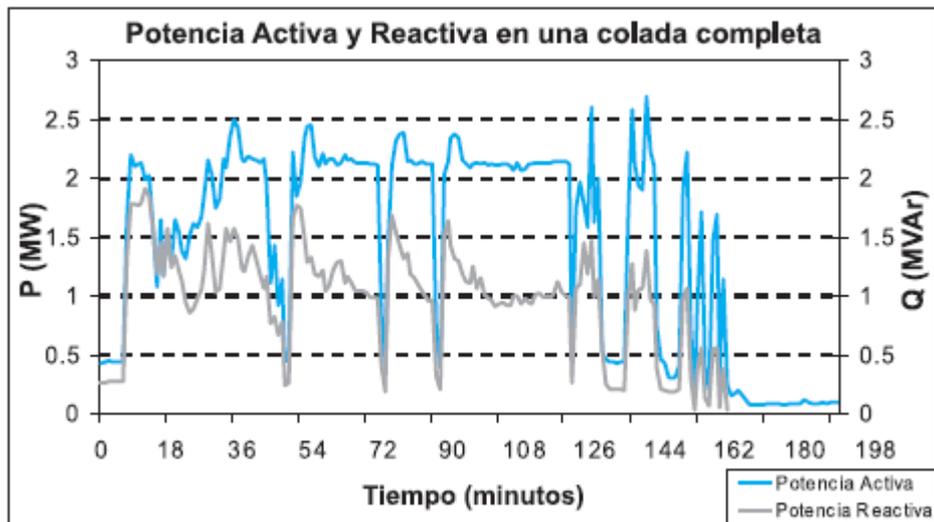


Figura 73. Potencia activa y reactiva durante una colada completa. Fuente:[58]



En la tabla 15 está el ejemplo de las características eléctricas de un horno de arco de 60MVA.

red aguas arriba	potencia de cortocircuito	$S_{ccn} = 5500 \text{ MVA}$
	tensión nominal	$U_n = 225 \text{ kV}$
transformador reductor	potencia nominal	$S_{tra} = 80 \text{ MVA}$
	tensión de cortocircuito	$u_{cca} = 10\%$
red de la fábrica	tensión nominal	$U_{res} = 30 \text{ kV}$
reactancia en serie	impedancia	$X_{ser} = 0,0 \Omega$
transformador del horno	potencia nominal	$S_{trf} = 60 \text{ MVA}$
	tensión de cortocircuito	$u_{cdf} = 7,5\%$
	tensión nominal en el lado BT	$U_{2f} = 750 \text{ V}$
horno	impedancia de las conexiones BT	$X_{BT} = 0,003 \Omega$
	potencia nominal	$S_f = 60 \text{ MVA}$

Tabla 15. Características eléctricas horno de arco de 60MVA. Fuente: [59]

#### 5.4.5. Interacción y perturbación de la red eléctrica

Las acerías en general y específicamente los hornos de arco eléctrico [56] son de las peores cargas que puede soportar una red eléctrica, ya que suponen una gran fuente de perturbaciones. Estas perturbaciones se originan porque no se pueden compensar instantáneamente las variaciones tan rápidas de la potencia reactiva en cada una de las fases de la producción del horno de arco. Estas variaciones grandes y rápidas de potencia activa provocan grandes variaciones de tensión lo que provoca una disminución de la potencia activa y, por consiguiente, limitan el suministro de potencia activa al horno de arco y las cargas conectadas a la misma barra.

La tensión del arco eléctrico al ser cuadrada en vez de sinusoidal aporta armónicos en el circuito del horno. En la etapa de fusión [50] también existe una gran demanda de potencia al sistema eléctrico. Las variaciones de potencia reactiva hacen que se modifique la tensión y al no haber una relación lineal entre esta tensión y la intensidad, se crean deformaciones en estas señales. Las perturbaciones más frecuentes producidas en los hornos de arco son:

- Armónicos
- Interarmónicos
- Flicker
- Desequilibrios de tensión
- Transitorios

El momento más crítico es durante la fusión de la chatarra, en los que hay de manera continua cortocircuitos y apagados de arco. Estos apagados ocurren cuando no se puede mantener el arco debido al nivel insuficiente de potencia, y la falta de ionización del gas que impide que circule la corriente. Esto último es causado por la excesiva

distancia entre el electrodo y la chatarra. Durante la etapa de afino [24] el movimiento del arco tiene mejor comportamiento, aunque todavía hay cambios en la longitud del arco sobre el metal fundido. Este mejor comportamiento es debido a que ya que el baño ya tiene una forma más homogénea y la distancia a los electrodos es más constante.

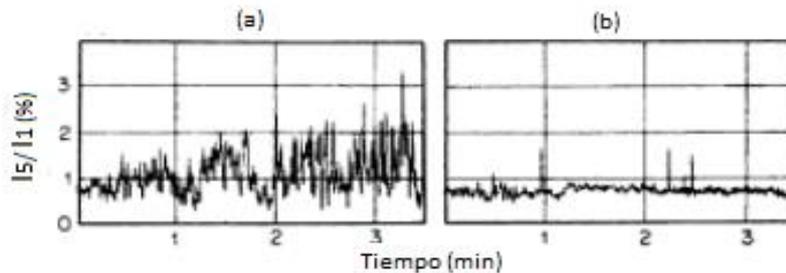


Figura 74. Variación en el tiempo del quinto armónico (a) durante la fusión y (b) durante el refinado.  
Fuente:[48]

También provocan caídas de tensión el movimiento de los brazos portaelectrodos, los cuales ascienden y descienden según existan cortocircuitos y apagados de arco. Estas caídas de tensión moduladas en frecuencias inferiores a la fundamental crearán flicker, que se manifiesta con fluctuaciones de la luminancia de las lámparas incandescentes y parpadeo en receptores de televisión.

Como la longitud del arco varía muy frecuentemente y no de manera constante, se produce una onda de intensidad que no es senoidal pura, y esta afecta a la onda de la tensión.

Los armónicos de intensidad producen pérdidas en conductores y transformadores y los de tensión afectan a otros usuarios que reciben tensión no senoidal. Si se mitigan los armónicos que se inyectan de corrientes armónicas se podrá controlar el contenido de armónicos de la onda de tensión.

Si todas estas corrientes y tensiones asimétricas no se corrigen, se inyectan [50] al sistema de suministro y serán transmitidas por la red a otros usuarios. Con el aumento del tamaño de las capacidades de los hornos de arco esta cuestión es cada vez más fundamental, lo que justifica adoptar medidas para su mitigación.

Los componentes armónicos [40] creados por el arco que no son múltiplos de tres pasan a la red si no se dispone de un sistema de filtrado en el inicio de la instalación.

## 5.5. MITIGACIÓN DE LAS PERTURBACIONES

- Armónicos

En el punto 6 se presenta una solución para la mitigación de armónicos haciendo uso de filtros.

- Compensación de reactiva

En estos hornos, para la compensación de reactiva no se utilizan las baterías de condensadores debido al desequilibrio entre las distintas fases y las variaciones muy rápidas de la misma potencia reactiva. En su lugar se utiliza el [65] Compensador Estático de Potencia Reactiva o *Static Var Compensator* (SVC), también conocido como [56] Compensador Estático de Tensión (CET) o Compensador Estático de Var. Este sistema suministra continuamente la potencia reactiva y se consigue: aumentar la producción de los hornos, reducir los costes de producción y mejorar la calidad de la potencia. Estos compensadores mejoran la calidad de la potencia manteniendo en el punto de conexión común un factor de potencia estable y cercano a 1, independientemente de los cambios de la potencia reactiva, a la vez que controlan el nivel de tensión para mitigar el nivel de flicker y armónicos.



