



TFG – Grado en Ingeniería Eléctrica

*Modelado del efecto de los paneles
fotovoltaicos y los coches eléctricos
en la red eléctrica*

Carratalá Font, Benjamín

Tutor: Carlos Ariño

Contenido

1.	CONTEXTO.....	5
1.1.	PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA.....	7
1.1.1.	GRUPO EDF.....	7
1.1.2.	EDF R&D	9
1.1.3.	DEPARTAMENTO MIRE.....	10
1.2.	DEFINICIÓN DEL PROYECTO	12
2.	LOS ARMÓNICOS.....	13
2.1.	RAZONES DEL ESTUDIO DE LOS ARMÓNICOS EN LA ELECTRICIDAD.....	20
2.2.	ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS EN LA ELECTRICIDAD.....	29
2.2.1.	EMISIONES EN TENSIÓN.....	30
2.2.2.	EMISIONES EN CORRIENTE.....	31
2.3.	COMO EVALUAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA.....	52
3.	MOTIVACIÓN: Aparición de nuevos perturbadores armónicos en la red.....	59
4.	OBJETIVO: Modelo a obtener.....	61
4.1.	METODOLOGÍAS DE MODELIZACIÓN	62
4.1.1.	MODELO POR ESQUEMA ELÉCTRICO SIMPLIFICADO	62
4.1.2.	RED DE NEURONAS ARTIFICIALES	65
4.2.	EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE UN MODELO	71
4.2.1.	COMPARACIÓN DE MODELOS.....	73
4.3.	NIVEL DE PRECISIÓN PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E INVERSORES	77
5.	OPERACIONES NECESARIAS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO	83
5.1.	TRATAMIENTO DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO	83
5.1.1.	PLAN DE LAS SEÑALES MULTIARMÓNICAS DE TENSIÓN.....	85
5.1.2.	DATOS ALMACENADOS POR LA CARTA DE ADQUISICIÓN	88
5.1.3.	SELECCIÓN DE LOS DATOS VÁLIDOS PARA EL CÁLCULO DEL MODELO.....	89
5.2.	OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS POR LA RED NEURONAL ARTIFICIAL	100
6.	VIABILIDAD DEL PROYECTO.....	105
7.	PRESUPUESTO	107
8.	CONCLUSIÓN	109
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	111
10.	ANEXOS	113
10.1.	ANEXO 1: Curvas de error de los modelados de otros dispositivos.....	113
10.2.	ANEXO 2: Plan de test multiarmónico.....	115

10.3.	ANEXO 3: Código MatLab del programa OPTIM V3	116
10.3.1.	INTERFAZ PRINCIPAL Y FUNCIONES DEL MENÚ PRINCIPAL	116
10.3.2.	FUNCIÓN: <i>valider_doss_FFT200</i>	124
10.3.3.	FUNCIÓN: <i>conv_txt_mat.m</i>	125
10.3.4.	FUNCIÓN: <i>trie_modelisation.m</i>	128
10.3.5.	FUNCIÓN: <i>savegarde_donnees.m</i>	132
10.4.	ANEXO 4: <i>matrices_reseau.m</i>	134

1. CONTEXTO

Cada vez utilizamos más aparatos en los que la potencia de funcionamiento es controlable, como pueden ser los motores eléctricos con variador de velocidad, que en función de nuestras necesidades podemos hacer girar más o menos rápidamente, ya sea para ahorrar energía en el caso de un ventilador o para acelerar en el caso de un tranvía por ejemplo.

También aumenta el número de procesos que requieren una conversión o tratamiento de la energía eléctrica (Conversión AC/DC, DC/AC, AC/AC o DC/DC). La energía eléctrica es generada de diferentes modos, y los receptores que conectamos a la red deben ser alimentados respetando unas condiciones concretas. Esto hace que sea necesario modificar las características de la energía eléctrica para poder conectar los diferentes generadores y receptores a la red eléctrica, donde como está normalizado, la corriente debe ser alterna, la frecuencia de 50 Hz (Convención adoptada en Europa para facilitar el transporte eléctrico entre países cercanos; en la mayor parte de los países de América, en cambio, la frecuencia es de 60 Hz) y la tensión de 230 V eficaces. Por ejemplo en la utilización de la energía solar fotovoltaica es necesaria una conversión DC/AC para suministrar la energía eléctrica que sale del panel fotovoltaico (En corriente continua) a la red (Corriente alterna). La conversión inversa (AC/DC) sería necesaria si cargáramos una batería eléctrica, en este caso el cargador transformaría la corriente alterna de la red en corriente continua para alimentar la batería apropiadamente.

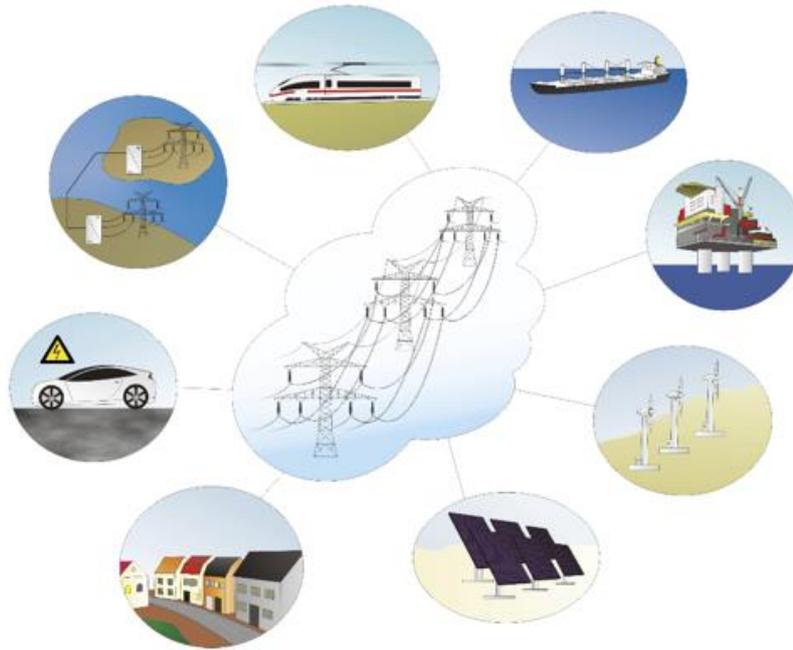


Figura 1 – Aplicaciones de la electrónica de potencia

Los circuitos de electrónica de potencia son por su simplicidad, su fácil control, la fiabilidad y, sobre todo, la alta eficiencia la mejor solución hoy en día para el tratamiento y el control de la energía eléctrica, y dadas las múltiples posibilidades que ofrecen están cada vez más presentes, ya sea por motivos de eficiencia energética o para realizar cualquier adaptación necesaria como las citadas anteriormente.

Estos circuitos contienen dispositivos semiconductores entre los que podemos destacar diodos, tiristores (SCR, TRIAC, GTO) y transistores (BJT, MOSFET, IGBT). Estos son dispositivos no lineales, y al contrario de lo que sucedería con dispositivos lineales como resistencias, condensadores e inductancias, la corriente que circulará por ellos no será sinusoidal pese a estar sometidos a una tensión que sí lo sea. Así pues, como veremos más adelante, esta corriente estará distorsionada y se podrá descomponer en diversas componentes frecuenciales denominadas armónicos. Aunque la mayor parte de las distorsiones armónicas de las señales eléctricas sean causa de la presencia de receptores con estos circuitos de electrónica de potencia, también veremos más adelante que no todos los demás receptores son perfectamente lineales, sino que también pueden inducir ciertas distorsiones del mismo tipo.

Estas perturbaciones armónicas forman parte de los fenómenos que afectan a la calidad de la electricidad, entre los que también podemos destacar las caídas de tensión, las sobretensiones, las fluctuaciones de tensión, variaciones de la frecuencia de alimentación,

desequilibrios de la tensión y posibles componentes continuas en redes de corriente alterna por ejemplo.

La empresa suministradora de electricidad tiene por su parte la responsabilidad de garantizar la buena calidad de la energía que reciben sus clientes.

En el centro “R&D” (Recherche et Développement, equivalente a “I + D”) de la empresa francesa “EDF” (Electricité de France), estos problemas sobre las perturbaciones eléctricas se trataban en el grupo “Calidad de la electricidad” dentro del departamento “MIRE”, donde tuve la ocasión de realizar el proyecto que se expone en este trabajo.

1.1. PRESENTACIÓN DE LA EMPRESA

Antes de hablar sobre el proyecto en sí, para contextualizarlo, en los siguientes párrafos se hablará de la empresa donde ha sido realizado.

1.1.1. GRUPO EDF

El grupo EDF es el principal productor de electricidad francés y uno de los más grandes en el mundo, con 158 467 colaboradores y 39’1 millones de clientes.

Para asegurar tanto el transporte como la distribución de la energía eléctrica producida, EDF colabora con sus filiales ERDF (Electricidad en la Red de Distribución de Francia) y RTE (Red de Transporte Eléctrico).

EDF está repartido entre diversos países como muestra la siguiente imagen:



Figura 2 – Presencia internacional de EDF

Pero mayoritariamente en Europa del siguiente modo:

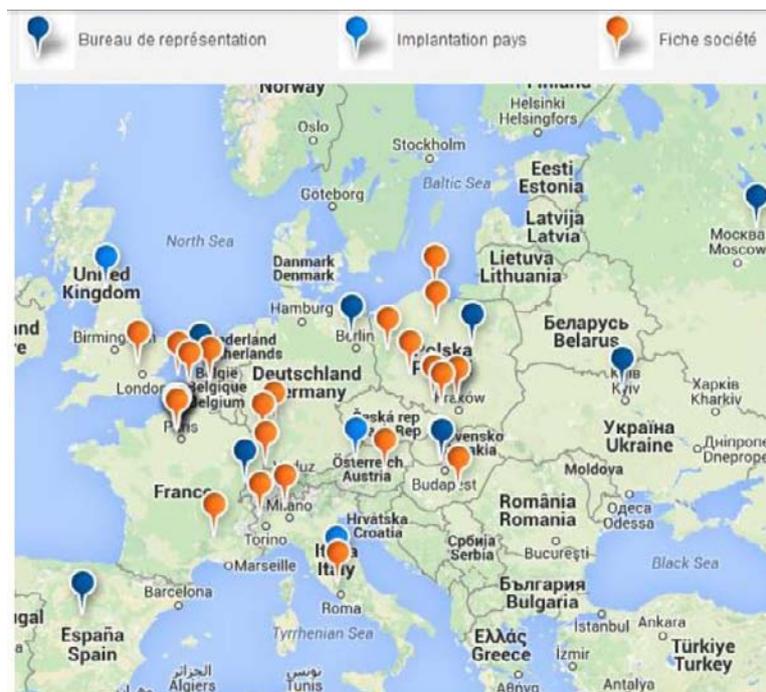


Figura 3 – Presencia de EDF en Europa

En lo que a producción de electricidad se refiere, en el último año, EDF ha producido 653'9 TWh, por medio de las diversas tecnologías expuestas a continuación:

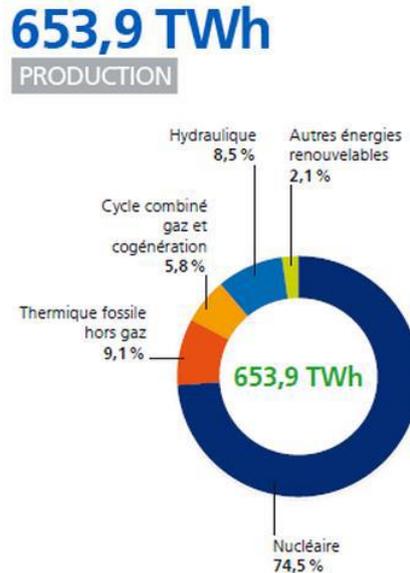


Figura 4 – Fuentes de obtención de la energía eléctrica

Se puede deducir de esta imagen que la gran mayoría de la electricidad (85'1 %) ha sido producida sin emisiones de CO_2 , pues éstos sólo se emiten en las centrales térmicas de combustible fósil y en las de ciclo combinado. Esta repartición de la energía producida es prueba de la tendencia de minimizar la emisión de gases de efecto invernadero.

El grupo tiene fijados otros objetivos principales como pueden ser:

- Tener más proximidad con todos los territorios en los que opera.
- Contribuir a la divulgación de informaciones relativas a la energía eléctrica.
- Participar en los debates sobre el desarrollo sostenible tanto en el ámbito nacional como internacional.

1.1.2. EDF R&D

Una gran importancia es dada a la actividad de investigación, concretamente a la filial "R&D", quien tiene como principales misiones contribuir a la mejora del funcionamiento de la

empresa e identificar y preparar nuevos proyectos de modo a anticiparse a los cambios que puedan producirse y garantizar el crecimiento del grupo.

Así pues, cada año se efectúan proyectos dentro de los diferentes ámbitos relacionados con la energía eléctrica:

- Producción de electricidad: Mejoras en los sistemas de producción y de consumo de electricidad.
- Mercado de la electricidad: Anticipación de las evoluciones que puedan tener lugar en este mercado.
- Distribución: Equilibrio de la oferta y la demanda, desarrollo de innovadores contadores y funcionamiento inteligente de las redes eléctricas (conocido como Smart Grid).
- Comercial: Desarrollo y mantenimiento de programas utilizados por la sección de comercio.

Con alrededor de 2100 trabajadores, EDF R&D realiza una media de 500 proyectos cada año.

1.1.3. DEPARTAMENTO MIRE

Dentro de la sección R&D, el departamento MIRE se encarga de la preparación del futuro del grupo EDF en el ámbito de las redes eléctricas, trabajando en estas durante todo su ciclo de vida.

Así pues se trabaja desde la concepción (arquitectura) hasta la gestión (análisis del funcionamiento, control de la calidad, conteo del consumo) pasando por el mantenimiento de todos los elementos participantes. También se realizan estudios técnicos al igual que especificaciones, desarrollos y test.

A su vez, el departamento MIRE se compone de 5 grupos:

- R42: Calidad de la electricidad.
- R43: Sistemas de conteo.
- R44: Automatización y protección de la red.
- R48: Fiabilidad de la red.
- R49: Interoperabilidad.

Es en el grupo R42 (Calidad de la electricidad) donde he podido realizar el proyecto, este grupo trabaja sobre la calidad de la electricidad en cualquier punto de la red, desde las centrales de producción eléctrica hasta las redes de distribución de baja tensión. El grupo dispone de un laboratorio equipado con material como amplificadores, sistemas de adquisición así como dispositivos en los que realizar pruebas para poder realizar los estudios necesarios.



Figura 5 – Edificio donde trabaja el grupo R42

Más concretamente se pueden citar como ejemplos las siguientes actividades que se realizan en este grupo:

- Ayuda a los gestores de redes a controlar la calidad de sus instalaciones y a tratar los contratos de calidad.
- Estudio de nuevos receptores eléctricos así como el desarrollo de nuevos métodos de medida de la calidad de la electricidad.
- Participación en consensos de carácter internacional sobre normalización relativa a la calidad de la electricidad.
- Desarrollo de herramientas tanto materiales como informáticas que permitan realizar estudios sobre la calidad de la electricidad, como pueden ser los programas de simulación de redes por ejemplo.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El proyecto realizado forma parte de un gran proyecto llevado a cabo en el grupo “R42 – Calidad de la electricidad” llamado MONDRIAN (Modelizaciones y nuevas herramientas para el desarrollo de la red eléctrica, integrando tanto nuevos receptores como aquellos que no son tan recientes).

Este proyecto de desarrollo de redes tiene como objetivo principal proporcionar a la filial ERDF (Electricidad en la Red de Distribución de Francia) herramientas y métodos que les permitan anticiparse a las evoluciones de la red eléctrica para optimizar la calidad de la electricidad suministrada a los clientes. Este proyecto pretende ayudarles a definir su estrategia de desarrollo y a establecer la planificación de la red eléctrica en un contexto en el que las necesidades y los usos de la electricidad evolucionan rápidamente.

La llegada al mercado de nuevos receptores, la mayoría de ellos basados en la electrónica de potencia, contribuye a la circulación de corrientes armónicas en la red de baja tensión del distribuidor ERDF. Así pues dentro de MONDRIAN se ha creado el proyecto en el que he podido participar, y cuyo objetivo es la predicción de la influencia en la calidad de la electricidad de los distintos perturbadores armónicos existentes.

Concretamente el estudio se centra en las perturbaciones armónicas provocadas por los inversores utilizados en los paneles fotovoltaicos y por la carga de las baterías de los vehículos eléctricos. Tanto estos inversores como los vehículos eléctricos forman parte de los receptores que empiezan a ser cada vez más utilizados y por lo tanto su análisis permitirá anticiparse a las evoluciones que se puedan dar en la red eléctrica.

El proyecto consiste en la modelización de las emisiones armónicas de estos dos dispositivos de forma a poder utilizar los modelos en un programa de simulación de redes. Este programa permitirá observar cómo diferentes dispositivos conviven en la misma red y más precisamente los efectos que pueden provocar en ésta distintos perturbadores armónicos conjuntamente.

Antes de proceder a explicar cómo las emisiones de armónicos de estos dispositivos pueden ser modelizadas, se presentarán a continuación de una forma más detallada estos armónicos así como sus causas y consecuencias en la red eléctrica.

2. LOS ARMÓNICOS

Estas ondas distorsionadas que podemos encontrarnos en la red eléctrica como consecuencia de la presencia de perturbadores armónicos, pese a no ser sinusoidales, sí son en general periódicas, lo cual nos permite calcular su serie de Fourier.

Mediante el cálculo de la serie de Fourier podemos descomponer cualquier señal periódica en la suma de una serie infinita de funciones sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de la señal periódica original, lo cual facilita mucho su análisis.

Sea por ejemplo una función periódica en el tiempo “f(t)” con periodo “T”, su serie de Fourier asociada es:

$$f(t) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right] \quad (1)$$

Donde a_0 , a_n y b_n son los coeficientes de Fourier que toman los valores:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) dt.$$

De este modo obtenemos las amplitudes asociadas a los cosenos (a_n) y a los senos (b_n) así como su posible offset ($a_0/2$).

No obstante existe otra formulación de esta serie, conocida como “Forma compacta”, en la que en lugar de utilizar una función sinusoidal y otra cosinusoidal, se considera únicamente una señal cosinusoidal (o sinusoidal modificando 90° la fase) con una cierta amplitud y fase:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t - \theta_n) \quad (2)$$

Donde:

$$A_0 = \frac{a_0}{2} \quad A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \theta_n = \tan^{-1} \frac{b_n}{a_n}$$

A partir de esta formulación podemos trasladar directamente la función descompuesta al dominio de la frecuencia, donde al tratarse de una función periódica tendrá una representación discreta. Esta representación se conoce como espectro de frecuencias y suele asemejarse a la gráfica que vemos a continuación:

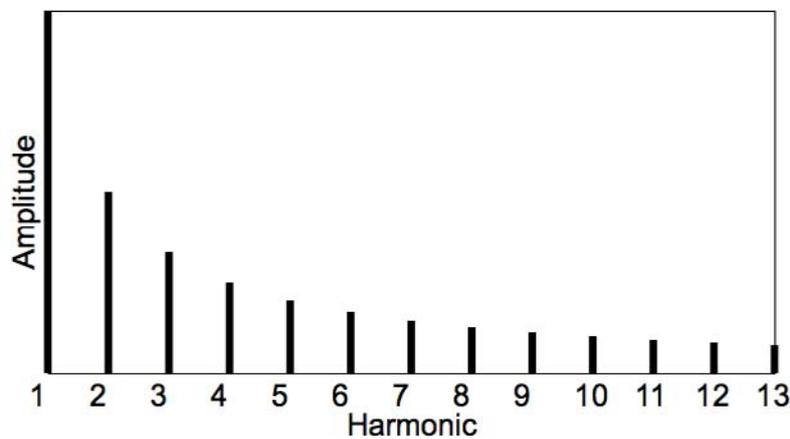


Figura 6 – Espectro de frecuencias

En el espectro se muestran los diferentes armónicos numerados, siendo el armónico de rango (u orden) 1 aquel de frecuencia igual a la frecuencia de la señal original (llamada frecuencia fundamental), el de rango 2 aquel de frecuencia igual a dos veces la frecuencia fundamental, y así sucesivamente. También podemos ver en la gráfica la amplitud que corresponde a cada armónico, no obstante, un dato que se omite y que es importante en algunos casos son las fases de cada armónico, que nos da información sobre el desfase relativo entre cada armónico. Más precisamente a cada rango armónico le corresponde un número complejo, el cual aporta la información sobre su amplitud y fase.

Cabe decir que si la señal tiene una componente continua (u offset), ésta correspondería a la frecuencia 0.

Así pues, si podemos trasladar una señal periódica desde el dominio del tiempo hasta el de la frecuencia conservando toda la información sobre ésta, también podremos partir del espectro de frecuencias para obtener la señal original de la que proviene. Lo cual equivale a superponer diferentes ondas sinusoidales con las amplitudes, fases y frecuencias que correspondan.

En la siguiente imagen se muestra como ejemplo la construcción de una onda cuadrada a partir de ondas sinusoidales cuyas frecuencias son todas múltiplos enteros de la frecuencia de la onda cuadrada:

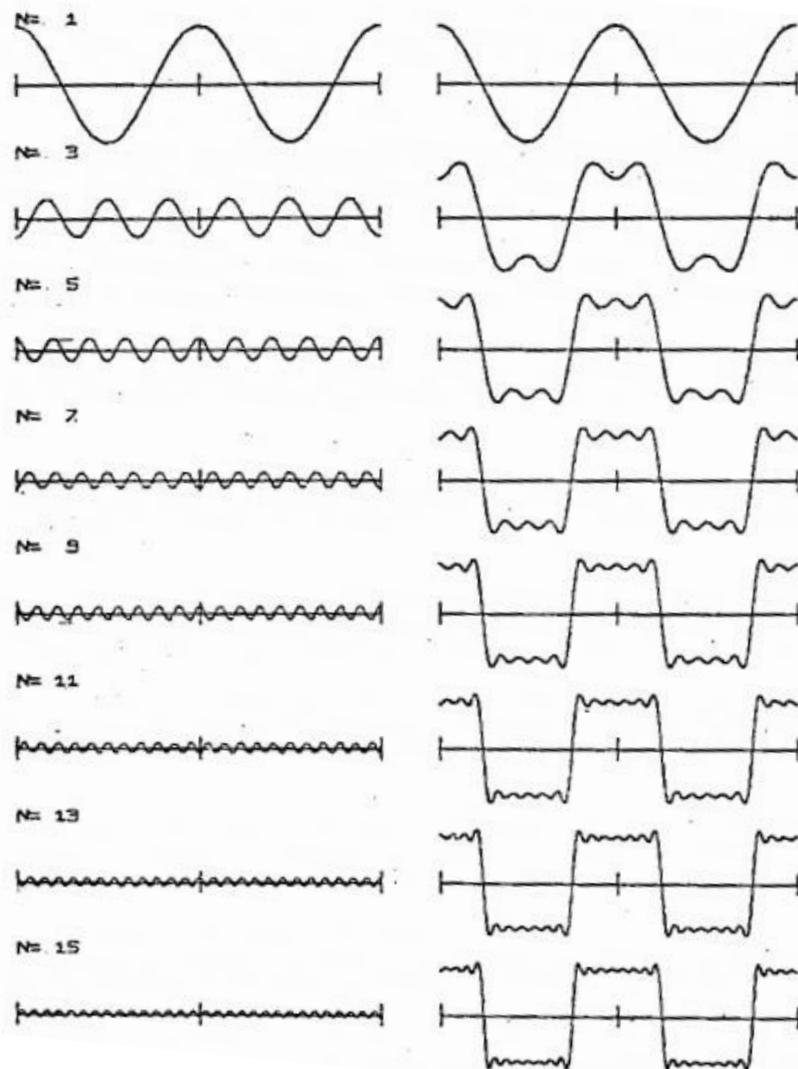


Figura 7 – Descomposición de una señal cuadrada

Como se puede apreciar, pese a que la forma de la onda obtenida es muy parecida a la de la onda cuadrada, todavía existen ciertas irregularidades que la hacen un poco diferente. Esto es debido a que una onda cuadrada perfecta posee frecuencias muy altas, teóricamente infinitas ya que existen puntos en los que la señal es vertical (pendiente infinita), lo que complica su construcción en la práctica. Si admitimos un cierto error y decidimos tomar en cuenta un número de frecuencias finito, el espectro que correspondería a una señal cuadrada sería como el siguiente:

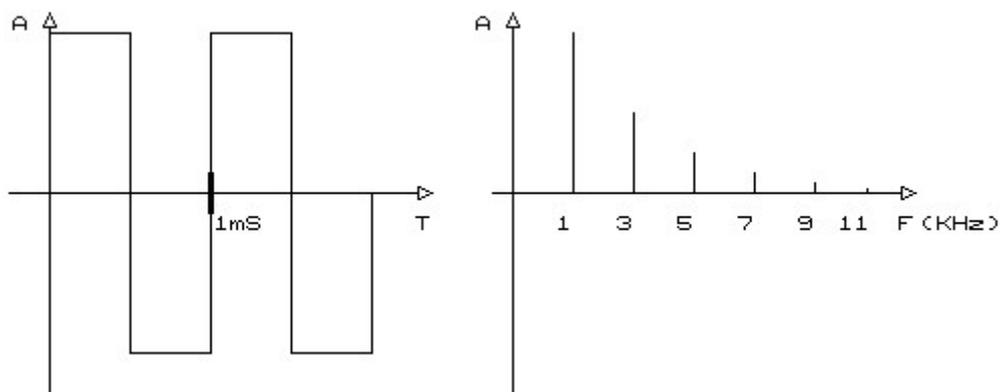


Figura 8 – Espectro de una señal cuadrada

Este espectro muestra que los armónicos de más peso en la señal son los de orden más bajo, aunque como hemos visto en la figura 7 este espectro debería presentar amplitudes no nulas en infinitas frecuencias, que pese a que a partir de cierto rango la influencia sea muy pequeña, debe ser tenido en cuenta para obtener una onda perfectamente cuadrada. También podemos ver que los únicos armónicos presentes son los de rango impar, algo que sucede con la mayoría de señales que se generan en el sistema eléctrico y que es debido a que la señal tiene en general la misma forma de onda en el semiciclo positivo que en el negativo, es decir $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$, no obstante existen también dispositivos en los que estas formas de onda no son simétricas y presentan rangos pares con amplitudes no nulas.

Es importante saber que pese a que este trabajo se centrará en los armónicos de las señales eléctricas, estos armónicos tienen otras aplicaciones. Una de ellas es la música, donde la presencia de las frecuencias apropiadas en cada sonido es de crucial importancia. Así pues cada nota tocada en un instrumento musical es en realidad una combinación de varias notas o armónicos. Como ejemplo podemos ver en la siguiente imagen la onda que resultaría al tocar

la nota “SI” inmediatamente superior (frecuencia mayor) a la nota “LA” cuando esta última nota está situada a una frecuencia de 440 Hz, así como su espectro en el dominio de la frecuencia obtenido tras calcular la transformada de Fourier:

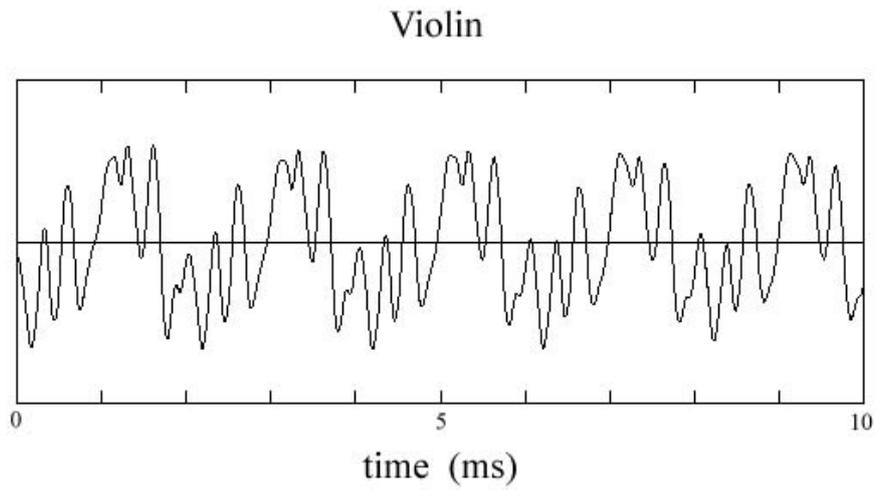


Figura 9 – Forma de onda del sonido emitido por un violín

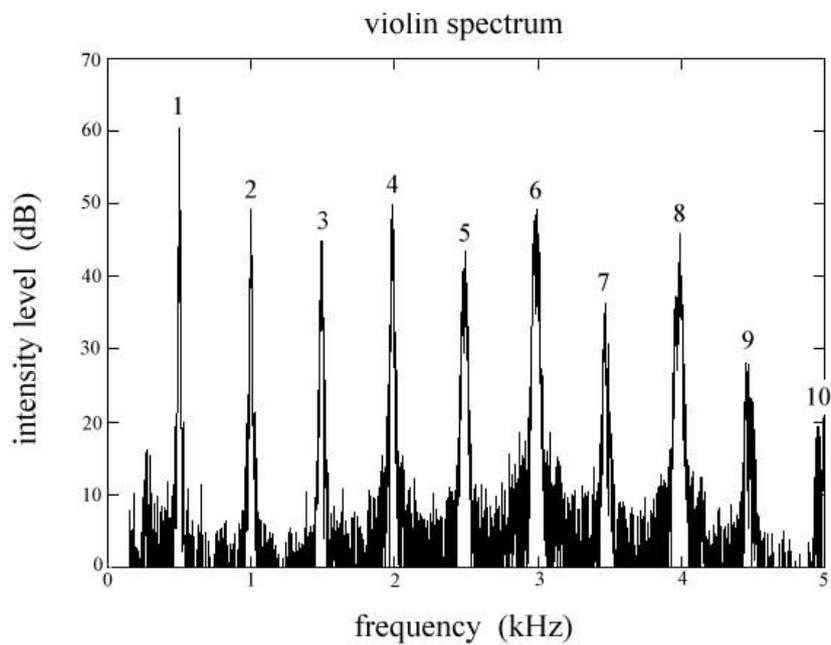


Figura 10 – Espectro de frecuencias de la forma de onda de la figura 9

Distinguimos que determinadas frecuencias destacan con altos picos, estas frecuencias corresponden a las de los armónicos, todas ellas múltiplos de la frecuencia del fundamental, que en este caso es de 497 Hz.

En la red eléctrica, puesto que la frecuencia estipulada es de 50 Hz (en Europa) al conectar un receptor, la corriente que absorberá tendrá también en general una frecuencia de 50 Hz. Y si esta corriente no es sinusoidal, podrá ser descompuesta como hemos visto en diferentes ondas sinusoidales cuyas frecuencias serán 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, etc...

Aunque la gran mayoría de los dispositivos emisores de perturbaciones armónicas producen señales compuestas prácticamente solo por armónicos, es decir componentes frecuenciales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental, es importante saber que existen señales en las que la descomposición en armónicos no es suficiente, debido a que presentan alguna componente frecuencial cuya frecuencia no es múltiple de la fundamental.

Estas frecuencias reciben el nombre de interarmónicas, y en el campo de nuestro interés, la electricidad, aunque podemos encontrar interarmónicos en algunas señales, éstos siempre poseen una amplitud pequeña que les hace pasar desapercibidos respecto a los armónicos, puesto que sólo los emiten algunos aparatos poco abundantes en la red, como puede ser el horno de arco eléctrico que estudiaremos más adelante, y en todo caso son emitidos con amplitudes relativamente pequeñas.

La siguiente imagen muestra una comparación de la presencia de armónicos e interarmónicos en las señales de tensión:



Figura 11 – Predominio de los armónicos frente a los interarmónicos

Sabiendo esto, las empresas suministradoras de electricidad hacen uso de estas frecuencias poco presentes en la red para realizar operaciones como el cambio de tarificación de sus contadores a las horas de paso de un periodo de consumo a otro, conociéndose como “pico” el periodo del día durante el que más energía es consumida y por lo tanto la energía es más cara, “llano” el periodo de consumo intermedio y “valle” el de menor consumo eléctrico y durante el cual el kwh es más económico. Así pues mediante emisores de señales de tensión situados en los secundarios de transformadores de alta tensión, la señal, que como se ha indicado constituye un interarmónico, llega hasta los consumidores particulares y las industrias y activa un relé que realiza el cambio de tarificación en el contador para que así la energía sea contabilizada a un precio u otro según el periodo.

Puesto que, como decíamos, existen receptores que emiten interarmónicos, podemos encontrar pequeñas distorsiones a las frecuencias utilizadas para comunicar con el contador. Por tanto, los relés encargados de recibir el interarmónico únicamente actuarán cuando éste sea de una amplitud suficientemente alta. Esta amplitud puede ser evaluada según la relación:

$$\tau = \frac{V_{ia}}{V_{fund}} \quad (3)$$

Como ejemplo orientativo podemos decir que un contador se activaría si en la expresión (3) “ τ ” fuera superior al 1 %. Asegurándonos así que una perturbación de menor amplitud no activaría el relé indeseadamente.

Estas señales no causan ningún problema en la red eléctrica puesto que se emiten durante un corto espacio de tiempo.

En la siguiente parte del trabajo se presentan los armónicos en el contexto del sistema eléctrico así como su influencia en el mismo.

2.1. RAZONES DEL ESTUDIO DE LOS ARMÓNICOS EN LA ELECTRICIDAD

Existe un interés creciente en el estudio de los armónicos en la electricidad ya que, como decíamos, su presencia en la red eléctrica es cada vez mayor, lo que conlleva que cada vez encontremos señales más perturbadas. Y esta distorsión respecto a la señal sinusoidal no pasa desapercibida en los sistemas eléctricos sino que suele tener efectos negativos, los cuales son de mayor gravedad cuánto más grande sea la amplitud de los rangos armónicos en comparación a la del fundamental.

Estas consecuencias de la distorsión de la señal eléctrica que pueden ir desde un mal funcionamiento esporádico, hasta un disfuncionamiento total de ciertos aparatos preocupa cada vez a un número mayor de gente e incluso existen normas como la “CEI 61000 (Comisión Electrotécnica internacional)” y la “IEEE 519 (IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE, 1992)” imponen límites en los niveles armónicos de tensión que los suministradores eléctricos deben respetar para garantizar una electricidad “de buena calidad” a sus clientes.

