



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN SISTEMAS FERROVIARIOS

**ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS EN UNA
RED DE MEDIA TENSIÓN DE
FERROCARRILES METROPOLITANOS**

Autor: Jaime Porro Granados

Director: Eduardo Pilo de la Fuente

Madrid

Enero, 2018

FICHA TÉCNICA

Autor: Porro Granados, Jaime

Director del Trabajo: Pilo de la Fuente, Eduardo

Programa cursado: Máster Universitario en Ingeniería Industrial y Master Universitario en Sistemas Ferroviarios

Curso: 2º

Título del Trabajo Fin de Máster:

Análisis de los armónicos en una red de media tensión de ferrocarriles metropolitanos.

Resumen:

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una herramienta de simulación para analizar el efecto de los armónicos producidos por los rectificadores AC/DC, de las subestaciones de tracción, sobre la red de media tensión.

Los rectificadores AC/DC son cargas no lineales, las cuales modifican las ondas provocando que la corriente vista desde el lado AC no sea una onda sinusoidal. Según el teorema de Fourier, cualquier onda periódica puede descomponerse como un sumatorio infinito de ondas sinusoidales de frecuencia múltiple a la fundamental. Cada una de estas ondas se denomina armónicos.

La distorsión de las ondas puede producir grandes problemas en los elementos eléctricos de la red, como por ejemplo, sobrecalentamiento de conductores, disparos intempestivos de interruptores, vibraciones, envejecimiento de equipos, etc.

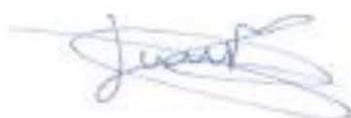
El simulador, desarrollado en MATLAB, es capaz de medir el efecto de los armónicos a partir de los datos de la red y conociendo el tipo de rectificador utilizado en la subestación de tracción. Para evaluar el efecto de los armónicos, existen unos índices de distorsión armónica total (THD) para tensión e intensidad. La norma IEC 61000-2-2 fija los valores umbrales para estos índices.

Para el desarrollo del simulador, ha sido necesario revisar los modelos de los elementos del sistema eléctrico para frecuencias superiores a la fundamental.

A la hora de validar el simulador, se ha analizado la red de metro de Yakarta (India), lo que ha permitido verificar el modelado del sistema y obtener los diferentes resultados para el análisis de los armónicos.

Autor: Jaime Porro Granados

Firma:



Director: Eduardo Pilo de la Fuente

Firma:



Contenido

1. Introducción	5
1.1. Motivación	5
1.2. Objetivos	6
1.3. Desarrollo del trabajo	6
1.4. Planificación.....	7
2. Descripción de electrificación	8
2.1. Subestaciones de transporte/distribución	9
2.2. Líneas de media tensión	9
2.3. Subestaciones eléctricas de tracción.....	10
3. Armónicos en sistemas eléctricos	12
3.1. Armónicos	12
3.2. Análisis de Fourier	13
3.3. Fuentes de armónicos	13
3.4. Rectificador trifásico	14
3.5. Índices para medir los armónicos	18
3.5.1. Umbrales críticos para los índices de distorsión	19
3.6. Efecto de los armónicos	19
3.6.1. Impacto económico	20
3.7. Soluciones para atenuar los armónicos	21
3.7.1. Filtro de armónicos	21
4. Herramienta de simulación.....	23
4.1. Hipótesis.....	23
4.2. Modelado del sistema eléctrico	25
4.2.1. Línea de transporte	25
4.2.2. Generadores.....	26
4.2.3. Transformadores.....	26
4.2.4. Carga convencional	27
4.2.5. Carga armónica	27
4.3. Proceso del simulador	28
4.3.1. Flujo de cargas.....	28
4.3.2. Cálculo de armónicos	32
5. Caso de estudio	34
5.1. Resultados	35
6. Conclusiones	39
Bibliografía	40

1. Introducción

1.1. Motivación

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el efecto que tienen los armónicos, producidos por los rectificadores que alimentan a los trenes, sobre la red de Media Tensión (MT) que los alimenta. Para poder estudiar este efecto, se ha desarrollado una herramienta de simulación donde, a partir de la estructura de la red y conociendo el tipo de rectificador, se obtiene la distorsión armónica producida, así como otros valores de armónicos relevantes.

Los sistemas ferroviarios se alimentan a través de subestaciones de tracción que transforman la energía eléctrica absorbida de la red. Generalmente, la energía absorbida por la subestación es alterna a frecuencia fundamental (en caso de España 50 Hz), y dependiendo del sistema ferroviario a alimentar, se puede mantener como alterna con diferentes valores o convertir a continua mediante el uso de rectificadores. Este trabajo se centra en las subestaciones de tracción rectificadoras, ya que estas son las principales generadoras de armónicos a nivel de la red de MT.

Algunos sistemas ferroviarios se alimentan de tensión continua, principalmente los metropolitanos y los de corta distancia. Para alimentar estos sistemas, se colocan subestaciones rectificadoras a lo largo de la vía, cuya función es transformar la corriente alterna (CA) en corriente continua (CC).

Los convertidores CA/CC son cargas no lineales, lo que modifica la onda provocando que la corriente que consume desde el lado de CA no sea sinusoidal, aunque sí periódica. Toda onda no sinusoidal periódica se puede descomponer en una sumatoria infinita de ondas sinusoidales de frecuencia múltiple a la fundamental, que conforman su descomposición en la serie de Fourier.

$$f_n = f_0 \cdot n \quad (1)$$

Donde f_0 es la frecuencia fundamental (50 Hz) y $n = 1, 2, 3 \dots$. Estas componentes de la frecuencia fundamental se denominan frecuencias armónicas y en lo general, las ondas van decreciendo en amplitud según va aumentando la frecuencia. Por esta razón, en el suministro de energía al sistema ferroviario circulan corrientes de múltiples frecuencias además de la fundamental.

El estudio de los armónicos es un tema relativamente joven, ya que hasta la aparición de los sistemas electrónicos de potencia no ha sido necesario su estudio. La aparición de estos sistemas ha sido un gran avance para los sistemas eléctricos, ya que con ellos es posible modificar las

características de la energía eléctrica, pero también han provocado graves problemas como la distorsión de ondas y las interferencias electromagnéticas entre equipos.

La distorsión de onda se produce porque los equipos electrónicos consumen la energía eléctrica de una manera no lineal. Esto produce problemas como puede ser: sobrecalentamiento de conductores, disparos intempestivos de interruptores, vibraciones, envejecimiento de equipos, etc. La aparición de estos efectos conlleva a pérdidas económicas.

El desarrollo de un simulador que sea capaz de analizar el efecto que tiene sobre la red la distorsión de onda, es de gran ayuda, ya que se puede anticipar lo que va a ocurrir y así tomar las medidas necesarias para evitar su aparición o intentar reducirlos al mínimo posible. En definitiva, poder anticipar el efecto de los armónicos produce un ahorro económico a largo plazo, ya que puede evitar fallos en el sistema.