Figura 75. SVC (*Static Var Compensator*). Fuente:[64]

Estos sistemas con una tecnología de electrónica de potencia se están utilizando desde la aparición de los tiristores de potencia. Son capaces [50] de compensar instantáneamente (en milisegundos) las variaciones de potencia reactiva que provocan caídas de la tensión de alimentación como se ilustra en la figura 76.

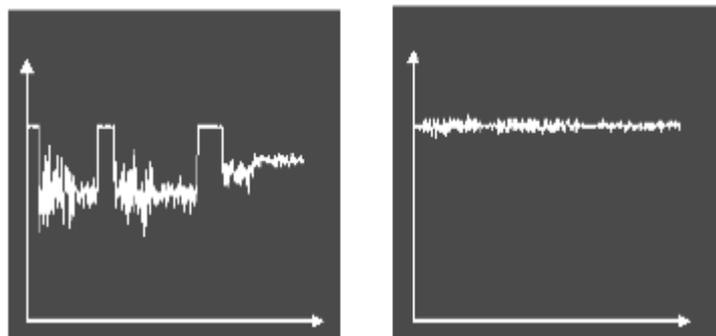


Figura 76. Tensión vs tiempo sin SVC y con SVC. Fuente: [56]

Compensando la potencia reactiva absorbida, la tensión de alimentación de la barra permanecerá más estable por lo que aumentará el suministro de potencia activa al horno. Un ejemplo real de un horno de arco, con horno de cuchara y sistema SVC es el siguiente de la figura 77:

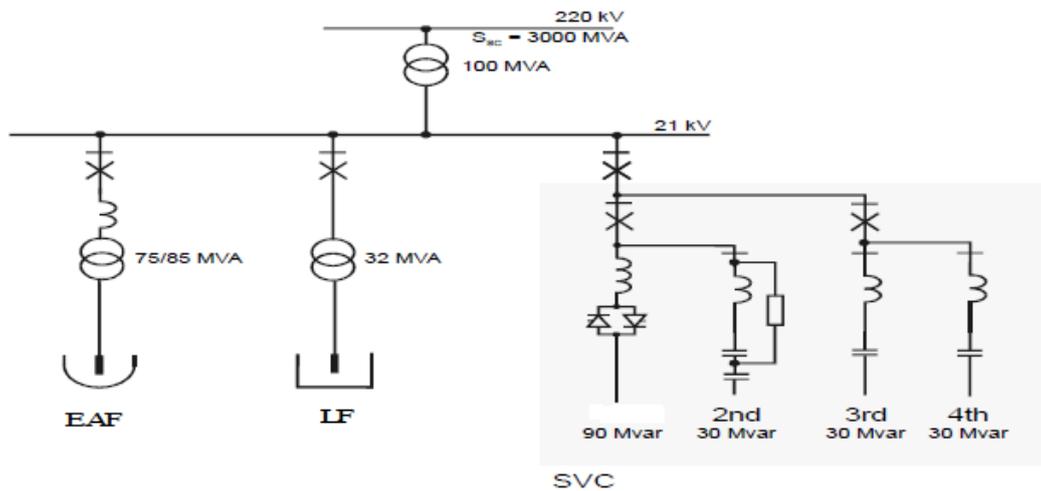


Figura 77. Horno con SVC. Fuente: [56]

El SVC en este caso está compuesto por una bobina controlada por tiristores en antiparalelo (TCR, Thiristor Controlled Reactor) y tres filtros al 2º, 3º y 4º armónico, ya que los tiristores crean armónicos por su conducción parcial. Este compensador no lineal [60] suele conectarse en paralelo con la batería fija de filtros.

En la figura 78 se muestra el esquema del compensador estático TCR.

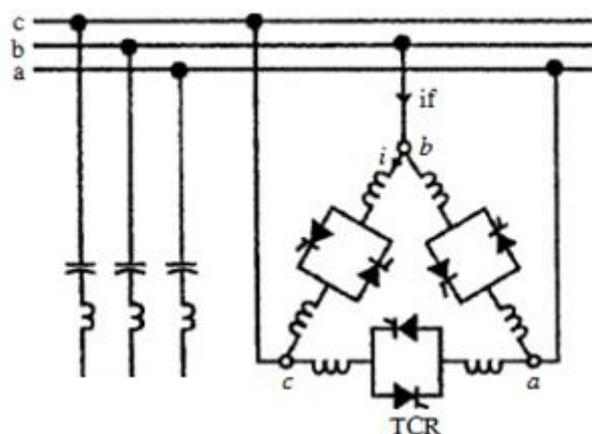


Figura 78. Esquema compensador estático TCR. Fuente: [24]

Este sistema [56] aporta:

- mejora el funcionamiento del horno disminuyendo las fluctuaciones de tensión;
- minimiza la distorsión armónica;
- reduce el flicker entre un 25-50%;
- aumenta la potencia de fundición;
- eleva el factor de potencia casi a 1;
- incrementa la producción; y
- disminuye el consumo de electrodos y de energía.

- Flicker

Para la reducción del flicker generado por los hornos e inyectado a la red de alimentación [59] se puede cambiar: el sistema de iluminación, modificar el perturbador (cambiar la rapidez de llenado del horno, etc.), modificar la red (aislando la carga de los circuitos de iluminación), aumentar la potencia del transformador común (con  $U_{cc}$  constante), etc. O utilizar sistemas como por ejemplo: la reactancia en serie, la capacidad serie (ambos mostrados en la figura 79), los mencionados anteriormente Compensadores Estáticos de Tensión (CET) o los SVC Light [56][57].

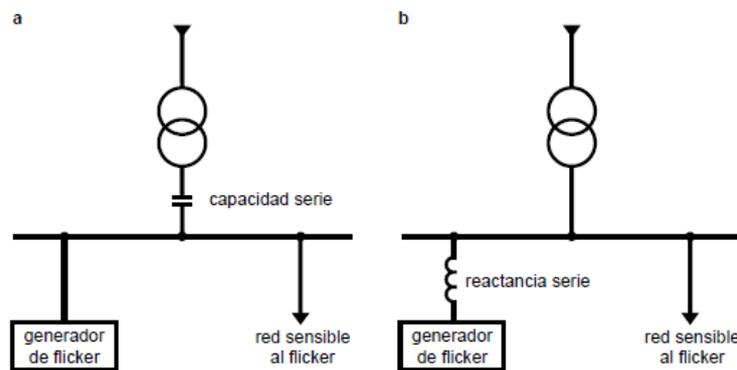


Figura 79. Capacidad serie (a) y reactancia serie (b) para la mitigación del efecto flicker. Fuente: [59]

- Normativa

Algunas normas ya explicadas en el punto 4.3 sobre normativa de los armónicos son aplicables para los hornos de arco y se verá su aplicación de una manera más sencilla en el caso práctico.

La norma americana IEEE Std 519-1992 [15] explica que los armónicos producidos en los hornos de arco son impredecibles debido a la variación aleatoria del arco eléctrico, sobre todo cuando se perfora la chatarra. La corriente del arco no es periódica, y las frecuencias armónicas son de orden entero y no entero. Cabe decir que predominan las de orden entero y, entre ellas, las de bajo orden desde el segundo al séptimo. El arco se vuelve más estable según se funde el metal, produciendo corrientes más uniformes con menos distorsión armónica.