En algunos países (como es el caso de Francia) también se limita a los consumidores los niveles de armónicos de la corriente que absorben.

A continuación estudiaremos algunos de los efectos que pueden producirse en determinados receptores.

Determinados circuitos electrónicos pueden ser sensibles a estas perturbaciones y funcionar de una forma diferente a la deseada. En aparatos que muestren una imagen electrónica como pantallas de ordenador o televisores, en los dispositivos diseñados para reproducir un sonido de cierta calidad como una cadena hi-fi o un teléfono, o en los instrumentos de medida por ejemplo se pueden observar una alteración sensible de las características de la señal de salida del aparato en cuestión. Esta se traduce en una distorsión momentánea de la imagen en el caso de las pantallas o del sonido en los equipos de audio, y en ligeras modificaciones del valor indicado por los instrumentos de medida.

El fenómeno conocido como “Flicker”, que consiste en la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, y que en función de la intensidad con la que se produce puede ser molesto para ciertas personas, es también un problema originado por perturbaciones frecuenciales de la tensión. Normalmente se trata de la presencia de interarmónicos, que al

superponerse pueden causar fluctuaciones de la tensión y por lo tanto del flujo de luz producido. Este efecto puede tener lugar tanto en lámparas incandescentes, como en fluorescentes o en lámparas LED.



Figura 12 – Representación gráfica del “Flicker”

Todas las perturbaciones mencionadas hasta ahora tienen lugar cada vez que la señal llega distorsionada, y no suelen ser muy problemáticas para el usuario mientras aparezcan de forma puntual. Además estos efectos aparecen esencialmente cuando los niveles de tensión armónica son bastante altos o cuando existen armónicos de frecuencias de gran valor.

Existen otro tipo de efectos que aunque a simple vista no se puedan apreciar, sí influyen en el aparato y pueden disminuir notablemente su vida útil.

Estos suelen estar relacionados con diversos fenómenos como pueden ser el sobrecalentamiento de conductores o de componentes por los que circulan corrientes armónicas. O por ejemplo la degradación de dieléctricos, que a su vez puede ser causada por la presencia de tensiones armónicas y por lo tanto la aumentación local de corrientes de fuga, o por una temperatura excesiva debida al calentamiento desmesurado de los conductores.

En la siguiente imagen podemos ver un ejemplo de como la presencia del armónico de rango 3 es capaz de provocar una sobretensión:

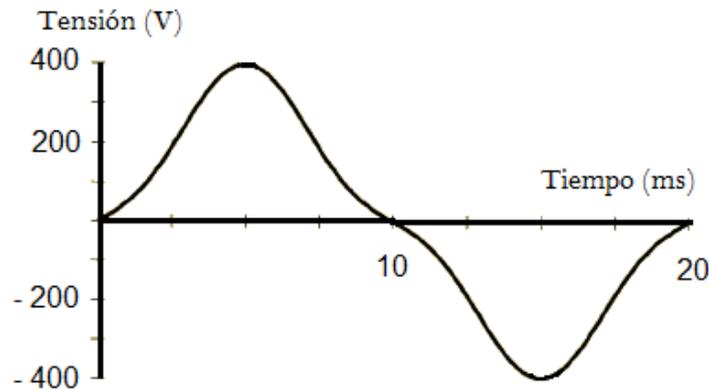


Figura 13 – Forma de onda con sobretensión debido a la presencia del armónico de orden 3

Vemos que con la presencia del armónico 3 con una amplitud igual al 17 % de la del fundamental y desfasado 180° respecto a éste, la tensión de pico es aumentada también en un 17 %. Esta sobretensión puede ser causa de ciertos esfuerzos en los dieléctricos que los deteriorarán más rápidamente.

Entre los aparatos que sufren una disminución de la vida útil, la pérdida de ciertas funcionalidades o incluso pueden quedar directamente inutilizables podemos hacer otra distinción según la duración del material hasta que podamos encontrar disfuncionalidades en éste.

Así pues encontramos ciertos tipos de material que sufren rápidamente estas consecuencias, como aquellos cuyas constantes de tiempo térmicas son bajas: los sistemas de alimentación de los aparatos electrónicos por ejemplo; o los elementos susceptibles de entrar en resonancia o por los cuales circulan corrientes armónicas amplificadas también por el fenómeno de la resonancia: los condensadores (muy presentes en la red para aumentar el factor de potencia y por ende la eficiencia energética), los pequeños transformadores y los disyuntores.

Estos problemas debidos a la resonancia están sobre todo presentes en las redes internas de fábricas que alimentan convertidores estáticos y dónde los condensadores han sido instalados sin ninguna precaución particular.

Otros materiales, en cambio, debido a diversas circunstancias no se deterioran tan rápido. Entre estos dispositivos el factor más influyente es el nivel de tensión armónica al que están sometidos, así pues, en general, cuanto mayor sea éste más se reducirá la vida útil del dispositivo.

Entre estos aparatos que suelen sufrir la influencia de los armónicos más a largo plazo podemos destacar:

Cables:

La circulación de corrientes armónicas se traduce en pérdidas de energía por efecto Joule según la ley de Ohm:

$$P = R I_{\text{eff}}^2 = R \sum I_h^2 \tag{4}$$

Entre los diferentes cables que conforman la red eléctrica, el conductor neutro sufre de forma particular la presencia de los armónicos, concretamente los de rango múltiplo de 3.

Para entender la influencia de los armónicos de rango múltiplo de 3 en el neutro consideremos un sistema trifásico simplificado constituido por una alimentación trifásica equilibrada y tres receptores monofásicos idénticos conectados entre fases y neutro.

Si los receptores son lineales, no generarán armónicos, luego las corrientes que circularán formarán un sistema de corrientes equilibrado directo y se anularán entre sí al llegar al nodo neutro.

En cambio si los receptores son no lineales, las corrientes que absorberán presentarán diversos armónicos. Analizando la forma del armónico de orden 3 en cada fase nos encontramos con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} i_{r3} &= I_3 \sin 3 (\omega t) \\ i_{s3} &= I_3 \sin 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = I_3 \sin (3\omega t - 2\pi) = i_{r3} \\ i_{t3} &= I_3 \sin 3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = I_3 \sin (3\omega t - 4\pi) = i_{r3} \end{aligned} \tag{5}$$

Donde i_{r3} , i_{s3} e i_{t3} son las corrientes armónicas de rango 3 en cada una de las 3 fases del sistema trifásico considerado.

Como vemos, puesto que el armónico 3 tiene un periodo igual al retraso entre una fase y la siguiente, i_{r3} , i_{s3} e i_{t3} estarán en fase (expresión (5)) y por lo tanto, si el sistema tiene conductor neutro, al llegar al nodo, estas intensidades se sumarán aritméticamente. Utilizando este mismo razonamiento deducimos que todos los rangos múltiplos de 3 se sumarán de igual manera en el conductor neutro.

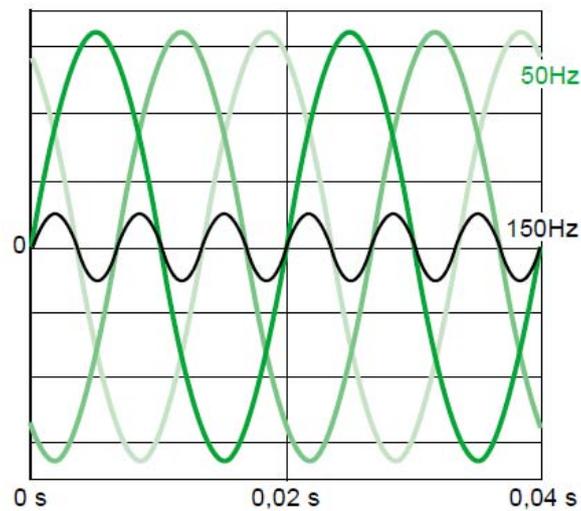


Figura 14 – Armónicos fundamentales y de orden 3 en un sistema trifásico

Puesto que las tres corrientes están en fase, estas forman un sistema homopolar. No obstante, dado que en la red de distribución de baja tensión los receptores nunca están perfectamente repartidos entre las tres fases, en realidad existe un cierto desequilibrio en todos los rangos armónicos que hace que los rangos múltiplos de 3 no formen perfectamente un sistema homopolar, sino un sistema que además de la componente homopolar presente una componente directa y una inversa de amplitudes reducidas. Como se muestra en la siguiente imagen:

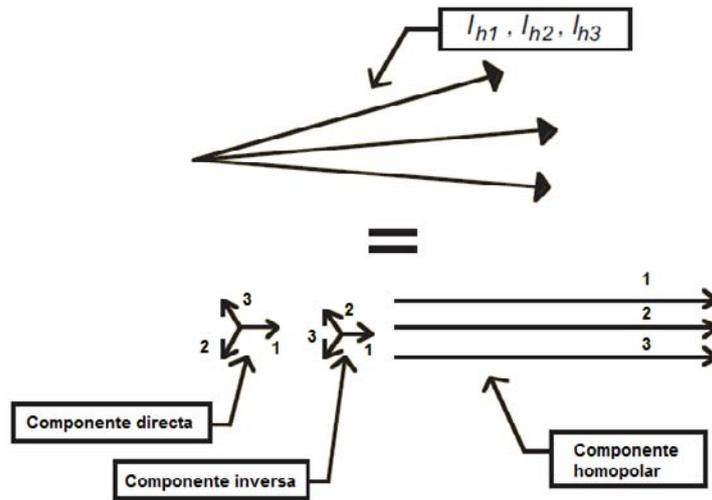


Figura 15 – Descomposición en componentes simétricas de las corrientes armónicas de rango múltiplo de 3

En todo caso, dado que la componente homopolar es la predominante, estas corrientes armónicas circularán casi totalmente por el neutro.

Este problema está presente especialmente en el sector terciario y doméstico, donde cada vez se encuentran más receptores no lineales como aparatos electrónicos, alimentaciones conmutadas de material informático y balastos para alumbrado en los que las corrientes están muy distorsionadas y poseen altos niveles de armónicos de rango múltiplo de 3, sobre todo, el de orden 3 que pueden causar la sobrecarga del conductor neutro. En un edificio de oficinas por ejemplo, donde el material informático es abundante, la corriente en el neutro puede llegar a ser de 1'4 a 1'7 veces la corriente en una fase.

La siguiente imagen muestra un caso de sobrecalentamiento de este conductor:

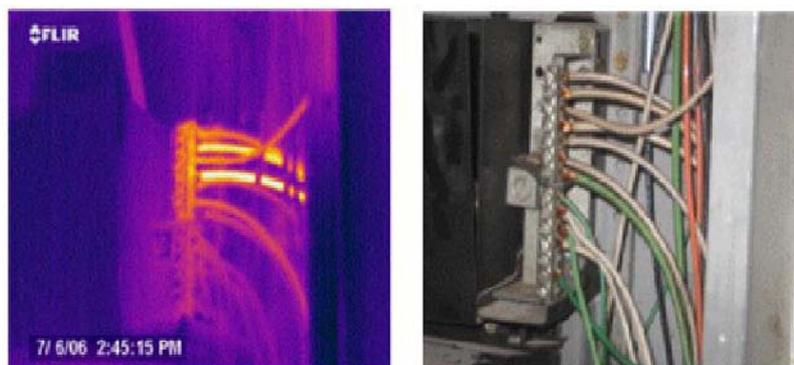


Figura 16 – Calentamiento sufrido por los cables debido a la presencia de armónicos

Una medida que puede tomarse para evitar esta sobrecarga del neutro es o bien la utilización de un conductor de neutro diferente para cada fase, o bien duplicar el calibre del cable neutro, lo cual supone un sobredimensionamiento simple y eficaz dado que, como puede ser demostrado, la corriente en el neutro no puede superar 1'7 veces el valor de la corriente de fase.

Transformadores:

Uno de los efectos de las corrientes armónicas en los transformadores también es un calentamiento suplementario. Este es debido a diversos tipos de pérdidas diferentes:

- Pérdidas en los bobinados por efecto Joule:

$$P_J = R I_{\text{eff}}^2 \quad (6)$$

- Pérdidas en el circuito magnético, que se descomponen en pérdidas por histéresis:

$$P_{\text{histéresis}} = V S f \quad (7)$$

(Donde "S" es el área del ciclo de histéresis (J/m^3), "V" el volumen del circuito magnético (m^3) y "f" la frecuencia (Hz)).

Y en pérdidas por corrientes de Foucault:

$$P_{\text{Foucault}} = \frac{\pi^2 d^2}{6 \rho} B_{\text{max}}^2 f^2 \quad (8)$$

(Donde “d” es el espesor de la chapa magnética (m), “ρ” la resistividad del material (Ω·m) y “ B_{max} ” la inducción máxima (T)).

Otro efecto negativo que puede producirse es que entren en resonancia mecánica por las vibraciones creadas por las fuerzas electrodinámicas a las frecuencias armónicas. Esto es causa de fuertes ruidos e incluso puede conllevar la fatiga mecánica.

Para reducir a niveles asequibles estos efectos de las corrientes armónicas una solución sería utilizar transformadores dimensionados para una potencia mayor de aquella para la que se utilizarán, de forma que estén sobredimensionados.

Así pues la norma UTE C15-112 propone calcular un factor “K” mediante la siguiente fórmula:

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \left[\sum_{h=2}^{40} h^{1,6} T_h^2 \right]}} \quad \text{donde} \quad T_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (9)$$

Un factor “K” que posteriormente nos permite calcular la potencia admisible por el transformador a partir de la nominal:

$$S_{adm} = K S_{nominal} \quad (10)$$

Como es evidente, cuanto más grandes sean los niveles armónicos, mayor será “ T_h ” en la expresión (9) y por lo tanto más pequeño será “K”, lo que conducirá a un valor de la potencia admisible también más pequeño (para una misma potencia nominal dada).

Máquinas eléctricas síncronas:

Las corrientes armónicas provocan calentamientos en las máquinas síncronas, como en el caso del transformador, debido a las pérdidas en el hierro y en el cobre del que están formados los bobinados.

Además, los diferentes armónicos tienen secuencias distintas según su rango. Aquellos de rango $3k + 1$ tienen una secuencia directa, los de rango $3k - 1$ secuencia inversa y los de rango $3k$ una secuencia homopolar. Los campos giratorios creados por cada armónico a diferentes velocidades (según la frecuencia del armónico) tienen un valor medio nulo, por lo que ni acelerarán ni ralentizarán el motor. No obstante provocan una oscilación en el campo giratorio resultante que se traduce en fatigas mecánicas.

En la práctica las perturbaciones armónicas no provocan fatigas mecánicas muy importantes ya que la mayoría de motores están equipados con conductores cortocircuitados conocidos como devanados amortiguadores que se oponen a cualquier variación de velocidad. Sin embargo la energía de las perturbaciones acaba también disipada en forma de calor.

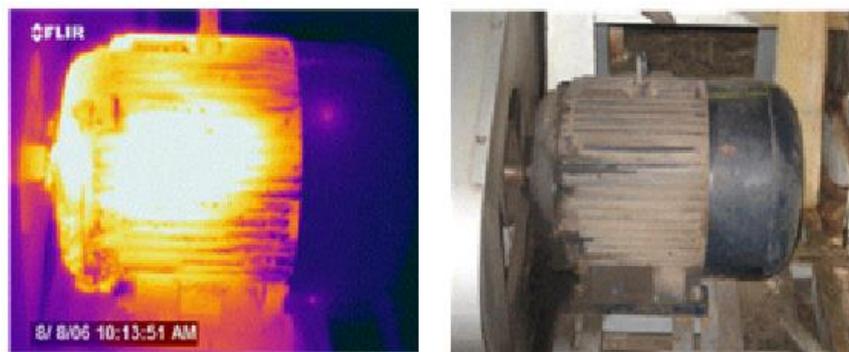


Figura 17 – Motor trifásico sobrecalentado debido a la perturbación de la tensión que lo alimenta

Máquinas eléctricas asíncronas:

Como en el caso de la síncrona, en la máquina asíncrona los armónicos también crean campos giratorios con diferentes sentidos y velocidades, lo que también causa ligeras variaciones del par motor.

Aun así, el efecto principal de las perturbaciones armónicas es el sobrecalentamiento de la máquina.

La norma "CEI 892" recoge diferentes límites que se deben respetar sobre los niveles armónicos en función del tipo de motor eléctrico.

Es importante saber que en general y puesto que el calentamiento del dispositivo suele ser el problema principal de las perturbaciones armónicas, éstas no tendrán la misma repercusión en el aparato según las condiciones del funcionamiento de éste.

La potencia de funcionamiento y la duración de utilización son los factores principales de los que dependerá la repercusión en nuestro receptor de un nivel de perturbación armónica dado. Así pues, si la presencia de armónicos en la red es lo bastante grande deberemos prestar atención a la utilización de los dispositivos conectados para evitar que funcionen a plena carga durante demasiado tiempo.

Todos estos riesgos que aparecen con las perturbaciones armónicas obligan al usuario a estar pendiente de sus dispositivos. Además la necesidad de sobredimensionar ciertos aparatos e incluso de remplazarlos si estos se averían constituye un importante problema económico.

De ahí que se realicen numerosos estudios para buscar soluciones y que se impongan normas como las que se han citado que garanticen la calidad del suministro eléctrico.

2.2. ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS EN LA ELECTRICIDAD

Tras saber qué son los armónicos y estudiar los efectos que pueden provocar en los dispositivos por los que circulan o que alimentan, surge la duda de su causa, es decir de cómo se pueden originar ondas no sinusoidales en la red eléctrica.

Se pueden diferenciar dos tipos de emisiones armónicas, las emisiones en tensión y las emisiones en corriente. De ellas las que suelen presentar niveles más altos de distorsión y que tienen una mayor repercusión en las redes eléctricas son las de corriente, que analizaremos con más detalle.

Todas estas emisiones armónicas tienen la capacidad de propagarse de un punto de la red eléctrica a otro situado a cierta distancia. Por lo que en un determinado punto de la red eléctrica podríamos encontrar armónicos resultantes de la superposición de las emisiones de distintos aparatos perturbadores.

Esta superposición, que al tratarse de ondas sinusoidales, es una superposición vectorial (módulo y fase), depende de factores como la distancia eléctrica de cada dispositivo perturbador al punto considerado así como del grado de perturbación de dicho dispositivo.

En general se puede decir que en una red de distribución formada por varias líneas alimentadas desde un mismo punto, las emisiones armónicas en tensión se propagan con más facilidad en el sentido de las tensiones decrecientes (de líneas de alta tensión a las de baja tensión). Inversamente, las emisiones en corriente apenas son atenuadas cuando se propagan hacia niveles de tensión superiores.

2.2.1. EMISIONES EN TENSIÓN

Aunque de menor importancia puesto que tienen menor repercusión en la calidad eléctrica en la red, las emisiones armónicas en tensión son producidas por dispositivos como los alternadores, los transformadores o los SAI (Sistema de Alimentación Ininterrumpida).

Los alternadores de las centrales de producción eléctrica proporcionan una tensión con perturbaciones armónicas, aunque muy pequeñas ($< 0.5\%$). En el caso de un grupo electrógeno, las distorsiones armónicas suelen estar por debajo de un 5% y pueden ser inferiores al 1% cuando éste funciona a altas potencias alimentando una carga lineal. Estas alteraciones de la señal suelen estar ligadas a la calidad de los bobinados empleados y de las piezas polares, responsables de producir una señal sinusoidal.

Los transformadores, al igual que sucede con los alternadores, también sufren ciertas imperfecciones en la realización de sus devanados. Además, las emisiones armónicas son mayores cuando estos dispositivos funcionan en régimen saturado. En todo caso, sus emisiones no suelen ser problemáticas ya que los niveles de armónicos en la red debidos a estos aparatos nunca supera el 1% .

Otros dispositivos diferentes pero que emiten perturbaciones similares son los SAI. Estos sistemas aseguran una alimentación sin interrupciones del dispositivo al que están conectados (habitualmente sistemas informáticos), algo especialmente útil para evitar que una caída de tensión nos detenga instantáneamente un proceso sin darnos tiempo a detenerlo de forma segura por nosotros mismos. Sin embargo, estos sistemas contienen un inversor que no siempre producen una senoide perfecta, y sobre todo, como hemos dicho por lo general alimentan cargas no lineales, lo cual causa las principales perturbaciones de estos dispositivos.

Cuanto mayor es la potencia a la que funcionan, menores suelen ser los niveles de armónicos generados. Como dato orientativo podemos decir que un SAI de 80 kVA suele emitir tensiones con un THD inferior al 4 % cuando la carga conectada es lineal, e inferior al 7 % cuando ésta es no lineal.

2.2.2. EMISIONES EN CORRIENTE

Se tratan de las más grandes contribuyentes a la contaminación armónica en la actualidad, debido principalmente a la gran presencia de dispositivos que producen estas emisiones, a la importante distorsión de las mismas y al largo alcance de su propagación en las líneas de distribución eléctrica.

Cuando un dispositivo eléctrico no lineal absorbe una corriente distorsionada, ésta circula por las impedancias presentes en la red, así como por la impedancia del generador que alimenta dicho dispositivo.

La siguiente imagen muestra de forma esquemática este fenómeno:

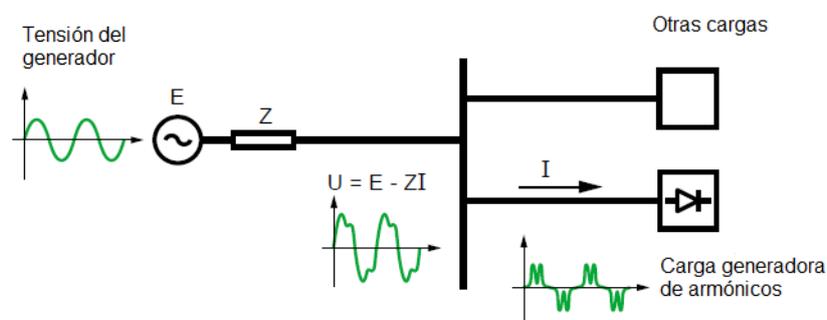


Figura 18 – Perturbación de la tensión de la red de baja tensión

Como vemos en la figura 18, las cargas perturbadoras inyectan una corriente distorsionada que al circular por las impedancias presentes en la red (impedancias de los cables, impedancias de los transformadores e impedancias de las centrales de generación eléctrica), provocan caídas de tensión en las mismas que se traducen en una señal de tensión también distorsionada en ese punto de la red. Dicho punto eléctrico puede ser común a otras cargas no

necesariamente perturbadoras que al estar situadas cerca de las cargas generadoras de armónicos verán afectada la tensión que las alimenta.

La tensión perturbada resulta de la tensión del generador menos las caídas de tensión en las impedancias como consecuencia de la circulación de corrientes armónicas. Por lo que, para una tensión de alimentación y unas corrientes armónicas dadas, la tensión que verán los receptores estará menos distorsionada cuanto menor sean las impedancias presentes. Por otro lado, como es evidente, cuanto menor sea la amplitud de la corriente respecto a la de la tensión del generador, también menor será la perturbación de la onda de tensión. En general, cuanto mayor sea la Pcc (Potencia de cortocircuito) del sistema, más robusto será éste frente a las inyecciones de corrientes armónicas.

Cuando hablamos de cargas generadoras de armónicos nos referimos a circuitos o receptores en los que, aunque la tensión sea sinusoidal, la intensidad no lo suele ser.

A continuación estudiaremos por qué ciertos receptores absorben una intensidad distorsionada aunque la tensión no lo esté.

2.2.2.1. MONTAJES ELECTRÓNICOS

Una gran parte de estos receptores y de un interés especial debido a su creciente presencia en la sociedad actual son aquellos que incorporan un montaje de electrónica de potencia para realizar un determinado tratamiento de la energía eléctrica antes de alimentar la carga, (conversión AC/DC, control de la potencia...).

Como veremos, estos circuitos absorben una intensidad distorsionada debido al particular funcionamiento de los componentes no lineales que contienen, como pueden ser los diodos (cuya característica V-I no es lineal) o los tiristores (que sólo conducen si son activados. En general por un circuito exterior).

De entre estos montajes de electrónica de potencia que más contribuyen a la contaminación armónica actualmente podemos destacar el rectificador monofásico de onda completa, el regulador monofásico, el rectificador trifásico a tiristores y el rectificador trifásico a diodos y filtro capacitivo.

Rectificador monofásico de onda completa:

Este circuito, como su nombre indica, rectifica la señal de la red eléctrica convirtiéndola en continua. Se utiliza para potencias que pueden ir de algunos vatios hasta ciertos kilovatios.

Así pues este circuito constituye el módulo de entrada de algunos dispositivos de corriente continua como las alimentaciones de televisores, ordenadores e impresoras; los variadores de velocidad de motores eléctricos asíncronos; y los balastos electrónicos utilizados en los tubos fluorescentes o en otros sistemas de iluminación.

Podemos ver en la siguiente figura el esquema de un circuito rectificador de onda completa:

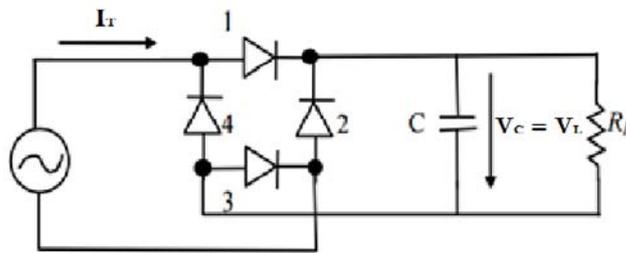


Figura 19 – Circuito rectificador de onda completa

En este circuito la tensión alterna es invertida por el puente de diodos de modo a que la diferencia de potencial en la carga sea siempre positiva, por su parte el condensador de filtrado se encarga de que esta tensión sea lo más parecido a una tensión continua. No obstante, debido a las cargas y descargas sufridas por el condensador existe siempre una pequeña variación de tensión a sus bornes (también referida como rizado) que depende de las características de los componentes así como de la amplitud y la frecuencia de la tensión a rectificar.

En la siguiente gráfica se pueden observar tanto la tensión que obtendríamos tras la rectificación del puente de diodos como la que finalmente tendríamos a bornes del condensador (Y de la carga, puesto que están en paralelo).

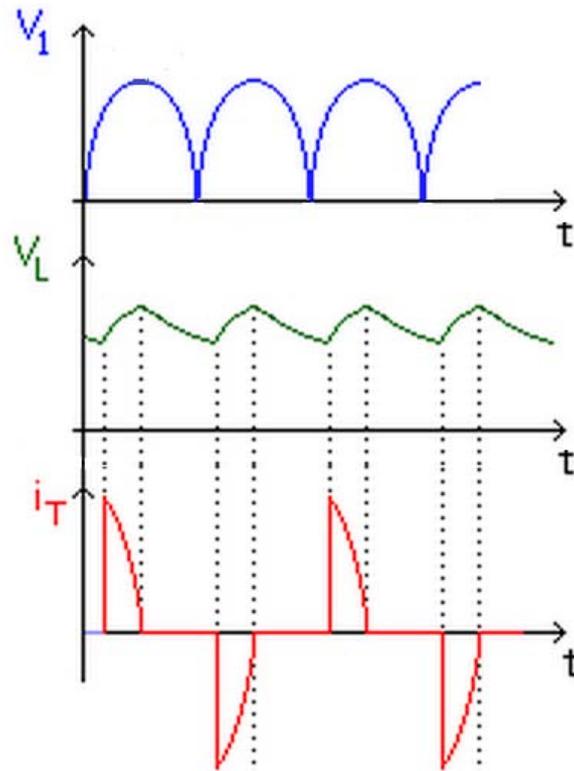


Figura 20 – Formas de onda presentes en el rectificador de onda completa

También se muestra en último lugar la corriente que es absorbida por el conjunto del circuito (rectificador y carga) que se diferencia de la que sale del puente de diodos por tener también una parte negativa. Esta corriente es nula durante la descarga del condensador y aumenta bruscamente cuando $V_1 \approx V_L$ hasta alcanzar su valor máximo (en sentido positivo o negativo según nos encontremos en la alternancia positiva o negativa de la sinusoide respectivamente). Esta corriente carga el condensador y decrece a medida que la pendiente de la sinusoide también lo hace hasta que ambos se anulan. Entonces el condensador presenta su tensión máxima y vuelve a descargarse repitiendo el proceso anterior.

Como hemos visto, pese a presentar la misma frecuencia que la tensión de entrada, la intensidad que recibe el receptor no es sinusoidal sino que contiene diferentes armónicos.

Aunque la forma de onda de la corriente dependa de los componentes del circuito y por lo tanto del receptor, ésta siempre suele estar bastante distorsionada, hasta el punto de que las amplitudes de los armónicos de rango 3 y 5 toman valores cercanos a la amplitud del fundamental.

Debido al rápido aumento que sufre la corriente de entrada del circuito, como consecuencia de la repentina disminución de la impedancia del diodo (en polarización directa a partir de $V_{AK} \approx 0'7V$), podemos deducir la presencia de componentes armónicas que también varíen muy rápidamente, o lo que es lo mismo, de muy altas frecuencias.

Una expresión bastante utilizada que nos permite calcular una aproximación de las amplitudes de los armónicos presentes en la corriente absorbida por estos montajes es la siguiente:

$$I_h \approx \frac{300}{h} \quad (11)$$

Donde el valor de " I_h " expresa la amplitud del rango "h" respecto a la del fundamental, y donde "h" únicamente toma valores impares, pues la forma de onda de la corriente no presenta armónicos pares.

A parte de valorar la gran distorsión de esta corriente, también se debe prestar atención a la gran presencia hoy en día de los aparatos que contienen este circuito. En cualquier oficina por ejemplo podemos encontrar múltiples ordenadores e impresoras, los balastos electrónicos forman parte de fluorescentes y otros sistemas de iluminación ampliamente utilizados, etc...

Regulador monofásico:

El regulador, también llamado dimmer, graduador, e incluso atenuador es un montaje electrónico que permite al usuario variar la potencia que recibe la carga conectada.

Esta posibilidad hace que este montaje tenga numerosas aplicaciones, entre las cuales podemos destacar la regulación de intensidad luminosa en las lámparas incandescentes halógenas, el control de la potencia en hornos de cocción y calderas, etc... De modo a suministrar únicamente la energía necesaria al proceso.

También es útil para arrancar motores eléctricos asegurándose de que éstos no consumen demasiada potencia en ningún momento, lo cual es necesario si la alimentación presenta ciertas limitaciones de este tipo.

Así pues el regulador constituye una ventaja muy interesante, ya sea para tener más control sobre un proceso o simplemente para ahorrar energía eléctrica, por lo que cada vez se implantan más circuitos de este tipo.

A continuación se muestra un circuito regulador monofásico:

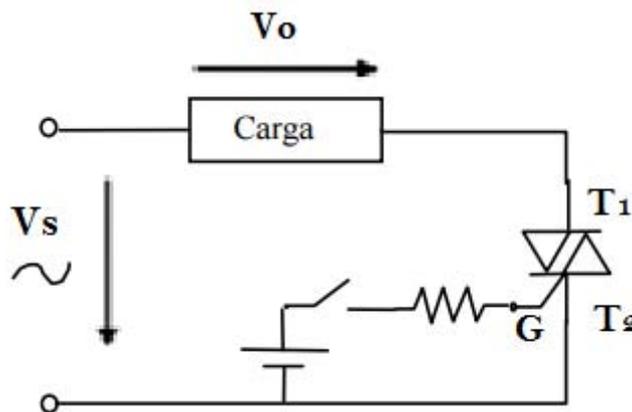


Figura 21 – Circuito regulador monofásico

Esta regulación de potencia de la que hablábamos es posible gracias al TRIAC, un dispositivo cuyo funcionamiento se puede asimilar al de un interruptor accionado mediante la aplicación de un pulso de corriente entre la puerta (Indicada por G “gate” en la figura) y el borne “T2”.

Podríamos entender este dispositivo como la disposición en antiparalelo de dos tiristores compartiendo la misma puerta. Así pues el TRIAC puede conducir tanto en un sentido como en el otro tras haber sido activado.

La desactivación se produce cuando se anula la corriente que circula entre “T1” y “T2” (Ver figura 21). De este modo, siempre y cuando la carga sea puramente resistiva, el TRIAC se bloqueará a cada paso por cero de la tensión alterna.

Programando un circuito externo de forma que active el TRIAC automáticamente para que conduzca sólo durante una porción de la señal alterna conseguiremos reducir el tiempo durante el que alimentamos la carga, como muestra la siguiente imagen:

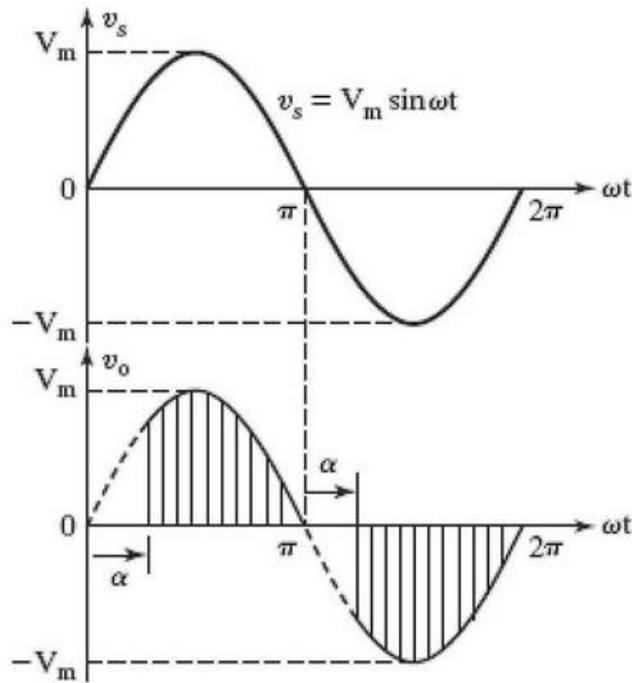


Figura 22 – Tensión de entrada del regulador (Arriba) y tensión a bornes de la carga (Abajo)

Como vemos, aumentando el tiempo de retraso de activación del TRIAC respecto a la sinusoide de entrada (simbolizado por “ α ” en la imagen), podemos reducir el área de la tensión aplicada a la carga, lo que significa disminuir la tensión eficaz y por tanto la potencia transmitida.