1.2. Objetivos

Los objetivos que se plantean para este trabajo son los siguientes.

- Modelar los diferentes elementos de electrificación que aparecen en la red.
- Desarrollar e implantar algoritmos que resuelvan el flujo de cargas armónicas para estudiar el efecto que producen.
- Analizar el efecto de los armónicos en una red de MT de ferrocarriles metropolitanos.

1.3. Desarrollo del trabajo

La memoria de este trabajo se ha dividido en siete capítulos. La presente introducción explica la motivación de este trabajo y pone en situación al lector.

El segundo capítulo describe el funcionamiento de la electrificación ferroviaria, centrándose en los elementos de MT. El capítulo tercero define y analiza los armónicos, así como los elementos que los producen, sus efectos y métodos para reducirlos.

El cuarto capítulo detalla el proceso que sigue el simulador para la resolución del problema. En el capítulo quinto se muestra un caso real de estudio y los resultados que se obtienen. El sexto capítulo y último, muestra las conclusiones del trabajo.

1.4. Planificación

A continuación se muestran los diferentes hitos que se han llevado a cabo durante la realización del proyecto, así como su duración.

	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero	
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2
Estudio de armónicos y modelado de los diferentes elementos eléctricos.	■	■			■									
Desarrollo de algoritmos para resolver flujo de carga y cálculo de armónicos.					■	■	■	■	■	■	■			
Análisis de caso real												■		
Memoria												■	■	

2. Descripción de electrificación

La electrificación ferroviario es el conjunto de elementos necesarios para el funcionamiento de un sistema de tracción eléctrica (Figura 1). Los elementos fundamentales son los siguientes:

- Fuentes de energía o centrales de generación de energía eléctrica.
- Líneas eléctricas de transporte en alta tensión.
- Subestaciones eléctricas.
- Línea Aérea de Contacto (Catenaria) y sus sistemas o elementos asociados.
- Feeders o cables de alimentación entre la subestación de tracción y la línea aérea de contacto.
- Material rodante.

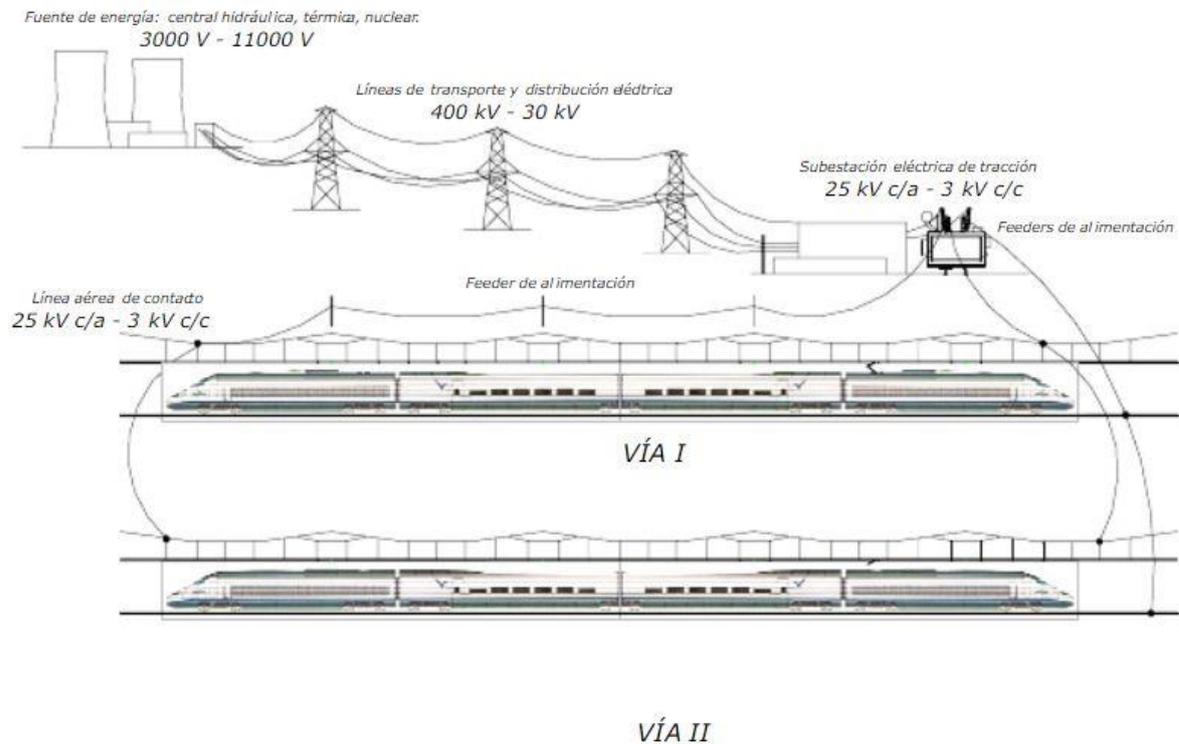


Figura 1. Sistema electrificación ferroviaria [1]

Este trabajo se centra en el efecto de los armónicos en la red de MT. Los elementos que intervienen en esta red son las subestaciones de conexión de red (transporte/distribución), las líneas de red de MT y las subestaciones de tracción AC/DC vistas desde el lado de alterna.

2.1. Subestaciones de transporte/distribución

Las subestaciones de transmisión tienen como objetivo reducir la tensión de alta a media tensión para su distribución. Este tipo de subestación sirve como enlace para las líneas de transporte de AT (66-400 kV) con las líneas de distribución (1-30 kV).