La siguiente tabla muestra el contenido armónico de corriente del horno de arco en dos fases del ciclo de fundición para la producción de acero.

	Orden del armónico / Corriente armónica en % de la fundamental				
Fase del horno	2	3	4	5	7
Fundición inicial (arco activo)	77	5,8	2,5	4,2	3,1
Refinamiento (arco estable)	0	2	0	2,1	0

Tabla 16. Contenido armónico en un horno de arco. Fuente: [15] y elaboración propia



## 6. CASO PRÁCTICO. HORNO DE ARCO CON SISTEMA DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

---

### 6.1. INTRODUCCIÓN

Para una visión más práctica de la penetración de armónicos y su mitigación en las plantas industriales, se muestran las medidas adoptadas en una planta siderúrgica, la cual está afectada por los armónicos generados por el horno de arco eléctrico de corriente alterna.

### 6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ACERÍA

El caso práctico se describe como una acería en la que hay instalado como carga principal un horno de arco eléctrico de corriente alterna. Además del horno de arco eléctrico existe un horno de afino. El horno [50] tiene una capacidad de 150 toneladas que se llenará de chatarra cuando comience el proceso de fusión.

El horno UHP (“Ultra High Power”) de esta acería está preparado [50] para funcionar con un  $\cos\phi > 0.7$ , aunque normalmente se sitúa en torno al 0.75

La acería se alimenta a una tensión de 132 kV, que es transformada mediante un transformador T1 (conexión Yd)(AT/MT) a 30 kV. Posteriormente el transformador del horno de fusión T2 (conexión Dd) convierte la tensión a 660-990V que alimenta a los electrodos. Otro transformador T3 (conexión Yd) transforma la tensión de 132kV a 15 kV y es de nuevo transformada por T4 (conexión Dd) para alimentar al horno de afino a 360V.

El horno de arco que está a 30kV, tiene una potencia de SN= 80 MVA. El horno de afino está conectado a una línea de 15 kV y tiene una potencia mucho menor que el horno de arco, SN= 10 MVA. Este horno de afino tiene un comportamiento más estable, por lo que producirá muchas menos perturbaciones.

En el punto de conexión de la acería con la red eléctrica, conocido como PCC (punto de conexión común), se registran los armónicos de intensidad inyectados a la red por los elementos perturbadores (horno de fusión, y horno de afino) así como por el sistema de compensación de reactiva (SVC).



### 6.3. DESCRIPCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA EXISTENTE

Antes de diseñar la solución a las perturbaciones producidas por el horno de arco, es necesario identificar los armónicos existentes y su magnitud. Es importante la limitación de estos armónicos [35] por evitar que la acería los inyecte a la red y porque pueden acarrear el mal funcionamiento de elementos conectados a la propia instalación, incluso la destrucción de algunos de ellos.

- Armónicos de tensión

Los límites de emisión de armónicos se establecen según el punto de estudio, las medidas en esta acería se realizan en el PCC que se sitúa a 132 kV. La norma UNE-IEC/TR 61000-3-6 determina que a 132 kV se está en el rango de Alta tensión (AT)  $35 \text{ kV} < U_n \leq 230 \text{ kV}$ , y la tabla correspondiente de niveles de tensiones armónicas es la siguiente:

Órdenes impares no múltiplos de 3			Órdenes impares múltiplos de 3			Órdenes pares		
Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %		Orden h	Tensión armónica %	
	MT	AT-MAT		MT	AT-MAT		MT	AT-MAT
5	5	2	3	4	2	2	1,6	1,5
7	4	2	9	1,2	1	4	1	1
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,4	0,4
17	1,6	1	>21	0,2	0,2	10	0,4	0,4
19	1,2	1				12	0,2	0,2
23	1,2	0,7				>12	0,2	0,2
25	1,2	0,7						
> 25	0,2 +	0,2 +						
	$0,5 \frac{25}{h}$	$0,5 \frac{25}{h}$						

NOTA Tasa total de distorsión armónica (THD): 6,5% en redes de MT y 3% en redes de AT.

- 1) Una tensión  $U_2$  del 1,5% puede parecer demasiado fuerte para una red de AT, pero se pueden encontrar esos valores y es conveniente recordar que la presencia de un armónico de orden 2 no está necesariamente ligado a una componente continua.

Tabla 17. Valores indicativos de niveles de planificación de tensiones armónicas (en porcentaje de la tensión nominal) en las redes de MT, AT y MAT. Fuente: [21]

Los armónicos de tensión dominantes en esta acería [50] son los de orden impar, sobretudo el 3° y 5°. El de tercer orden la mayor parte del tiempo está por debajo del 2% que está establecido como límite pero en momentos del proceso de fusión llega a alcanzar un valor del 4,5%. La distorsión armónica total tiene un valor medio de 1,3%, cuando el horno no está en funcionamiento desciende a menos del 1%. Los armónicos de orden par son los que más sobrepasan los límites a excepción del 3° armónico. El de segundo orden llega al valor del 2,1 % siendo su límite un 1,5%.

Tras conocer los armónicos de tensión existentes y los límites permitidos establecidos en la normativa, se hace necesario adoptar medidas para reducir los armónicos a niveles admisibles.

- Armónicos de corriente



La distorsión de la onda de tensión depende de la inyección de armónicos de corriente. Por ellos es de gran importancia limitar los armónicos de corriente que inyectan los usuarios a la red eléctrica.

La norma Estándar IEEE 519, que se ha comentado en el tema de la normativa de armónicos, establece unos límites para los armónicos de intensidad en el PCC. Estos límites se tienen de base para el peor caso posible y se pueden exceder un 50% para emisiones de armónicos en cortos periodos de tiempo, como es el caso de los arcos eléctricos ya que su valor varía constantemente. Para el nivel de 132 kV del PCC de esta acería se está dentro del rango de 69 kV a 161 kV de la tabla 18 y hay que tener en cuenta [50] que  $I_L = 150$  A,  $S_{cc} = 1000$  MVA,  $I_{cc} = 4373$  A y por tanto  $I_{cc} / I_L = 29.15$ . Con este valor se sitúa en el rango de  $20 < I_{cc} / I_L < 50$ .

Se utiliza esta norma ya que la UNE-EN 61000-3-12:2012 aporta límites para las redes de 50 Hz y 230/400 V y los límites para las demás redes se añadirán en la próxima edición.

Máxima distorsión de corriente armónica (en % de $I_L$ ) / Orden armónico individual (impares)						
$I_{cc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10

$I_L$  = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.  
 $I_{cc}$  = máxima corriente de cortocircuito en el PCC.  
 TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima  
 Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares  
 Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de  $I_{cc}/I_L$

Tabla 18. Límites de armónicos de corriente para sistemas de distribución en general de 69 kV a 161 kV. Fuente: [15] y elaboración propia

Durante una jornada en la acería el TDD (Distorsión Demandada Total) puede llegar a alcanzar puntualmente el valor del 36 %, muy superior al límite de 4 % (el límite final sería del 6 % al sumarle el 50% para emisiones de armónicos en cortos periodos de tiempo).