La forma de onda de la corriente absorbida por este montaje cuando éste está conectado a una carga resistiva es idéntica a la de la tensión que vemos en la segunda gráfica de la imagen 22, y de mayor o menor amplitud según la conductancia sea mayor o menor respectivamente. Cabe decir que si la carga presenta una cierta componente inductiva, los cambios de corriente no serán tan bruscos como en el caso de una carga puramente resistiva, debido a la relación de la inductancia: $V = L \cdot \frac{di}{dt}$. Donde un cambio repentino de la corriente requeriría una tensión teóricamente infinita.

La corriente que circula por este montaje estará más o menos distorsionada según el retraso impuesto en la activación del TRIAC, pero en general los rangos armónicos de una amplitud importante suelen ser sobre todo los de orden 3, 5 y 7.

Rectificador trifásico a tiristores o rectificador trifásico controlado

Este montaje, también conocido como “puente de Graëtz” es uno de los circuitos de electrónica de potencia más utilizados en el sector industrial.

A parte de rectificar las señales alternas provenientes del sistema trifásico también permite regular la potencia transmitida a la carga mediante la programación de disparo de los tiristores, como sucedía con el regulador monofásico.

Además, al disponer de las tres tensiones trifásicas en entrada, como veremos a continuación, haciéndolas intervenir en el momento adecuado podemos obtener una señal mucho más estable que la del rectificador monofásico.

Gracias a sus características es habitual utilizar este circuito para controlar la velocidad de motores eléctricos de corriente continua, que podemos encontrar en la industria en prácticamente cualquier sistema que requiera una regulación de velocidad, como pueden ser: las máquinas herramienta (pequeñas potencias); el control de procesos en la industria del papel o en la textil (medianas potencias); y las laminadoras (grandes potencias). También lo encontramos junto a otro tipo de motor eléctrico, el síncrono (habitualmente para potencias del orden del MW), de forma a regular la potencia que le llega al motor pasando antes por un inversor (pues el motor síncrono requiere ser alimentado en alterna). En la química (en concreto el Cloro) y en la producción de metales no férricos forma parte del electrolizador, encargado de llevar a cabo la electrólisis. Por último destacaremos su presencia en los hornos a inducción cuando éstos son de potencia variable, los cuales a su vez están presentes sobre todo en los sectores del trabajo de metales, de la química, de las construcciones mecánicas y de la galvanoplastia.

El circuito básico rectificador trifásico controlado es el de la siguiente figura:

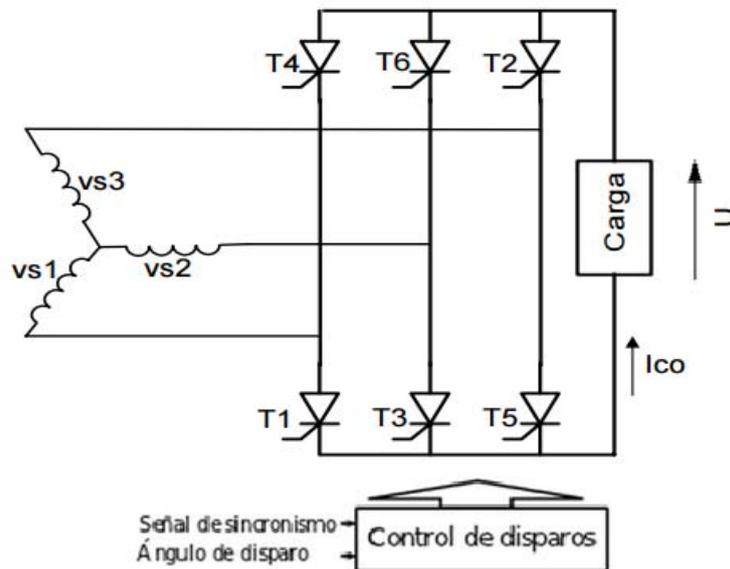


Figura 23 – Circuito rectificador trifásico controlado

El puente de 6 tiristores controla la tensión que recibe la carga, disponiendo de un modo u otro las tres fases que vemos en entrada. Al igual que en el regulador monofásico un sistema automático de control de disparos debe ser programado para activar diferentes tiristores en un corto espacio de tiempo.

La tensión rectificada varía en función del ángulo de disparo de los tiristores según la siguiente expresión:

$$V_{DC} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos(\beta) \quad (12)$$

Donde “ V_{DC} ” es el voltaje promedio de la tensión de salida, “ V_{LL} ” la amplitud de la tensión entre fases y “ β ” es el ángulo tal que “ $\beta = \alpha - 30^\circ$ ”. Nótese que el valor de “ V_{DC} ” es máximo para “ $\alpha = 30^\circ$ ”.

Hemos hablado de las ventajas que presenta este montaje eléctrico, no obstante también posee inconvenientes. El aspecto más negativo del rectificador trifásico a tiristores es su gran perturbación armónica, pues la corriente que circula a través de él presenta por lo general cambios bruscos como consecuencia de la conmutación de los tiristores.

En la siguiente figura podemos observar un ejemplo de la forma de onda de tensión (representada en morado y denominada “u” en la gráfica) que recibiría la carga cuando el ángulo de disparo de los tiristores es $\alpha = 60^\circ$ y se sigue la secuencia de activación de tiristores indicada.

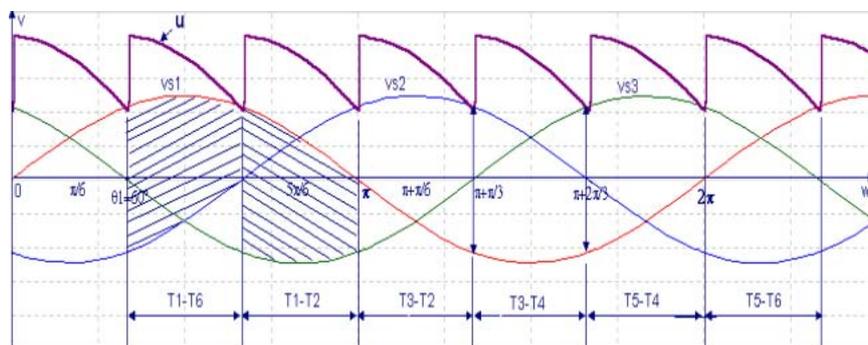


Figura 24 – Formas de onda de las principales tensiones en juego en un rectificador trifásico controlado

Como vemos, la tensión aplicada a la carga es en cada intervalo de 60° una combinación diferente de dos de las tres tensiones simples. Esta tensión resultante es siempre positiva con variaciones relativamente pequeñas (que cabría la posibilidad de reducir conectando un condensador en paralelo a la carga como en el caso del rectificador monofásico con filtro capacitivo).

En la siguiente imagen podemos ver la forma de onda de la tensión (en rojo) a la que se somete un tiristor (Concretamente el tiristor T1) durante todo un ciclo y también está representada la intensidad (en azul) que circularía por la carga en el caso de que ésta fuera puramente resistiva (“i(R)”).

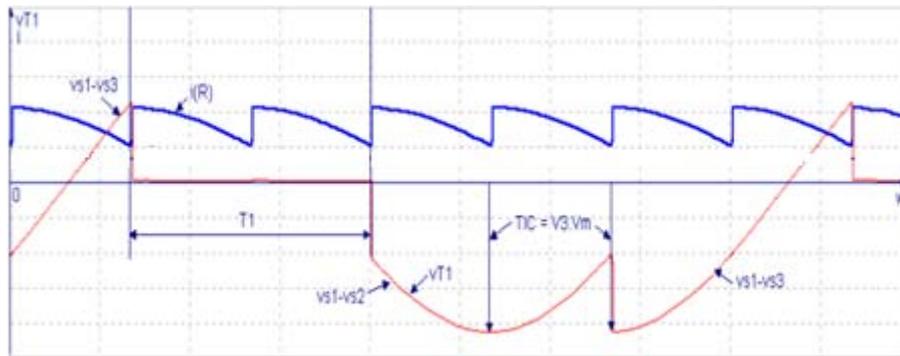


Figura 25 – Intensidad en la carga si ésta es puramente resistiva (misma forma que la tensión)

Como preveíamos, la conmutación de los tiristores conlleva cambios bruscos de corriente, estos se aprecian bien en la curva “ $i(R)$ ”, que al circular por una carga puramente resistiva presenta la misma forma que la tensión. Como sabemos, si la carga presentara una componente inductiva, los cambios de corriente en ésta se producirían más lentamente.

No obstante, si analizamos las corrientes que circulan por cada una de las tres fases, nos damos cuenta de que cada vez que se activa un tiristor, entra en juego la fase que no intervenía antes, y que pasa por lo tanto de no aportar corriente, a inmediatamente aportar un valor determinado de corriente que absorbe la carga. Esta variación en la corriente es muy rápida y sólo está limitada por el poco tiempo necesario para que el tiristor pase de estar bloqueado a conducir y por la presencia de impedancias inductivas en la red.

En la siguiente figura podemos ver la forma de onda de la intensidad que circula por una fase durante un ciclo (obtenida para un ángulo de disparo de los tiristores de 30°). Lo que, como veremos más adelante, equivale a utilizar diodos en el lugar de los tiristores):

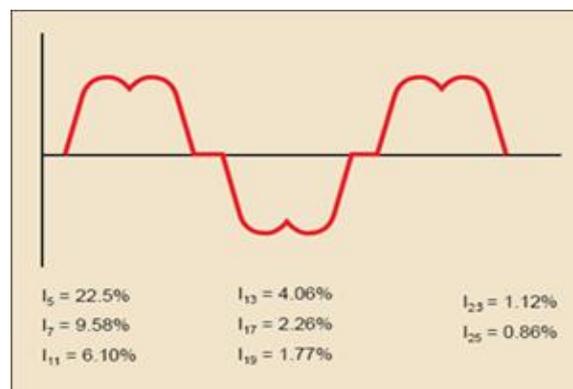


Figura 26 – Forma de onda de la corriente trifásica en un rectificador trifásico no controlado

Esta corriente distorsionada presenta rangos armónicos que son de la forma: “ $h = 6k \pm 1$ ”, donde “ k ” es un entero positivo. Las amplitudes de estos armónicos hasta el de rango 25 se dan de forma aproximada en la imagen.

Puesto que existen variaciones muy rápidas de la intensidad, en su descomposición encontramos componentes de frecuencias altas.

En general se puede utilizar la siguiente expresión para obtener valores orientativos de la amplitud de los armónicos:

$$I_h = \frac{I_1}{h} = \frac{1}{h} \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} \quad (13)$$

Donde “ U_n ” es la tensión de alimentación y “ S_n ” la potencia aparente consumida. I_h , es la amplitud del armónico de rango “ h ” (al contrario que en la ecuación 11, donde resultaba ser la amplitud en porcentaje respecto a la amplitud del fundamental).

Debido a la fuerte distorsión de la corriente inyectada por este circuito, la disposición de una cierta cantidad de receptores que utilicen este circuito puede causar serios problemas de distorsión en la red y en consecuencia la disfunción de ciertos dispositivos como se ha explicado anteriormente. Lo que obligaría a sobredimensionar el transformador desde el cual se alimentan, o a utilizar filtros que reduzcan la amplitud de algunos rangos.

Así pues, debido a este problema se han diseñado circuitos capaces de realizar la rectificación de la señal y absorber una corriente menos distorsionada, ya que ciertos rangos armónicos quedan prácticamente anulados.

Estos circuitos basan su funcionamiento en la utilización de un número de señales sinusoidales múltiplo de 6, donde cada señal presenta una fase propia y distinta a la de las demás. Esto es posible gracias a la utilización de transformadores que desfazan las señales de las líneas trifásicas.

Como ejemplo la siguiente figura 27 muestra el esquema de un rectificador trifásico de 12 pulsos obtenido disponiendo en serie dos rectificadores trifásicos de 6 pulsos (circuito de la figura 23):

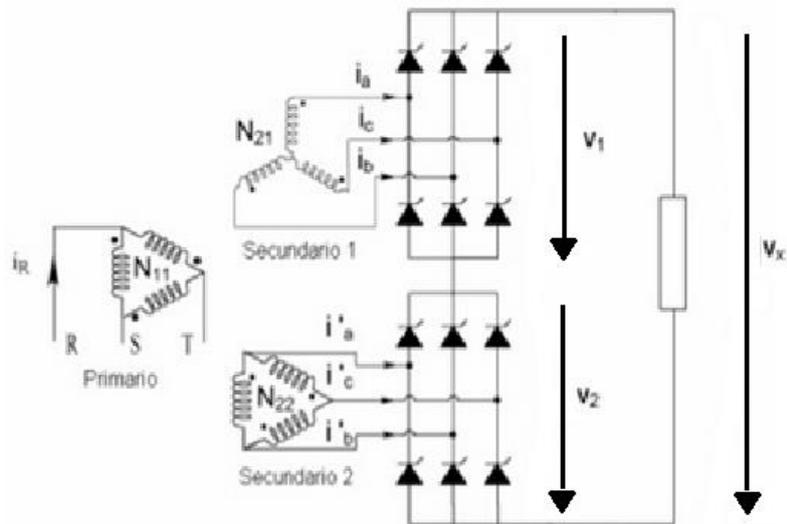


Figura 27 – Circuito rectificador trifásico controlado de 12 pulsos

Como vemos, el transformador consiste en un primario y dos secundarios. De este modo, conectando un secundario en estrella y el otro en triángulo conseguimos que ambos sistemas trifásicos estén desfasados 30° del modo que muestra la siguiente imagen:

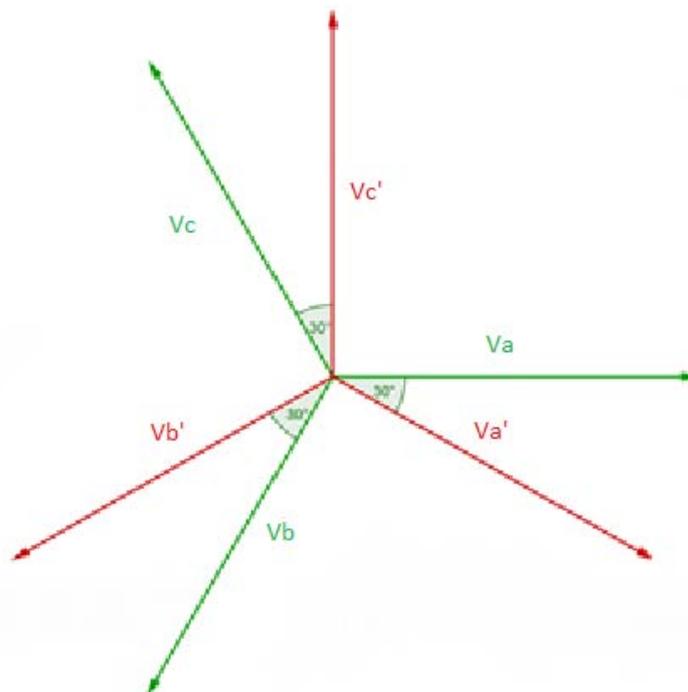


Figura 28 – Fasores de las tensiones de la figura 27

Las intensidades inyectadas al sistema trifásico quedan mucho menos distorsionadas debido a que ciertos rangos armónicos se compensan entre sí. Concretamente los únicos rangos armónicos presentes serán los de la forma: " $h = 12k \pm 1$ ", con lo que se ha conseguido eliminar armónicos de bajas frecuencias cuyas amplitudes tenían valores muy elevados en el rectificador trifásico de 6 pulsos, sobre todo los de rango 5 y 7 pero también el 17 y 19.

En la práctica, debido a diversas asimetrías en la construcción de los dispositivos como el transformador dichos armónicos de corriente no se compensan totalmente y poseen ciertas amplitudes, aunque bastante reducidas.

De la misma forma que se realiza el circuito rectificador trifásico de 12 pulsos, utilizando transformadores para desfasar las señales eléctricas, conocidos como "phase-shifting transformers" se pueden realizar circuitos rectificadores trifásicos de un número de pulsos múltiplo de 6 (con el mismo número de tiristores, los cuales deben ser todos disparados con el mismo ángulo de retraso para un buen funcionamiento del rectificador). No obstante, en la práctica no hay muchas aplicaciones que requieran un rectificador trifásico de más de 48 pulsos.

Cuando aumentamos el número de pulsos, la señal rectificada tiene un menor rizado y, sobre todo, la corriente inyectada a la red posee cada vez menos armónicos de bajas frecuencias. Concretamente, en un rectificador trifásico de " n " pulsos, los rangos armónicos presentes en la intensidad son (teóricamente, pues no se tienen en cuenta las imperfecciones del material) todos de la forma: " $h = nk \pm 1$ ".

Así pues se consigue prácticamente anular los armónicos de baja frecuencia, que eran los de mayor amplitud. Por ejemplo en un rectificador trifásico de 24 pulsos, el primer armónico que encontraríamos sería el de rango 23, el cual tiene ya una amplitud suficientemente pequeña para la gran mayoría de las aplicaciones. No obstante debe ser tenido en cuenta el rápido aumento del precio del convertidor con el aumento del número de pulsos, por lo que en general se utilizará el número de pulsos mínimo necesario para garantizar el buen funcionamiento del sistema considerado.

La siguiente figura muestra una comparación a grandes rasgos entre las formas de onda de las corrientes en rectificadores trifásicos de diferentes números de pulsos:

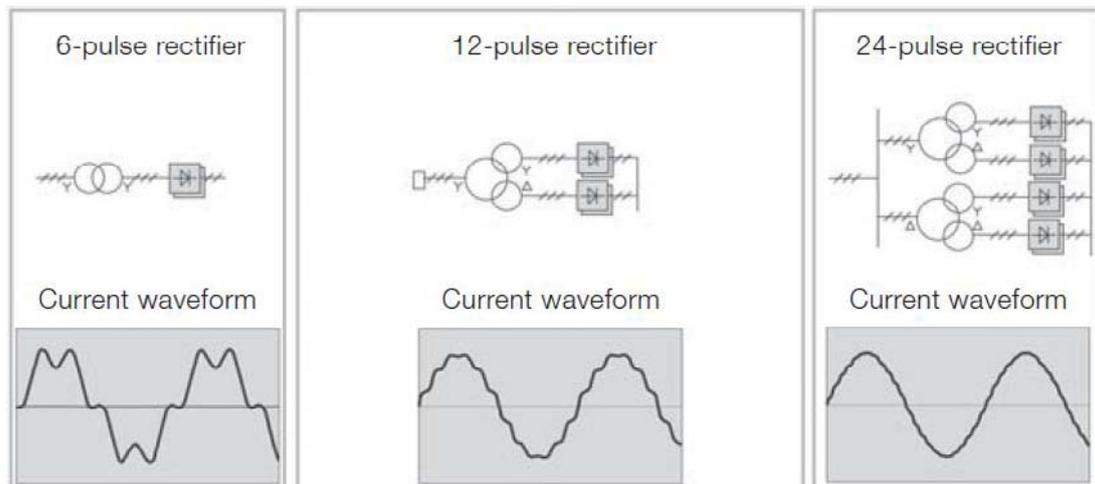


Figura 29 – Comparación de la corriente trifásica según el número de pulsos del rectificador trifásico

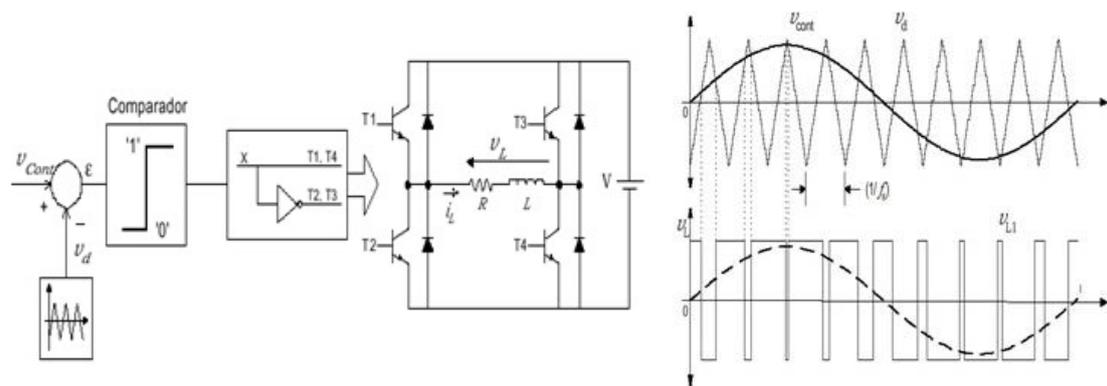
A simple vista se puede apreciar como al aumentar el número de pulsos del rectificador la distorsión de la corriente es menor. Como vemos, en un rectificador trifásico de 24 pulsos la intensidad presenta una forma casi idéntica a la de la sinusoide.

Rectificador trifásico con diodos o rectificador trifásico no controlado:

Este circuito nos permite rectificar la tensión de la red trifásica para convertirla en continua, no obstante, a diferencia del rectificador trifásico controlado, el no controlado no permite regular la tensión continua en la salida.

Este montaje, es útil en muchos casos en los que se necesita una tensión continua de un nivel constante, como por ejemplo la carga de baterías o también el control de velocidad de motores asíncronos por medio de un variador de frecuencia. Estos motores forman parte de compresores, ventiladores, bombas, extrusoras y sirven también para hacer circular cintas transportadoras utilizadas para la manutención de productos por ejemplo.

La siguiente figura muestra cómo, a partir de una tensión continua, gracias a un variador de frecuencia podemos modificar la velocidad de sincronismo para así hacer girar el rotor más o menos rápidamente:



La figura 30 a la izquierda muestra el sistema comparador de la señal sinusoidal y la triangular así como el circuito rectificador que recibe el resultado de la comparación para realizar el control de los transistores en consecuencia. A la derecha, la figura 31 muestra las formas de las señales presentes en el variador de frecuencia.

El circuito del rectificador trifásico no controlado, es idéntico al controlado salvo que los tiristores quedan remplazados por diodos. Así pues, no es posible controlar la conducción del semiconductor y sólo tiene un modo de funcionamiento en el que los diodos cambian de estado automáticamente según la tensión de entrada. En este modo de funcionamiento, la tensión continua de salida es siempre la máxima que se podría obtener con un rectificador controlado (en el caso del rectificador trifásico controlado, como se ha dicho anteriormente, este funcionamiento equivaldría a la activación de los tiristores con un ángulo de retraso de 30°).

En determinadas aplicaciones que requieran un rizado de la tensión aún menor, es posible añadir a la salida de este montaje, en paralelo con la carga, un condensador que filtre la tensión. Sin embargo, debido a la presencia de este condensador, en cada pulso de la tensión rectificada éste se cargará y descargará posteriormente, lo que implica la presencia de más discontinuidades en la forma de onda de la corriente absorbida.

Como ejemplo podemos ver la forma de onda de la intensidad de una fase en un rectificador trifásico de 6 pulsos no controlado con filtro capacitivo:

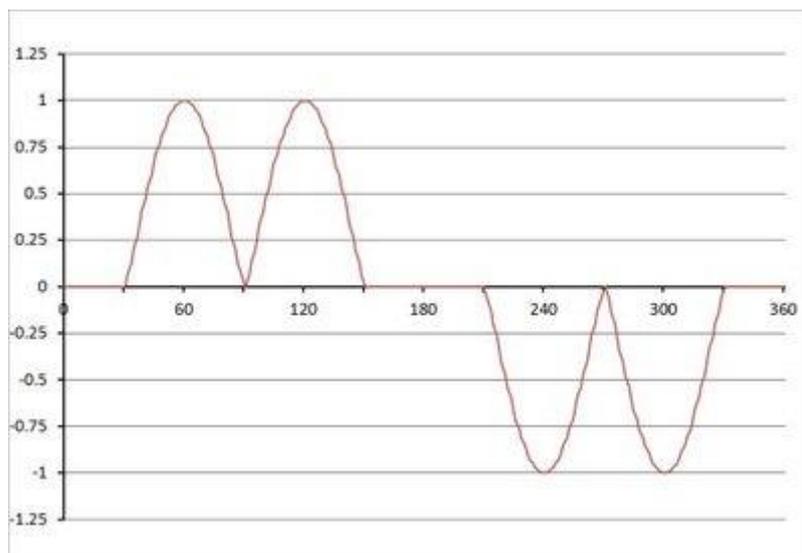


Figura 32 – Forma de onda de la intensidad absorbida por un rectificador trifásico con filtro capacitivo

Comparándola con la forma de onda de la figura 26, vemos que en este caso la corriente llega a anularse entre cada pico, debido a que el condensador se descarga durante un corto espacio de tiempo entre cada pulso de la tensión rectificada.

Aunque no existen fórmulas que nos permitan calcular valores aproximados de los niveles de los armónicos de corriente que emite este circuito, sí es sabido que éstos son más altos que los emitidos sin el condensador de filtrado (siempre y cuando comparemos rectificadores del mismo número de pulsos).

2.2.2.2. CARGAS PASIVAS NO LINEALES

Existen otro tipo de receptores perturbadores en los que la distorsión no es originada por ningún circuito electrónico, sino que son las propias cargas las que, debido a su naturaleza o funcionamiento, distorsionan la señal de la intensidad.

Entre estos dispositivos podemos destacar los motores asíncronos y ciertas lámparas todos ellos muy presentes en el sector terciario, doméstico e industrial y, por otro lado, los aparatos que hacen uso del fenómeno del arco eléctrico, como ciertos hornos y las máquinas de soldar por arco eléctrico que se encuentran principalmente en el sector industrial.

Motores asíncronos:

Son muchas las aplicaciones para las que se utilizan motores asíncronos conectados directamente a la alimentación. Estos motores funcionan a todo-nada y se alimentan en trifásico o en monofásico dependiendo de la potencia a la que funcionen.

Se pueden encontrar para diferentes aplicaciones y potencias como pueden ser:

- En potencias menores a 2 kw en monofásico para robots o aspiradoras.
- Hasta 10 kw en monofásico para lava-vajillas, neveras, utillajes y climatización.
- Hasta 11 kw en trifásico para aplicaciones como los armarios congeladores, ascensores o escaleras mecánicas.

Aunque teóricamente estos motores generan ondas de corriente perfectamente sinusoidales, en la práctica, puesto que por razones económicas no se presta mucha atención a las perturbaciones armónicas que puedan introducir, existen imperfecciones en la distribución de los devanados o pequeñas variaciones de la permeancia magnética (inversa de la reluctancia magnética) que son causa de pequeñas distorsiones de la corriente absorbida.

A modo de ejemplo, a continuación se muestra una tabla con los valores de las amplitudes armónicas que puede presentar la corriente en un refrigerador:

<u>Corrientes armónicas emitidas por el motor asíncrono de un refrigerador</u>					
Rango armónico	3	5	7	11	13
Módulo (en % I_1)	12	6'5	3'4	1'5	1'2

Tabla 1 – Ejemplo de corrientes armónicas emitidas por el motor asíncrono de un refrigerador

Estos motores producen menos perturbaciones armónicas cuanto mayor sea la potencia a la que funcionan.

No obstante, aunque las amplitudes de los armónicos suelen ser pequeñas, la presencia de muchos perturbadores de este tipo puede ser causa de distorsiones armónicas notables. Como puede suceder en el sector terciario o doméstico, donde los dispositivos que se han citado son abundantes.

Lámparas:

Como se ha mencionado anteriormente, los fluorescentes equipados con balasto electrónico emiten importantes niveles de armónicos a causa del funcionamiento del rectificador monofásico con filtro capacitivo que contiene dicho balasto.

No obstante, debido a la naturaleza no lineal del fenómeno de la generación de luz en determinadas lámparas, éstas suelen inyectar corrientes un tanto distorsionadas. Entre estas lámparas se encuentran principalmente las lámparas fluorescentes con balasto electromagnético y las lámparas de vapor a alta presión.

Las primeras son sobre todo utilizadas en las oficinas, en los grandes comercios y para la iluminación en la industria. Estos fluorescentes a balasto electromagnético, que disponen de un cebador y una reactancia, se caracterizan por su bajo consumo y su larga vida útil.

Las lámparas de vapor a alta presión presentan, por su parte, una mayor eficacia luminosa a la vez que un precio más elevado. Su luminosidad característica las hacen útiles para el alumbrado público así como para algunas salas de deporte y para la iluminación de ciertos monumentos principalmente.

La siguiente tabla muestra unos valores orientativos de las amplitudes de los armónicos presentes en la intensidad que circula por una lámpara fluorescente con balasto electromagnético:

Corrientes armónicas emitidas por un fluorescente con balasto electromagnético						
Rango armónico	3	5	7	9	11	13
Módulo (en % I_1)	11	1'4	1'2	0'3	0'3	0'2

Tabla 2 – Ejemplo de las corrientes armónicas emitidas por un fluorescente con balasto electromagnético

Estas lámparas han llegado a constituir dos tercios de la potencia utilizada para el alumbrado en el sector terciario. No obstante, tras la aparición de la tecnología LED (Light-Emitting Diode) y gracias a estudios que permiten mejorar la eficiencia y la calidad luminosa de este particular diodo, las lámparas con vapor a alta presión y las fluorescentes están siendo remplazadas en muchas aplicaciones por estos nuevos sistemas de iluminación.

La siguiente imagen muestra un conjunto de farolas de alumbrado público en las que la luz es producida por LEDs:



Figura 33 – Sistemas de alumbrado LED

Pese a que la razón principal por la que los sistemas de iluminación LED se imponen a las lámparas citadas sea su bajo consumo y su alta luminosidad, cabe decir que también en el aspecto de la calidad eléctrica son preferibles. Ya que presentan menores niveles de armónicos de todas las frecuencias, lo que sumado a que la amplitud de la intensidad fundamental es menor (ya que la potencia consumida es más baja), se traduce en amplitudes más pequeñas en todos los rangos armónicos y por tanto una menor perturbación de la red eléctrica.

Dispositivos a arco eléctrico:

Existen dispositivos que basan su funcionamiento en el fenómeno del arco eléctrico, como pueden ser los hornos de arco eléctrico o las máquinas soldadoras por arco eléctrico.

El arco eléctrico es un fenómeno eléctrico que tiene lugar cuando en un medio aislante, en general un gas o al aire libre, hay dos polos (electrodos en general) entre los cuales la diferencia de potencial es superior a la tensión crítica disruptiva del medio entre dichos polos. Esto produce en primer lugar la ionización del medio, y seguidamente el arco eléctrico, mediante el cual circulan iones de un electrodo al otro. La tensión a aplicar para provocar este

arco eléctrico depende de condiciones como la distancia de separación de los electrodos, las características del dieléctrico, así como de la presión a la que éste se encuentre.

Las altas temperaturas que se pueden alcanzar así como la posibilidad de controlar de forma precisa la generación de arcos eléctricos según la temperatura deseada son algunas de las razones por las que los hornos de arco eléctrico se utilizan cada vez más en los procesos de fundición de metales, además de que no generan gases de combustión, al contrario que los hornos de combustión convencionales. La desventaja principal es el riesgo que supone trabajar con dispositivos de alto consumo eléctrico, pues estos hornos eléctricos funcionan a potencias que pueden alcanzar varias decenas de MW.

Tanto los hornos de arco eléctrico, que funcionan en alterna, como los dispositivos para soldar por arco que pueden ser de continua o de alterna, emiten ciertas perturbaciones armónicas en forma de corriente a la red debido a su peculiar funcionamiento ligado a las descargas eléctricas que causan el aumento de temperatura.

A continuación se muestra una tabla con valores aproximados de los niveles armónicos que suele producir un horno de arco eléctrico:

Corrientes armónicas emitidas por un horno a arco eléctrico					
Rango armónico	3	5	7	11	13
Módulo (en % I_1)	7'7	3'2	1'3	0'5	0'3

Tabla 3 – Ejemplo de las corrientes armónicas emitidas por un horno a arco eléctrico

Cabe decir que aunque los rangos impares sean los de mayor presencia, la intensidad que circula por un horno a arco eléctrico presenta en realidad un espectro continuo, en el que entre las frecuencias múltiples enteras de la frecuencia fundamental encontramos ciertos valores de amplitud de interarmónicos que deben tenerse en cuenta.

La intensidad que circula por estos aparatos no está muy perturbada respecto a la onda sinusoidal, no obstante, puesto que la potencia es elevada, aunque no distorsionen mucho la señal, los rangos armónicos presentan amplitudes que sí pueden tener cierta repercusión en la calidad de la electricidad.

2.3. COMO EVALUAR LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Viendo las dos formas de onda de la figura 34, a simple vista podemos afirmar que la dibujada en color rojo presenta una distorsión mayor que la de color verde, pues ésta última no parece estar perturbada en absoluto.

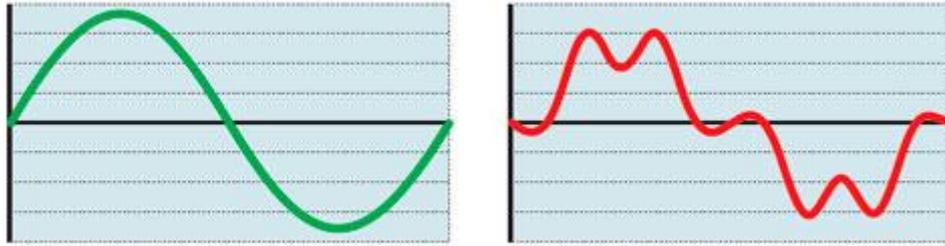


Figura 34 – Comparación de señal sinusoidal (izquierda) y señal con distorsión armónica (derecha)

En cambio, a la hora de comparar dos ondas deformadas, la respuesta sobre cuál presenta una perturbación mayor o cuál afecta más a la calidad de la electricidad no es tan directa, y no siempre se puede apreciar a primera vista.

Es evidente que existen señales más perturbadas que otras, y que algunas son más perjudiciales para los dispositivos presentes en la red que otras, así pues es necesario poder analizar la distorsión de estas señales para ser capaces de saber cuándo un dispositivo emite o recibe una distorsión demasiado alta.

No obstante esta deformación puede darse de muchas formas diferentes, y los efectos de una señal eléctrica distorsionada en un dispositivo u otro pueden deberse a distintas características concretas de esta señal. Por ejemplo, como se ha indicado anteriormente, son exclusivamente los armónicos de rango 3 y múltiplos de 3 los que causan ciertos problemas en el conductor neutro; luego aunque una señal contenga un armónico de otro rango diferente con una amplitud muy elevada, esta perturbación, por grande que fuera, no afectaría a los problemas en el conductor neutro. En el caso de un motor trifásico (síncrono o asíncrono), puesto que como hemos visto, en función de su orden cada armónico tiene una secuencia (directa, inversa u homopolar), algunos armónicos (los de secuencia directa, de orden " $3k + 1$ ") contribuyen a girar el motor en el sentido normal (sentido dado por el armónico fundamental), mientras que

otros (los de secuencia inversa, de orden “ $3k - 1$ ”) lo hacen en el sentido opuesto; así pues dependiendo del rango de la perturbación armónica se creará un efecto u otro. A veces el problema es debido a las altas amplitudes que se pueden alcanzar cuando las perturbaciones armónicas se superponen de una forma determinada, lo que puede causar por ejemplo el disparo intempestivo de dispositivos de protección.