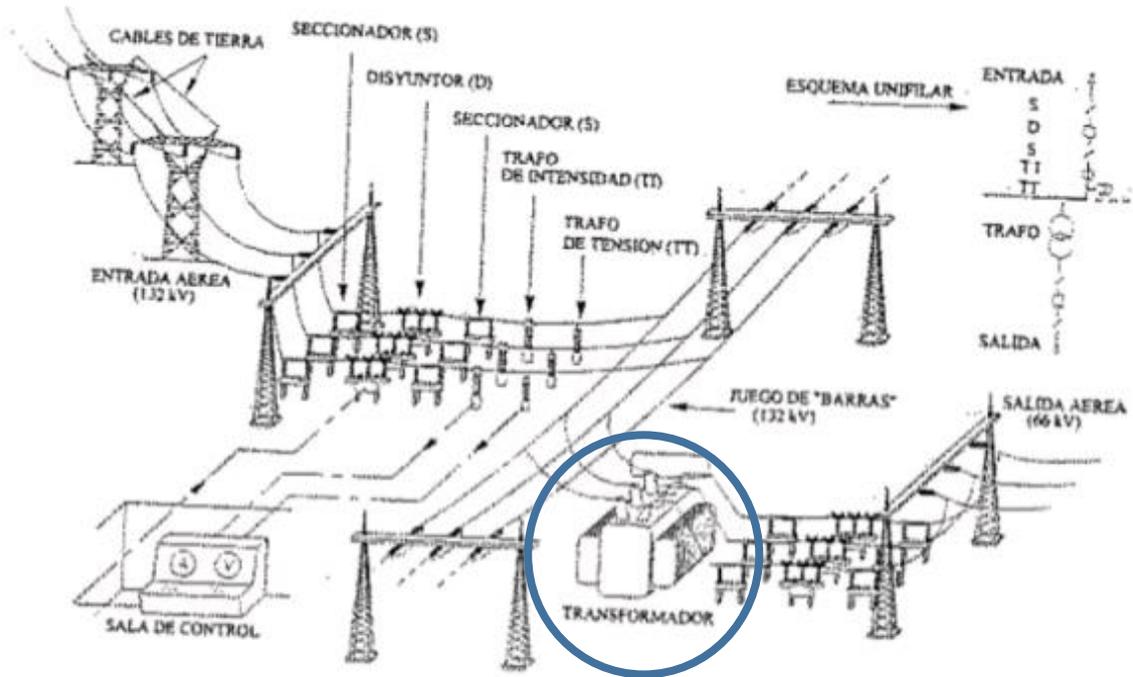


Figura 2. Subestación eléctrica [2]

El elemento principal de cualquier subestación es el transformador de potencia (Figura 2), el cual se encarga de transformar la tensión sin variar la potencia. A la hora de estudiar un sistema eléctrico, la subestación se modela como una impedancia, a partir de los valores del transformador de potencia.

Además del transformador, existen diferentes equipos para la protección, interruptores o seccionadores, y para control y medida, como por ejemplo los transformadores de intensidad.

2.2. Líneas de media tensión

Su función es transportar y distribuir la potencia generada en las centrales eléctricas a las subestaciones. En el caso de la red ferroviaria, estas líneas llegan hasta las subestaciones de tracción.



Figura 3. Línea eléctrica alimentando subestación [1]

En el transporte de grandes potencia se usan sistemas de corriente alterna, debido a la simplicidad de los grandes alternadores y transformadores de corriente alterna. La tensión en alterna es mucho más sencilla de adaptar a las necesidades de servicio y más económica que en el caso de corriente continua.

Los sistemas ferroviarios que funcionan a 3.000 V en corriente continua, se suelen alimentar de líneas eléctricas de 20/66 KV (aunque pueden alcanzar valores de 132 KV). Por otra parte, toda la alimentación de AVE es a 132, 220 o 400 KV.

2.3. Subestaciones eléctricas de tracción

En España existen dos grandes tipos de sistemas ferroviarios, los alimentados en corriente alterna y los que se alimentan en corriente continua. Por ello, también se pueden clasificar las subestaciones de tracción en dos grandes grupos: subestaciones para sistemas de corriente continua (CA/CC) y subestaciones para sistemas de corriente alterna (CA/CA). Por lo general, las de corriente continua son más complejas. Para este trabajo sólo se tienen en cuenta las subestaciones de tracción de corriente continua, ya que son las que generan armónicos en la red de MT.

Las subestaciones convertidoras AC/DC cuentan con un transformador de potencia, y todos los equipos de seguridad y medida asociados. Además, cuentan con un conjunto de equipos destinados a convertir la tensión de alterna a continua.

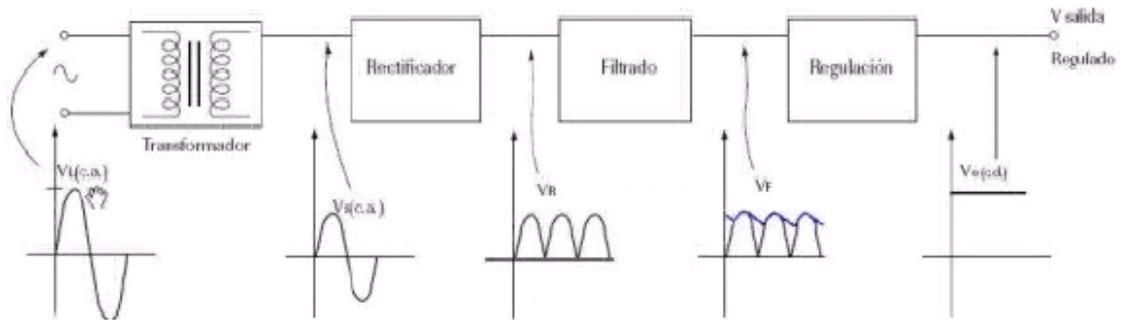


Figura 4. Esquema subestación rectificadora [9]

En la figura 4 se muestra un esquema dónde aparecen los equipos típicos de una subestación convertidora. Además se puede observar como varía la onda según va pasando por los diferentes equipos.

El proceso de conversión de onda varía en función del tipo de rectificador utilizado. El rectificador se tratará con más detalle en el capítulo 3.

3. Armónicos en sistemas eléctricos

Actualmente los sistemas eléctricos cuentan con una gran cantidad de elementos llamados no lineales, los cuales a partir de ondas sinusoidales y a frecuencia industrial, generan otras ondas de diferente frecuencia, que reciben el nombre de armónicos.

Los armónicos generan problemas tanto a los usuarios como a la compañía encargada de suministrar la energía eléctrica.

3.1. Armónicos

De acuerdo a los estándares de la calidad de onda, la onda de tensión debe tener una forma sinusoidal, con unas características determinadas (frecuencia y amplitud), tal y como se muestra en la figura 5.

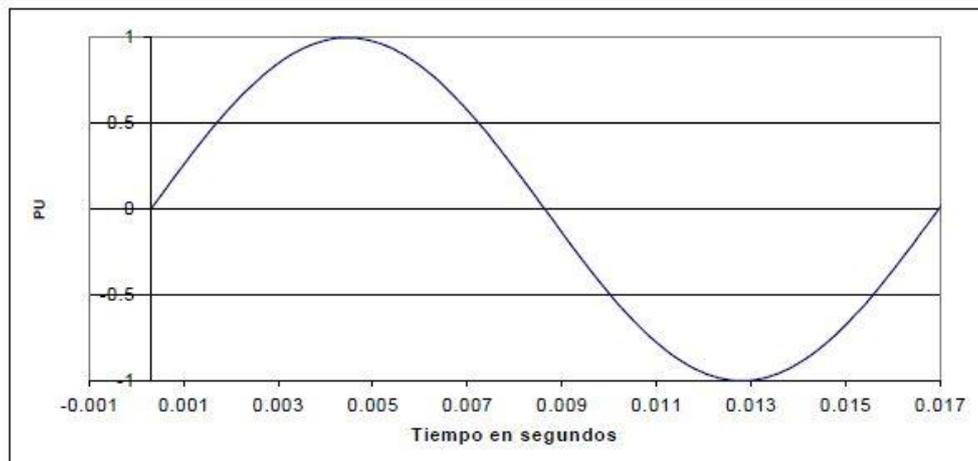


Figura 5. Onda sin contenido armónico [3]

Cuando una onda periódica tiene contenido armónico no tiene esta forma sinusoidal, lo cual puede provocar una variación en el valor de pico y/o valor RMS. Esto provoca alteraciones en el funcionamiento normal de los equipos alimentados por esta tensión.