Los armónicos dominantes son los de orden 2, 3, 5 y 4. A partir del armónico 11° sus valores medios son mínimos. El armónico de orden 2 alcanza valores del 17 %, el armónicos de orden 3 valores del 13 % y el armónico del orden 5 valores del 6%. Datos muy superiores para el máximo estipulado del 3,5 % (el límite final sería del 5,25 % al sumarle el 50% para emisiones de armónicos en cortos periodos de tiempo). El 2° armónico es el que más veces supera el límite permitido.



Las medidas se han realizado con transformadores de tensión e intensidad que son sólo fiables hasta el armónico de orden 10.

También habría que tener en cuenta los interarmónicos [39] según la norma CEI 61000-4-7 ya que también contribuyen a la medida de distorsión total, pero la falta de datos ha hecho que el caso práctico se haya basado únicamente en los armónicos.

Tras conocer los armónicos de corriente existentes y los límites permitidos establecidos en la normativa, se hace necesario adoptar medidas para reducir los armónicos a niveles admisibles.

#### **6.4. SOLUCIÓN ADOPTADA**

Después de conocer los armónicos presentes en la acería, se plantea la posible solución con el objetivo de limitar, mediante filtrado, la distorsión en las ondas de tensión y corriente producidas por el horno de arco. Su eliminación total [35] no es posible tanto por motivos técnicos como económicos, ya que no se puede estimar de manera exacta la magnitud de los armónicos en todo instante de tiempo.

Existen varias posibles soluciones para la mitigación de armónicos en las acerías. Una de las soluciones consiste en la instalación de un filtro pasivo y un sistema de compensación de la potencia reactiva.

- Sistema de compensación de reactiva (Static Var Compensator, SVC)

En la etapa de fusión hay una gran demanda de potencia reactiva debido a la cantidad de cortocircuitos que hay entre la chatarra y los electrodos. Estas variaciones rápidas de potencia reactiva provocan grandes variaciones de tensión lo que hace disminuir la cantidad de potencia activa entregada al horno y una mayor duración de la etapa de fusión. Para que todas estas variaciones no se propaguen por la red es necesario compensar estas variaciones de potencia reactiva. Al ser unas variaciones muy rápidas, no se utilizan sistemas tradicionales como batería de condensadores en paralelo.

Este sistema de electrónica de potencia SVC está compuesto por bobinas controladas por tiristores, TCR, y en esta acería están conectados a la línea de 15kV [50].

Como se ve en la imagen 80, este sistema tiene acoplados en paralelo filtros del 2°, 3°, 4° y 5° orden, para filtrar los armónicos que crean los tirisotres. Estos filtros de absorción formados por un condensador y una bobina están sintonizados a una frecuencia próxima al armónico a eliminar. La conexión siempre [31] está en orden ascendente o descendente de sintonización para evitar resonancias.

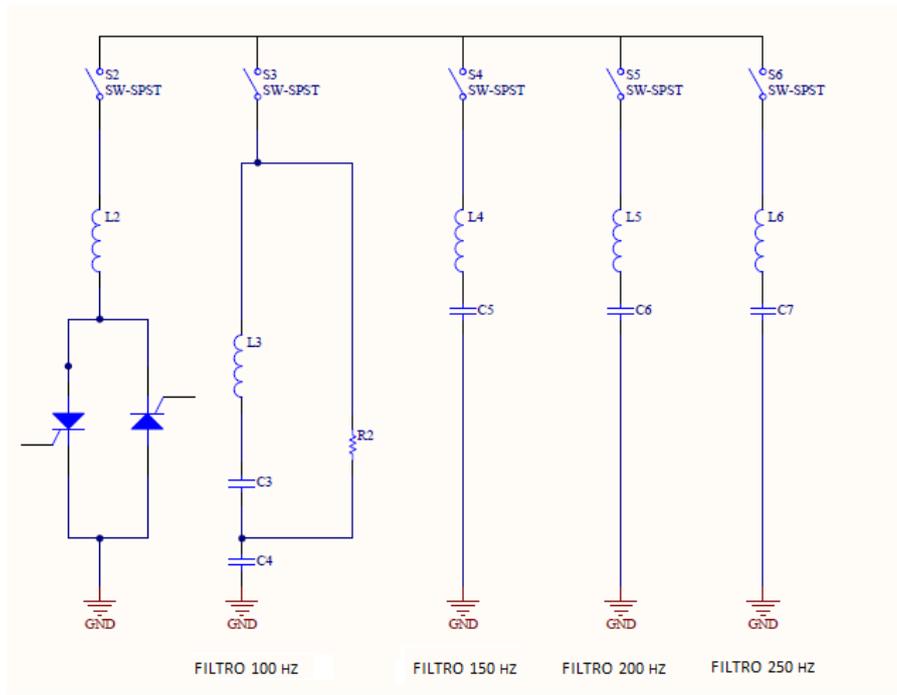


Figura 80. Sistema de compensación de reactiva formado por bobina controlada por tiristores (TCR) y sus filtros en paralelo. Fuente: elaboración propia

- Filtro pasivo tipo C

En la línea de 30kV de la acería, donde está situado el horno de fusión, se conecta [50] un filtro para eliminar o atenuar los armónicos de 2° orden. Éste es un filtro pasivo de tipo C y se conecta en paralelo entre el horno de arco (carga perturbadora) y el sistema eléctrico.

La principal ventaja del filtro tipo C [24] es una notable reducción de las pérdidas debido a que  $C_2$  y  $L$  están sintonizados en serie a la frecuencia fundamental y  $R$  cortocircuitada; como resultado, este filtro es más susceptible a desviaciones de la frecuencia y de los valores de los componentes.

Este filtro además de eliminar el armónico de orden 2, también atenúa los interarmónicos generados por el horno de arco en torno a ese 2° armónico.

Algunas acerías también instalan filtros tipo T (filtro de tercer orden) para mitigar los efectos del 4° y 5° armónico [70].

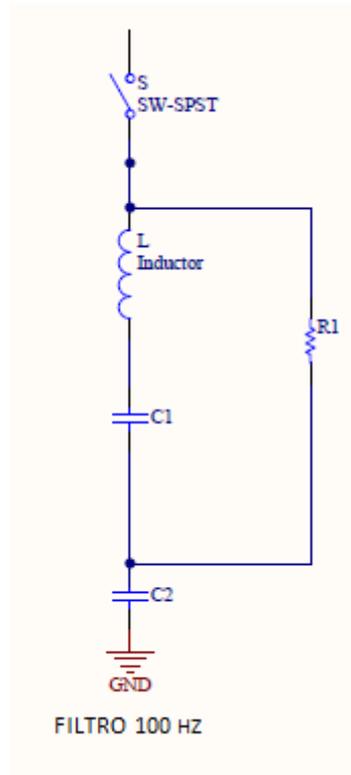


Figura 81. Filtro pasivo tipo C. Fuente: elaboración propia

La solución propuesta también es utilizada por grandes empresas como muestra la figura 82.