Así pues, según el aspecto de la señal (que puede ser de tensión o de intensidad) que se quiera cuantificar, se tendrá más en cuenta un parámetro u otro. Los más comunes son los siguientes:

Espectro de frecuencias:

Se trata del indicador principal de la perturbación de una señal, puesto que muestra toda su descomposición frecuencial. En él podemos observar rápidamente si la señal contiene rangos impares, pares, si contiene interarmónicos y comparar todas sus amplitudes con sólo mirar la gráfica.

No obstante, se pierde información sobre la fase que corresponde a cada frecuencia y no se conoce nada sobre la forma de onda. Además estos espectros buscan dar una rápida noción de los armónicos presentes en la señal sin necesidad de saber con gran precisión las amplitudes de los mismos.

Distorsión armónica individual:

Como su nombre indica, este parámetro nos permite evaluar la presencia de un rango en particular en una señal perturbada. Puede ser calculado tanto para tensiones como para corrientes del siguiente modo:

$$s_h(\%) = \frac{y_h}{y_1} \cdot 100 \quad (14)$$

Donde y_h es el valor de la amplitud del rango “h” y s_h la proporción en porcentaje del rango “h” respecto al fundamental.

Puesto que el cálculo consiste en el cociente entre la amplitud de un rango y la del fundamental, este parámetro no tiene unidades, y es útil cuando nos interesa conocer cuánto un rango determinado distorsiona una señal.

Tasa de distorsión armónica o THD (Total Harmonic Distortion):

Junto con la distorsión armónica individual, el THD es de los parámetros más utilizados por las normas que obligan a mantener unos niveles de distorsión armónica aceptables para evitar problemas en la red eléctrica.

El THD da una información general sobre la distorsión armónica presente, puesto que en su cálculo se tienen en cuenta todos los rangos armónicos que componen la señal deformada.

Este parámetro es utilizado tanto para señales de tensión como de intensidad y es calculado como se muestra a continuación:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (15)$$

Donde y_h es la amplitud del rango "h". El resultado se suele dar en porcentaje (multiplicando por 100 en la expresión).

Puesto que el THD evalúa la distorsión de la señal, en el sumatorio no se tiene en cuenta el armónico fundamental. Por otra parte, aunque teóricamente el sumatorio sea infinito, a efectos prácticos la normativa permite no considerar los armónicos más allá del rango 50, ya que las amplitudes de las componentes de alta frecuencia presentes en la red son muy bajas.

Tampoco se tienen en cuenta los posibles interarmónicos presentes en una señal, luego el cálculo será poco representativo si éstos poseen grandes amplitudes. No obstante, como se ha estudiado anteriormente, estos interarmónicos son mucho menos comunes en la red.

Al igual que en el cálculo de la distorsión armónica individual, el THD evalúa las amplitudes de los armónicos respecto a la del fundamental, para así medir mejor la deformación de la señal,

pues para una amplitud de un armónico dado (de rango ≥ 2) éste deformará menos la señal cuanto mayor sea la amplitud del armónico fundamental. Nótese que el THD puede tomar valores más altos que 1, mientras que la distorsión armónica individual estará siempre comprendida entre 0 y 1.

El THD es también el parámetro más utilizado para juzgar sobre los problemas que puede acarrear la presencia de perturbaciones armónicas. Así pues existirá un riesgo mayor o menor en función de su valor. Denominando THDu el THD de la tensión y THDi el de la corriente, en general podemos considerar lo siguiente:

- Un valor de THDu inferior al 5 %, al igual que un valor de THDi inferior al 10% es considerado como normal y la distorsión no causa ningún problema.
- Un valor de THDu comprendido entre el 5 y el 8 % al igual que un valor de THDi situado entre el 10 y el 50 %, revela una distorsión considerable, que puede en ocasiones provocar el mal funcionamiento de un dispositivo. A lo que en el caso de la corriente se añade un riesgo de sobrecalentamientos y puede requerir el sobredimensionamiento de cables y otros dispositivos.
- Por último, un valor de THDu superior al 8 % al igual que un THDi superior al 50 % revela una alta distorsión de la señal que en muchos casos tiene repercusiones negativas. Estas elevadas distorsiones deben ser remediadas para evitar sus efectos.

Factor de cresta:

El factor de cresta se define como la relación entre el valor de la tensión o corriente de pico (I_m o U_m) y su valor eficaz o RMS (Root Mean Square). Al igual que los dos parámetros precedentes se basa en un cociente y también puede expresarse en porcentaje o en pu (por unidad):

$$k = \frac{y_m}{y_{ef}} \text{ (p.u.)} \quad (16)$$

Para una señal sinusoidal el factor de cresta vale por lo tanto " $k = \sqrt{2}$ ". Si la señal presenta una cierta distorsión, este valor será superior o en ocasiones inferior a " $\sqrt{2}$ ".

Ciertas cargas perturbadoras como por ejemplo el material informático absorben una intensidad muy deformada cuyo factor de cresta puede ser 3 e incluso 5.

Estas sobreintensidades pueden causar problemas en generadores (como alternadores u inversores) que no puedan proporcionar una intensidad instantánea tan elevada, así como provocar el disparo intempestivo de ciertos dispositivos de protección, como se había indicado anteriormente.

Factor de potencia:

El factor de potencia (F.P.) es definido como el cociente entre la potencia activa (P) y la potencia aparente consumida (S):

$$FP = \frac{P}{S} \quad (17)$$

Este parámetro es confundido muchas veces con el “cos φ ”, cuya definición es en realidad:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (18)$$

Donde P_1 y S_1 son las potencias activa y aparente respectivamente considerando únicamente la componente a la frecuencia fundamental de la tensión y la intensidad.

No obstante, en el caso de señales distorsionadas, los diferentes armónicos tienen una repercusión en ambas potencias. Por lo que el cálculo de dichas potencias tiene en cuenta las diferentes componentes frecuenciales, como se muestra a continuación.

El cálculo de la potencia activa consiste en la suma de las potencias activas debidas a cada tensión y corriente del mismo rango:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (19)$$

Siendo " U_h " y " I_h " el valor eficaz de la componente armónica "h" de la tensión y la corriente respectivamente y " $\cos \varphi_h$ " el desfase entre estas señales de rango "h". En ausencia de armónicos, obtenemos la conocida expresión " $P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ " válida cuando las señales son sinusoidales. Cabe decir que en esta expresión no se considera la presencia de componentes continuas en las señales, puesto que salvo en casos especiales son inexistentes.

La definición general de la potencia aparente consumida es por su parte:

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} \quad (20)$$

Sabiendo que el valor eficaz de una señal compuesta por diversos armónicos es:

$$y_{ef} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} y_h^2} \quad (21)$$

Donde y_h es el valor eficaz del armónico "h".

Obtenemos la siguiente expresión para la potencia aparente:

$$S^2 = \left(\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right) \cdot \left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right) \quad (22)$$

Así pues, al considerar los armónicos presentes en una señal, tanto la potencia activa como la aparente aumentan. Y al modificarse ambos valores, también se obtiene un valor del "FP" diferente al del " $\cos \varphi$ ". Este valor preciso del "FP" nos permite conocer la potencia aparente real a la que trabajan los dispositivos eléctricos para así determinar si es necesario un sobredimensionamiento de éstos.

Potencia distorsionante:

Se han estudiado las variaciones que implica la presencia de armónicos en el cálculo de la potencia activa y aparente consumidas. En lo que respecta al cálculo de la potencia reactiva, aunque existen diferentes definiciones, la más utilizada, conocida como la de “Budeanu”, también considera la presencia de los distintos armónicos como se puede ver a continuación:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \text{sen } \varphi_h \quad (23)$$

Así pues esta definición es idéntica a la de la potencia activa cambiando el seno por el coseno. Y por lo tanto, si las señales son sinusoidales, también se obtiene la conocida expresión de la potencia reactiva “ $Q = U_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen } \varphi$ ”.

Salvo en caso de que la carga considerada sea puramente resistiva independientemente de la frecuencia o de que tanto la tensión como la intensidad sean sinusoidales la potencia aparente no será igual a la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva.

Esto es debido a que aparece una potencia llamada distorsionante que se define de la siguiente manera:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (24)$$

Esta potencia distorsionante nos aporta información sobre cuánto la presencia de armónicos influye en la potencia aparente consumida por un receptor. Lo que permite conocer su influencia y tomar medidas al respecto como evitar la presencia de estas distorsiones o sobredimensionar dispositivos afectados.

3. MOTIVACIÓN: Aparición de nuevos perturbadores armónicos en la red

Dadas las ventajas que ofrece la electrónica de potencia en términos de eficiencia energética, control y fiabilidad entre otros, estos circuitos son utilizados en cada vez más aplicaciones. Como sabemos, estos circuitos, por cómo funcionan emiten corrientes distorsionadas que presentan en general altos niveles de armónicos, y estas emisiones como ya hemos visto pueden tener numerosos efectos indeseables en la red eléctrica. Esto hace que cobre importancia el análisis de la influencia de los diferentes aparatos perturbadores para así poder actuar en consecuencia al tipo de distorsión producida.

Tanto los vehículos eléctricos como los inversores para paneles fotovoltaicos forman parte de estos aparatos perturbadores que se están introduciendo con fuerza en nuestra sociedad y cuya influencia en la red eléctrica debe ser controlada para evitar futuros problemas.

A continuación se muestra cómo están presentes en la red tanto el inversor para paneles fotovoltaicos como el vehículo eléctrico. Como se puede ver, el inversor funciona como generador mientras que la carga del vehículo eléctrico absorbe energía de la red; no obstante esto no tendrá mayor repercusión en nuestro estudio.

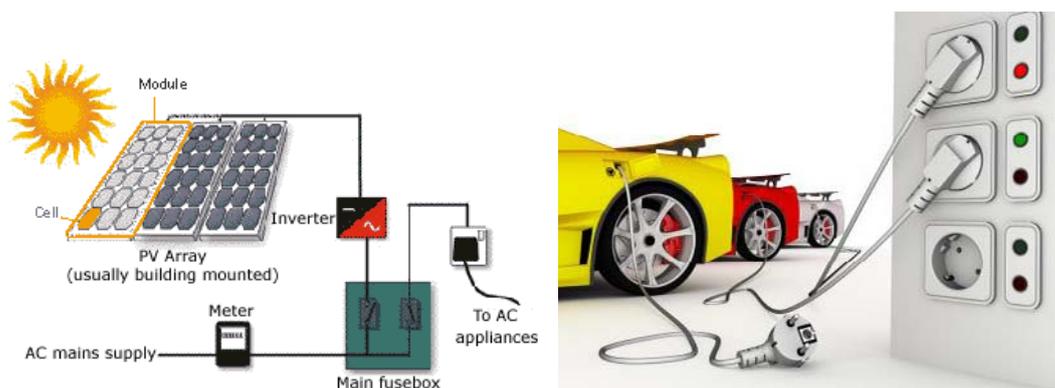


Figura 35 – Ondulador para paneles eléctricos (Izquierda) y vehículos eléctricos (derecha)

Para poder anticipar con cierta precisión la influencia de estos aparatos así como la de otros en la misma situación (emisores de perturbaciones armónicas cuya presencia en la red vaya en aumento) la solución propuesta ha sido modelizar los receptores en cuestión para utilizarlos en un programa de simulación de redes. Estas simulaciones servirán para observar los efectos

producidos en la red por la conexión de un conjunto determinado de dispositivos. Así pues podrá estudiarse la repercusión de un conjunto de perturbadores armónicos de diversos tipos y bajo diversas circunstancias diferentes.

El modelo a obtener debe por lo tanto poseer su propia respuesta en corriente sea cual sea la tensión a la que esté sometido. Es decir, debe tener en cuenta las posibles perturbaciones armónicas que, como se ha visto, puede sufrir la tensión y absorber una corriente próxima a la que absorbería el aparato real en las mismas condiciones. Para realizar simulaciones más próximas a la realidad, dentro de los vehículos eléctricos y los inversores para paneles fotovoltaicos habrán subdivisiones según las marcas de los dispositivos, lo cual nos permitirá ganar precisión dado que cada fabricante realiza su producto de forma propia y por lo tanto no todos tendrán el mismo comportamiento como podremos ver más adelante. No obstante sólo se estudiarán ciertas marcas determinadas que nos permitan generalizar sus comportamientos a todas las demás

4. OBJETIVO: Modelo a obtener

El objetivo del modelo, sea cual sea el método de modelización utilizado es deducir la corriente que absorbería el dispositivo real según la tensión a la que esté sometido.

Puesto que el objetivo es estudiar la repercusión de las emisiones armónicas y dado que a toda señal periódica corresponde un espectro con los armónicos que la componen, el modelo trabajará en frecuencial en lugar de en temporal. De este modo se consigue simplificar la modelización sin perder ninguna información sobre las señales.

Por lo tanto los parámetros de salida del modelo serán los armónicos que forman la corriente, y éstos serán obtenidos a partir del espectro armónico de la tensión a bornes, así como la potencia de funcionamiento, pues para una tensión dada, la intensidad varía de forma directamente proporcional a la potencia.

A continuación se muestra una representación esquemática del principio de funcionamiento del modelo:

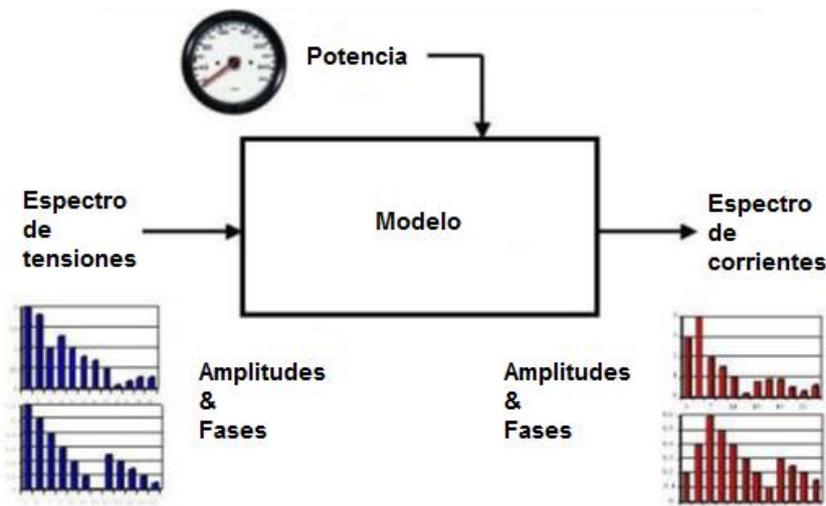


Figura 36 – Funcionamiento deseado de la modelización

Puesto que cuanto más aumentamos en frecuencia, las amplitudes de los armónicos decrecen, a partir de un rango de una cierta frecuencia se puede ignorar la influencia de los siguientes, para nuestras aplicaciones, nos limitaremos tanto en las tensiones como en las corrientes al rango 25 (1'25 KHz), ya que esto no supone prácticamente ninguna pérdida de información.

Además, tal es el predominio de las cargas simétricas en la red eléctrica, que puede considerarse que prácticamente no existen señales que presenten armónicos pares (los armónicos pares, como se ha visto, sólo existen en las señales cuya forma de onda del ciclo positivo es diferente a la del ciclo negativo), esto nos permite eliminarlos y sólo considerar los rangos impares en la modelización, tanto para las tensiones como para las corrientes, lo cual supone otra simplificación.

De este modo, finalmente el modelo recibirá en entrada la potencia de funcionamiento y 13 rangos armónicos de tensión (impares del 1 al 25) y proporcionará en salida los mismos 13 rangos de corriente.

4.1. METODOLOGÍAS DE MODELIZACIÓN

Tras definir la función que debe desempeñar el modelo que debemos crear, surge la duda de cómo, utilizando los recursos de los que se disponen, como medidas en un laboratorio, programas informáticos, etc... se puede deducir una función que represente con bastante precisión el funcionamiento del dispositivo a modelizar.

Este modelo debe cumplir además algunos requisitos según la exigencia de la aplicación. En nuestro caso, además de tener una precisión bastante alta, este modelo debe poder ser creado con cierta rapidez, pues se espera realizar modelizaciones de un gran número de dispositivos.

A continuación se presenta un método que permite obtener modelos de cualquier dispositivo eléctrico de forma suficientemente rápida y que fue implementado por estudiantes que trabajaron en este proyecto que yo pude continuar posteriormente.

4.1.1. MODELO POR ESQUEMA ELÉCTRICO SIMPLIFICADO

Tras hacer pruebas de algunos inversores para paneles fotovoltaicos en el laboratorio, el primer método que se propuso fue el de utilizar un esquema eléctrico simplificado como modelo.

Este modelo debía consistir en un dipolo formado por varios componentes eléctricos básicos que conectados entre sí tuvieran un comportamiento parecido al que tendría el inversor bajo la misma tensión.

Para poder determinar los componentes que mejor modelizarían al inversor se analizaron más profundamente los test realizados y se hicieron algunos nuevos a medida que se hacían nuevas observaciones. Finalmente se pudieron destacar las siguientes características del comportamiento armónico del inversor:

- En primer lugar se observó que, aunque la tensión a la que estaba sometida el inversor fuera perfectamente sinusoidal (ningún armónico presente), la intensidad que circulaba por este inversor sí presentaba unos determinados niveles de armónicos. Este comportamiento condujo a la utilización en el modelo de una fuente de corriente ideal que produciría una intensidad con dichos niveles de armónicos independientemente de la tensión.
- Al realizar test que sometían al inversor a señales de tensión en las que únicamente se iba variando la amplitud de un rango determinado (llamados ensayos unitarios), se observó que en el espectro de la corriente prácticamente sólo variaba el armónico de la misma frecuencia. Esto reafirmó por un lado la utilización de la fuente de corriente y al mismo tiempo, dado que la variación de la amplitud del armónico de tensión “h” inducía una variación proporcional de la amplitud del mismo armónico de corriente, se dedujo que se debía añadir una admitancia en paralelo a la fuente de corriente.

Tanto la corriente impuesta por la fuente como la proporción de variación de la corriente armónica I_h en función de la variación de V_h dependen del rango armónico considerado, lo que supone la utilización de una admitancia en paralelo a una fuente de corriente para cada rango.

Además, también pudo observarse que, para un mismo rango, tanto el valor de la impedancia como el de la intensidad proporcionada por la fuente dependían de la potencia a la que trabajara el inversor.

Así pues, en la siguiente imagen se muestra el esquema eléctrico simplificado para el rango armónico “h” a la potencia “P”:

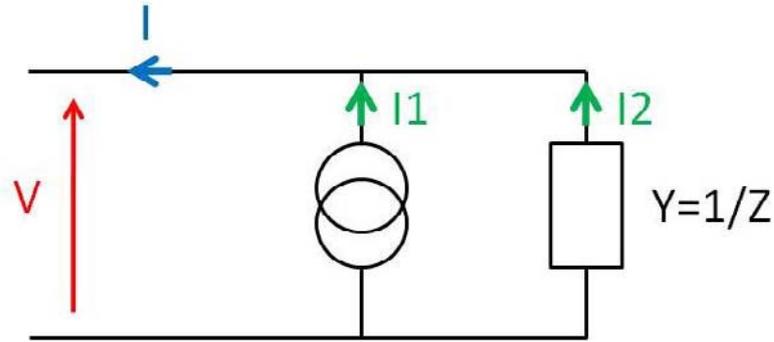


Figura 37 – Esquema eléctrico simplificado (Equivalente de Northon)

Donde : “ $I_1 = f_1(h, P)$ ” ; “ $Y = f_2(h, P)$ ” ; “ $I = I_1 + I_2$ ” ; y “ V ” es el armónico “ h ” de la tensión.

Este método de modelización, además de tener la ventaja de poderse implementar fácilmente en un simulador de redes utilizando los componentes básicos (admitancia y fuente de intensidad) de los que está formado, daba muy buenos resultados para algunos inversores. No obstante, para otros la precisión de los modelos era demasiado baja.

La causa de los malos resultados de este modelo es que no toma en cuenta la influencia en el armónico de corriente “ h ” de todos los rangos armónicos de la tensión, sino únicamente la del mismo rango “ h ”.

Así pues, este modelo funciona bien para inversores en los que las relaciones interarmónicas son débiles, es decir, en los que un determinado armónico de tensión V_h sólo afecta al armónico de intensidad de mismo rango. No obstante, existen inversores en los que una variación del armónico de corriente I_h puede ser causada por variaciones de cualquier otro rango de tensión diferente al “ h ”. En este último tipo de inversores, en los que las relaciones interarmónicas son considerables, la precisión de este modelo por esquema eléctrico simplificado no es suficientemente alta.

Este método de modelización debió ser descartado debido a su irregularidad y baja precisión en algunos de los inversores, por lo que otros métodos debieron ser probados.

Rápidamente se observó que utilizando una red de neuronas artificiales para modelizar la corriente en los inversores a partir de las tensiones era posible obtener buenos resultados para todos los inversores en general. Ya que se conseguía aumentar suficientemente la precisión en la modelización de inversores con fuertes relaciones interarmónicas manteniendo los buenos

resultados que se obtenían ya con el modelo anterior en inversores donde las relaciones interarmónicas son más débiles. Esta posibilidad de utilizar un único método de modelización para los diferentes inversores hizo de la red neuronal el mejor método para modelizar las emisiones armónicas de estos dispositivos. Posteriormente se comprobaría que la precisión de este método para modelizar otros aparatos como vehículos eléctricos también era satisfactoria.

A continuación se explica en qué consiste esta red de neuronas artificiales así como su principio de funcionamiento y su utilización para modelizar las emisiones armónicas de los dispositivos eléctricos.

4.1.2. RED DE NEURONAS ARTIFICIALES

Las redes neuronales artificiales consisten en modelos de cálculo inspirados en el funcionamiento de las neuronas biológicas. Los primeros estudios y trabajos realizados sobre estas redes neuronales se llevaron a cabo alrededor de los años 50, y estos modelos son utilizados hoy en día para diversas aplicaciones en numerosos campos distintos. Un buen ejemplo es su aplicación en el reconocimiento de caracteres visuales.

Estas redes neuronales están compuestas por diversas “capas”, siendo cada una de estas capas un conjunto de varias “neuronas formales”. Así pues esta estructura de neuronas agrupadas en capas tiene la función de predecir los valores de las variables de salida del modelo a partir de los de las variables de entrada.

Puesto que estas redes de neuronas artificiales no representan un modelo con un sentido físico directo, tienen en ocasiones mala reputación al ser consideradas como una “caja negra” donde el usuario únicamente ve los resultados obtenidos a partir de las entradas sin tener un seguimiento de cómo estas entradas son tratadas. No obstante, en realidad el cálculo de las salidas a partir de las entradas se realiza mediante algoritmos bien definidos.

A continuación se presentará con más detalle la “neurona formal” para seguidamente describir más rigurosamente el funcionamiento de la red neuronal.

La neurona formal :

La neurona formal es el elemento de base de la red neuronal artificial. Este tipo de neuronas pueden ser representadas como muestra la siguiente imagen:

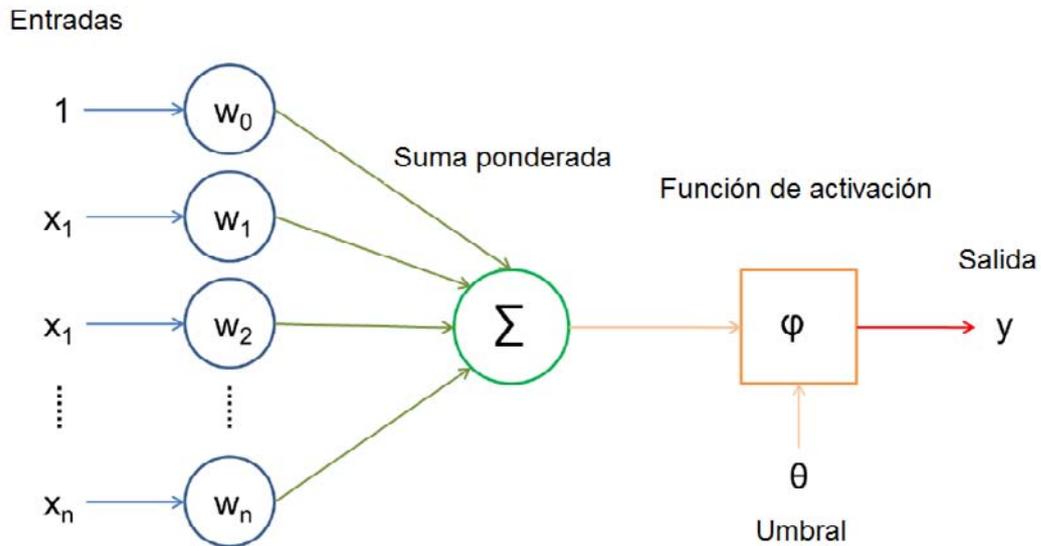


Figura 38 – Funcionamiento de una neurona formal

Los parámetros característicos de la neurona formal son por lo tanto las constantes asociadas a cada entrada utilizados para efectuar la suma ponderada (w_1, w_2, \dots), la función de activación " ϕ " por la que pasa la suma ponderada de las entradas, y el umbral " θ " de la función de activación, que se trata de un parámetro característico de dicha función. Como se puede ver en la figura 38, a parte de las variables de entrada (x_1, x_2, \dots), existe también una entrada constante con su respectiva constante asociada " w_0 ".

De este modo, la neurona formal constituye a su vez una función de diversas variables de entrada en la que la salida es calculada utilizando la siguiente expresión:

$$y = \phi \left(w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \times x_i, \theta \right)$$

(25)

En cuanto a la función de activación, esta es escogida libremente por el usuario según las características de la aplicación de la red neuronal. Sin embargo, son las cuatro funciones representadas en la figura 39 las que se utilizan en la gran mayoría de casos.

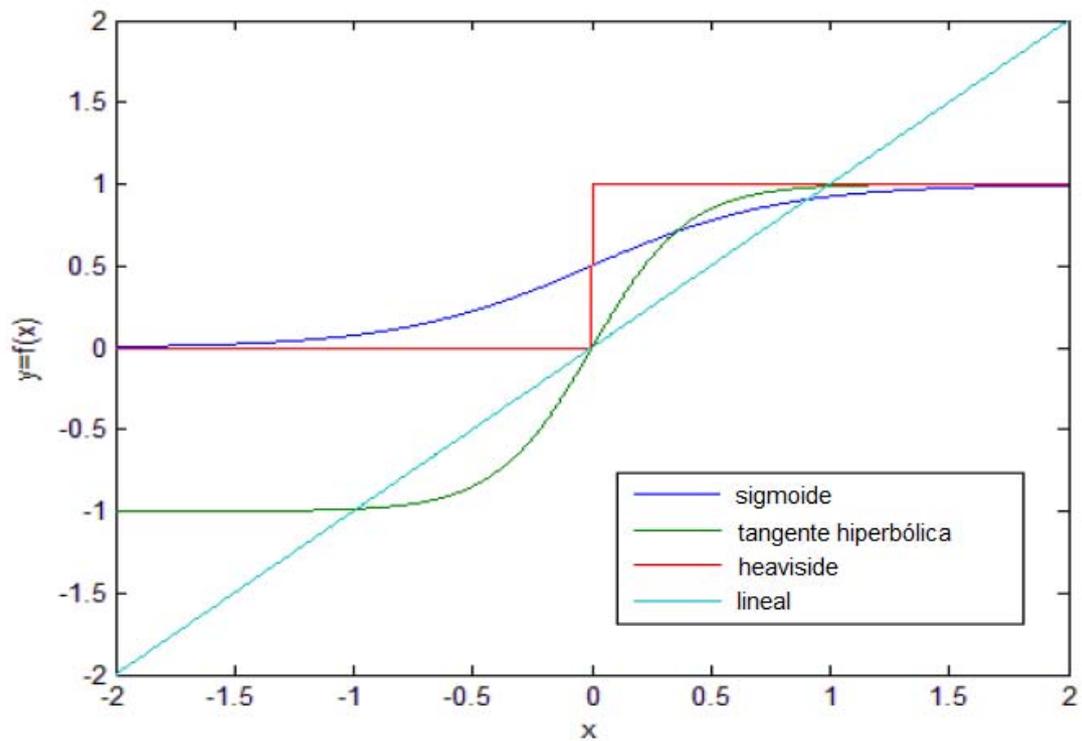


Figura 39 – Funciones comúnmente utilizadas como función de activación de las neuronas

Todas estas funciones poseen un parámetro conocido como “umbral” que las permite desplazarse horizontalmente para situarse sobre un rango de valores u otro. Como vemos, exceptuando la función lineal, las demás curvas presentan dos asíntotas horizontales y se componen de tres partes, una en la que están cercanas a la primera asíntota, una de transición en la que se aproximan a la otra asíntota y la última en la que están cercanas a esta segunda asíntota. Esta fase de transición puede por lo tanto situarse sobre unos valores u otros modificando el umbral “ θ ”, definiendo de este modo en qué momento la imagen de la función cambiará de valor.

Red neuronal artificial multicapa:

Tras haber estudiado el funcionamiento de la neurona formal, a continuación se detallará cómo éstas, agrupadas en capas, están estructuradas e interaccionan entre ellas para funcionar bien conjuntamente como una red. Pues, como se podrá ver en este apartado, estas neuronas formales ofrecen muchas más posibilidades entrelazadas entre ellas.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de red neuronal multicapa:

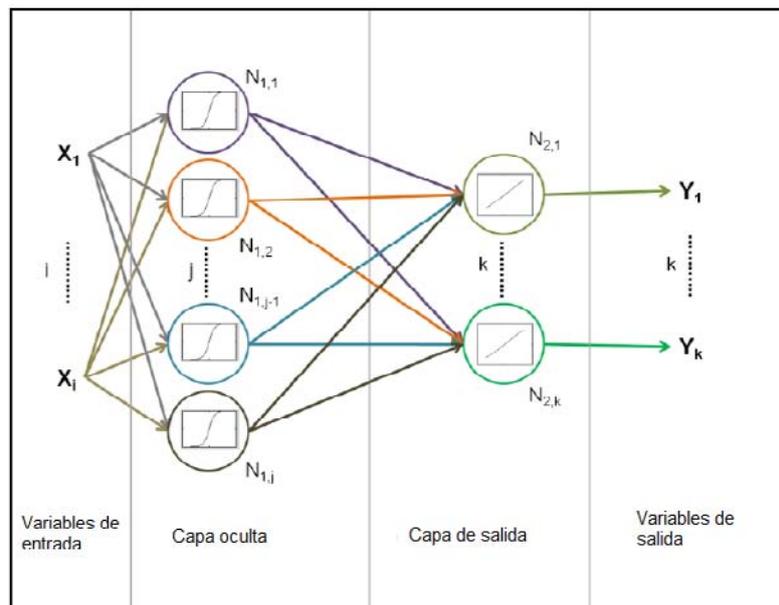


Figura 40 – Funcionamiento de una red neuronal con dos capas

Como vemos, cada neurona recibe como entradas las salidas de las neuronas de la capa anterior o las variables de entrada de la red en el caso de las neuronas de la primera capa. En cuanto a las salidas, cada capa tiene tantas salidas como número de neuronas, pues como sabemos cada neurona tiene una salida. Así pues, esta característica fija el número de neuronas en la capa de salida, debiendo ser igual al número de salidas de la red neuronal. En cuanto a las demás capas (capas ocultas), en cambio, no existe una limitación de este tipo; no obstante, modificando el número de neuronas en éstas, también cambia el comportamiento de la red, y este número de neuronas es determinado en función de la complejidad de la modelización, del número de entradas y salidas del modelo, o incluso del tiempo disponible, pues la creación de la red requerirá más tiempo cuantas más neuronas contenga.

Para nuestra aplicación, puesto que nuestra red neuronal trabaja con valores reales, hemos debido descomponer los números complejos asociados a los armónicos en la parte real y la imaginaria (La precisión obtenida era más alta que descomponiéndolos en amplitud y fase). Dado que tomamos en cuenta 13 rangos armónicos, tendremos 26 variables de salida y 27 de entrada (26 más la potencia de funcionamiento). Así pues el número de neuronas en la capa de salida estará fijado a 26, y sobre el número de neuronas en la capa oculta, ya que es variable, éste será determinado comparando los resultados obtenidos con distintas cantidades de neuronas como veremos más adelante.

La red de neuronas que se utilizará tendrá dos capas, al igual que la de la figura 40. Una capa de entrada donde la función de activación es la función sigmoide y una de salida donde esta función será una función lineal. Estas dos funciones de activación utilizadas conjuntamente, como ha sido demostrado, permiten aproximar toda función continua acotada [\[18\]](#).

En el siguiente apartado se explica cómo una red de neuronas puede ser capaz de predecir los valores de las variables de salida a partir de los de las variables de entrada tras haberle presentado un conjunto de muestras reales, que para nuestra aplicación serían medidas de tensión y de corriente en el dispositivo eléctrico tomadas en el laboratorio.

Aprendizaje de la red neuronal artificial:

El aprendizaje de estas redes neuronales consiste en ir ajustando el valor de los distintos parámetros (Constante asociada a cada entrada, umbral de la función de activación, etc...) de modo a que la diferencia entre las previsiones calculadas por la red y las salidas reales sea lo más pequeña posible.

También existen diferentes algoritmos de aprendizaje para estas redes. Uno de los más conocidos y que utilizaremos para nuestra aplicación es el de Levenberg-Marquardt [\[19\]](#), ya que tras comparar diferentes algoritmos resultó dar resultados ligeramente mejores que los obtenidos con los demás.

El procedimiento de aprendizaje consiste en realizar varias iteraciones calculando cada vez el error por mínimos cuadrados y modificando los parámetros de la red según el algoritmo de aprendizaje para minimizar este error respecto a las salidas reales. De este modo, realizando estas iteraciones sin condición de parada, el modelo convergerá hacia un error mínimo (Error por mínimos cuadrados) respecto a los valores de salida utilizados para el aprendizaje.