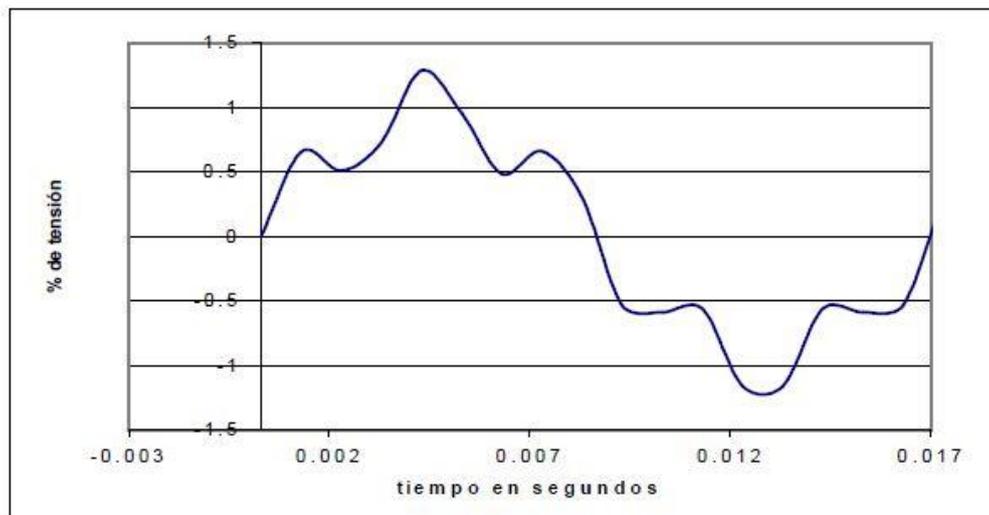


Figura 6. Onda con contenido armónico [3]

En la figura 6 se muestra una onda con contenido armónico. Como se puede observar, esta onda no es sinusoidal y su valor de pico ha aumentado con respecto la figura 6.

3.2. Análisis de Fourier

El teorema de Fourier dice que toda onda periódica no sinusoidal puede ser descompuesta como la suma infinita de ondas sinusoidales de frecuencia múltiple a la fundamental, siempre que cumpla las siguientes condiciones:

- La integral a lo largo de un periodo de la función sea un valor finito.
- La función debe tener un número finito de discontinuidades en un periodo.
- La función debe tener un número finito de máximos y mínimos en un periodo.

Cualquier función $F(w_0t)$ con periodo 2π tiene su representación en series de Fourier de acuerdo con la siguiente expresión [3].

$$F(w_0t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \text{sen}(nw_0t) + B_n \text{cos}(nw_0t)] \quad (2)$$

Donde:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(w_0t) dx \quad (3)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(w_0t) \text{sen}(nw_0t) dx \quad (4)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} F(w_0t) \text{cos}(nw_0t) dx \quad (5)$$

$$[A_n \text{sen}(nw_0t) + B_n \text{cos}(nw_0t)] = R_n \text{sen}(nw_0t + \varphi_n) \quad (6)$$

Con $n=1, 2, 3, \dots$ y siendo w_0 la pulsación a frecuencia fundamental (50Hz en España).

3.3. Fuentes de armónicos

Como ya se ha comentado, los armónicos son el resultado de cargas no lineales o de elementos de la infraestructura no lineales, los cuales ante una señal sinusoidal devuelven una respuesta no

sinusoidal. Se puede considerar que las cargas no lineales inyectan armónicos en la red de distribución.

Las principales fuentes de armónicos en las redes de transporte/distribución son:

- Hornos de arco y otros elementos de descarga de arco, como lámparas fluorescentes.
- Núcleos magnéticos en transformadores y máquinas rotativas que producen corriente de tercer armónico ($n=3$) debido a la saturación en el hierro.
- Controladores de velocidad ajustables.
- Switches en estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- Rectificadores basados en diodos o tiristores para equipos de soldadura, cargadores de baterías, etc.
- Compensadores estáticos de potencia reactiva.
- Estaciones en CC de transmisión en alto voltaje.
- Convertidores CA/CC.

En las redes de MT que alimentan a las subestaciones de tracción, la principal fuente de armónicos la constituyen los rectificadores (convertidores CA/CC generalmente no controlados).

3.4. Rectificador trifásico

Antes de explicar el funcionamiento de un rectificador trifásico, hay que comentar que existen convertidores controlados y no controlados. Los convertidores utilizan elementos electrónicos que solo permitan el paso de corriente en un sentido, permaneciendo bloqueado cuando circula corriente en la polaridad inversa. Los convertidores no controlados utilizan diodos, mientras que los controlados usan semiconductores de potencia, normalmente tiristores, IGBTs o GTOs. Además hay que mencionar que los rectificadores se conectan a la red a través de un transformador.

Los rectificadores trifásicos se utilizan para producir tensión y corriente continua, a partir de alterna, para grandes cargas, como por ejemplo los sistemas ferroviarios. En la figura 7, se muestra el rectificador trifásico en puente. Para toda la explicación, se supondrá que el rectificador se alimenta con tensión trifásica equilibrada y que el generador y los diodos son ideales.

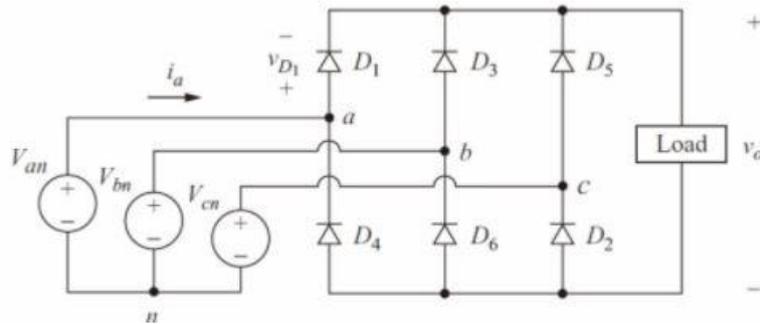


Figura 7. Rectificador trifásico [3]

Aplicando la ley de Kirchoff para las tensiones al circuito de la figura 7, se puede observar que solo puede conducir un diodo a la vez de la mitad superior y uno de la mitad inferior. Por el mismo motivo, D1 y D4 no pueden conducir al mismo tiempo, y por tanto D3 y D6 tampoco ni D5 y D2.