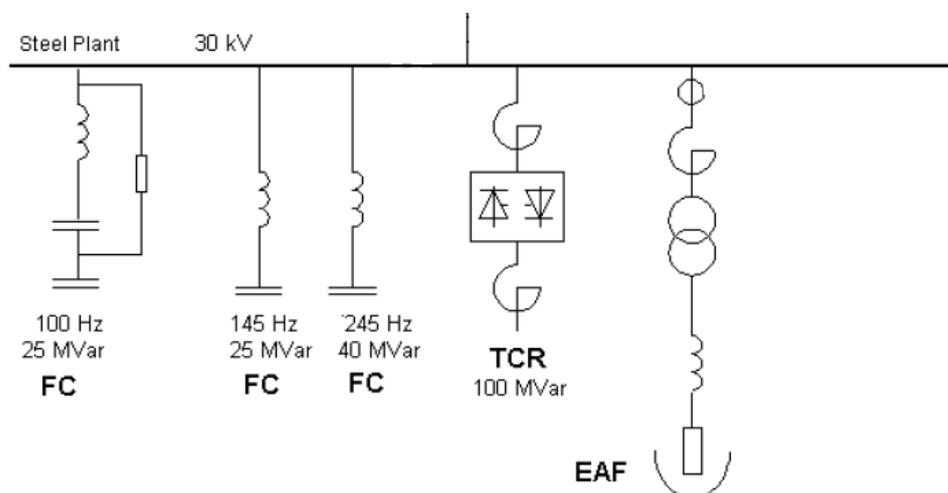


Figura 82. Filtro pasivo tipo-c y SVC (TCR) en acería con horno de arco eléctrico. Fuente: [69]

- Otras soluciones: el filtro activo

En otros estudios se plantean como solución [35] la instalación de un filtro activo. Aunque, a día de hoy, su campo mayoritario de aplicación está en baja potencia y no está tan avanzada su intalación en MT y AT. Es una solución más cara que el filtro pasivo pero posee importantes ventajas como las que se describieron en en el tema de soluciones ante los armónicos.

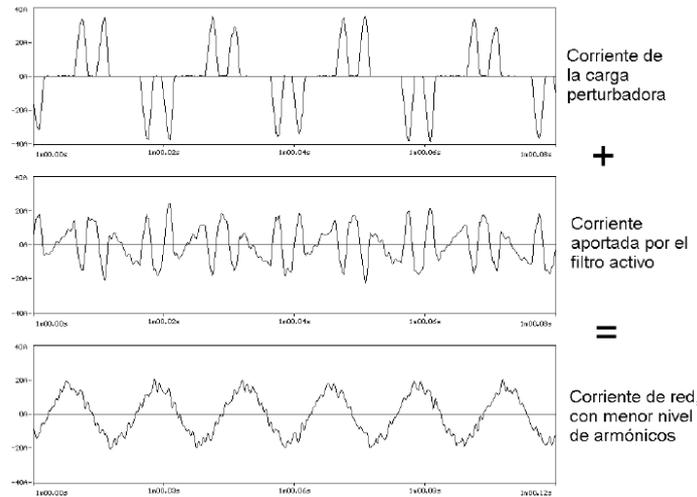


Figura 83. Corriente de red con menos nivel de armónicos como resultado de la suma de la carga perturbadora y la corriente aportada por el filtro activo. Fuente: [66]

## 6.5. CONCLUSIONES

El sistema de filtrado propuesto y adoptado ha conseguido atenuar [50] los armónicos hasta niveles dentro de la normativa, con los respectivas consecuencias positivas que conlleva tanto a nivel de red de distribución como para la misma instalación.

No se pueden facilitar valores de las soluciones aportadas debido a la competencia existente entre las industrias siderúrgicas.

En la actualidad se siguen utilizando mayoritariamente filtros pasivos en las acerías de horno de arco eléctrico, fundamentalmente por su menor coste.



## 7. PRESUPUESTO

En este presupuesto se tiene en cuenta tanto las horas dedicadas a la realización del proyecto como el material necesario.

- Recursos humanos

Duración: 6 meses

Dedicación semanal: 20 horas

Considerando el trabajo realizado por un becario a 500€/mes = 3000€

- Recursos materiales

- Ordenador portátil Toshiba Satellite. Precio 900€  
Coste de amortización atribuible =  $(\text{Coste total}/\text{Tiempo amortización}) \times \text{Duración del proyecto} = (900/40) \times 6 = 135 \text{ €}$
- Conexión a internet: 40 € x 6 meses = 240 €
- Llamadas telefónicas a empresas especializadas: 120 minutos x 0.10 €/minuto = 12€
- Gastos en transporte para búsqueda de información: 3.50€ x 12 viajes = 42€  
Billete de ida/vuelta de tren: 3.50€

La tabla 19 muestra el cómputo total del coste del proyecto.

DESCRIPCIÓN	COSTE
Recursos humanos	3.000 €
Hardware	135 €
Conexión internet	240 €
Comunicación	12,00 €
Transporte	42 €
<b>TOTAL</b>	<b>3.429 €</b>

Tabla 19. Presupuesto de la realización del proyecto Fuente: elaboración propia



## 8. CONCLUSIONES

---

Las conclusiones de este proyecto se han dividido en las técnicas sobre la penetración de armónicos y su mitigación en plantas industriales, y en las personales obtenidas de la realización de este proyecto fin de carrera.

### Conclusiones técnicas

El objetivo principal de este proyecto fin de carrera era el de conocer los conceptos de calidad de suministro eléctrico y concretamente la penetración de armónicos y su mitigación. Adicionalmente se había propuesto el analizar un caso práctico, en el que se muestra la aplicación de filtros en una acería con un horno de arco eléctrico de corriente alterna.

Dichos objetivos se han logrado con el desarrollo del presente proyecto fin de carrera.

Se ha podido comprobar la importancia que tiene el conocimiento de la calidad de onda, con el fin de saber qué perturbaciones se deben contrarrestar para tener una calidad de suministro lo más elevada posible. Se ha comprendido que la presencia cada vez más habitual en las instalaciones industriales de la electrónica de potencia junto con ciertos equipos, como los hornos de arco eléctrico en acerías, contribuyen a la proliferación de perturbaciones eléctricas, convirtiéndose en un problema para los usuarios y distribuidores de la electricidad que se debe mitigar in situ.

Seguidamente se ha hecho un análisis más concreto de los armónicos, logrando conocer así que son, sus fuentes y efectos. Se han revisado las diversas normativas, medidas y soluciones para mitigar la inyección de los armónicos en las redes.

Para un mayor entendimiento de los efectos de los armónicos y su mitigación se ha penetrado en el campo de la siderurgia, donde se sitúa una de las cargas más perturbadoras existentes, el horno de arco eléctrico. Así se ha conocido qué es un horno de arco eléctrico, y centrándose en los de corriente alterna, saber su funcionamiento e interacción con la red eléctrica.

A continuación se ha analizado un caso práctico en una acería, para tener una visión más real de las medidas que se adoptan para mitigar los armónicos. Se ha conocido la utilización de los filtros pasivos y activos, y los sistemas de compensación de reactiva.

Con el caso práctico, y la interpretación de la normativa de aplicación, se ha logrado conocer y entender la problemática que puede causar este tipo de perturbación en los sistemas eléctricos si no se adoptan las medidas correctoras oportunas. Concluyendo con la importancia de la aplicación y cumplimiento de la normativa para no afectar al resto de usuarios del sistema eléctrico, así como del gran coste económico que conlleva tanto su mitigación como las consecuencias de no hacerlo.



## Conclusiones personales

A nivel de la realización de este proyecto fin de carrera, me ha servido para aplicar conocimientos adquiridos a lo largo de los estudios universitarios y para adquirir otros de la rama de energía eléctrica, que no había podido alcanzar al haber realizado la especialidad de electrónica industrial.