No obstante, dado que los datos utilizados para el aprendizaje (En nuestro caso medidas tomadas en el laboratorio) son limitados, se puede provocar el sobreaprendizaje de la red. Este sobreaprendizaje consiste en un aprendizaje tan minucioso de los datos que se le han presentado a la red, que empeora su precisión sobre datos nuevos que no se hayan utilizado para el aprendizaje. Para evitar que esto suceda, los datos disponibles se dividen en dos grupos, uno se utilizará para realizar el aprendizaje de la red (datos para aprendizaje o entrenamiento) y el otro para observar cuándo se produce el sobreaprendizaje (datos para validación). Así pues en cada iteración también se calcula el error sobre los datos para validación, y es cuando este error ya no disminuye e incluso aumenta durante un cierto número de iteraciones cuando se ha alcanzado el sobreaprendizaje (ver figura 41). Es en ese momento cuando termina el aprendizaje de la red, y los valores definitivos de sus parámetros serán aquellos que habían sido calculados justo antes de que el error sobre los datos para validación empezara a crecer.

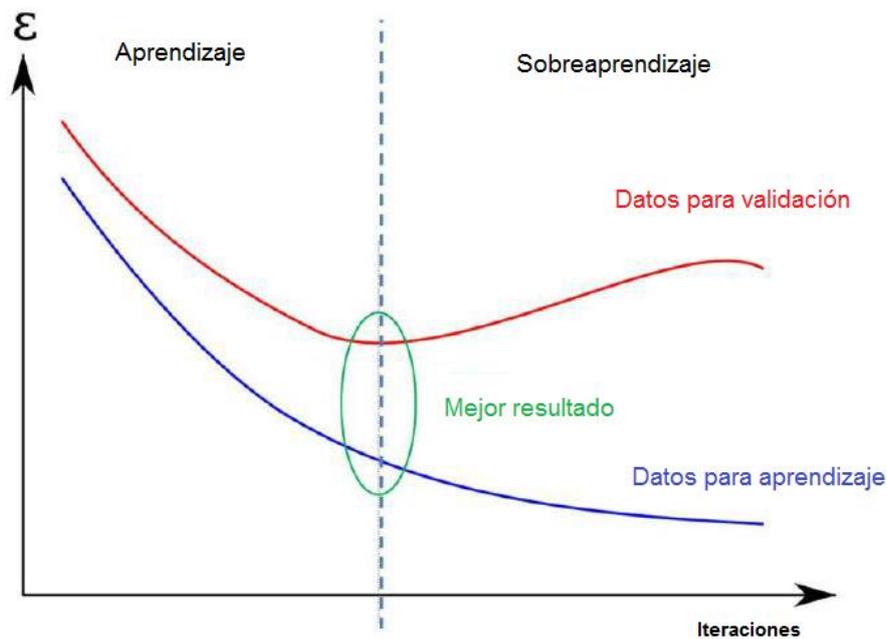


Figura 41 – Proceso de aprendizaje de una red neuronal artificial

Según interese, es posible modificar las condiciones de paro del aprendizaje, imponiendo un número de iteraciones máximo, un número máximo de iteraciones consecutivas en las que el error sobre los datos para validación no ha disminuido, o un determinado error a alcanzar por ejemplo.

4.1.2.1. RED NEURONAL EN MATLAB

El cálculo de un modelo por red neuronal requiere poder realizar diversos cálculos en cada iteración de forma rápida. Estos modelos suelen calcularse por lo tanto utilizando una computadora. En nuestro caso, las redes neuronales fueron calculadas con la ayuda de MatLab [20] utilizando una "Toolbox" llamada "Neural Network Toolbox" [21].

MatLab, en sí, es un lenguaje de alto nivel que dispone de un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante este programa hemos podido realizar diversas aplicaciones relacionadas con el proceso de modelización como veremos más tarde. Además, MatLab presenta la posibilidad de utilizar sus diferentes "Toolbox" para aplicaciones diversas.

Así pues, hemos podido entrenar las diferentes redes neuronales utilizando esta función de MatLab, lo cual ofrecía numerosas ventajas como la rapidez o la posibilidad de modificar la forma de entrenar la red neuronal cambiando por ejemplo las proporciones de división de datos en datos para entrenamiento y para validación, o como se ha dicho anteriormente, modificando las condiciones de paro del entrenamiento.

4.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN DE UN MODELO

Como sabemos, la función del modelo buscado es predecir las corrientes armónicas que circularían por un dispositivo eléctrico en función de la tensión a sus bornes y su potencia de funcionamiento.

Para evaluar los resultados obtenidos por un modelo así como para comparar la precisión de predicción de cada método es necesario poder cuantificar el error de las corrientes calculadas por el modelo respecto a las corrientes reales medidas sobre el dispositivo.

Cuando nos disponemos a calcular el error sobre un valor complejo, podemos pensar en descomponer el error en un error sobre la amplitud y otro sobre la fase, o bien también podemos realizar una resta en complejos como se ilustra en la figura 42(a).

No obstante, la medida del error en amplitud/fase supone un pequeño problema. La diferencia entre las corrientes calculadas y las reales puede en general ser interesante evaluarlas mediante un error relativo, es decir, comparando el error realizado con el valor de la medida a predecir, de modo a obtener un error en porcentaje. Sin embargo, al contrario que para las amplitudes, evaluar un error relativo sobre las fases de los armónicos no tiene un sentido tan intuitivo. El error complejo, en cambio, permite concentrar el error sobre la amplitud y la fase en uno sólo (figura 42(b)). Así pues, se utilizará este último para evaluar la precisión de los distintos modelos creados.

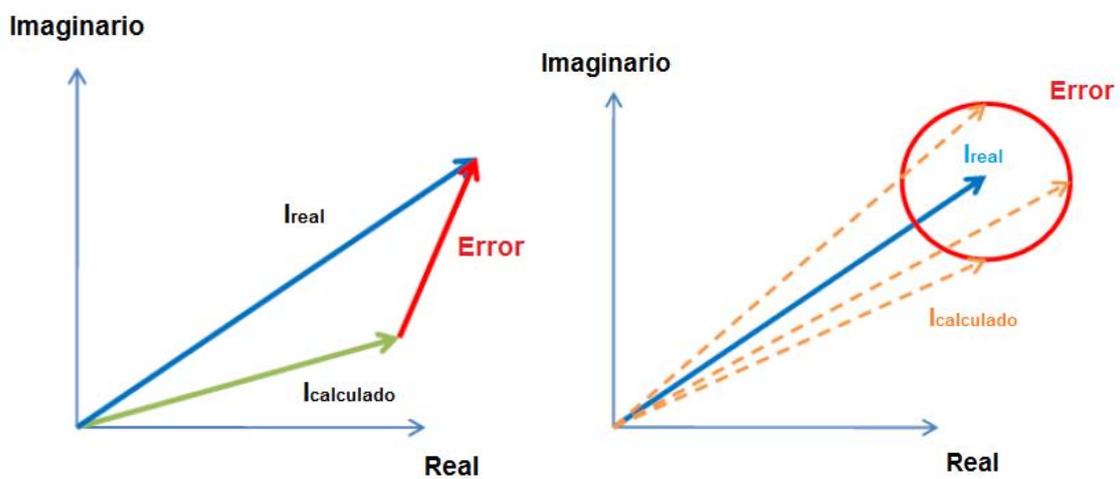


Figura 42 (a) – Vector error correspondiente a la resta compleja Figura 42 (b) – Representación de la noción de error complejo

A partir de esta diferencia de valores complejos, se han utilizado dos tipos de error.

Sea I_h el armónico “h” de la corriente real medida en el laboratorio, I_{ch} el armónico “h” de la corriente calculado por el modelo y I_1 el armónico fundamental de la intensidad medida:

$$\text{Error armónico/armónico} \quad : \quad E_{h/h} = \frac{|I_h - I_{ch}|}{|I_h|} * 100$$

$$\text{Error armónico/fundamental} \quad : \quad E_{h/f} = \frac{|I_h - I_{ch}|}{|I_1|} * 100$$

(26)

Estas dos medidas de error aportan informaciones diferentes. El primero es útil para comparar fácilmente la precisión de distintos modelos, sin embargo, al no considerar la amplitud fundamental de la intensidad, no se conoce el impacto en la deformación de la señal. Pues cuanto mayor sea la amplitud del armónico fundamental respecto a la de otro armónico, menor será la distorsión producida por este último. En el cálculo del segundo error $E_{h/f}$, en cambio, el error se compara a la amplitud del fundamental, lo que aporta información más precisa sobre la distorsión.

4.2.1. COMPARACIÓN DE MODELOS

Tras definir como calcular el error, debemos definir un procedimiento para a partir de estos errores poder determinar qué modelo es más preciso que otro.

Para medir la precisión de un modelo, es necesario probarlo con una importante cantidad de entradas y salidas diferentes y así tener una noción de su precisión sobre todo tipo de tensiones e intensidades y no sobre únicamente unas señales concretas.

Además, para saber si el modelo es fiable, los datos disponibles para crearlo (medidas realizadas en el laboratorio) se dividirán desde un primer momento en dos grupos, uno de “datos para modelización”, donde estarán los datos con los cuales se calculará el modelo, y otro de “datos para verificación”, que serán utilizados para poner a prueba el modelo con datos que no han sido utilizados para definirlo. Son estos últimos datos los que servirán para realmente conocer la validez del modelo y definir qué modelización es mejor.

No se debe confundir esta separación de datos con la que se realiza para entrenar la red neuronal artificial (datos para aprendizaje y datos para validación), pues es una separación que forma parte del proceso de entrenamiento de una de estas redes y en la que el usuario no conoce qué datos han sido utilizados en cada grupo. Estas son por tanto dos separaciones de datos totalmente independientes.

A continuación se ilustra de forma esquemática el proceso de comparación de precisiones:

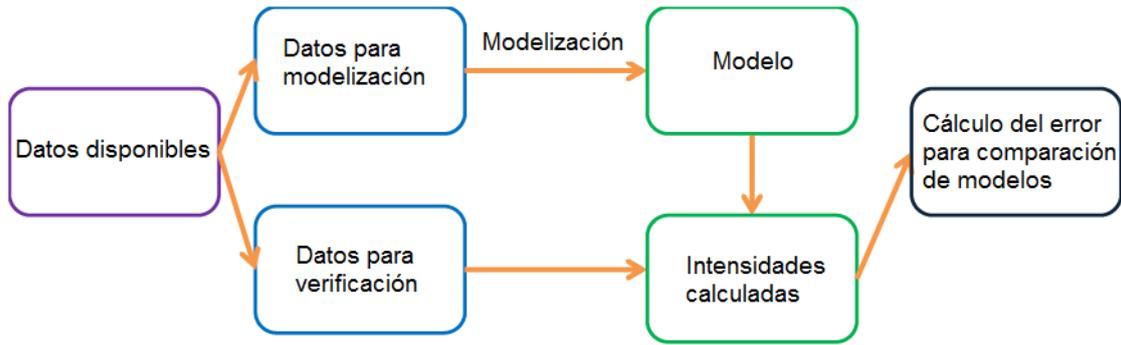


Figura 43 – Proceso de análisis de precisión de una modelización

Cuando las “medidas disponibles” han sido realizadas para varias potencias de funcionamiento del aparato a modelizar, la división de datos es hecha una vez para cada potencia, de modo a asegurarse de que en ambos grupos habrá medidas de todas las potencias.

La evaluación del error sobre los datos para verificación una vez obtenemos el modelo a partir de los datos para modelización se efectúa como se indica en el siguiente esquema:

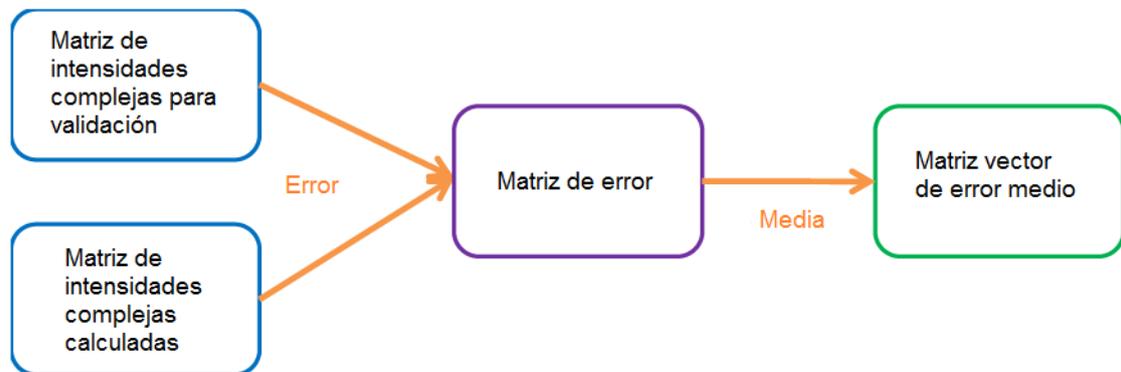


Figura 44 – Detalle de las operaciones realizadas para obtener el vector de errores medios

Como se indica en la figura 44, las corrientes se disponen en matrices, y éstas se restan realizando la resta compleja entre los elementos de una y los de otra obteniendo la matriz de error. Posteriormente, se calcula el error relativo y en la matriz obtenida se calcula la media aritmética quedando una matriz vector en la que cada elemento es la media del error sobre

cada rango armónico. El error relativo es el calculado respecto a cada rango armónico ($E_{h/h}$), pues es éste el considerado para comparar los modelos.

Este cálculo de los errores mediante operaciones matriciales es realizado de forma rápida y simple utilizando MatLab.

El método de la red neuronal artificial resultó dar desde el primer momento mucho mejores resultados que el método por esquema eléctrico equivalente, sobre todo a la hora de modelizar inversores con fuertes relaciones interarmónicas.

Así pues, este procedimiento de comparación de modelos ha sido empleado principalmente para comparar distintas redes neuronales artificiales cada una con un número de neuronas en la capa oculta diferente, pues como observaremos a continuación, al modificar esta cantidad de neuronas en la capa oculta, las precisiones también cambiaban ligeramente.

A continuación se describe con más detalle el procedimiento llevado a cabo para la determinación del número óptimo de neuronas en la capa oculta.

4.2.1.1. DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE NEURONAS IDEAL EN LA CAPA OCULTA

El proceso de comparación de precisiones descrito es realizado para comparar, a partir de las medidas de un mismo dispositivo, distintas redes neuronales en las que cada vez el número de neuronas en la capa oculta es diferente.

Este proceso, puesto que es el mismo independientemente del dispositivo a modelizar y está bien definido, se decidió acelerarlo creando un programa que automatizara la mayoría de los cálculos para así poder realizar más rápidamente próximas modelizaciones. Este programa fue también creado utilizando MatLab, lo cual puesto que el entrenamiento de la red neuronal se efectúa mediante una "Toolbox" de MatLab, permite simplificar el proceso.

Pese a tener una gran parte de los cálculos automatizados, este proceso de comparación de redes neuronales con distintas cantidades de neuronas en la capa oculta requiere un tiempo considerable. Así pues, para limitar el tiempo de determinación del número de neuronas óptimo, se decidió probar sólo con un rango de número de neuronas determinado. Tras realizar unas primeras pruebas con distintas cantidades de neuronas, se concluyó que en general, se obtenían mejores resultados cuando este número de neuronas era próximo al

número de entradas y al de salidas, además, un alto número de neuronas en la capa oculta aumentaba de forma considerable el tiempo de cálculo necesario.

Para nuestra aplicación, donde como sabemos tenemos 27 entradas y 26 salidas, hemos decidido comparar redes en las que este número de neuronas vaya de 22 a 33. Cabe decir que, una vez determinado el número de neuronas en la capa oculta que dé mayor precisión, para evitar una innecesaria pérdida de datos, el modelo definitivo constará del número de neuronas en la capa oculta óptimo y será entrenado no sólo con los datos para modelización sino con todos los datos disponibles.

Tras realizar en MatLab todo el proceso descrito de evaluación de la precisión de cada red neuronal artificial con un número de neuronas en la capa oculta diferente (12 redes neuronales distintas, puesto que se va de 22 a 33 ambos incluidos), llega el momento de determinar qué red neuronal da mejores resultados. Para esto, se extraen las matrices vectores de errores " $E_{h/h}$ " medios obtenidos en MatLab, y se valora qué red neuronal es más precisa.

Para realizar la comparación, estas series de valores se exportan a Excel, un programa de "Microsoft Office" de hojas de cálculo que permite visualizar gráficas fácilmente a partir de un conjunto de datos.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de visualización de las curvas de error en Excel:

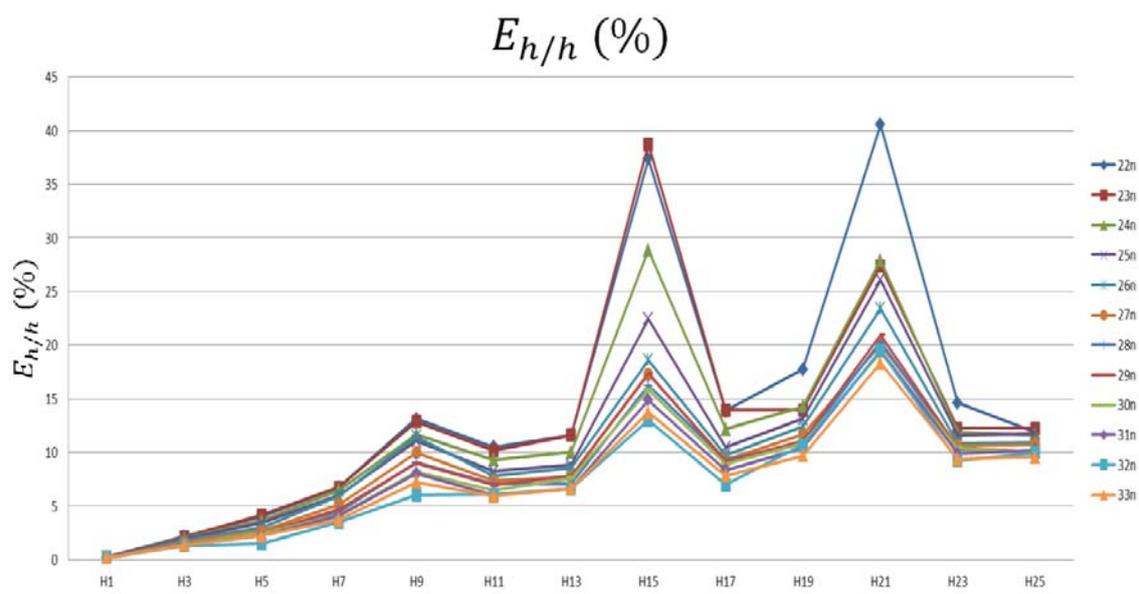


Figura 45 – Conjunto de curvas de error para diferentes cantidades de neuronas en la capa oculta

En esta gráfica se tienen los errores $E_{h/h}$ en porcentaje en el eje de ordenadas y los distintos rangos armónicos impares hasta el 25 en el eje de abscisas.

Se puede observar también en esta gráfica que las curvas correspondientes a números de neuronas mayores de 26 poseen para todos los rangos errores bastante pequeños en general, pese a que también se aprecia en todas las curvas que el error aumenta a medida que consideramos rangos más altos. Esto puede ser debido a que, aunque un rango “h” de la corriente pueda depender de todos los rangos presentes en la tensión, estará en general más influenciado por los rangos de frecuencias cercanas. Así pues al no considerar rangos más allá del 25, no se tiene tanta precisión sobre los últimos armónicos. No obstante como sabemos, la amplitud decrece al aumentar la frecuencia de los armónicos, por lo que el error sobre los armónicos de altas frecuencias supone un menor error en términos de amplitud. Esto podrá ser valorado con certeza analizando la curva de error $E_{h/f}$.

En la figura 45, puesto que la curva correspondiente a 32 neuronas en la capa oculta está por debajo de las demás para todos los rangos armónicos prácticamente, podemos decir que el modelo por red neuronal artificial con 32 neuronas en la capa oculta es el que aproxima con mayor precisión la respuesta del dispositivo.

4.3. NIVEL DE PRECISIÓN PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E INVERSORES

En el caso de la figura 45 el dispositivo modelizado ha sido un vehículo eléctrico. En general, sobre estos dispositivos se alcanzan mayores precisiones utilizando la red neuronal que en el caso de los inversores, no obstante, como veremos, la precisión obtenida para los inversores es también satisfactoria para nuestra aplicación.

En la siguiente imagen podemos ver más cómodamente la curva correspondiente a 32 neuronas en la capa oculta:



Figura 46 – Curva de error $E_{h/h}$ (%) obtenida para el modelo de un vehículo eléctrico

Vemos que la precisión es alta en general, con errores $E_{h/h}$ (%) que no superan el 7 % en los armónicos de rango menor que 15.

A continuación se debe comprobar que estos errores $E_{h/h}$ (%) no supongan amplitudes muy grandes respecto a la amplitud del fundamental, y por tanto, que la distorsión de la señal sea bien modelizada.

La siguiente imagen muestra la curva de error $E_{h/f}$ (%) de la red de neuronas de 32 neuronas en la capa oculta que modeliza el vehículo eléctrico:

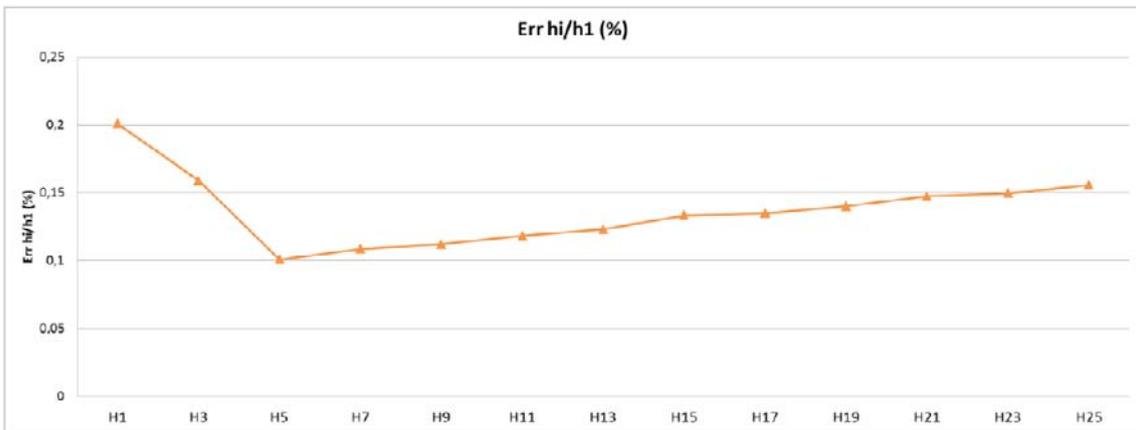


Figura 47 – Curva de error $E_{h/f}$ (%) del mismo modelo de la figura 46

En esta gráfica, al igual que en la precedente, en el eje horizontal se disponen los rangos armónicos impares del fundamental hasta el 25 y en el vertical encontramos el error en porcentaje, en este caso respecto a la amplitud fundamental ($E_{h/f}$ (%)).

A primera vista, se observa que para todos los rangos los errores son menores que los de la curva $E_{h/h}$ (%), lo cual es normal ya que la amplitud del armónico fundamental es siempre mayor a la de los demás.

También vemos que, al contrario que el error $E_{h/h}$, el error $E_{h/f}$ no aumenta tanto al subir en frecuencia. Esto, aparte de que todos los errores son de menor valor, es debido sobre todo a que la amplitud de los armónicos desciende radicalmente cuando estos son de rangos de alta frecuencia.

De este modo se ha podido comprobar que los altos errores $E_{h/h}$ que se tenían para rangos como el 15 o el 21 no tienen en realidad gran impacto en la predicción de la distorsión de la intensidad, pues el error respecto a la amplitud del fundamental no supera en ningún caso el 0'2 % que se tiene para el fundamental. Nótese que el error $E_{h/h}$ y el $E_{h/f}$ coinciden para el armónico fundamental debido a la definición de estos dos errores.

A continuación sobre qué niveles se sitúan habitualmente los errores de precisión a la hora de modelizar un inversor para paneles fotovoltaicos.

La siguiente imagen muestra el error $E_{h/h}$ obtenido al modelizar uno de estos inversores con una red neuronal que en este caso poseía 30 neuronas en la capa oculta:

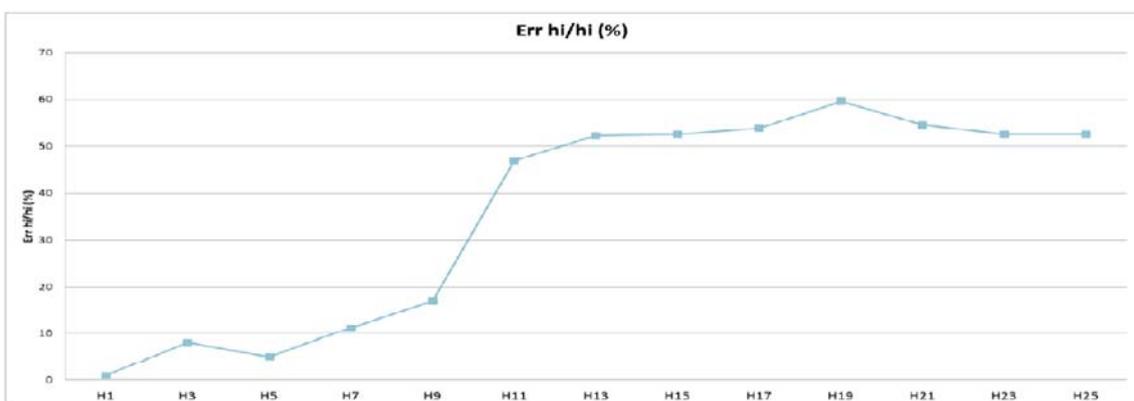


Figura 48 – Curva de error $E_{h/h}$ (%) del modelo de un ondulator

Vemos que, al igual que para el vehículo eléctrico, en este caso la curva de error también es creciente. No obstante los errores son en general más altos, con un error de alrededor al 10 % entre los rangos 3 y 9, y a continuación un aumento brusco del error para el rango 11, a partir del cual el error se sitúa sobre el 50 %.

Unos errores $E_{h/n}$ del 50 % puede suponer una diferencia considerable entre la intensidad calculada por el modelo y la señal de intensidad real medida en el dispositivo. No obstante, hasta el rango 11, donde los armónicos suelen tener mayor amplitud, los errores son bajos.

La curva del error $E_{h/f}$ de la siguiente figura nos permitirá conocer hasta qué punto este error en las altas frecuencias tiene influencia en la predicción de la perturbación armónica de la corriente.

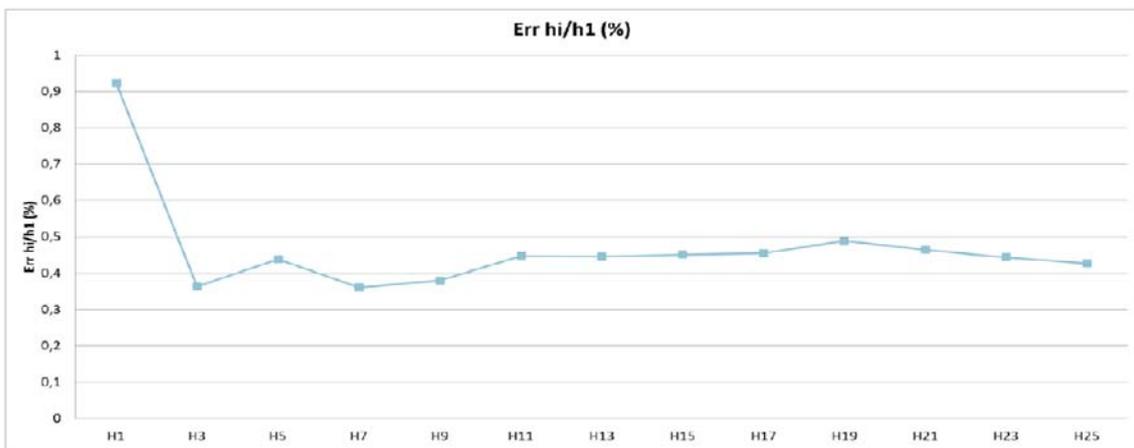


Figura 49 - Curva de error $E_{h/f}$ (%) del mismo modelo de la figura 48

Al igual que sucedía en el caso del vehículo eléctrico, puesto que las amplitudes de los armónicos de órdenes elevados es muy inferior respecto a las demás, al comparar los errores respecto a la amplitud fundamental, estos disminuyen hasta tal punto que, en la curva de la figura 49, estos alcanzan niveles similares a los de los armónicos de bajas frecuencias. Pues, a excepción del error sobre el fundamental que se sitúa a un poco más del 0'9 %, para los demás armónicos se tienen errores que oscilan ligeramente alrededor del 0'4 %.

En el [anexo 1](#) se encuentran las curvas de error obtenidas para un vehículo eléctrico y un inversor diferentes, ya que la interpretación de éstas es muy similar a la de las que se acaban de analizar.

Así pues en todos los dispositivos que se han modelizado se concluye que las precisiones obtenidas en la aproximación de las corrientes armónicas son muy satisfactorias para nuestra aplicación, que consiste en la utilización del modelo en un programa de simulación de redes en el que entran en juego otros errores e imprecisiones más altas que éstas.

5. OPERACIONES NECESARIAS PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO

Se ha visto hasta ahora cómo a partir de unas muestras de la respuesta en corriente de un dispositivo según la tensión, se puede proceder al cálculo de una red neuronal artificial que consigue modelizar el comportamiento de dicho dispositivo con resultados satisfactorios en términos de precisión.

No obstante, desde la realización de los test sobre un receptor en el laboratorio hasta la utilización del modelo en el programa de simulación para el que está destinado, se deben llevar a cabo otros procesos importantes que se detallarán a continuación.

5.1. TRATAMIENTO DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN EL LABORATORIO

Para obtener unos datos con los que directamente efectuar la modelización de las emisiones armónicas de un dispositivo, se deben realizar distintas operaciones, la primera de las cuales es montar en el laboratorio el circuito que permita tomar las medidas necesarias de la mejor forma posible.

El montaje básico realizado para efectuar los test sobre un dispositivo es el representado en la figura 50, en la que dicho dispositivo es un vehículo eléctrico. Un ordenador equipado con el programa “LabVIEW” [22] envía las señales de tensión que son amplificadas por un amplificador (4 cuadrantes; 3 kw), pues el ordenador no es capaz de suministrar la potencia necesaria por sí sólo. Estas señales de tensión amplificadas se envían a continuación al aparato a modelizar (El amplificador juega el rol en este caso de la red de alimentación de baja tensión). En consecuencia, el aparato absorbe una señal de corriente, en general perturbada.

Durante los test, el ordenador almacena las tensiones y corrientes presentes mediante una carta de adquisición de datos [23]. Estas medidas son guardadas en archivos y serán tratadas y utilizadas con la ayuda de algunos programas que se presentarán posteriormente en este trabajo.

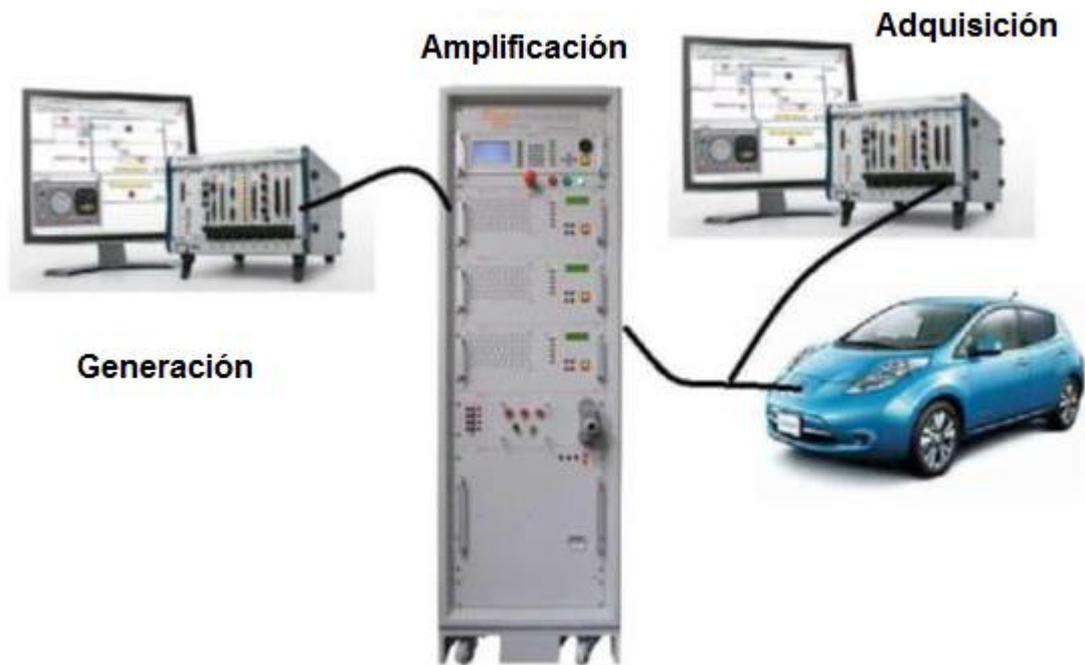


Figura 50 – Montaje realizado para el test de dispositivos como vehículos eléctricos

El montaje de la figura 50 es el montaje básico para realizar los test de un dispositivo y es utilizado cuando dicho dispositivo se trata de un receptor que absorbe una potencia fija que sólo depende de la tensión que se le aplica y que es constante o que sigue una variación determinada respecto al tiempo conocida (como en el caso de la carga de la batería de un vehículo eléctrico, en la que la potencia transmitida disminuye a partir de un determinado estado de carga de dicha batería).

En el caso de un inversor para paneles fotovoltaicos, como es sabido, la potencia de funcionamiento depende de la potencia solar recibida por dichos paneles en cada momento. Por lo que se ha debido añadir una fuente de alimentación continua [24], que simula la potencia solar transformada en potencia eléctrica por los paneles fotovoltaicos y cuya potencia es modificada a lo largo de los test para así poder considerar las influencias en la corriente.

Además, al efectuar pruebas de estos inversores a potencias elevadas (más de 1'5 kw) durante un cierto espacio de tiempo, dado que el inversor se comporta como un generador, la potencia transmitida al amplificador puede causar su sobrecalentamiento. Para evitar este sobrecalentamiento que podría causar ciertos disfuncionamientos, se debe incorporar también

una carga resistiva del orden del “kw” en paralelo al inversor para disipar la potencia transmitida por dicho inversor. Esta carga resistiva no modifica en absoluto la respuesta del inversor, por lo que las medidas realizadas no estarán condicionadas.