Existen seis combinaciones de tensiones compuestas (tres fases combinadas de dos en dos). Sabiendo que el periodo de cada fase es 2π , la combinación de par de diodos que deja conducir cambia cada $\frac{2\pi}{6}$. Por esta razón, este rectificador se conoce como rectificador de 6 pulsos.

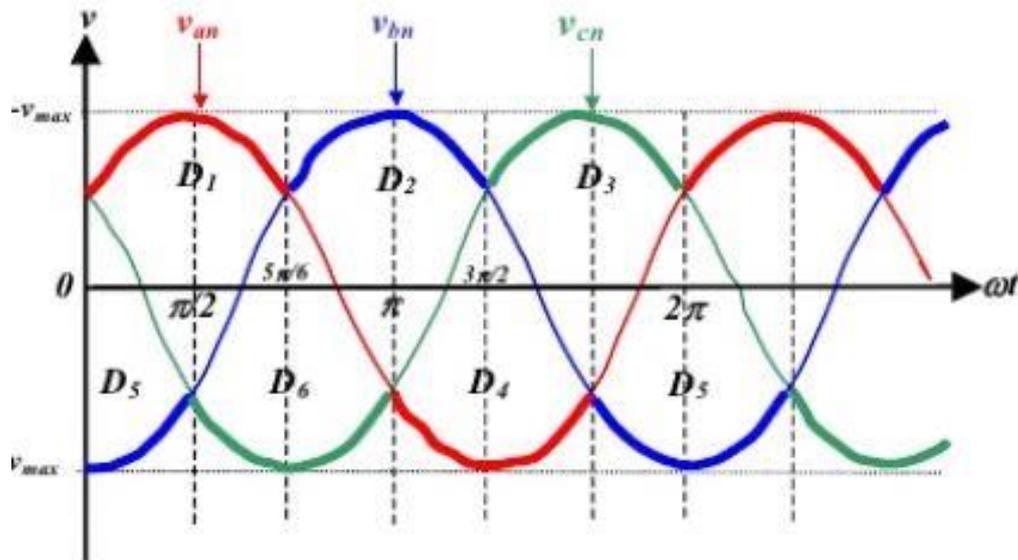


Figura 8. Tensión de entrada al rectificador [3]

En cada una de las diferentes combinaciones de diodos transmitiendo, se consigue que circulen el valor máximo de tensión y el menor. En la figura 8 se observa este fenómeno. El orden de funcionamiento de los diodos es D1-D6; D6-D2; D2-D4; D4-D3, D3-D5; D5-D1 y cada tensión que se obtiene será la compuesta entre los dos diodos que transmitan, por ejemplo para D3-D5 es v_{cb} .

En la figura 9, se muestra la onda de tensión de entrada a la carga. Como se puede observar la onda no es corriente continua pura, ya que existe un rizado, pero se toma el valor medio de la

onda como tensión continua, gracias a la utilización de condensadores que estabilizan estas tensiones (filtros) Además, se muestra la intensidad de entrada al rectificador y la de entrada a la carga. Como se puede observar, la corriente en cada fase pasa a ser una onda cuadrada de 6 pulsos, mientras que la de entrada a la carga es continua.

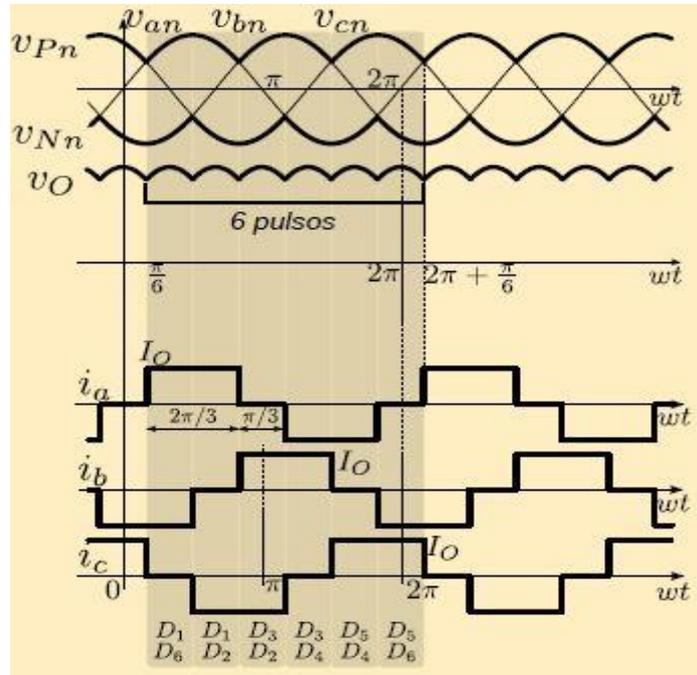


Figura 9. Señales rectificador 6 pulsos [4]

Aplicando la serie de Fourier a esta onda, los armónicos presentes en la corrientes, se transmiten al primario del transformador, y por tanto a la red, tienen frecuencia múltiple a la fundamental según la ecuación $6k \pm 1$, siendo $k=1, 3, 5, \dots$. Esto se detalla en el apartado 4.1.

Hasta ahora se ha considerado el rectificador como un elemento ideal, pero en la realidad hay que tener en cuenta los dispositivos electrónicos reales introducen armónicos adicionales debido a sus características (relación v-i no lineal, retrasos, conmutaciones, etc.). En la figura 10, se muestra una señal real de corriente de entrada del rectificador.

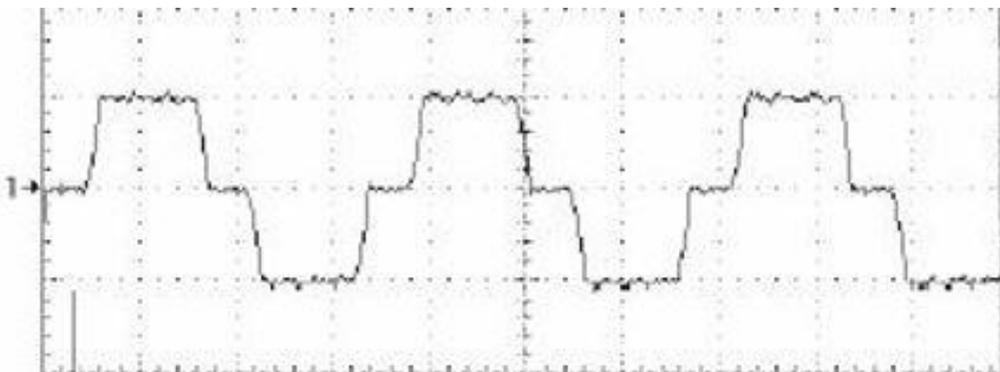


Figura 10. Corriente de entrada rectificador 6 pulsos real [4]

Otro tipo de rectificador trifásico son los rectificadores multipulso. Estos rectificadores se componen de varios rectificadores de 6 pulsos en serie, por lo que el número de pulsos se calcula como $6n$, siendo n el número de rectificadores en serie.