Este proyecto me ha servido para conocer más de cerca nuestro sistema eléctrico y, por el lado de la calidad de onda, la importancia de la mitigación de las diversas perturbaciones que existen en la red eléctrica, para así poder tener una calidad de la energía eléctrica lo mejor posible.

La búsqueda de información, las consultas realizadas a fabricantes de equipos y a los técnicos de una acería me han aportado mucho valor para mi futuro desarrollo profesional. He apreciado que no es sencillo conseguir información técnica y esto me ha enseñado a buscar información de una manera eficiente, que seguro me ayudará en mi futuro laboral.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1 ] Energía y Sociedad: [www.energiaysociedad.es](http://www.energiaysociedad.es)
- [2] Iberdrola: [www.iberdrola.es](http://www.iberdrola.es)
- [3] Unesa, Asociación Española de la Industria Eléctrica: [www.unesa.es](http://www.unesa.es)
- [4] Minetur, Ministerio de Industria, Energía y Turismo: [www.minetur.gob.es](http://www.minetur.gob.es)
- [5] REE, Red Eléctrica Española: [www.ree.es](http://www.ree.es)
- [6] PÉREZ MIGUEL, Ángel Alberto; BRAVO DE MEDINA, Nicolás; LLORENTE ANTÓN, Manuel. *La amenaza de los armónicos y sus soluciones*. Madrid: Centro Español de Información sobre el Cobre (CEDIC), 1999. 205 p. ISBN 84-605-9514-5
- [7] ESPAÑA. *Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del sector eléctrico*. Boletín Oficial del Estado, 28 de noviembre de 1997, núm. 285, p. 35097
- [8] ESPAÑA. *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica*. Boletín Oficial del Estado, 27 de diciembre de 2000, núm. 310, p. 45988
- [9] AENOR. *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. UNE-EN 50160. Madrid: AENOR, 2011
- [10] AMARÍS, Hortensia. Filtros activos de potencia: opción de mejora de calidad de suministro y de PFC. *Mundo electrónico*. 2006, núm. 377, p. 44-48
- [11] LÓPEZ SOLAR, Gabriel. Medida de armónicos en ambientes industriales. *Técnica Industrial*. 2005, núm. 258, p. 37-42
- [12] SCHNEIDER ELECTRIC. *Complementos técnicos de calidad de la energía*.
- [13] CNE, Comisión Nacional de Energía: [www.cne.es](http://www.cne.es)
- [14] MELÉNDEZ FRIGOLA, Joaquim; HERRAIZ JARAMILLO, Sergio; COLOMER LLINEAS, Joan. Calidad de onda en el servicio eléctrico. *Automática e instrumentación*. 2005, núm. 360
- [15] ANSI (American National Standard). *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE Standard 519-1992.



- [16] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.* UNE-EN 61000-4-7/A1. Madrid: AENOR, 2004, 2010
- [17] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.* UNE-EN 61000-2-4. Madrid: AENOR, 2004
- [18] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada  $\leq 16$  A por fase).* UNE-EN 61000-3-2:2006/A1/A2. Madrid: AENOR, 2010
- [19] AENOR. *Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos. Empleo de filtros y de condensadores a instalar en paralelo.* UNE-EN 61642:2010. Madrid: AENOR, 2010
- [20] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3-12: Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada  $> 16$  A y  $\leq 75$  A por fase.* UNE-EN 61000-3-12:2012. Madrid: AENOR, 2012
- [21] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 3: Límites. Sección 6: Evaluación de los límites de emisión para las cargas perturbadoras conectadas a las redes de media y alta tensión.* UNE-EN 61000-3-6:2006. Madrid: AENOR, 2006
- [22] *GUÍA de diseño de instalaciones eléctricas 2010: según normas internacionales IEC.* 4ª edición. Barcelona: Schneider Electric España, 2010. 477 p. Colección técnica. ISBN: 84-609-8658-6
- [23] ABB (Asea Brown Boveri). *Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas.* Cuaderno de aplicaciones técnicas número 8.
- [24] ARRILLAGA, J; NEVILLE, Neville R. *Power system harmonics.* 2ª ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. 399 p. ISBN 0-470-85129-5
- [25] ARRILLAGA, J; EGUÍLUZ, L.I. *Armónicos en sistemas de potencia.* Universidad de Cantabria. Electra de Viesgo, 1994. 373 p. ISBN 84-8102-085-0
- [26] CIRCUTOR. *Procedimientos para el estudio y análisis de perturbaciones armónicas.*
- [27] SCHNEIDER ELECTRIC. *Detección y filtrado de armónicos.* 42 p.
- [28] KREYSZIG, Erwin. *Matemáticas avanzadas para ingeniería. vol. II.* 3ª ed. Méjico: Limusa Wiley, 2000. 871 p. ISBN 968-18-5311-3



- [29] MORENO SAIZ, Víctor M. *Sistema distribuido de medida y análisis de la calidad de servicio de una red eléctrica aplicando filtrado de Kalman*. Santander: Electra de Viesgo S.A, 1994. 230 p. ISBN 84-8499-150-4
- [30] VELASCO, Luis de. El problema de los armónicos en las redes industriales y el sector terciario. *Dyna*. 2004, v.79, núm. 6, p. 55-59
- [31] Fominaya, F. Armónicos en redes eléctricas industriales. *Energía: revista de ingeniería energética y medioambiental*. 1998, v.24, núm. 2, p. 37-42
- [32] COLLEMBET, Christian; LUPIN, Jean-Marc; SCHONEK, Jacques. *Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. Cuaderno Técnico (Schneider Electric); núm. 152
- [33] VIDAL LOMBARTE, Daniel. *Estudio y eliminación de armónicos en el sistema de ayudas visuales a la navegación aérea en el aeropuerto de Valencia*. Universitat Rovira i Virgili, 2003. Escola Técnica Superior Enginyeria.
- [34] SCHNEIDER ELECTRIC. *AccuSine, soluciones para filtrados de armónicos*: Catálogo 2011
- [35] ZAMORA, Inmaculada. [et al.]. *Proyecto de diseño de un equipo limitador de la distorsión armónica producida por una acería*. En <http://www.unizar.es/aeipro/finder/INGENIERIA%20DE%20PRODUCTOS/BB32.htm>
- [36] PÉREZ ABRIL, Ignacio. Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. *Ingeniería energética*. 2012, vol. 33, núm. 2
- [37] PETIT SUÁREZ, Johann Farith. *Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados*. Director: Hortensia Amarís Duarte, Guillermo Robles Muñoz. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007.
- [38] AENOR. *Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión*. UNE-EN 61000-2-2 Madrid: AENOR, 2003
- [39] HANZELKA, Zbigniew; BIEN, Andrzej. *Armónicos, interarmónicos*. Madrid: Cedici: Copper. 2004
- [40] ASTIGARRAGA URQUIZA, Julio. *Hornos de arco para fusión de acero. Teoría cálculo y aplicaciones*. Madrid: McGraw Hill, 1995. 192 p. ISBN 84-481-1728-X
- [41] APRAIZ BARREIRO, José. *Hierro, acero y fundiciones. Tomo 1 y Tomo 2*. Bilbao: Urmo S.A. Ediciones. 800 p. ISBN 84-614-0328-4 (tomo 2)