A continuación puede observarse un esquema del montaje descrito utilizado para realizar los test en un inversor para paneles fotovoltaicos:

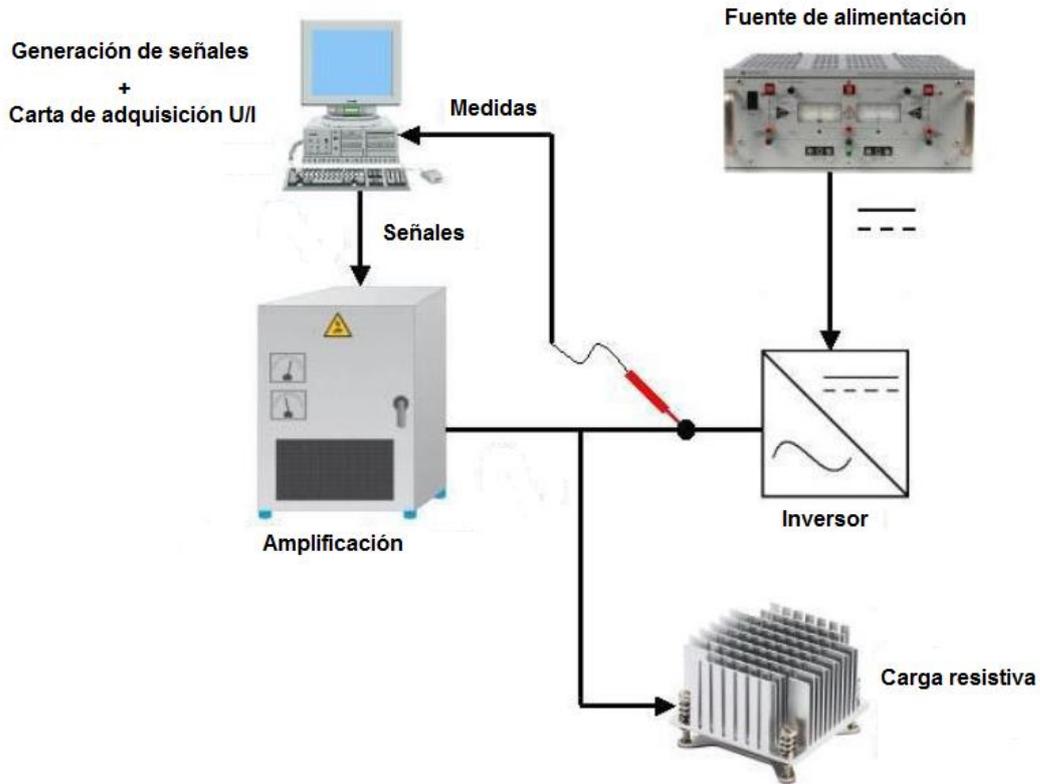


Figura 51 – Montaje realizado para el test de onduladores para paneles fotovoltaicos

5.1.1. PLAN DE LAS SEÑALES MULTIARMÓNICAS DE TENSIÓN

Los espectros de tensión emitidos por el generador de señales por medio del amplificador siguen de forma automática un plan de test que ha sido definido previamente. Estas señales de tensión poseen cada una distintos armónicos de rango impar comprendido entre 3 y 25, con amplitudes y fases determinadas respetando un límite de amplitud en función del orden del armónico ([anexo 2](#)).

Cada una de estas señales perturbadas de tensión es emitida durante 2 segundos para que el sistema llegue a estabilizarse y evitar los transitorios que tienen lugar. Además, tras cada señal distorsionada, se emite una tensión perfectamente sinusoidal de la misma amplitud fundamental (230 V) también durante otros dos segundos y cuya función es evitar una desincronización de las fases con el amplificador.

Uno de estos planes de test para un aparato puede contener alrededor de 6 000 espectros armónicos de tensión diferentes, para así poder considerar muchos casos distintos que permitan crear un modelo más preciso.

En los test de los inversores, la potencia de la fuente de alimentación que simula la transmitida por los paneles fotovoltaicos es variada de 200 w a 2 400 w con un paso de 200 w para considerar la influencia de esta potencia en la respuesta en corriente.

En el caso de los vehículos eléctricos, puesto que, como habíamos dicho, la potencia de carga de la batería varía siguiendo un determinado ciclo según el estado de carga, no se realiza ninguna regulación de potencia. Esta potencia transmitida a la batería es generalmente constante y próxima a 2'2 kw, y no decrece ligeramente hasta que se alcanza un alto nivel de carga. Así pues puede considerarse que los test se han realizado todos para una potencia de alrededor 2'2 kw.

En la siguiente imagen se muestra un espectro de tensión como ejemplo de los utilizados en las pruebas de los dispositivos:

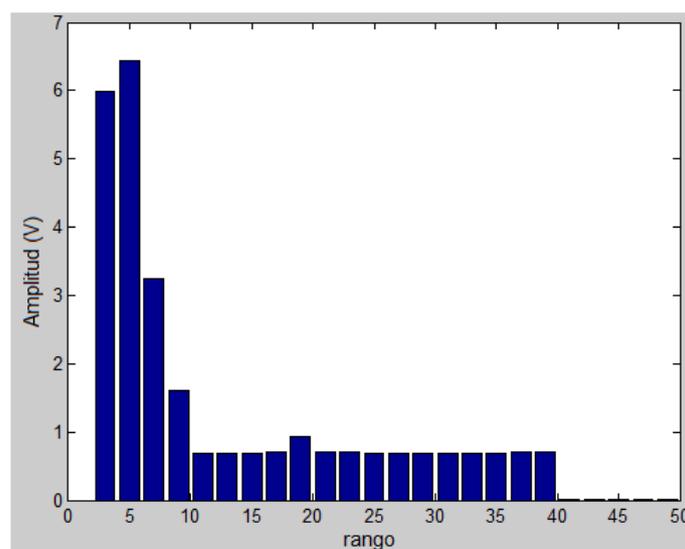


Figura 52 – Espectro de frecuencias característico de las señales de tensión emitidas por el ordenador en los test en el laboratorio

La amplitud del armónico fundamental, de 230 V, no ha sido representada en esta figura 52 por ser mucho mayor que las demás, lo que impediría apreciar bien las amplitudes del resto de rangos.

Podemos observar también en este espectro que hasta el rango 41 las amplitudes no son totalmente nulas, no obstante las amplitudes de los armónicos de rango mayor a 9 son bastante pequeñas en comparación a las de los de frecuencias más bajas, que llegan a alrededor de 6 V en la imagen.

Este espectro corresponde a una señal multiarmónica, en el sentido de que contiene diversas componentes frecuenciales a distintas frecuencias. Es por esto por lo que se diferencia de las señales utilizadas en los test llamados unitarios que eran realizados anteriormente para calcular modelos basados en un esquema eléctrico equivalente. Señales en las que únicamente un armónico está presente en la señal además del fundamental.

Un ejemplo de la distorsión de la forma de onda sufrida por una señal multiarmónica de tensión así como de la forma de onda de la intensidad correspondiente es ilustrado para el caso de un inversor (de respuesta poco perturbada) en la siguiente figura:

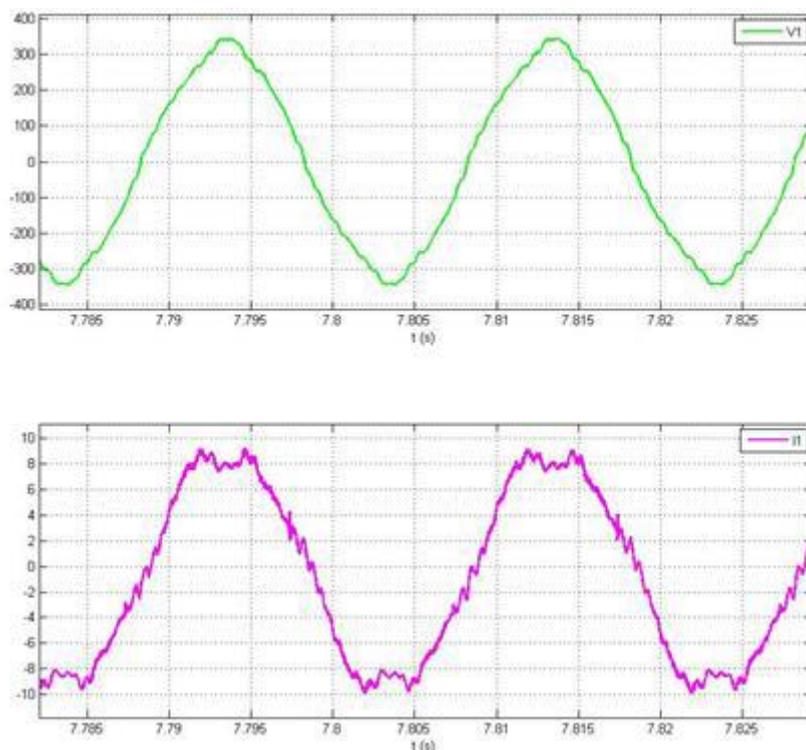


Figura 53 – Formas de onda distorsionadas. Arriba la tensión y abajo la respuesta en corriente

5.1.2. DATOS ALMACENADOS POR LA CARTA DE ADQUISICIÓN

Las medidas de tensión y corriente son tratadas y almacenadas en la carta de adquisición de modo a disponer de estas medidas en los diferentes formatos que se describen a continuación:

- **Forma de onda:** Se trata de las señales muestreadas a una frecuencia de 90 kHz. Estas formas de onda son utilizadas cuando se debe detectar una perturbación de forma muy precisa. Son los únicos datos que no han sufrido ningún tratamiento (a parte del muestreo [\[26\]](#), por supuesto) y representan los datos más representativos de las señales reales.
- **FFT 200ms:** Consisten en las amplitudes y fases de los rangos armónicos del espectro obtenidas mediante el cálculo de la “Transformation de Fourier Rapide” [\[25\]](#) (FFT – Fast Fourier Transform) de la señal en periodos de 200 ms. Estas medidas contienen los rangos del 1 al 50, tanto pares como impares (de 50 Hz a 2'5 kHz) así como la componente continua.
- **FFT 2-9 kHz:** Idénticas a las FFT 200 ms pero con las amplitudes y fases de los armónicos hasta el rango 180 (9 kHz). Estas medidas son útiles para representar espectros con un abanico de frecuencias mayor.
- **Medidas 200ms:** Son medidas diversas como la corriente y la tensión RMS, potencias PQS, $\cos \varphi$, THD, etc... integradas por periodos de 200 ms.
- **Medidas 1min:** Como las medidas 200ms pero integradas esta vez por periodos de 1 minuto. Estas medidas, especialmente ligeras en términos de almacenamiento informático, son muy útiles para visualizar rápidamente las señales en Excel, no obstante, dado el largo periodo sobre el que son efectuadas, no permiten realizar análisis muy precisos (no se pueden visualizar fenómenos de una duración menor a 1 minuto).

Todas estas medidas son guardadas en archivos diferentes que llevan en su nombre la fecha en que fueron tomadas dichas medidas. Lo que permite localizarlas más rápidamente a la hora de analizarlas. La mayoría de las medidas citadas son guardadas en archivos de texto, salvo

algunas como las formas de onda que están en formato binario para optimizar el espacio informático ocupado.

Los archivos utilizados para el cálculo de los modelos son los que contienen las medidas FFT 200 ms. Estos archivos, guardados en formato “.txt”, contienen, como se ha indicado, las amplitudes y fases de los armónicos de rangos del 1 al 50 de tensión y de corriente. Estos datos son más que suficientes puesto que como sabemos, sólo hacemos uso de los armónicos impares hasta el rango 25 para realizar el proceso de modelización.

5.1.3. SELECCIÓN DE LOS DATOS VÁLIDOS PARA EL CÁLCULO DEL MODELO

Los archivos de medidas FFT 200 ms creados durante los test en el laboratorio contienen muchos más datos que los que de verdad requerimos para el cálculo del modelo del dispositivo.

Las medidas se efectúan ininterrumpidamente del principio al fin del test de un aparato, incluyendo las etapas de conexión del dispositivo en cuestión, de encendido del amplificador, de desconexión al terminar las pruebas, de variación de la potencia de funcionamiento (durante la cual el generador de señales es interrumpido) en el caso de un inversor, etc... Todas estas medidas tomadas en esos momentos en los que las condiciones no son las correctas no son, por lo tanto, significativas para nosotros.

Quedan por lo tanto las medidas tomadas bajo buenas condiciones en las que el generador de señales emite las señales de tensión durante periodos de 2 segundos. De estos periodos, mientras que aquellos en los que la señal emitida es multiarmónica nos interesan todos para considerar un máximo de casos distintos, cada uno de los que sucedían a estos en los que se emitía una tensión puramente sinusoidal aportan la misma información, por lo que únicamente se considerará alguno que permitirá conocer la respuesta en corriente que deba tener el modelo.

No obstante, dado que una misma señal es emitida durante 2 segundos y las medidas son tomadas cada 200 ms, se tienen 10 líneas de datos correspondientes a la misma señal en el archivo de medidas. Y puesto que de estas 10 líneas sólo nos interesa una que nos aporte la información sobre la respuesta estable en corriente, también se deben suprimir todas las otras.

Toda esta selección unida al hecho de considerar sólo los rangos impares del 1 al 25 como se ha anunciado anteriormente dada la despreciable influencia de los demás, constituye por lo tanto una reducción grande de los datos que debe realizarse minuciosamente.

Un ejemplo de los valores que toma la amplitud del armónico de rango 3 de la tensión a lo largo de un test se muestra en la siguiente figura:

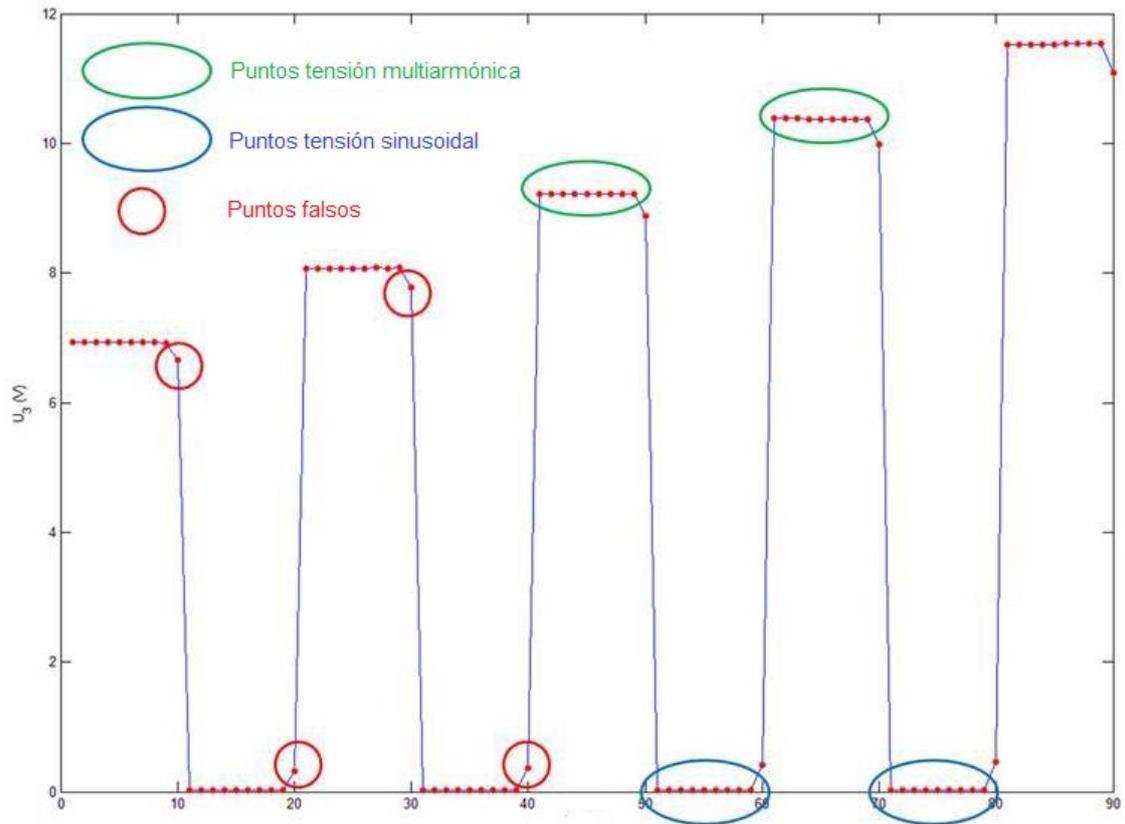


Figura 54 – Valores tomados por la amplitud del rango 3 de tensión durante una parte de un test multiarmónico

Podemos distinguir perfectamente las medidas correspondientes a la tensión sinusoidal, en las que la amplitud del rango 3 y de todos salvo el fundamental es nula, y las que corresponden a la tensión multiarmónica, en las que la amplitud del rango 3 y la de los demás rangos impares (que no se muestran en la imagen) tienen un cierto valor no nulo. No obstante también observamos puntos que corresponden a la transición de la tensión sinusoidal a la multiarmónica (llamados “puntos falsos” en la figura 54).

Estos “puntos falsos” aparecen porque, al efectuar la FFT 200ms cada 200 ms, puesto que la adquisición de las medidas no está sincronizada perfectamente con la emisión de las señales, durante los 200 ms, puede ocurrir que el generador pase de emitir una señal multiarmónica a una sinusoidal pura. Así pues estos puntos que aparecen aislados de los demás en la figura 54, no transmiten ninguna información útil para nuestra aplicación.

De este modo, finalmente no tenemos 10 sino 9 líneas de datos de cada señal, las cuales resultan ser prácticamente idénticas, como muestra el ejemplo de la amplitud del armónico 3 en la figura 54. Por lo tanto podremos guardar cualquiera de estas para utilizarla posteriormente en el proceso de cálculo del modelo.

El programa Excel ha sido muy útil para analizar diferentes archivos .txt con las medidas FFT 200ms y visualizar distintos datos para comprender más rápidamente el contenido de estos archivos y saber qué era interesante tener en cuenta para la modelización.

5.1.3.1. AUTOMATIZACIÓN DEL TRATAMIENTO DE LAS MEDIDAS

Dada la gran cantidad de señales que son emitidas durante el test de un aparato en el laboratorio, seleccionar manualmente los datos válidos para el cálculo de la modelización supondría un procedimiento excesivamente largo. Esto unido al cierto carácter sistemático y repetitivo de los datos, que siguen la secuencia explicada en el apartado anterior, son las razones por las que los estudiantes que trabajaron en este proyecto antes que yo decidieron automatizar el proceso de tratamiento de los datos para la obtención de aquellos útiles para la modelización. Esta automatización se llevó a cabo creando en MatLab el programa OPTIM, que posteriormente tuve ocasión de adaptar y mejorar.

Programa de tratamiento de datos para modelización OPTIM

El programa con el que se efectuaba el tratamiento de las medidas FFT 200 ms cuando empecé a trabajar en este proyecto era OPTIM V2, una versión que tuve ocasión de mejorar creando la versión OPTIM V2.5, que corregía ciertos fallos en la selección de datos, y finalmente la versión OPTIM V3, que utiliza el método de selección de datos implementado en OPTIM V2.5 pero ésta se realiza de forma aún más automática, requiriendo menos participación del usuario, por lo que es más simple y rápida a utilizar. A continuación se describirá como el proceso de tratamiento de datos es realizado en OPTIM V3 haciendo hincapié en los cambios respecto a la

versión OPTIM V2. En cuanto a la versión OPTIM V2.5, puesto que se trata de una versión de transición, su análisis no tiene ningún interés especial.

La interfaz de la versión OPTIM V2 es presentada en la siguiente figura:

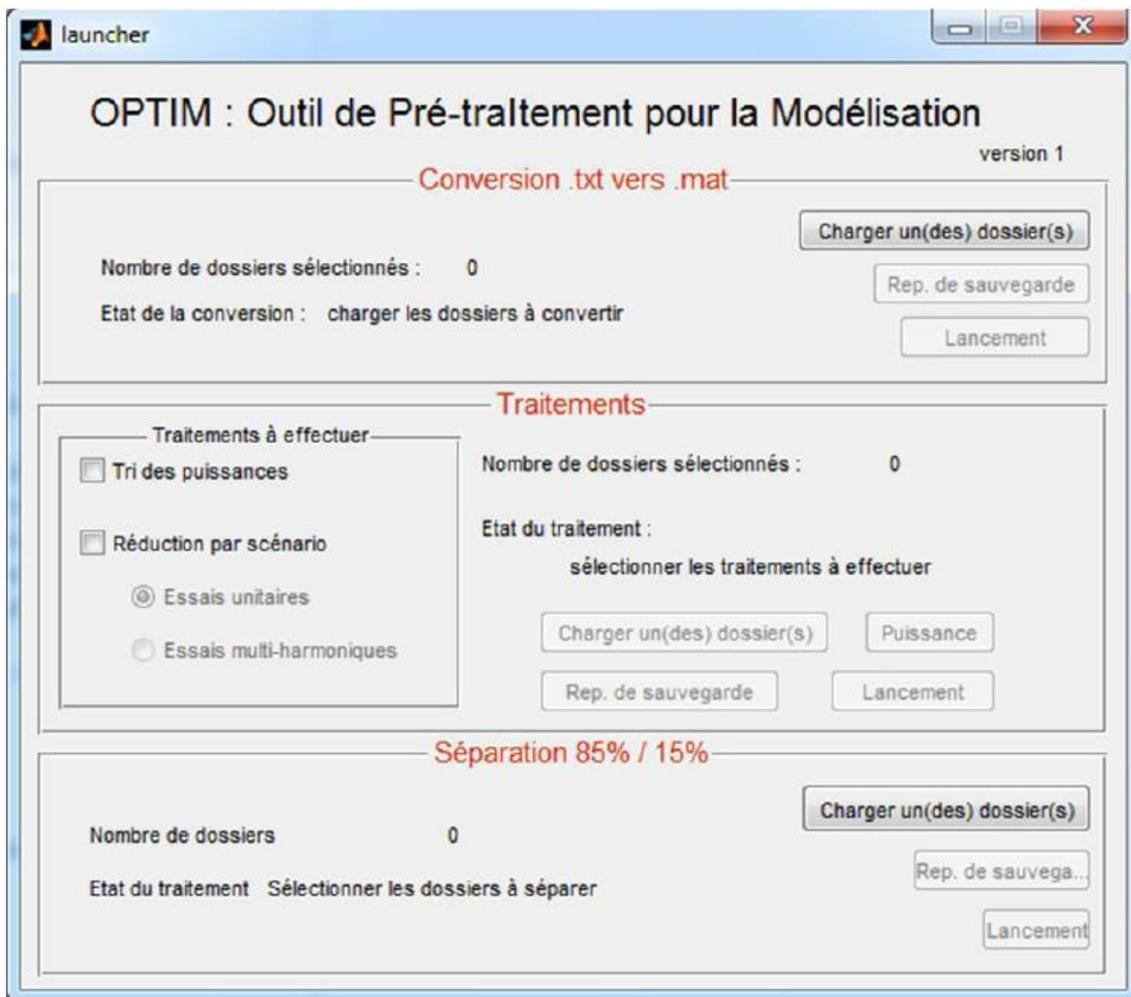


Figura 55 – Interfaz de la versión OPTIM V2

El principio de funcionamiento de esta versión se ilustra de forma esquemática en la siguiente imagen:

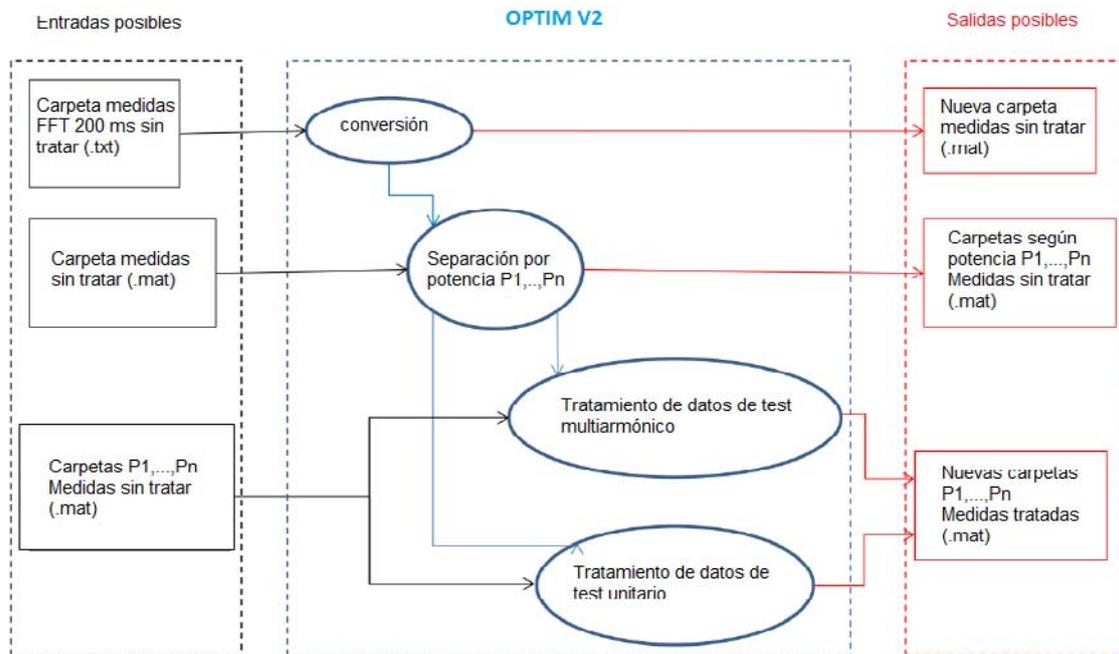


Figura 56 – Funcionamiento de OPTIM V2 representado de forma esquemática

Como da a pensar la parte de la interfaz del programa bajo el nombre de “Traitements” (Tratamientos), así como muestra el esquema de su funcionamiento, OPTIM V2 proponía dos métodos de selección de datos diferentes, según el tipo de test del que provenían las medidas. Recordamos que estos dos test que se realizaban antes de que el método de modelización fuera la red neuronal artificial eran:

- Test unitarios: Consisten en utilizar señales de tensión que únicamente poseen un armónico no nulo a parte del fundamental. Las señales emitidas consistían del fundamental y de un armónico impar del que se iba variando la amplitud y la fase. Las medidas obtenidas de este modo permiten observar la influencia de un rango concreto de la tensión en el espectro de la corriente que circula por el dispositivo.
- Test multiarmónicos: Las señales de tensión generadas poseen amplitudes no nulas en todos los rangos armónicos impares. Estas amplitudes son determinadas de forma aleatoria aunque respetando unos límites establecidos ([anexo 2](#)).

Actualmente el único método de modelización es la red neuronal artificial, y los test unitarios ya no tienen ningún interés especial, por lo que únicamente se realizan test multiarmónicos que permiten considerar señales más variadas. Así pues esta función de “tratamiento de datos de test unitario” ha sido suprimida en la nueva versión OPTIM V3.

Para detallar los cambios introducidos en OPTIM V3 para mejorar el tratamiento de los test multiarmónicos, se analizarán a continuación las etapas a seguir para obtener los datos válidos para el cálculo del modelo a partir de las medidas guardadas mediante la carta de adquisición en el laboratorio:

- **Conversión de formato de los archivos (.txt -> .mat):** Los archivos de medidas FFT 200ms son guardados en formato .txt por el sistema de adquisición, no obstante, para poder realizar el tratamiento de los datos en MatLab éstos deben estar en formato .mat.

Para llevar a cabo esta conversión, en OPTIM V2 debían introducirse uno a uno los archivos en formato .txt para convertirlos a formato .mat y posteriormente los archivos obtenidos se guardaban en una carpeta previamente creada.

Pero dada la importante cantidad de archivos a convertir, este proceso era largo y existía la posibilidad de equivocarse en la elección de algún archivo.

Así pues se ha decidido automatizar esta selección de archivos en la versión OPTIM V3, en la que el usuario únicamente debe proporcionar la carpeta que contiene todas las medidas realizadas en el test del dispositivo, y el programa se encarga a continuación de encontrar todos los archivos de medidas FFT 200ms (Las interesantes para nuestro tipo de modelización).

- **Selección de las medidas:** Selección de los datos útiles para el cálculo del modelo. Este tratamiento era realizado en dos etapas en OPTIM V2, en primer lugar se agrupaban los datos según potencias y posteriormente se realizaba la selección de los datos válidos. Así pues daba la posibilidad de guardar los datos tras el tratamiento completo o bien justo después de la separación de los datos según potencias como se representa en el esquema de la figura 56.

Para realizar este tratamiento de las medidas en OPTIM V2, también era necesario escoger uno a uno los archivos que habíamos convertido de formato .txt a .mat además de especificar para cada uno de estos archivos los valores de potencia para los que se han obtenido las medidas que contienen, lo que obligaba al usuario a analizar

las medidas de estos archivos antes de comenzar su tratamiento para cerciorarse de que este se realizaría satisfactoriamente.

Puesto que este proceso era largo y daba pie a cometer algún error, se ha decidido automatizarlo completamente en OPTIM V3, que inmediatamente después de la conversión de formato, dispone todas los datos en una misma lista sobre la que realiza la selección de los datos calculando por él mismo las potencias mediante el producto de la tensión y la intensidad fundamentales, de modo que no requiere la participación del usuario y permite a este último no tener que analizar y entender cómo las medidas están dispuestas en el archivo de FFT 200 ms.

Otra ventaja de este tipo de tratamiento es que la potencia registrada es la potencia exacta que había durante la emisión de cada señal, con lo que se tienen en cuenta las ligeras fluctuaciones de potencia que pueden producirse en lugar de considerar una única potencia media aproximada para todas las señales de potencia similar. Esto es especialmente interesante cuando durante el test de un aparato la potencia puede variar automáticamente como por ejemplo en el caso de la carga de los vehículos eléctricos.

También se ha introducido una mejora en la forma de seleccionar los datos de las medidas para obtener aquellos útiles para el cálculo del modelo.

En la antigua versión se consideraba que cuando la amplitud de un determinado rango sobrepasaba un valor límite, la señal era considerada multiarmónica y no puramente sinusoidal. Y tras agrupar todas las líneas de medidas correspondientes a estas señales, se guardaba una de cada 10 de estas líneas para utilizarlas en el proceso de modelado. No obstante, puede darse el caso de que “puntos falsos” se encuentren demasiado cerca de cero y no superen el valor límite para ser considerado, lo que hace que tengamos 9 en lugar de 10 líneas para la señal multiarmónica. También puede ocurrir que un nuevo archivo de medidas sea creado (puesto que tienen una limitación de la talla) por el sistema de adquisición en el momento en que se emitía una señal multiarmónica, lo que propicia que en este archivo al tratar sus datos, se tendrán menos de 10 líneas de la primera señal. Por razones como estas, no es correcto considerar que simplemente escogiendo 1 de cada 10 líneas no se tomarán líneas correspondientes a puntos falsos.

En la versión OPTIM V3 en lugar de un solo armónico, se suman las amplitudes de los primeros rangos impares para saber si estos sobrepasan otro valor límite determinado, y en cuanto a la selección de los datos, para cada señal multiarmónica se cuentan las líneas de datos que superan dicho valor límite y se escoge una línea situada por el

medio, para asegurarnos de que no se toman puntos falsos (que se encuentran tanto al principio como al final del listado de líneas correspondientes a cada señal).

Además, la nueva versión no toma en cuenta las medidas tomadas cuando se producen ciertas variaciones fuertes de corriente. Tras analizar en Excel los datos de las medidas FFT 200ms concretamente aquellos correspondientes a los test de los inversores, hemos advertido que tenían lugar repentinas caídas de corriente (y de potencia, pues la tensión sigue constante) indeseadas de corta duración como las que se pueden ver en la siguiente imagen:

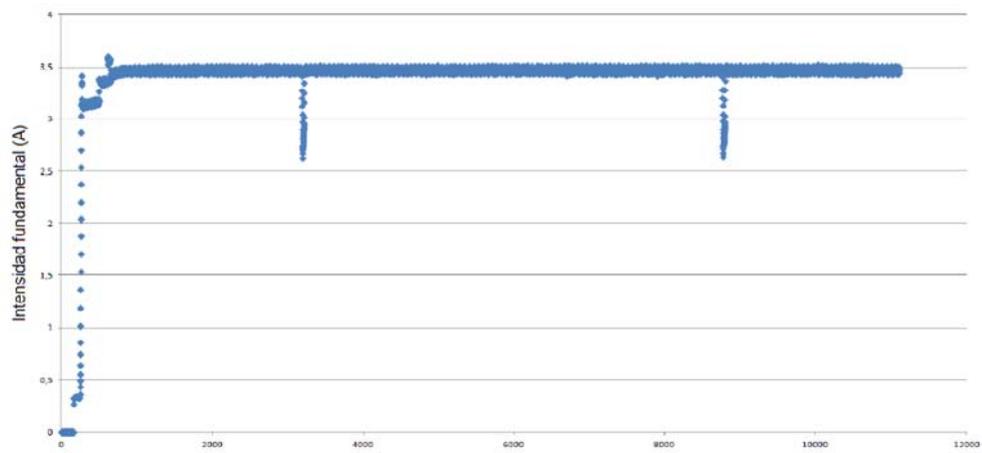


Figura 57 – Intensidad fundamental a lo largo de una parte de un test multiarmónico

Donde en ordenadas se encuentra el valor de la intensidad fundamental en amperios para una serie de líneas de medidas tomadas durante el test del dispositivo que encontramos en el eje de abscisas. Como se había especificado previamente, cada una de estas líneas corresponde a 0'2 segundos del test, pues se trata de medidas FFT 200ms.

Otra funcionalidad que ha sido introducida en la versión OPTIM V3 es que en el proceso de selección se tomarán también algunas medidas correspondientes a la emisión de una tensión puramente sinusoidal, las cuales eran simplemente ignoradas en la versión precedente, que permitirán considerar la respuesta en corriente del dispositivo ante estas señales de tensión sin armónicos. No obstante, puesto que se emiten muchas señales de tensión sinusoidales (una tras cada señal multiarmónica), éstas sólo se tomarán hasta llegar a tener unas pocas.

- **Guardar los datos válidos para el modelado:** Consiste en el almacenamiento en carpetas de los datos seleccionados listos para ser utilizados en el cálculo del modelo.