Uno de los rectificadores multipulso, es el de 12 pulsos, el cual está compuesto por dos rectificadores de 6 pulsos intercalados (figura 11). Este intercalado, reduce el rizado de la señal de tensión en continua (figura 11), y además mejora la calidad de la corriente de entrada al rectificador (menos armónicos).

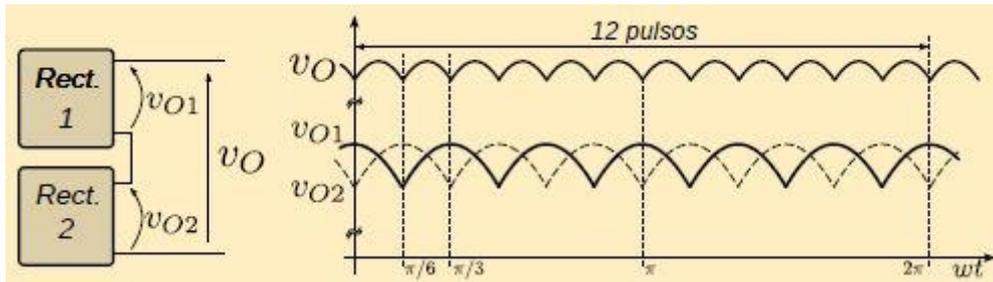


Figura 11. Tensión salida rectificador 12 pulsos [4]

Para obtener 12 pulsos durante un ciclo de onda, cada par de diodos debe transmitir durante $\frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$. Para obtener esto, es necesario tener 6 ondas de tensión de entrada desfasadas $\frac{\pi}{3}$ entre sí. La manera de conseguirlo es tener dos secundarios de transformador, uno en estrella y otro en triángulo. El que se utiliza comúnmente en el sistema ferroviario es el estrella-estrella; estrella-triángulo. En la figura 12 se muestra el esquema de un rectificador de este tipo.

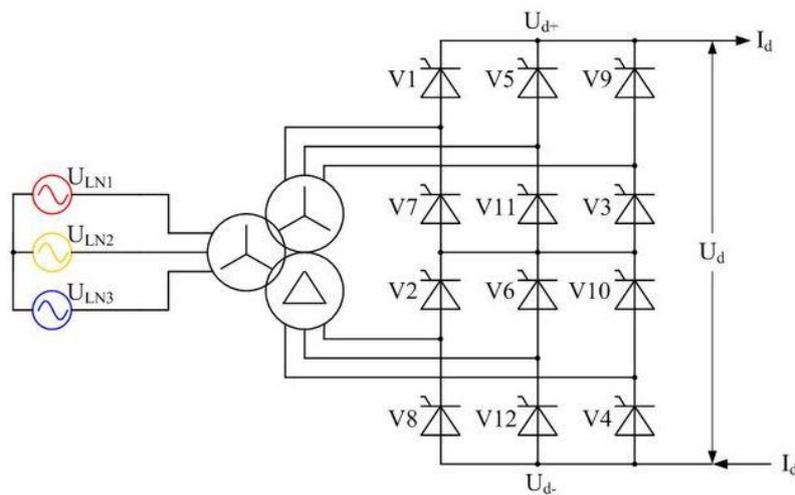


Figura 12. Esquema rectificador de 12 pulsos [3]

Al igual que ocurría con el de 6 pulsos, la corriente de entrada al rectificador es escalonada, pero en este caso de 12 pulsos. En figura 13 se muestra la onda en caso de rectificador ideal, mientras que en la figura 14 se muestra una onda real.

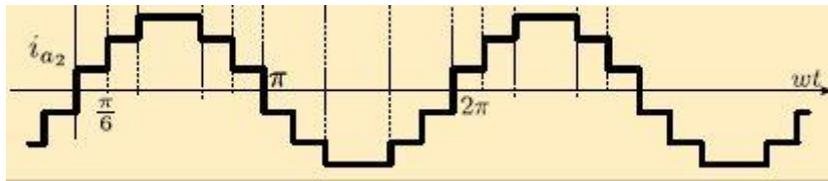


Figura 13. Corriente de entrada rectificador 12 pulsos ideal [4]

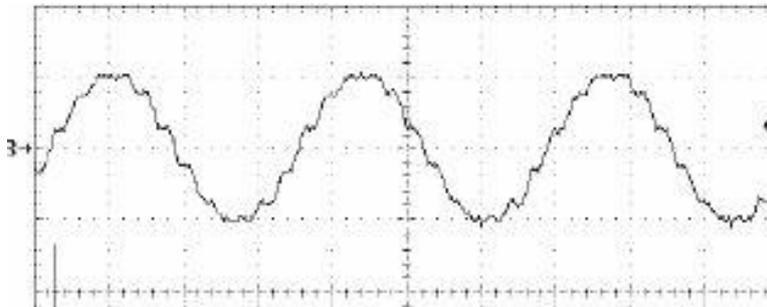


Figura 14. Corriente de entrada rectificador 12 pulsos real [4]

Analizando la serie de Fourier de la onda teórica, los armónicos que se transmite al primario son de frecuencia $12k \pm 1$, siendo $k=1, 3, 5 \dots$

3.5. Índices para medir los armónicos

Para analizar el efecto producido por los armónicos se utilizan unos índices que cuantifican el nivel de contaminación armónica de las ondas. Estos valores se comparan con los límites dados por las normas o por lo que puede soportar el equipo.

Existen dos tipos de índices para la intensidad y para la tensión: distorsión individual de cada armónico y distorsión total. A continuación se definen ambos para la corriente y para la tensión.

Distorsión individual

$$D_{iI} = \frac{I_i}{I_1} \quad (7a) \quad ; \quad D_{iV} = \frac{V_i}{V_1} \quad (7b)$$

Distorsión total

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (I_i)^2}{I_1^2}} \quad (8a) \quad ; \quad THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} (V_i)^2}{V_1^2}} \quad (8b)$$

donde D_{iI} es la distorsión del armónico i de corriente; D_{iV} es la distorsión del armónico i de tensión; I_i es la corriente del armónico i ; V_i es la tensión del armónico i ; I_1 es la corriente del primer armónico (frecuencia fundamental); V_1 es la tensión del primer armónico (frecuencia fundamental); THD_I es la distorsión total de corriente; THD_V es la distorsión total de tensión. Estos valores se definen en la norma IEC 61000-2-2.

3.5.1. Umbrales críticos para los índices de distorsión

Los valores umbrales de la distorsión armónica total de tensión, y sus posibles consecuencias, según IEC 61000-2-2:

- $THD_V < 5\%$: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- $5 < THD_V < 8\%$: contaminación armónica importante, puede que se produzca algún funcionamiento incorrecto.
- $THD > 8\%$: contaminación armónica importante, es muy probable que se produzcan funcionamientos incorrectos. Es necesario realizar un análisis profundo e instalar dispositivos de atenuación.