- [42] Unesid, Unión de empresas siderúrgicas: [www.unesid.org](http://www.unesid.org)
- [43] FERNÁNDEZ BEITES, Luis. *Modelado en el dominio de la frecuencia de hornos de arco de corriente alterna para la estimación de armónicos, fluctuaciones y desequilibrios*. Director: Julio García Mayordomo. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 1999
- [44] SINGH, Vikramjit. *Examination of electric arc behavior in open air*. Aalto University. 2012
- [45] Eurofer, The European steel association: [www.eurofer.org](http://www.eurofer.org)
- [46] Siderex, Asociación española de exportadores de productos e instalaciones siderúrgicas: [www.siderex.es](http://www.siderex.es)
- [47] Bascotecniasteel: [www.bascotecniasteel.es](http://www.bascotecniasteel.es)
- [48] Stemm S.A. Guipúzcoa
- [49] VILLAFUERTE NOVOA, Raúl Santiago. *Modelación, simulación y determinación de índices de distorsión armónica y efecto flicker, en el sistema nacional de transmisión, causados por la conexión de hornos de arco, aplicado al caso Novacero S.A.* Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2008
- [50] ANXO PRIETO ALONSO, Manuel. *Medida y análisis de armónicos en hornos de arco de corriente alterna*. Director: Manuel Pérez Donsión. Tesis doctoral. Universidad de Vigo. Departamento de Enxeñería Eléctrica, 2000
- [51] UNIVERSITY of Liverpool. *Simulación del horno de arco eléctrico: guía del usuario, versión 1*. [Steeluniversity.org](http://Steeluniversity.org), 2006
- [52] CHANG, G.W. [et al.]. *Harmonic analysis of the industrial power system with an AC Electric Arc Furnace*. En: Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEE. ISBN 1-4244-0493-2
- [53] UNESID. FORPRESID, guía de riesgos significativos y medidas preventivas en el sector siderúrgico.
- [54] Siemens Vai Metal Technologies: <http://www.industry.siemens.com>
- [55] Sidernaval. SMS Group
- [56] BALTASAR, Antonio [et al.]. Utilización de dispositivos FACTS en acerías para mejorar su comportamiento técnico económico. *Energética*. 2010, vol. 31, núm. 2
- [57] ABB (Asea Brown Boveri). *SVC Light, the next generation*. ABB Facts; núm. 5



- [58] ISSOURIBEHHERE, Pedro E; ISSOURIBEHHERE, Fernando; BARBERA; Gustavo A. Aspectos de calidad de servicio en hornos de arco eléctrico como cargas en los sistemas de distribución. *Revista CIER*. 2009, núm. 52
- [59] WIERDA, Rene. Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas. Cuaderno técnico (Schneider Electric), núm. 176
- [60] GÓMEZ EXPÓSITO, Antonio (coordinador); GARCÍA MAYORDOMO, Julio; USAOLA GARCÍA, Julio. *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*. 1ª ed. Madrid: Mc Graw Hill, 2002. 769 p. ISBN 94-481-3592-X
- [61] FLOYD, Thomas L. *Principios de circuitos eléctricos*. 8ª ed. Méjico: Pearson Educación, Prentice Hall, 2007. 948 p. ISBN: 970-26-0967-4
- [62] Materiales y propiedades: [materialestecno1.wordpress.com](http://materialestecno1.wordpress.com)
- [63] Economizador de energía: [www.imergia.es](http://www.imergia.es)
- [64] Siemens Energy Sector: [www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com)
- [65] CARRILLO GONZÁLEZ, Camilo José; CIDRÁS PIDRE, José. *Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)*. Vigo, 2003. En: [es.scribd.com](http://es.scribd.com)
- [66] BARONA LEJARRAGA, Amaya. *Minimización de los efectos de las perturbaciones eléctricas en los procesos industriales*. Director: Javier Amantegui González. Tesis de master. Universidad Pontificia de Comillas, 2000
- [67] METZ-NOBLAT, Benoit de; DUMES, Frédéric; THOMASSET, Georges. *Cálculo de corrientes de cortocircuito*. Cuaderno técnico (Schneider Electric), núm. 158
- [68] CHIQUITO GUAMANQUISPE, Leonardo Ernesto. *Diseño de un sistema de extracción de humos y polvos secundarios para el proceso de producción de acero mediante horno de arco eléctrico*. Guayaquil (Ecuador), Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006.
- [69] AEG Industrial Engineering: [www.aeg-ie.com](http://www.aeg-ie.com)
- [70] ABB (Asea Brown Boveri).
- [71] Ministerio de Fomento: [www.fomento.es](http://www.fomento.es)



## 10. GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Afino en cuchara:** proceso en metalurgia que ajusta la composición deseada del acero en el horno cuchara.
- **Alambrón:** filamento de acero obtenido por laminación en caliente, generalmente presentado en un rollo cilíndrico de diferentes dimensiones.
- **Análisis espectral:** descomposición de algo complejo en partes simples o identificación de ese algo complejo en las partes más simples que lo forman. El sentido matemático del análisis espectral está relacionado con la herramienta llamada transformada de Fourier.
- **Carga no lineal:** carga que dibuja una onda de corriente no sinusoidal cuando es proporcionada por una fuente de voltaje sinusoidal.
- **Combustión:** reacción química exotérmica entre el combustible y un cuerpo que aporta oxígeno.
- **Compatibilidad electromagnética (CEM):** capacidad de un equipo o de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin introducir él mismo perturbaciones electromagnéticas intolerables para lo que se encuentre en su entorno.
- **Convertidor estático:** a diferencia de otro tipo de convertidores de potencia eléctrica compuestos por máquinas eléctricas rotatorias tales como grupos motor-generador y otras combinaciones, efectúa esta conversión de potencia eléctrica sin emplear elementos móviles como los anteriormente descritos. En este caso, se emplean elementos de electrónica de potencia, por lo que su desarrollo ha estado íntimamente ligado a la evolución de los dispositivos semiconductores.
- **Corriente armónica total (THC):** valor eficaz total de las componentes armónicas de corriente del orden 2 al 40.

$$THC = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}$$



- **Corriente armónica ponderada parcial (PWHC):** valor eficaz total de un grupo seleccionado de componentes armónicas de corriente de orden superior (normalmente del 14 al 40), ponderado con el armónico de orden  $h$ .

$$PWHC = \sqrt{\sum_{h=14}^{40} hI_h^2}$$

- **Corriente eléctrica alterna:** intensidad y tensión varían de forma periódica entre un valor máximo y mínimo.
- **Corriente eléctrica continua:** intensidad se mantiene de manera constante y su valor es el cociente entre la tensión y la resistencia del circuito.
- **Corrientes Parásitas o de Foucault:** son las corrientes que circulan por los materiales al estar sometidos a una variación del flujo de inducción magnética. Estas corrientes da lugar a pérdidas de energía por efecto Joule, siendo necesario para disminuirlas, construir las piezas metálicas con espesores mínimos.
- **Corrugado:** varilla de acero de forma helicoidal utilizada para mejorar las características físicas del hormigón en la estructura de la construcción.
- **Decalaje:** desfase. Proceso, por el que se "gira" un determinado ángulo o tiempo de desfase entre la onda corriente del arrollamiento primario y secundario de un transformador.
- **Distorsión Demandada Total (TDD):** distorsión de corriente armónica en % de la máxima corriente de carga demandada.
- **Electromagnetismo:** es la parte de la ciencia que trata de las relaciones entre la electricidad y el magnetismo.
- **Equipo trifásico equilibrado:** equipo trifásico conectado a los tres conductores de fase de una red de alimentación trifásica, y que se diseña de modo que las tres corrientes de fase tengan una amplitud y una forma de onda idénticas, estando cada corriente desplazada un tercio del periodo fundamental con relación a las otras dos.
- **Equipo trifásico no equilibrado:** equipo trifásico conectado a los tres conductores de fase de una red de alimentación trifásica, y que se diseña de



modo que las tres corrientes de fase no tengan una amplitud o una forma de onda idénticas, o en el que el desplazamiento entre dos corrientes de fase cualesquiera es distinto de un tercio del periodo fundamental.