El programa OPTIM V2, tras el proceso de selección de cada archivo .mat creaba tantas carpetas como potencias habían sido especificadas al principio de dicho tratamiento y guardaba los datos seleccionados en la carpeta de la potencia correspondiente.

Sin embargo, debido al límite de talla de los archivos de medidas, datos de una misma potencia pueden estar guardados en más de un archivo. Esto propicia que al final del proceso completo de tratamiento de las medidas nos encontremos con varias carpetas de misma potencia, que deben ser unificadas en una a posteriori.

En la nueva versión, como se ha indicado en el punto precedente, todas las medidas son tratadas al mismo tiempo, como si se tratara de un archivo con todas las medidas. De este modo únicamente se crea una carpeta para cada potencia donde se agruparán las medidas de potencias similares. Esta carpeta tendrá como nombre el valor de la potencia media de sus medidas redondeado a la centena de vatios.

5.1.3.2. UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA OPTIM V3

Esta última versión de OPTIM toma automáticamente todos los datos FFT 200ms a partir de la carpeta donde se encuentran todas las medidas realizadas en el mismo dispositivo, y realiza todos los pasos que se acaban de describir de forma automática hasta el almacenamiento de los datos válidos para calcular el modelo en diferentes carpetas según la potencia.

Así pues, para realizar todo el proceso de tratamiento de medidas, sólo pide dos informaciones al usuario: La carpeta dentro de la cual se encuentran las medidas efectuadas sobre el aparato y la carpeta de destino de las medidas seleccionadas. Por lo que el programa es mucho más fácil de utilizar, más rápido, y también más fiable, pues las informaciones a proporcionar son mínimas y el usuario puede trabajar con él sin conocer el contenido de los archivos a tratar.

A continuación se muestra la interfaz de la versión OPTIM V3:

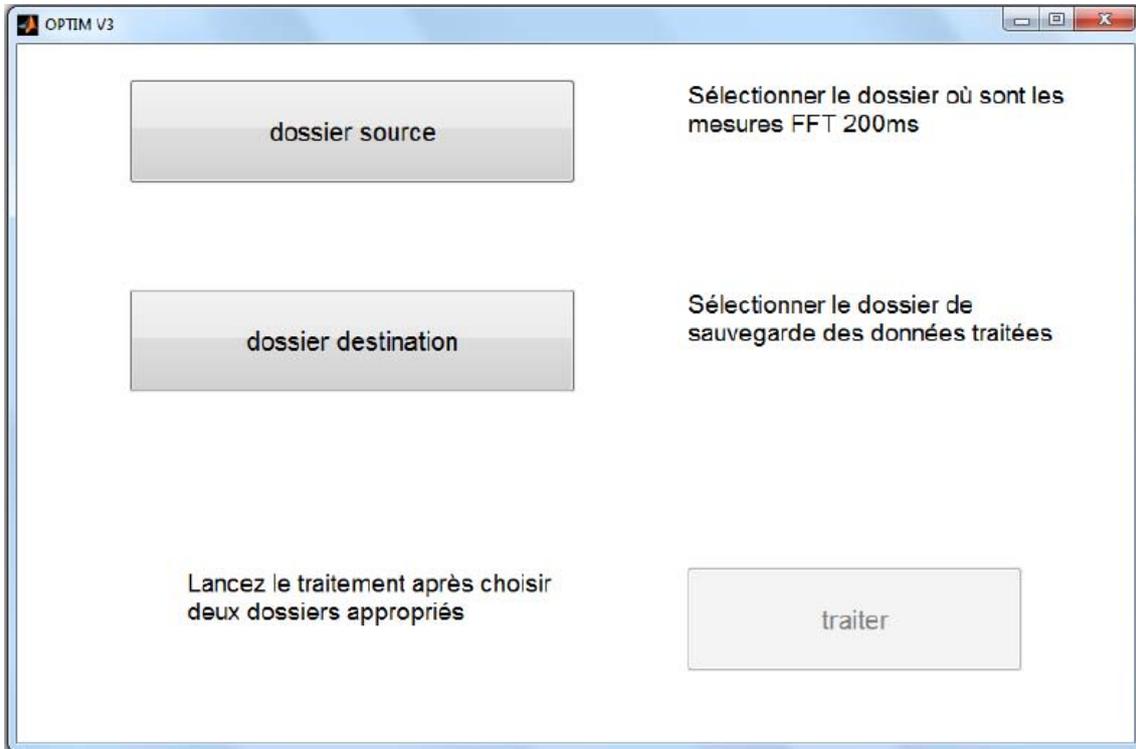


Figura 58 – Interfaz de la última versión OPTIM V3

Al proporcionar la carpeta con las medidas FFT 200ms a tratar y la carpeta donde se desean guardar las medidas seleccionadas pinchando sobre “dossier source” y “dossier destination” respectivamente, al lado de cada uno de estos botones el programa indicará si ha podido encontrar los archivos con las medidas FFT 200 ms sin tratar dentro de la carpeta “dossier source” y si la carpeta “dossier de destination” está vacío para poder guardar las medidas seleccionadas, para así asegurarse de que no se mezclan los datos con los de otro dispositivo.

Una vez ambas carpetas sean válidas, el programa indicará que el tratamiento puede ser realizado al mismo tiempo que se activará el botón “traiter” (tratar) que vemos en la figura 58.

Una vez pinchemos en el botón “traiter” y el proceso de tratamiento de las medidas comience se mostrará una barra de progresión que informará del estado de avance de dicho tratamiento, e inmediatamente después de que éste termine, la interfaz volverá a su estado inicial y podremos encontrar en la carpeta seleccionada como “dossier de destination” las medidas tratadas dispuestas como se muestra en la siguiente imagen:

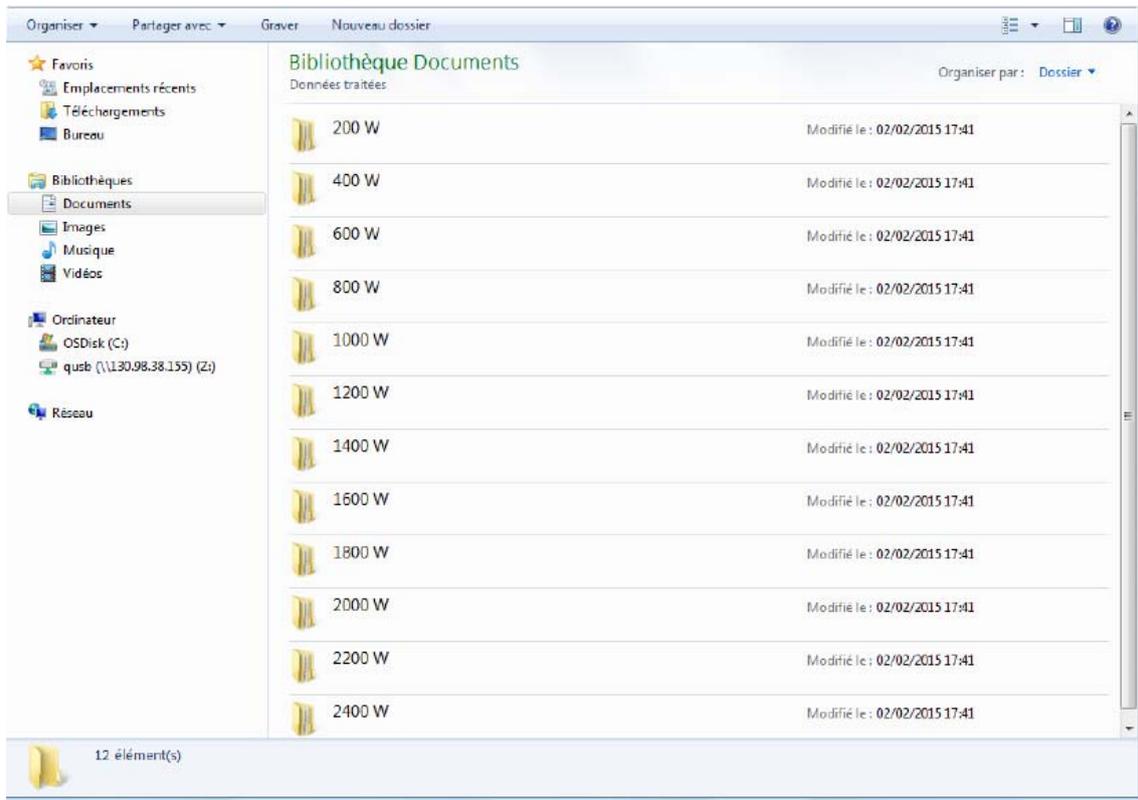


Figura 59 – Carpetas con los datos válidos para el cálculo del modelo. A juzgar por la diversidad de potencias, las medidas corresponden a un ondulador.

Los códigos escritos en MatLab que forman OPTIM V3 se muestran en el [anexo 3](#), incluyendo las funciones creadas para una mejor organización del código del programa.

Llegados a este punto ya disponemos de sólo los datos que podemos utilizar directamente para el cálculo del modelo.

Para entrenar la red neuronal a partir de estos datos mediante la “Neural Network Toolbox” de MatLab, también ha sido escrito un pequeño programa que recibe en entrada una carpeta como la que se muestra en la figura 59 y automáticamente utiliza la Toolbox de MatLab para crear los diferentes modelos por red neuronal artificial. Ya sea para realizar el proceso de determinación del número óptimo de neuronas en la capa oculta, o también para crear el modelo definitivo con el número de neuronas en la capa oculta que dé mejores resultados.

5.2. OBTENCIÓN DE LAS ECUACIONES UTILIZADAS POR LA RED NEURONAL ARTIFICIAL

Tras la creación de la red neuronal artificial mediante la Toolbox “Neural Network” de MatLab, esta red se encuentra en forma de una variable de MatLab de formato “.net” que sólo se puede utilizar en MatLab.

No obstante los modelos están destinados a ser utilizados en un programa de simulación de redes, por lo que deben poder ser exportados fuera de MatLab. Así pues hemos decidido indagar e intentar descubrir cuáles son las operaciones que realiza la variable “.net” en MatLab para obtener las salidas de la red neuronal a partir de las entradas.

Para ello hemos empezado suponiendo que la estructura de la red neuronal representada por la variable “.net” era tal y como la que habíamos visto en la figura 40, puesto que otras fuentes de información coincidían en este aspecto. Además MatLab posee las funciones específicas para obtener los valores de todos los parámetros que intervienen en esta estructura.

No obstante, advertimos que para unas entradas dadas, las salidas proporcionadas por la variable “.net” no eran iguales a las calculadas teóricamente siguiendo la estructura de la figura 40 y utilizando los parámetros obtenidos con las funciones que propone MatLab. Lo que ha motivado que realicemos un análisis más profundo de esta variable para descubrir los cálculos que realmente tienen lugar en esta red neuronal.

Para entender su funcionamiento, en primer lugar hemos creado una red neuronal (variable .net en MatLab) simplificada con una entrada, una neurona en cada una de las dos capas, y por lo tanto también una salida. Tras realizar distintas pruebas variando los valores de los diferentes parámetros que entran en juego mediante las funciones de MatLab que lo permiten hemos analizado cómo las salidas de la red neuronal cambiaban, y hemos concluido que existían otros parámetros que no conocíamos. Concretamente éstos eran dos: un valor que era restado a cada entrada antes de realizar ninguna otra operación, y otro valor que multiplicaba inmediatamente la diferencia resultante anterior. También hemos podido deducir que la función característica de las neuronas de la capa de salida era lineal como suponíamos pero con una pendiente y una ordenada en el origen que podían tomar distintos valores.

Seguidamente hemos analizado una red neuronal con dos entradas, dos neuronas en cada capa y dos salidas, que nos han permitido observar cómo estas características influían en el funcionamiento.

Finalmente hemos podido generalizar la estructura que siguen las operaciones para una red neuronal cualquiera (independientemente del número de entradas, de salidas y de neuronas en la capa oculta), que puede ser descrita del siguiente modo:

- Antes que nada, a cada entrada se le resta un valor (diferente para cada entrada) que llamaremos sustraendo.
- El resultado de la operación anterior es multiplicado por un factor, también diferente para cada entrada.
- Los valores resultados son multiplicados por las constantes correspondientes de cada una de las neuronas de la capa oculta.
- A cada resultado se suma la entrada constante de la neurona correspondiente de la capa oculta.
- Todos los valores obtenidos son pasados ahora por una función sigmoide.
- El conjunto de imágenes obtenidas es multiplicado, como antes, por las constantes correspondientes de cada una de las neuronas de la capa de salida esta vez.
- Al igual que antes, se suman a los resultados las entradas constantes de las neuronas de la capa de salida.
- Los resultados son esta vez pasados por una función lineal con una pendiente y ordenada en el origen diferente para cada neurona.

Todas estas etapas pueden representarse mediante la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{pmatrix} I_{h1} \\ \vdots \\ I_{hk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} m_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_{qq} \end{pmatrix} \times \left[\begin{pmatrix} b_{21} \\ \vdots \\ b_{2q} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} lw_{11} & \dots & lw_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ lw_{q1} & \dots & lw_{qn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} T/S_1 \\ \vdots \\ T/S_n \end{pmatrix} \right] \quad (27)$$

Donde $\begin{pmatrix} T/S_1 \\ \vdots \\ T/S_n \end{pmatrix}$ corresponde a :

$$\text{Tangente/Sigmoïde} \left(\begin{pmatrix} b_{11} \\ \vdots \\ b_{1n} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} iw_{11} & \dots & iw_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ iw_{n1} & \dots & iw_{nm} \end{pmatrix} \times \left[\begin{pmatrix} f_{11} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & f_{mm} \end{pmatrix} \times \left[\begin{pmatrix} P \\ V_{h1} \\ \vdots \\ V_{hk} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{pmatrix} \right] \right] \right) \quad (28)$$

Una ecuación en la que distinguiremos en primer lugar:

- El vector $\begin{pmatrix} P \\ V_{h1} \\ \vdots \\ V_{hk} \end{pmatrix}$, que contiene los datos de entrada, es decir, la potencia de funcionamiento (generalmente en vatios) y las componentes reales e imaginarias de los rangos armónicos impares de tensión (en voltios) del 1 al 25.
- El vector $\begin{pmatrix} I_{h1} \\ \vdots \\ I_{hk} \end{pmatrix}$, donde se disponen los datos de salida, que son las componentes reales e imaginarias de los rangos armónicos impares de corriente (en amperios) del 1 al 25.

Y a continuación las matrices que intervienen en la ecuación matricial para obtener las salidas a partir de las entradas. Cabe decir que los elementos de todas estas matrices son definidos en el proceso de aprendizaje de la red neuronal y las dimensiones de dichas matrices dependerán

del número de entradas (“m”), de salidas (“q”), y de neuronas en la capa oculta (“n”). Así pues estas matrices son:

- El vector de sustraendos $\begin{pmatrix} S_1 \\ \vdots \\ S_m \end{pmatrix}$ de longitud “m”.
- La matriz de factores $\begin{pmatrix} f_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & f_{mm} \end{pmatrix}$ diagonal, de dimensión “m x m”.
- La matriz de las constantes multiplicadas a las entradas de cada neurona de la capa oculta $\begin{pmatrix} iw_{11} & \cdots & iw_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ iw_{n1} & \cdots & iw_{nm} \end{pmatrix}$ de dimensión “n x m”.
- El vector de entradas constantes de las neuronas de la capa oculta $\begin{pmatrix} b1_1 \\ \vdots \\ b1_n \end{pmatrix}$ de longitud “n”.
- La matriz de las constantes multiplicadas a las entradas de cada neurona de la capa de salida $\begin{pmatrix} lw_{11} & \cdots & lw_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ lw_{q1} & \cdots & lw_{qn} \end{pmatrix}$ de dimensión “q x n”.
- El vector de las entradas constantes de las neuronas de la capa de salida $\begin{pmatrix} b2_1 \\ \vdots \\ b2_q \end{pmatrix}$ de longitud “q”.
- La matriz de las pendientes de la función lineal de cada neurona de la capa de salida $\begin{pmatrix} m_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & m_{qq} \end{pmatrix}$ también diagonal y de talla “q x q”.
- El vector de las ordenadas en el origen de la función lineal de cada neurona de la capa de salida $\begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_q \end{pmatrix}$ de longitud “q”.

De estas matrices, las de las constantes que intervienen en las entradas de las neuronas (de elementos “iw”, “lw”, “b1” y “b2”) pueden ser obtenidas directamente mediante las funciones de MatLab, al contrario que las demás matrices (de elementos “s”, “f”, “m” y “d”).

Puesto que el análisis del funcionamiento de esta red neuronal nos ha llevado mucho tiempo y dado que independientemente de las entradas, salidas y número de neuronas en la capa oculta, la red neuronal de MatLab seguirá los cálculos definidos por la ecuación matricial descrita, se ha decidido automatizar la obtención de las matrices que componen dicha ecuación.

Así pues se ha creado una función (código MatLab de la función en [anexo 4](#)) que toma como entrada la variable “.net” correspondiente a la red de neuronas previamente entrenada y, tras realizar los cálculos necesarios, da como salida una variable de tipo “structure” en la que se encuentran todas las matrices que forman la ecuación matricial que representa el cálculo realizado por el modelo entre sus entradas y salidas.

Finalmente conocemos la ecuación matricial que modeliza las emisiones armónicas en corriente de nuestro dispositivo en función de la potencia y del espectro de la señal de tensión a bornes. Esta ecuación puede ser implementada directamente en el programa de simulación de redes, representando el comportamiento del dispositivo que modeliza. Esto, como hemos dicho, permitirá simular la influencia de distintos dispositivos conjuntamente y bajo diferentes condiciones en las perturbaciones armónicas de la red de baja tensión. Lo que permitirá tener una idea de la influencia de estos dispositivos cuando realmente sean conectados a la red de distribución eléctrica.

6. VIABILIDAD DEL PROYECTO

El objetivo del gran proyecto del que éste forma parte es prever la influencia que puede tener el gran aumento de la presencia en la red eléctrica de dispositivos emisores de perturbaciones armónicas como inversores para paneles fotovoltaicos o vehículos eléctricos cuando se carga su batería, pero también de otros muchos que se modelizarán más adelante como pueden ser los alumbrados LED por ejemplo.

Esta posibilidad de prever las perturbaciones armónicas de distintos dispositivos simultáneamente y de poder observar sus efectos y los fenómenos que pueden tener lugar bajo ciertas circunstancias es de especial interés para las empresas distribuidoras eléctricas. Estas empresas, como puede ser ERDF (Electricidad en la Red de Distribución de Francia), pueden basarse en los resultados de las simulaciones para adoptar ciertas medidas y crear un plan de desarrollo de redes con el que evitar las disfuncionalidades que puedan provocar las distorsiones armónicas en su material, así como para garantizar la buena calidad de la electricidad suministrada a sus clientes.

De este modo, el valor exacto del proyecto es todavía incierto y dependerá de diversas circunstancias como: la precisión de las simulaciones, la tendencia en la presencia de perturbadores armónicos así como el grado de distorsión de las señales que emitan, la magnitud de los perjuicios causados por estas perturbaciones armónicas, y evidentemente también la competencia que exista en cuanto a la oferta de estudios de este tipo, que dependerá en buena parte del tiempo que se emplee en terminar el proyecto.

Existen diferentes inversiones que deben ser realizadas antes de terminar este gran proyecto, como las horas de los trabajadores requeridos así como la compra y alquiler en algunos casos del material utilizado para realizar investigaciones, entre otros. Para la parte que he podido realizar de este proyecto se han utilizado un determinado tipo de medidas realizadas sobre diversos aparatos en el laboratorio, utilizando material como amplificadores o un generador de señales y un sistema de adquisición programados, ciertos programas informáticos como MatLab, que suponen una inversión de cierta magnitud pero que es aprovechada por diversos trabajadores y para distintos proyectos.

7. PRESUPUESTO

Nº DESCRIPCIÓN _____ EUROS.

II.1.- INVERSIÓN EN MEDIOS.

1.- Amortización Equipo Informático. 1.250 Euros.
2.- Amortización de Equipo del laboratorio. 2.150 Euros.

Subtotal 3.400 Euros.

II.2.- INVERSIONES EN PERSONAL.

1.- Estudiante de Ingeniería Eléctrica 4º curso, 6 meses. 9.000 Euros.
2.- Ingeniero supervisor de la empresa EDF. 1.800 Euros.

Subtotal 10.800 Euros.

II.3.- RESUMEN DE LAS PARTIDAS Y TOTAL.

1.- Medios 3.400 Euros.
2.- Inversiones en personal. 10.800 Euros.

TOTAL 14.200 Euros.

El total del presupuesto es catorce mil doscientos Euros.

El Peticionario:

El Ingeniero Eléctrico

De Grado:

EDF.

Benjamín Carratalá Font.

8. CONCLUSIÓN

El objetivo de modelizar de forma precisa el espectro de la corriente absorbida por un dispositivo en función del espectro de la tensión a sus bornes y de la potencia de funcionamiento para después utilizar el modelo obtenido en un programa de simulación de redes ha sido alcanzado. Además, puesto que el proceso completo de modelización de un dispositivo era muy largo y algo tedioso, éste ha sido automatizado desde que se tienen las medidas tomadas en el laboratorio hasta la obtención del modelo final listo para ser implementado en el programa de simulación de redes. Esta aceleración del proceso de modelado supondrá un ahorro de tiempo para próximas modelizaciones.

Trabajar en este proyecto me ha permitido ampliar mis conocimientos en el campo de las perturbaciones armónicas en las redes eléctricas. Un problema que como hemos visto sigue creciendo y que tiene múltiples efectos negativos como las pérdidas de energía generalmente en calor, e incluso el disfuncionamiento de algunos dispositivos. Así pues, conocer estas perturbaciones así como sus causas y consecuencias permite ser capaz de trabajar sobre ellas de forma más eficaz.

También he podido trabajar con las redes neuronales artificiales, con las que hemos modelado las emisiones armónicas de varios dispositivos y que son utilizadas de forma similar en muchas aplicaciones relacionadas con la automática principalmente.

Además he podido aplicar con un fin práctico mis conocimientos de informática y de electrotecnia principalmente, lo cual ha sido una experiencia muy satisfactoria que me ha permitido ver de mejor manera el mundo en la empresa.

Por último, el hecho de haber realizado este proyecto en Francia, ha supuesto mi total inmersión en un país, con una cultura y una lengua diferentes, lo que considero una experiencia personal muy enriquecedora.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.abb.com/cawp/seitp202/85b14cadbc1d544bc1257b5b003de5af.aspx>
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_de_Fourier
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_arm%C3%B3nico
- [4] [https://simple.wikipedia.org/wiki/Harmonics_\(music\)](https://simple.wikipedia.org/wiki/Harmonics_(music))
- [5] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_\(%C3%A9lectricit%C3%A9\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_(%C3%A9lectricit%C3%A9))
- [6] Schneider Electric – Cahier technique n° 199 : La qualité de l'énergie électrique
- [7] <http://slideplayer.es/slide/1075321/>
- [8] Electrical machines – S K Bhattacharya Technical teacher's training institute – Chandigarh (books.google.es)
- [9] <https://prezi.com/xrite0mrfmz8/el-horno-de-arco-electrico/>
- [10] http://eia.udg.es/~secse/curso_calidad/curso5_fluctuaciones_flicker.pdf
- [11] <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/ihflicker.pdf>
- [12] Les Cahiers de l'ingénierie – Qualité de l'alimentation électrique. 1^{ère} partie : "Origine, propagation et effets des harmoniques" [EDF Industrie]
- [13] Origine des harmoniques - Sitelec.org
- [14] <http://www.etasc.fr/index.php?page/cours/coupleMASPrincipe/machineSynchrone>
- [15] ABB Technical Guide n° 6 - Guide to harmonics with AC drives
- [16] Armónicos: Efectos, diagnóstico y soluciones – JCEE'09 – Francesc Fornieles
- [17] <http://www.edf.com/le-groupe-edf-3.html>
- [18] <http://deeplearning.cs.cmu.edu/pdfs/Cybenko.pdf>
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Levenberg%E2%80%93Marquardt_algorithm
- [20] <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [21] <http://es.mathworks.com/help/nnet/index.html>
- [22] <https://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>
- [23] https://es.wikipedia.org/wiki/Adquisici%C3%B3n_de_datos
- [24] https://es.wikipedia.org/wiki/Fuente_de_alimentaci%C3%B3n

[25] https://es.wikipedia.org/wiki/Transformada_r%C3%A1pida_de_Fourier

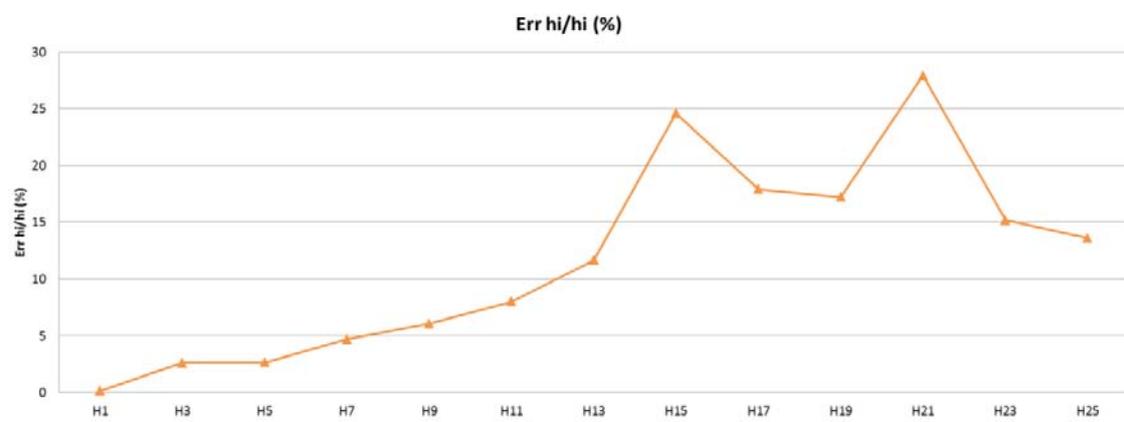
[26] https://es.wikipedia.org/wiki/Muestreo_digital

10. ANEXOS

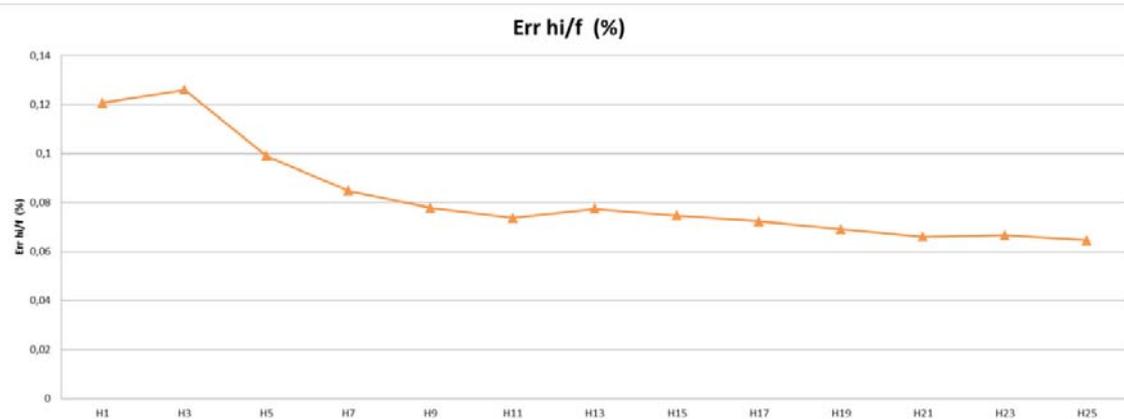
10.1. ANEXO 1: Curvas de error de los modelados de otros dispositivos

Vehículo eléctrico (2):

$$E_{\frac{h}{h}}(\%):$$

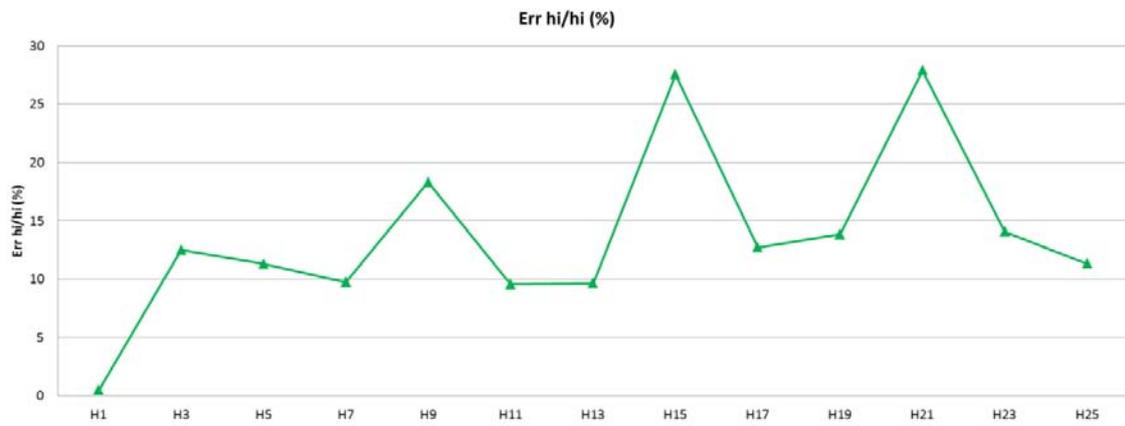


$$E_{\frac{h}{f}}(\%):$$

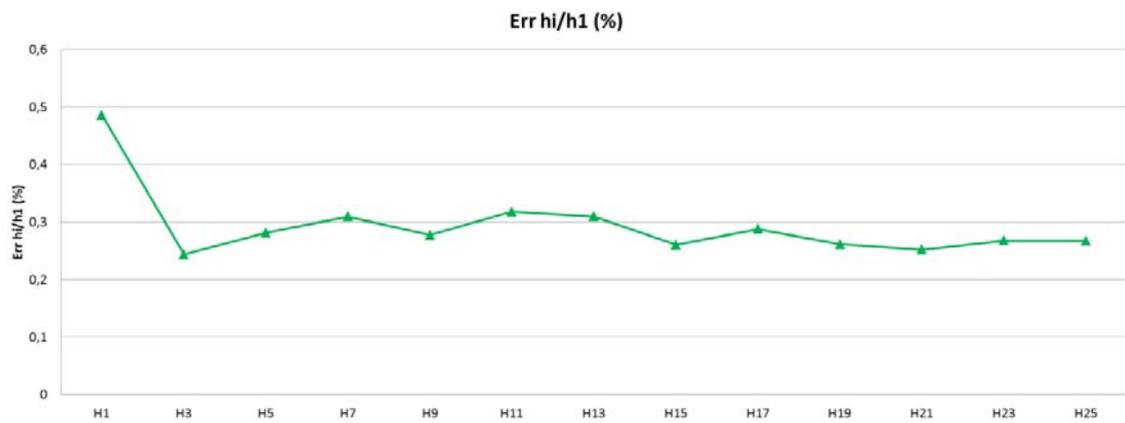


Inversor para paneles fotovoltaicos (2):

$$E_{\frac{h}{h}}(\%):$$



$$E_{\frac{h}{f}}(\%):$$



10.2. ANEXO 2: Plan de test multiarmónico

La siguiente tabla contiene la descripción del plan de test seguido por las señales de tensión a las que se somete el dispositivo cuya respuesta en corriente se quiere modelizar. Todos los rangos armónicos impares están presentes con unas amplitudes aleatorias pero siempre dentro del margen especificado:

Rango armónico	Intervalo de amplitudes (en % de U1)	Intervalo de fases (en °)
3	De 1 a 3% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)
5	De 2 a 4% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)
7	De 0,5 a 2% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)
9	De 0,5 a 1% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)
11	De 0 a 0,5% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)
13	De 0 a 0,5% (aleatoriamente)	De 0° a 360° (aleatoriamente)

U1 = fundamental de la tensión

10.3. ANEXO 3: Código MatLab del programa OPTIM V3

10.3.1. INTERFAZ PRINCIPAL Y FUNCIONES DEL MENÚ PRINCIPAL

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% OPTIM_launcher.m

% IHM du logiciel de traitement des mesures FFT 200ms pour obtenir
les données utiles pour une modélisation ultérieure
% Afin de au'on comprend l'utilisation des fonctions qui sont créées
pour
% être appelées par ce script (sauvegarde_donnees , conv_txt_mat,
% valider_doss_FFT200 et trie_modelisation) des commentaires ont été
écrits
% sur elles.

function OPTIM_launcher()

clear
clc

%% création de la fenêtre principale
main_figure = figure;
set(main_figure,'units','normalized','position',[.2 .2 .6 .6],...
    'name','OPTIM V4','color',[1 1 1],'menubar','none',...
    'numbertitle','off');

%% création des textes
text_doss_sr =
uicontrol(main_figure,'style','text','units','normalized',...
    'string','Sélectionner le dossier où sont les mesures FFT
200ms','horizontalalignment','left',...
    'position',[.6 .65 .35 .3],'fontsize',14,'backgroundcolor',[1 1
1]);

text_doss_sv =
uicontrol(main_figure,'style','text','units','normalized',...
    'string','Sélectionner le dossier de sauvegarde des données
traitées','horizontalalignment','left',...
    'position',[.6 .3 .35 .35],'fontsize',14,'backgroundcolor',[1 1
1]);

text_traitement =
uicontrol(main_figure,'style','text','units','normalized',...
    'string','Lancez le traitement après choisir deux dossiers
appropriés','horizontalalignment','left',...
    'position',[.15 .1 .35 .15],'fontsize',14,'backgroundcolor',[1 1
1]);

%% création des boutons
traiter =
uicontrol(main_figure,'units','normalized','string','traiter',...
    'position',[.6 .1 .3 .15],'fontsize',15,'Enable','off');
```

```

doss_source =
uicontrol(main_figure, 'units', 'normalized', 'string', 'dossier
source', ...
    'position', [.1 .8 .4 .15], 'fontsize', 15);

doss_sauve =
uicontrol(main_figure, 'units', 'normalized', 'string', 'dossier
destination', ...
    'position', [.1 .5 .4 .15], 'fontsize', 15);

% Relier le bouton avec la fonction qu'il appellera
set(traiter, 'callback', {@traite, main_figure, traiter, doss_source, doss_s
auve});
set(doss_source, 'callback', {@doss_sr, text_doss_sr, text_traitement, main
_figure, traiter, doss_source, doss_sauve});
set(doss_sauve, 'callback', {@doss_sv, text_doss_sv, text_traitement, main_
figure, traiter, doss_sauve, doss_source});