En segundo lugar se definen los valores umbrales de la distorsión armónica total de corriente, según IEC 61000-2-2:

- $THD_I < 10\%$: situación normal, sin riesgos de funcionamiento incorrecto.
- $10 < THD_I < 50\%$: contaminación armónica importante con riesgo de aumento de temperatura y la necesidad consiguiente de sobredimensionar cables y fuentes.
- $THD_I > 50\%$: contaminación armónica importante, es muy probable que se produzcan funcionamientos incorrectos. Es necesario realizar un análisis profundo e instalar dispositivos de atenuación

3.6. Efecto de los armónicos

En este apartado se explica el efecto que tienen los armónicos sobre los sistemas eléctricos

- **Factor de potencia.** La aparición de armónicos distorsiona la lectura factor de potencia, ya que la potencia aparente se ve aumentada en la lectura de los contadores. En la ecuación siguiente se ve el efecto:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V \cdot I_{RMS}} = \frac{P}{V \cdot \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}} \quad (7)$$

- **Conductores.** En corriente alterna, la distribución de corriente no es uniforme en toda la sección del cable, sino que va en aumento desde el interior del conductor hacia la capa externa, este es el denominado efecto pelicular. A medida que aumenta la frecuencia este fenómeno se ve incrementado, provocando sobrecalentamiento de los conductores. Además, la reactancia es proporcional a la frecuencia (ωL), por lo que al aparecer armónicos de mayor frecuencia a la fundamental, este valor aumenta. Esto conlleva unas mayores pérdidas en las líneas.
- **Transformadores.** Las diferentes pérdidas que se pueden producir en un transformador se ven afectadas de diferentes formas por los armónicos:
 - a. Pérdidas del núcleo: la corriente de magnetización es muy pequeña con respecto a la de carga, por lo que el efecto de los armónicos suelen ser despreciables
 - b. Pérdidas en arrollamientos: principalmente son las producidas por el efecto Joule, las cuales se rigen por la ecuación I^2R , por lo que aumentarían debido al efecto pelicular.

Al aumentar las pérdidas totales, aumenta su temperatura, provocando un debilitamiento del aislamiento y un mal funcionamiento del transformador.

- **Condensadores.** Cuando en un sistema hay instalados condensadores existe la posibilidad de que existan frecuencias de resonancia. Este efecto produce tensiones y corrientes bastantes más altas a las normales.
- **Motores.** Los armónicos de voltaje aumentan las pérdidas en el hierro y en el cobre a altas frecuencias de las máquinas asíncronas y síncronas, lo que provoca una disminución de su eficiencia.

3.6.1. Impacto económico

Lógicamente, el aumento de las pérdidas y de los fenómenos de fatiga, conlleva un impacto económico. Los principales se resumen a continuación:

- **Mayores costes de contratación.** Como se ha visto los armónicos generan pérdidas de potencia, por lo que es necesario aumentar la potencia contratada para suplir estas pérdidas.
- **Sobredimensionamiento de los equipos.** Al aumentar la potencia transmitida, es necesario dimensionar los generadores y transformadores. Los conductores al circular más intensidad, también se deben sobredimensionar.

- **Reducción de la vida útil de los equipos.** Cuando el THD_V se aproxima a 10%, la vida útil de los equipos se reduce considerablemente.
- **Disparos intempestivos y parada de la instalación.** Los interruptores se someten a picos de corriente producidos por los armónicos. Estos picos pueden provocar el disparo de ellos, dejando sin energía la instalación.

3.7. Soluciones para atenuar los armónicos

Para limitar la propagación de armónicos en la red de distribución, existen diferentes soluciones, como por ejemplo los filtros, que deben tenerse en cuenta. A continuación se definen algunas soluciones básicas:

- Instalar las cargas no lineales aguas arriba en el sistema.
- Agrupar las cargas no lineales en una línea distinta a las lineales.
- Alimentar las cargas no lineales desde una fuente diferente a las lineales.
- Transformadores con conexiones especiales.

3.7.1. Filtro de armónicos

En los casos en los que las soluciones preventivas explicadas anteriormente no sean suficientes, es necesario equipar la instalación con sistemas de filtrado.

- **Filtros pasivos.** Consiste en un circuito LC sintonizado a cada rango de armónico que se quiere filtrar. Se montan en paralelo a la carga no lineal (figura 15). Este circuito absorbe los armónicos evitando que se propaguen por la red de distribución. Este tipo de filtro se ajusta a un rango de armónicos próximo al que se desea eliminar. En caso de querer eliminar varios, se puede colocar varios en paralelo.

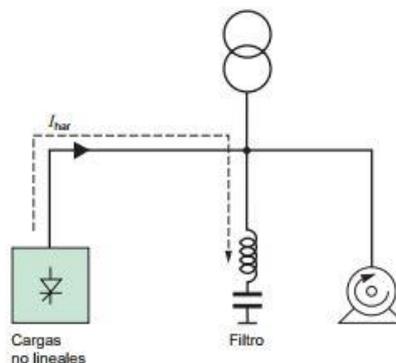


Figura 15. Filtro pasivo [5]

- Filtros activos.** Estos sistemas, que incluyen electrónica de potencia, compensa la intensidad de armónicos generada por la carga no lineal. Se pueden conectar en serie o paralelo. En la figura 16 se muestra un filtro activo conectado en paralelo que compensa la corriente armónica ($I_{har} = -I_{act}$), de forma que la corriente I_s sea senoidal.

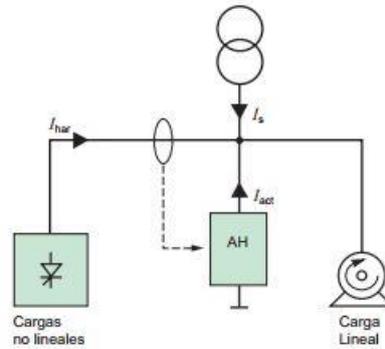


Figura 16. Filtro activo [5]

- Filtros híbridos.** Consiste en conectar en paralelo un filtro pasivo y uno activo, formando un sistema único. Este solución de filtrado ofrece las ventajas de ambos filtros y abarca una amplia gama de niveles de potencia y rendimiento.

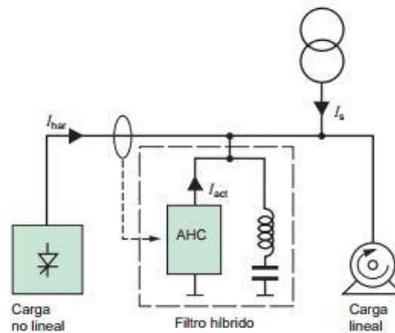


Figura 17. Filtro híbrido [5]

4. Herramienta de simulación

En este capítulo se describe el simulador desarrollado para obtener el efecto de los armónicos producidos por los rectificadores de las subestaciones de tracción CA/CC en las redes de MT. El simulador está desarrollado en MATLAB.