- **Exotérmica:** reacción química que desprende calor, caso de los electrodos y la oxidación de la chatarra.
- **Filtro:** término genérico usado para definir aquellos tipos de equipos cuyo propósito es reducir el flujo de corriente o voltaje armónico en o aplicado a las partes específicas de un sistemas de potencia eléctrica, o en ambos.  
También descrito como equipo constituido generalmente por reactancias, condensadores y resistencias si es necesario, sintonizado de tal forma que presenta una impedancia conocida sobre un rango de frecuencias dado.
- **Filtro en paralelo:** tipo de filtro que reduce los armónicos proporcionando un camino de baja impedancia para desviar los armónicos lejos de la fuente del sistema a ser protegido. Colocado en paralelo con la fuente armónica y el sistema a ser protegido.
- **Forja:** procedimiento de conformación de los metales, que se realiza sometidos a esfuerzos violentos de presión, repetidos o continuos, una vez calentados a temperaturas superiores a la recristalización, pero inferiores a la de fusión.
- **Frecuencia interarmónica:** cualquier frecuencia que no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- **Histéresis magnética:** fenómeno por el que la imantación de los cuerpos ferromagnéticos depende no solamente del valor actual del campo sino también de los estados magnéticos anteriores.
- **IGBT:** (transistor bipolar de puerta de salida), dispositivo electrónico que generalmente se aplica a circuitos de potencia. Sirve para la conmutación en sistemas de alta tensión.
- **IEC:** Comisión Electrotécnica Internacional.
- **Impurezas:** constituyente accidental presente en una sustancia después de su fabricación. Puede proceder de las materias primas o bien ser resultado de reacciones secundarias o incompletas durante el proceso de producción. Si bien se encuentra presente en la sustancia final, no ha sido añadido



intencionalmente. En la mayoría de los casos, las impurezas representan menos del 10% de la sustancia.

- **Laminación:** proceso que consiste en hacer pasar un material entre dos rodillos o cilindros, que giran a la misma velocidad y en sentido contrario, para reducir su espesor mediante la presión ejercida por los rodillos. Dado que el volumen permanece constante, el material experimentará un alargamiento que será directamente proporcional a la disminución de espesores entre la entrada y la salida.

- **Marcado CE:** el marcado CE sobre un producto indica que éste cumple con todos los requisitos esenciales obligatorios en virtud de las directivas comunitarias que le son de aplicación. Es un marcado obligatorio para tener acceso al mercado europeo, establece requisitos mínimos, se puede obtener en cualquier Estado miembro con validez en todo el territorio de la UE y está orientado a garantizar la libre circulación de productos.

En el caso del Acero el marcado CE va principalmente ligado a los Productos de la Construcción y a la Directiva 89/106/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados Miembros sobre los productos de construcción, transpuesta por el Real Decreto 1630/1992.

- **Nivel de compatibilidad:** nivel especificado de perturbación electromagnética utilizado como nivel de referencia en un entorno especificado para asegurar la coordinación del establecimiento de los límites de emisión e inmunidad.
- **Pérdidas por efecto Joule:** hecho físico que se basa de manera simple en la transformación de la energía eléctrica en energía calorífica al transformarse parte de la energía cinética de los electrones en calor al circular corriente eléctrica por un conductor.
- **Platea:** la Plataforma Tecnológica Española del Acero (PLATEA) nace liderada por la industria y se presenta como un entorno de trabajo y de colaboración comprometido con la consecución de nuevos avances e iniciativas que redunden en beneficios para el sector del acero y para la sociedad, donde se analizan las necesidades y se definen las estrategias relacionadas con I+D+i en el sector del acero.
- **Potencia activa:** valor medio, durante un periodo, de la potencia instantánea. representa la capacidad de una instalación eléctrica para transformar la energía eléctrica en trabajo útil. Representa la capacidad de una instalación eléctrica para transformar la energía eléctrica en trabajo útil.



- **Potencia aparente:** suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Se representa por  $S$  y se mide en voltioamperios (VA). Para una tensión dada la potencia aparente es proporcional a la intensidad que circula por la instalación eléctrica.
- **Potencia reactiva:** no es una potencia (energía) realmente consumida en la instalación, ya que no produce trabajo útil debido a que su valor medio es nulo. Aparece en una instalación eléctrica en la que existen bobinas o condensadores, y es necesaria para crear campos magnéticos y eléctricos en dichos componentes. Se representa por  $Q$  y se mide en voltiamperios reactivos (VAr). La compañía eléctrica mide la energía reactiva con el contador (kVArh) y si se superan ciertos valores, incluye un término de penalización por reactiva en la factura eléctrica.
- **Punto de conexión común (PCC):** el punto en una red de suministro, eléctricamente más próximo a una carga particular, y a la cual están conectadas o se podrían conectar otras cargas.
- **Punto de conexión interno (PCI):** el punto en una red dentro de un sistema o instalación, eléctricamente más próximo a una carga particular, y a la cual están conectadas o se podrían conectar otras cargas.
- **Refractario:** material que soporta grandes temperaturas y del cual está revestido el horno de arco y de cuchara.
- **Resonancia:** fenómeno que se produce en un circuito en el que existen elementos reactivos (bobinas y condensadores) cuando es recorrido por una corriente alterna de una frecuencia tal que hace que la reactancia se anule, en caso de estar ambos en serie, o se haga infinita si están en paralelo.
- **SAI:** sistema de alimentación ininterrumpida, también conocido como UPS (del inglés uninterruptible power supply), es un dispositivo que puede proporcionar energía eléctrica por un tiempo limitado y durante un apagón a todos los dispositivos que tenga conectados, esto lo realiza a través de baterías u otros elementos almacenadores de energía.
- **Secuencia de los armónicos:** secuencia positiva, estos armónicos “giran” en el mismo sentido que la onda fundamental, puede producir calentamiento de conductores; el segundo tipo son los armónicos de secuencia negativa, “giran” al contrario de la onda fundamental, por lo que tienden a frenar los motores, recalentándolos; secuencia cero, no tienen sentido de rotación, son los múltiplos del tercer armónico



- **Sociedad mercantil:** entidad cuyo objetivo es la realización de actos de comercio sujeta a derecho mercantil.
- **Tensión armónica:** tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación.
- **Tensión interarmónica:** tensión sinusoidal cuya frecuencia se sitúa entre las frecuencias de los armónicos, es decir no es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.
- **Tensión nominal:** tensión que designa o identifica una red de alimentación y a la cual se hace referencia para ciertas características de funcionamiento.
- **Tiristor:** Es un dispositivo electrónico semiconductor que tiene dos estados de funcionamiento: conducción o bloqueo. Posee tres terminales: Ánodo (A), Cátodo (K) y Puerta (G).
- **Valor eficaz de una componente armónica ( $G_n$ ):** el valor eficaz de una de las componentes con una frecuencia armónica en el análisis de una onda no sinusoidal. De manera concisa, una componente tal puede denominarse simplemente “armónico”.