% Initialisation des variables qui contrôleront l'activation du
bouton traiter (Par défaut 0 donc éteint)

setappdata(main_figure, 'accept_source', 0);
setappdata(main_figure, 'accept_sauve', 0);

end

function
doss_sr(h, ev, text_doss_sr, text_traitement, main_figure, traiter, doss_sou
rce, doss_sauve)
% On éteint tous les boutons car risque d'appeler une fonction
plusieurs
% fois avant qu'elle termine
set(traiter, 'Enable', 'off');
set(doss_sauve, 'Enable', 'off');
set(doss_source, 'Enable', 'off');

adresse_source = uigetdir(pwd, 'Sélection du dossier contenant toutes
les mesures'); % IHM Choisir dossier, pwd est le current directory

if adresse_source ~= 0 % Si on a réalisé une sélection (ON n'a pas
fermé la fenêtre)

    % voir si on trouve des fichiers FFT 200ms
    addpath(genpath(adresse_source)) % On sélectionne prend en path
tout ce qu'il y a dans le dossier
    dossiers_mesures = which('conf.txt', '-all'); % On trouve tous les
dossiers conf dans path
    rmpath(genpath(adresse_source)) % On désélectionne tout pour que
si après on traite d'autres données on ne les inclue pas

    % Pour chaque adresse conf.txt trouvé on vérifiera le dossier FFT
200ms
    % (S'il y a des couples de fichiers V et I .txt)
    adresses_correct = {};
    for i = 1:size(dossiers_mesures,1)

        adresse_conf = dossiers_mesures{i};
        adresse_dossier = adresse_conf(1:(length(adresse_conf) - 8));
% conf.txt sont 8 caractères

```

```

    adresse_FFT200 = [adresse_dossier 'FFT 200ms']; % Ce nom exact

    correct = valider_doss_FFT200(adresse_FFT200);

    if correct == 1 % Si valable on le garde

        adresses_correct = vertcat(adresses_correct,
adresse_FFT200);

    end

end

if size(adresses_correct,1) > 0 % Il y a quelque dossier valable

    accept_source = 1; % On retient que le dossier source est bon

    if size(dossiers_mesures,1) ~= size(adresses_correct,1) % Pas
tous valables (Peut-être quelques fichiers sont encore dans un
subdossier)

        uiwait(msgbox({'Dans certains des dossiers FFT 200ms
présents dans le dossier fourni il n''y a pas de couples de fichiers V
et I (.txt)'; ...
            'Si vous lancez le traitement avec ce dossier, vous ne
traitez que les données des dossiers valides'}));

        set(text_doss_sr,'string', {'Certains des dossiers
FFT200ms n''ont pas des fichiers valides'; 'Chemin du dossier: ' ;...
            adresse_source},'ForegroundColor', [1 0.7333 0.1373]);
% ORANGE est le couleur défini par le dernier vecteur 1x3

    else % Tous valables

        set(text_doss_sr,'string', {'Dossier accepté'; 'Chemin du
dossier: ' ; adresse_source},'ForegroundColor',[0 0.6784 0.1333]); %
VERT

    end

    adresse_source = adresses_correct; % On garde tous les
dossiers valables

    else % Aucun valable

        accept_source = 0; % On retient que le dossier source n'est
pas valable

        if size(dossiers_mesures,1) == 0 % Pas trouvés des fichiers
conf.txt dans le dossier

            uiwait(msgbox('Il n''y a pas des mesures FFT 200ms à
partir du dossier fourni.'));
            set(text_doss_sr,'string', {'Dossier non accepté, il ne
contient pas des mesures FFT 200ms à l''interieur' ; 'Chemin du
dossier: ' ;...
                adresse_source},'ForegroundColor', [1 0.0392 0.0392]);
% ROUGE

```

```

        else % Il y avait des dossiers FFT200ms mais pas de fichiers
trouvés à l'intérieur (Peut-être les fichiers sont encore dans un
subdossier)

            uiwait(msgbox('Les dossiers FFT 200ms à l''intérieur du
dossier fourni ne contiennent pas directement des couples de fichiers
V et I (.txt)'));
            set(text_doss_sr,'string', {'Dossier non accepté, Dans les
dossiers FFT 200ms il n''y a pas de couples de fichiers V et I (.txt)'
;...
            'Chemin du dossier: ' ;
adresse_source},'ForegroundColor', [1 0.7333 0.1373]); %ORANGE

        end

    end

        setappdata(main_figure, 'adresse_source', adresse_source); % On
garde les variables dans la figure pour pouvoir les utiliser dans les
autres fonctions
        setappdata(main_figure, 'accept_source', accept_source);

end
% A partir d'ici jusqu'à la fin de la fonction se fait même si l'on
ferme
% la fenêtre de sélection de dossier

% On prend les variables pour effectuer l'activation ou pas de traiter
accept_sauve = getappdata(main_figure, 'accept_sauve');
accept_source = getappdata(main_figure, 'accept_source');

% On fait l'évaluation de ces variables maintenant (Et pas juste avant
dans le "if" de la ligne 57) pour savoir si l'on doit
% re allumer ou pas le bouton traiter qu'on a éteint au début de la
% fonction
if accept_source && accept_sauve % Tout est bon

    % Allumer le bouton traitement et afficher que tout est prêt
    set(text_traitement , 'string' , 'Le traitement peut être
réalisé','ForegroundColor',[0 0.6784 0.1333]); % VERT
    set(traiter, 'Enable', 'on');

else % Tout n'est pas bon

    % Eteindre le bouton traitement et afficher que le chemin
% accept_source n'est pas validé
    set(traiter, 'Enable', 'off');
    set(text_traitement, 'string', 'Lancez le traitement après choisir
deux dossiers appropriés','ForegroundColor',[0 0 0]); % Noir

end

% On re allume les boutons de sélection (Allumés par défaut)
set(doss_sauve, 'Enable', 'on');
set(doss_source, 'Enable', 'on');

end

```

```

function
doss_sv(h,ev,text_doss_sv,text_traitement,main_figure,traiter,doss_sau
ve,doss_source)
set(traiter, 'Enable', 'off');
set(doss_sauve, 'Enable', 'off');
set(doss_source, 'Enable', 'off');

adresse_sauvegarde = uigetdir(pwd, 'Sélection du dossier de sauvegarde
(De préférence un dossier vide)');

if adresse_sauvegarde ~= 0

    cd(adresse_sauvegarde) % On s'y met dans l'adresse
    list = ls; % Ce fonction trouve tout ce qu'il y a dans le current
directory

    if size(list,1) > 2 || size(list,2) > 2 % Il y a toujours deux
lignes sans infos même si vide, mais au cas où on met aussi la
condition de largeur

        qqch = 'oui'; % Il y a qqchose

    else

        qqch = 'non';

    end

    switch qqch

        case 'oui'

            reponse = questdlg({'Ce dossier contient déjà d'autres
fichiers ou dossiers, 2 options : ' ; '"Retourner" pour choisir un
autre emplacement' ; ...
                '"Nouveau dossier" pour créer un nouveau dossier placé
dans le dossier que vous avez sélectionné'}, ...
                'OPTIM', 'Retourner', 'Nouveau dossier', 'Nouveau
dossier');
            % On donne 2 options : -Créer nouveau dossier- OU -
Retourner à la sélection-

            switch reponse

                case 'Nouveau dossier'

                    sortir = 0;
                    while sortir == 0; % Ce boucle n'est fait que pour
relancer la demande d'un nom de dossier quand il n'est pas valable

                        nom = inputdlg('Rentrez le nom du nouveau
dossier. Non accepté : \ / : * ? " < > |' , 'OPTIM'); % donner le NOM
du nouveau dossier à créer

                        if sum(size(nom)) == 0 % la variable est
complettement vide parce qu'on a fermé la fenêtre: on retournera au
menu principal

```

```

                                uiwait(msgbox('Opération annulée, veuillez
refaire la sélection'));
                                sortir = 1;
                                accept_sauve = 0; % Dossier non validé
                                set(text_doss_sv, 'string' , {'Dossier non
accepté, il n''était pas vide' ; 'Chemin du dossier: ' ;
adresse_sauvegarde},...
                                'ForegroundColor',[1 0.7333 0.1373]);

                                elseif sum(size(nom{1})) == 0 ||
sum(size(strfind(regexprep(nom{1}, '[\/:?"<>|]', '*'), '*'))) ~= 0 ||
sum(isspace(nom{1})) == length(nom{1})
                                % On est ici soit parce qu'on a appuyé sur
OK
                                % sans rien rentrer, soit parce que il y a
des
                                % symbols pas acceptés pour créer un
dossier.
                                % C'est dans ce cas qu'on continue au
boucle

                                uiwait(errordlg('Ecrivez un nom valable
s''il vous plaît'));
                                % on dit que c'est pas un nom valable, et
qu'on y retourne

                                else % Nom valable

                                % Créer le nouveau dossier avec NOM et
SAUVEGARDER LE CHEMIN
                                mkdir(nom{1});
                                adresse_sauvegarde = [adresse_sauvegarde
'\ ' nom{1}]; % On retient l'adressé de sauvegarde
                                sortir = 1;
                                accept_sauve = 1;
                                % Dire que c'est bon
                                set(text_doss_sv, 'string' , {'Dossier
accepté'; 'Chemin du dossier: ' ; adresse_sauvegarde},...
                                'ForegroundColor',[0 0.6784 0.1333]);
                                % VERT

                                end

                                end

                                otherwise % Soit la réponse était retourner soit la
fenêtre a été fermée

                                % Operation annulée
                                set(text_doss_sv, 'string' , {'Dossier non
accepté, il n''était pas vide' ; 'Chemin du dossier: ' ;...
                                adresse_sauvegarde},'ForegroundColor',[1
0.7333 0.1373]); %ORANGE

                                accept_sauve = 0;

                                end

```

```

        case 'non' % Dossier vide

            % Dire que c'est bon et rappeler le dossier
            set(text_doss_sv, 'string', {'Dossier accepté'; 'Chemin
du dossier: ' ; adresse_sauvegarde}, 'ForegroundColor', [0 0.6784
0.1333]); % VERT
            accept_sauve = 1;

        end

        setappdata(main_figure, 'adresse_sauvegarde', adresse_sauvegarde);
        setappdata(main_figure, 'accept_sauve', accept_sauve);

    end

    % Même démarche que dans la fonction de dossier source
    accept_sauve = getappdata(main_figure, 'accept_sauve');
    accept_source = getappdata(main_figure, 'accept_source');

    if accept_source && accept_sauve

        % Allumer le bouton traitement et afficher que tout est prêt
        set(text_traitement, 'string', 'Le traitement peut être
réalisé', 'ForegroundColor', [0 0.6784 0.1333]); % VERT
        set(traiter, 'Enable', 'on');

    else

        % Eteindre le bouton traitement et afficher que le chemin
        % accept_source n'est pas validé
        set(traiter, 'Enable', 'off');
        set(text_traitement, 'string', 'Lancez le traitement après choisir
deux dossiers appropriés', 'ForegroundColor', [0 0 0]); % Noir

    end

    set(doss_sauve, 'Enable', 'on');
    set(doss_source, 'Enable', 'on');

end

function traite(h, ev, main_figure, traiter, doss_sauve, doss_source) %
Activée que quand le bouton est appuyé
set(traiter, 'Enable', 'off'); % Encore une fois on ne permet pas
d'appeller d'autres fonctions pendant que celle-ci tourne
set(doss_sauve, 'Enable', 'off');
set(doss_source, 'Enable', 'off');

progress_bar = waitbar(0, {'Etat du traitement : ' ; 'Conversion format
.txt -> .mat'}); % On crée une barre pour informer de l'état du
traitement

adresse_source = getappdata(main_figure, 'adresse_source');

matrice_brute = [];
for i = 1:size(adresse_source,1) % Ici on n'a que les adresses
validées par la fonction valider_doss_FFT200

```

```

    matrice_mat = conv_txt_mat(adresse_source{i}); % On rentre dans
chaque dossier, on convert les données au format mat et on concatene
tout
    matrice_brute = vertcat(matrice_brute, matrice_mat);

    progress_bar = waitbar((i *
(0.7/size(adresse_source,1))),progress_bar); % Avancement de la barre

end

%% Traitement des mesures

matrices_traitees = trie_modelisation(matrice_brute,progress_bar); %
Tri des données brutes pour avoir en sortie les données de
modélisation de chaque puissance

%% Sauvegarde des données dans l'adresse de sauvegarde

adresse_sauvegarde = getappdata(main_figure, 'adresse_sauvegarde');

for i = 1:size(matrices_traitees,1) % On crée un dossier pour chaque
puissance et on y sauvegarde les données de modélisation

    matrice_puissance = matrices_traitees{i};
sauvegarde_donnees(matrice_puissance, adresse_sauvegarde);

end

close(progress_bar)

uiwait(msgbox('Les données ont bien été traitées'));

close all % On ferme l'IHM pour la reinitialiser

OPTIM_launcher % On appelle l'IHM

end

```

10.3.2. FUNCIÓN: *valider_doss_FFT200*

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% valider_doss_FFT200.m

% Esta función busca en la carpeta proporcionada los archivos que
contienen
% la "v" y estén en formato .txt. A partir de aquí suponemos que éste
es el
% archivo de tensión y que el correspondiente de intensidad se
denominará
% igual, pero cambiando la "v" por "i" (El resto del nombre es la
fecha,
% que debe ser la misma para los dos).
% La carpeta será por lo tanto válida si para cada archivo de tensión
% encontrado se encuentra el de corriente de la misma fecha.
% A veces, en las carpetas de FFT 200ms hay dos intensidades, I1 y IN.
La
% que nos interesa es I1. Puesto que la tensión se llama realmente V1,
el
% archivo de corriente escogido será el correcto (I1).

function valable = valider_doss_FFT200(chemin_dossier)

cd(chemin_dossier)

fichiers_V = ls('*v*.txt');
valable = 1; % Par défaut valable

if size(fichiers_V,1) == 0 % Aucun fichier trouvé qui contienne une v
et soit format .txt

    valable = 0;

else

    for i = 1:size(fichiers_V,1) % Pour chaque fichier tension on
cherche le correspondant en courant

        tension = deblank(fichiers_V(i,:));
        courant = strrep(tension, 'V', 'I'); % strrep remplace les
strings fournis, il différencie entre majuscule et minuscule
        courant = strrep(courant, 'v', 'i'); % Comme ça on couvre la
possibilité de que v soit minuscule

        if size(ls(courant),1) ~= 1 % Recherche des fichiers courant
ayant le nom déduit

            valable = 0;

        end

    end

end

end

end
```

10.3.3. FUNCIÓN: *conv_txt_mat.m*

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% conv_txt_mat.m

% La entrada son las carpetas validadas por la función
% "valider_doss_FFT200" por lo que sabemos ya que habrá archivos de
tensión
% .txt y los correspondientes de corriente
% Para cada pareja de archivos U - I, éstas se convierten a formato
.mat,
% se mantienen sólo los rangos impares, convertimos los ángulos a
grados y
% en base seno, y juntamos horizontalmente los datos de tensión y
% corriente. Finalmente si había varias parejas de archivos U - I
estos se
% juntan verticalmente. De todos modos, en el código OPTIM_launcher
cuando
% se llama a esta función se juntan verticalmente todas las matrices
.mat.
% Estos datos son siempre sucios (sin haber sido seleccionados) puesto
que
% son una copia exacta de las medidas del archivo .txt FFT 200ms, a
% excepción de la no presencia de los rangos pares.

function donnees_mat = conv_txt_mat(chemin_donnees_txt)

cd(chemin_donnees_txt)

couples_fichiers = ls('*v*.txt'); % Ce sera le nombre de couples de
fichiers

donnees_mat = [];
for i = 1:size(couples_fichiers,1) %On réalise la conversion pour
chaque couple

    nom_U = deblank(couples_fichiers(i,:));
    nom_I = strrep(nom_U, 'V', 'I'); % strrep difference entre
majuscule et minuscule
    nom_I = strrep(nom_I, 'v', 'i'); % Comme ça on couvre la
possibilité de que v soit minuscule

    % Remplacement des "," par des "." (pour pouvoir utiliser dlmread)
    % Traitement de nom_U
    file    = memmapfile( nom_U, 'writable', true );
    comma   = uint8(',');
    point   = uint8('.');
    file.Data( transpose( file.Data==comma) ) = point;
    % Traitement de nom_I
    file    = memmapfile( nom_I, 'writable', true );
    comma   = uint8(',');
    point   = uint8('.');
    file.Data( transpose( file.Data==comma) ) = point;

% Lecture des fichiers
```

```

    U_nt=dlmread(nom_U, '\t', 2, 0); % On commence à la ligne 3 (on saute
l'entete)
    I_nt=dlmread(nom_I, '\t', 2, 0);

    U_Amp=U_nt(:, 2:2:50); % On ne garde que les rangs impaires
    U_Pha=U_nt(:, 53:2:101);
    I_Amp=I_nt(:, 2:2:50);
    I_Pha=I_nt(:, 53:2:101);

    % Remplacement des "." par des "," (on remet le fichier dans son
etat initial)
    % Traitement de nom_U
    file    = memmapfile( nom_U, 'writable', true );
    comma   = uint8('.');
    point   = uint8(',');
    file.Data( transpose( file.Data==comma) ) = point;
    % Traitement de nom_I
    file    = memmapfile( nom_I, 'writable', true );
    comma   = uint8('.');
    point   = uint8(',');
    file.Data( transpose( file.Data==comma) ) = point;

    % Changement des phases (base sinus)

    %Tf = Th - h*(T1+PI/2)+PI/2 où Tf est l'angle en base sinus, h le
numéro du
    %fondamentale, Th est l'angle en base cosinus et T1 l'angle de
référence,
    %Ici cette angle est l'angle de la tension fondamentale. Ne rien
changer.

    nb_colonne_demi=size(U_Pha,2); % Correspond au nombre de colonne
d'une matrice Amp ou Pha
    nb_ligne_demi=size(U_Pha,1); % Correspond au nombre de lignes
d'une matrice Amp ou Pha

    mat_tempo=zeros(nb_ligne_demi,nb_colonne_demi); % Cette matrice va
servir pour le changement de bases

    % Traitement I_Pha
    for i=1:nb_ligne_demi
        for j=1:nb_colonne_demi
            mat_tempo(i,j) = I_Pha(i,j) - (2*j-1)*(U_Pha(i,1)+pi/2) +
pi/2 ; % Changement base cos vers base sin (La référence est
U_Pha(i,1))
            mat_tempo(i,j) = mod(mat_tempo(i,j),2*pi)*180/pi; % On
passe l'angle en [0;2*pi], puis on converti en degré
        end
    end
    I_Pha=mat_tempo; % on remplace par les nouvelles valeurs

    % traitement U_Pha
    for i=1:nb_ligne_demi
        for j=1:nb_colonne_demi

```

```

        mat_tempo(i,j) = U_Pha(i,j) - (2*j-1)*(U_Pha(i,1)+pi/2) +
pi/2 ; % Changement base cos vers base sin (La référence est
U_Pha(i,1))
        mat_tempo(i,j) = mod(mat_tempo(i,j),2*pi)*180/pi; % On
passe l'angle en [0;2*pi], puis on converti en degré
    end
end
U_Pha=mat_tempo; % on remplace par les nouvelles valeurs

% Sauvegarde des fichiers
ensemble = horzcat(U_Amp, U_Pha, I_Amp, I_Pha); % Concaténation
horizontale

donnees_mat = vertcat(donnees_mat,ensemble); % On concatène
verticalement toutes les couples

end

end

```

10.3.4. FUNCIÓN: *trie_modelisation.m*

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% trie_modelisation.m

% Esta función toma la matricula de datos sucios (sin haber sido
% seleccionados) y proporciona en salida diferentes matrices (una para
cada
% potencia) con los datos válidos para la modelización).
% Cuando una señal multiarmónica es detectada, se guarda una línea de
las
% 10 en la que todo esté estable (sin transitorios) cogiendo una línea
del
% medio (la sexta por ejemplo) para no coger un "punto falso". Esta
línea
% se guardará con los de potencia similar.
% Finalmente se tiene una tabla (o matriz) para cada potencia con las
% líneas seleccionadas.
% También se cogen algunas líneas correspondientes a tensiones
sinusoidales
% ya que también serán utilizadas para el cálculo del modelo. En
función
% del número de potencias diferentes se cogerán más o menos líneas de
seno
% puro para cada potencia. (Es útil para coger más líneas para el V.E.
que
% únicamente trabaja a una potencia, que para el inversor)

% Esta función pide diferentes requisitos a validar para coger una
señal
% multiarmónica, el más important es que la suma de las amplitudes de
los
% rangos 3, 5, 7 y 9 en tensión sea superior a 8.5. Los demás se
comentarán
% a continuación en el código.

function trieess = trie_modelisation(matrice_brute,progress_bar)

puissances = []; % Ici on gardera les valeurs des puissances pour
lesquels on a déjà pris une ligne
nb_lignes_pures = []; % Ici on comptera les lignes sinus qu'on a pour
chaque puissance,
                % le premier élément correspond au nb de sinus
de la premier puissance du vecteur puissances ci-dessus
trieess = {}; % Cell array où on stockera la matrice de chaque
puissance constituée des lignes sélectionnées
avance_progress_bar = 1; % Cette valeur servira a faire avancer la
barre (ligne 138)

j = 0;
scenario = [];
waitbar(0.7,progress_bar,{'Etat du traitement :' ; 'Sélection des
données utilisables pour la modélisation'});

for i = 1:size(matrice_brute,1)
```

```

    if sum (matrice_brute(i,2:5)) > 8.5 % Quand un spectre du plan
    multiharmonique est joué, c'est toujours vrai

        j = j + 1;
        scenario(j,1:100) = matrice_brute(i,:); % On accumule les
        lignes où on a joué des harmoniques (souvent même les points mauvais)

    elseif j > 0 % Dans ce cas un sinusoid pure est joué et on vient
    de finir un scénario harmonique joué

        if size(scenario,1) < 13 && size(scenario,1) > 8 % Si ce n'est
        pas vrai, le spectre est trop court ou trop long par rapport au prévu
        (risque de mauvaises données)

            differences = max(scenario(3:(size(scenario,1)-2),2:4)) -
            min(scenario(3:(size(scenario,1)-2),2:4)); % On vérifie que les
            amplitudes en tension n'aient pas trop varié aux alentours
            discontinuite_tension = sum(differences);

            if (i+10) < size(matrice_brute,1) % Avec cette condition
            on s'assure de pouvoir calculer les discontinuités en courant

                discontinuite_courant = max(matrice_brute((i-
                9):(i+10),51)) - min(matrice_brute((i-9):(i+10),51)); % On vérifie que
                les amplitudes en courant n'aient pas trop varié aux alentours

            else

                discontinuite_courant = max(matrice_brute((i-
                9):size(matrice_brute,1),51)) - min(matrice_brute((i-
                9):size(matrice_brute,1),51));

            end

            if discontinuite_tension < 0.5 && discontinuite_courant <
            0.2 % Des seuils pour s'assurer de que ça a été stable, le seuil en
            courant pourrait être éventuellement trop strict

                p = mean(scenario(:,1)) * mean(scenario(:,51)); % On
                calcule la puissance pour laquelle a été joué le scénario
                ligne = horzcat(scenario(6,:),p); % On prend une ligne
                du milieu, où tout est stabilisé

                if isempty(puissances) == 0 % On a déjà trié quelque
                ligne

                    distances = abs(puissances - p); % On regarde
                    l'écart par rapport aux puissances enregistrées
                    [proche, position] = min(distances); % On garde la
                    valeur minimale et la position

                    if proche <= 100 % S'il est à au moins 100W près,
                    on le gardera dans le même tableau

                        trieess{position} = vertcat(trieess{position},
                        ligne); % On le garde dans le tableau la puissance duquel était la
                        plus proche

```

```

                                if (i+10) < size(matrice_brute,1) &&
nb_lignes_pures(position) < 5 &&
sum(sum(matrice_brute((i+2):(i+7),2:4))) < 0.3 % Si on a pas encore 5
sinus pour cette puissance et

% si les amplitudes de tensions étaient assez faibles

                                ligne_pure =
horzcat(matrice_brute((i+6),:),p);
                                trieess{position} =
vertcat(trieess{position}, ligne_pure); % On ajoute le sinus pure
                                nb_lignes_pures(position) =
nb_lignes_pures(position) + 1; % On compte

                                elseif (i+10) < size(matrice_brute,1) &&
size(trieess{position},1) > 700 && nb_lignes_pures(position) < 50 &&
sum(sum(matrice_brute((i+2):(i+7),2:4))) < 0.3 % Paréil mais juste si
on commence a avoir bcp

% de lignes pour la même puissance (cas des voitures)

                                ligne_pure =
horzcat(matrice_brute((i+6),:),p);
                                trieess{position} =
vertcat(trieess{position}, ligne_pure);
                                nb_lignes_pures(position) =
nb_lignes_pures(position) + 1;

                                end

                                else % Dans ce cas la puissance de ce scénario
n'était pas encore enregistrée

                                puissances = horzcat(puissances,p); % On
ajoute la valeur de la puissance
                                trieess = vertcat(trieess, ligne); % On socke la
ligne

                                nb_lignes_pures = horzcat(nb_lignes_pures, 0);
% On n'a pas encore de sinus pour la nouvelle puissance

                                if (i+10) < size(matrice_brute,1) &&
sum(sum(matrice_brute((i+2):(i+7),2:4))) < 0.3

                                ligne_pure =
horzcat(matrice_brute((i+6),:),p);
                                trieess{length(puissances)} =
vertcat(trieess{length(puissances)}, ligne_pure); % A cause de ça, la
puissance de la matrice i dans trieess

% est l'élément i du vecteur puissances
                                nb_lignes_pures(length(nb_lignes_pures)) =
nb_lignes_pures(length(nb_lignes_pures)) + 1;

                                end

                                end

```

```

        else % C'est le premier scénario dont on garde la
ligne

        puissances = p;
        trieess{1} = ligne;
        nb_lignes_pures = 0;

        if (i+10) < size(matrice_brute,1) &&
sum(sum(matrice_brute((i+2):(i+7),2:4))) < 0.3

            ligne_pure =
horzcat(matrice_brute((i+6,:),p);
            trieess{1} = vertcat(trieess{1}, ligne_pure);
            nb_lignes_pures = 1;

        end

    end

    else % Si les grandeurs n'étaient pas très stables, on ne
considère pas le scénario

%           disp(['Le scénario n''était pas stable en ligne '
num2str(i)]);

        end
    end

    j = 0; % On réinitialise
    scenario = [];

    end % Dans ce cas, un sinusoid pure est joué et et on vient d'un
sinusoid aussi, on zappe

    if i >= (avance_progress_bar * size(matrice_brute,1) / 6) % On
fait avancer la barre de progression

        waitbar((0.7 + (avance_progress_bar * 0.05)),progress_bar);
        avance_progress_bar = avance_progress_bar + 1;

    end

end

waitbar(1,progress_bar,'Traitement terminé'); % La barre est complétée

end

```

10.3.5. FUNCIÓN: *sauvegarde_donnees.m*

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% sauvegarde_donnees.m

% Esta función toma en entrada una matriz de una única potencia,
% formada
% por las líneas de datos válidas para la modelización.
% En la carpeta indicada por "chemin", la función crea la carpeta de
% guardado y le pone de nombre la potencia media de las líneas de
% datos que
% contiene (redondeada a la centena de vatios). Guarda además dentro
% de
% esta carpeta la tensión y la corriente en dos subcarpetas. De este
% modo
% se tienen los datos ordenados y listos para ser utilizados en el
% cálculo
% de la modelización.

function sauvegarde_donnees(matrice_complete, chemin)

% Décomposition de la matrice de donnees
Amp_V = matrice_complete(:,1:25);
Ph_V = matrice_complete(:,26:50);

Amp_I = matrice_complete(:,51:75);
Ph_I = matrice_complete(:,76:100);

P = matrice_complete(:,101);
p_moyenne = mean(P);
p_arrondie = round(p_moyenne/100) * 100; % Ici on arrondi aux
centaines de Watts

cd(chemin) % Dossier de sauvegarde

nom_dossier = [num2str(p_arrondie) ' W']; % On crée le nom du dossier

% Création du dossier puissance
mkdir(nom_dossier)

cd(nom_dossier)

% Création des subdossiers
mkdir('Tensions')
mkdir('Courants')
mkdir('Puissances')

% Sauvegarde des données

cd([chemin '\\' nom_dossier '\\Tensions'])
save('Amp_V.mat', 'Amp_V')
save('Ph_V.mat', 'Ph_V')

cd([chemin '\\' nom_dossier '\\Courants'])
save('Amp_I.mat', 'Amp_I')
save('Ph_I.mat', 'Ph_I')
```

```
cd([chemin '\\' nom_dossier '\Puissances'])
save('P.mat', 'P')

%cd(ancien_chemin)

end
```

10.4. ANEXO 4: matrices_reseau.m

Esta función automatiza la obtención a partir de la red neuronal en formato .net de las matrices de la ecuación matricial que utiliza dicha red entre sus entradas y salidas.

```
% Carratala Font Benjamin (18/08/2014 - 06/02/2015)

%% matrices_reseau.m

% Cette fonction sert à obtenir les matrices constituant l'équation
% matricielle utilisée par le réseau de neurones de MatLab (variable
net)
% pour calculer les sorties à partir des entrées.

function Matrices = matrices_reseau(net)

b1 = net.b{1};
b2 = net.b{2};
iw = net.IW{1};
lw = net.LW{2,1};

net.LW{2,1} = net.LW{2,1} * 0;
net.b{2} = net.b{2} * 0;
d = net(zeros(size(net.IW{1},2),1));

net.b{2} = ones(size(net.b{2}));
m = net(zeros(size(net.IW{1},2),1)) - d;

net.LW{2,1}(1,1) = 1;

facteur = zeros(size(net.IW{1},2),1);
seuil = zeros(size(net.IW{1},2),1);
net.IW{1}(1,:) = zeros(1,size(net.IW{1},2));
net.b{1} = net.b{1} * 0;
net.b{2} = net.b{2} * 0;

for e = 1:size(net.IW{1},2) % Boucle pour obtenir à chaque itération
le seuil et le facteur de chaque entrée

    net.IW{1}(1,e) = 1;

    in1 = 0 * ones(size(net.IW{1},2),1);
    y1 = (net(in1) - d) ./ m;

    signe = (net(1e10 * ones(size(net.IW{1},2),1)) - d) ./ m; % On
calcule la sortie pour une valeur grand, c'est pour savoir si le
sigmoide est inversé(avec un signe -) ou pas. Pour après savoir vers
où sera l'origine du sigmoide (valeur du seuil)

    precision = [0 0];
    reduction = 1;
    ecart = 0.1;
```

```

    if signe(1) > 0 % Dans ce cas le sigmoïde n'est pas inversé
    %     On essaiera que y1 et y2 soient le plus près de l'origine,
pas
    %     sur les asymptotes, car si ils étaient sur les asymptotes
on
    %     avait du mal à retrouver les x. (car si y1 et y2 sont toutes
les
    %     2 dans la même asymptote, les x seront égales à cause de la
    %     précision machine)

    while y1(1) >= 0.7 || y1(1) <= -0.9

        if y1(1) >= 0.7 % Ici on définit si l'on ira vers la
droite ou la gauche
            pass = -10;
            precision(1) = 1;
        elseif y1(1) <= -0.9
            pass = 10;
            precision(2) = 1;
        end

        if precision(1) && precision(2) % Quand ce sera vrai
signifie qu'on a dépassé l'origine du sigmoïde, donc on revient dans
l'autre sens
            reduction = reduction * 2; % On revient dans l'autre
sens mais plus petit à petit
        end

        in1 = in1 + (pass / reduction) *
ones(size(net.IW{1},2),1);
        y1 = (net(in1) - d) ./ m;
    end

    in2 = in1 + ecart * ones(size(net.IW{1},2),1);
    y2 = (net(in2) - d) ./ m;

    while y2(1) >= 0.9
        ecart = ecart / 2;
        in2 = in1 + ecart * ones(size(net.IW{1},2),1);
        y2 = (net(in2) - d) ./ m;
    end

else % dans ce cas le sigmoïde est inversé

    while y(1) <= -0.7 || y(1) >= 0.9

        if y1(1) <= -0.7
            pass = -10;
            precision(1) = 1;
        elseif y1(1) >= 0.9
            pass = 10;
            precision(2) = 1;
        end

        if precision(1) && precision(2)
            reduction = reduction * 2;
        end
    end
end

```

```

        in1 = in1 + (pass / reduction) *
ones(size(net.IW{1},2),1);
        y1 = (net(in1) - d) ./ m;

    end

    in2 = in1 + ecart * ones(size(net.IW{1},2),1);
    y2 = (net(in2) - d) ./ m;

    while y2(1) <= -0.9
        ecart = ecart / 2;
        in2 = in1 + ecart * ones(size(net.IW{1},2),1);
        y2 = (net(in2) - d) ./ m;
    end
end

% On retrouve les x
reel_in1 = (log(1 + y1(1)) - log(1 - y1(1))) / 2;
reel_in2 = (log(1 + y2(1)) - log(1 - y2(1))) / 2;

facteur(e) = (reel_in2 - reel_in1) / (in2(1) - in1(1)); % On
calculé le coefficient appliqué

seuil(e) = in1(1) - (reel_in1 / facteur(e)); % On calcule le seuil
à l'entrée

net.IW{1}(1,e) = 0;
end

net.b{1} = b1;
net.b{2} = b2;
net.IW{1} = iw;
net.LW{2,1} = lw;

% Sauvegarde des matrices(L'ordre est celui d'utilisation pour arriver
% depuis les entrées jusqu'aux sorties)
Matrices.seuils = seuil;
Matrices.facteurs = facteur;
Matrices.poids_couche_cachee = iw;
Matrices.biais_couche_cachee = b1;
Matrices.poids_couche_sortie = lw;
Matrices.biais_couche_sortie = b2;
Matrices.pentes_couche_sortie = m;
Matrices.decalages_couche_sortie = d;

% A continuation vous verrez comment interviennent les matrices dans
% l'équation matricielle, tansig() est la fonction sigmoïde :

% out_couche_cachee = tansig((iw * ((entrees - seuil) .* facteur)) +
b1);
% sorties = (((lw * out_couche_cachee) + b2) .* m) + d

```