Antes de entrar en el funcionamiento del simulador hay que explicar las simplificaciones que se han hecho para resolver el estudio de armónicos, y el modelo de los diferentes elementos que aparecen.

4.1. Hipótesis

Las hipótesis usadas para el desarrollo del simulador son las siguientes:

Hipótesis 1. Sistema trifásico equilibrado

Se ha supuesto que el sistema está equilibrado, es decir, cada una de las ondas de fases tienen idéntico módulo y desfasadas 120° en el tiempo.

Debido a que las formas de onda tienen simetría de media onda, los armónicos pares son nulos. Para que se cumpla simetría de media onda, los valores negativos deben ser un reflejo de los positivos pero desplazados medio periodo, es decir $x(t) = -x(t + \frac{T}{2})$ (figura 18). Si se resuelven las ecuaciones (4) (5) para los coeficientes A_n y B_n se obtiene un valor nulo.

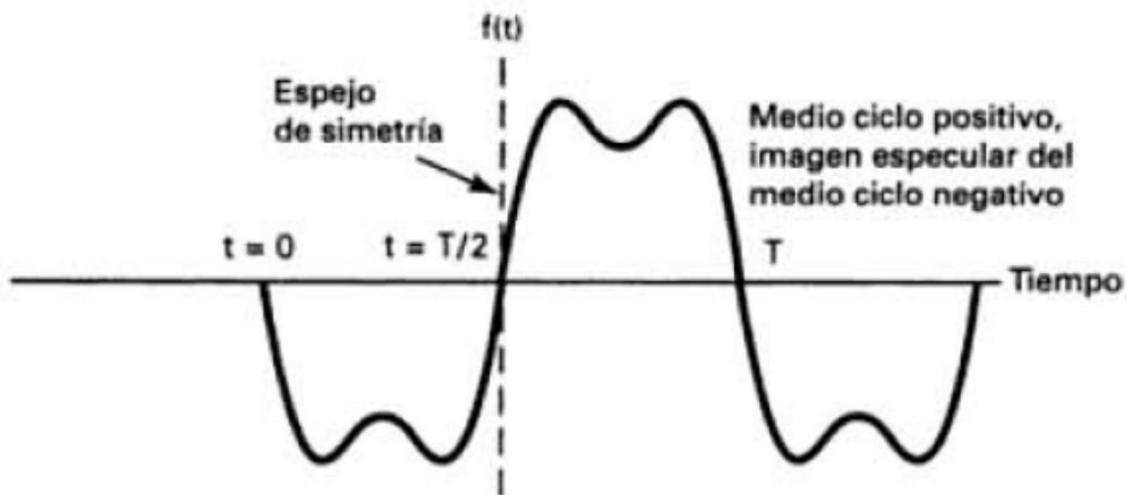


Figura 18. Simetría de media onda [6]

Al ser sistema equilibrado las ondas están desfasadas $\frac{2\pi}{3}$, es decir, se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$u_b(t) = u_a\left(t - \frac{2\pi}{3}w_1\right) ; u_c(t) = u_a\left(t + \frac{2\pi}{3}w_1\right) \quad (8)$$

Siendo:

$$u_a(t) = \sqrt{2} \sum_{k=1}^{\infty} V_k \text{sen}(kw_1 t + \theta_k) \quad (9)$$

Resolviendo estas ecuaciones para los distintos valores de k, se obtiene la secuencia de cada uno de los armónicos en redes equilibradas (Tabla 1).

Tabla 1. Secuencias en los armónicos en redes equilibradas

k	fase a	fase b	fase c	secuencia
	θ_k	$\theta_k - k2\pi/3$	$\theta_k + k2\pi/3$	
1	θ_1	$\theta_1 - 2\pi/3$	$\theta_1 + 2\pi/3$	directa
2	θ_2	$\theta_2 + 2\pi/3$	$\theta_2 - 2\pi/3$	inversa
3	θ_3	θ_3	θ_3	homopolar
4	θ_4	$\theta_4 - 2\pi/3$	$\theta_4 + 2\pi/3$	directa
5	θ_5	$\theta_5 + 2\pi/3$	$\theta_5 - 2\pi/3$	inversa
6	θ_6	θ_6	θ_6	homopolar
7	θ_7	$\theta_7 - 2\pi/3$	$\theta_7 + 2\pi/3$	directa

Las corrientes homopolares circulan por el neutro. En sistemas trifásicos sin neutro no puede haber corrientes homopolares, por lo que no se encuentran corrientes de armónicos múltiplos de tres. Además, la mayor parte de cargas no lineales sólo tienen tres hilos conectados a la red, por lo que no pueden producir corrientes homopolares.

Resumiendo, la ventaja de suponer una red trifásica equilibrada es que sólo existen armónicos cuyo orden k cumpla con la condición $k = 6p \pm 1$, siendo $p=1, 2, 3, \dots$, es decir sólo existen armónicos de orden $k=5, 7, 11, 13, 17, \dots$. Estos armónicos son conocidos como armónicos característicos.

Hipótesis 2. Régimen permanente

Durante la simulación se considera que el sistema está en régimen permanente. Además, se presupone que las únicas perturbaciones que ocurren en el sistema son provocadas por los armónicos, ya que las pequeñas variaciones que pueden ocurrir en el sistema por otros motivos son lentas en comparación con las constantes de tiempo eléctricas.

Hipótesis 3. Potencia consumida es a frecuencia fundamental

Al aparecer corrientes a diferentes frecuencias, la potencia que absorbe la carga será la suma de todas las potencias de los armónicos ($P_{carga} = \sum_{k=1}^n P_k$). Como no se conoce el comportamiento de las cargas al ser alimentadas con tensiones armónicas, se sobreestima el consumo de potencia asumiendo que la potencia requerida por las cargas es suministrada a frecuencia fundamental y posteriormente incrementada por el efecto de los armónicos.

4.2. Modelado del sistema eléctrico

Los diferentes elementos que se encuentran en un sistema eléctrico, actúan de forma diferente cuando la frecuencia es mayor a la fundamental. Por ello, es necesario modelar cada uno de ellos para poder resolver el problema de los armónicos.

4.2.1. Línea de transporte

El modelo de la línea de transporte que se ha utilizado es el equivalente en π (figura 19). En este circuito, Z_{sk} e Y_{pk} son respectivamente la impedancia serie y admitancia paralelo del armónico k .

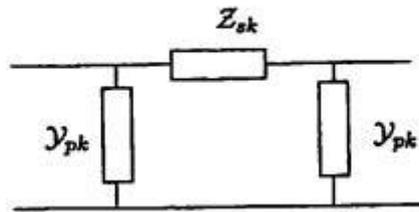


Figura 19. Equivalente π de línea de transporte [7]

Las ecuaciones que definen estos dos parámetros son las siguientes:

$$Z_{sk} = (R'_k + jk\omega_1 L') \cdot l \quad (10a) ; \quad Y_{pk} = \frac{jk\omega_1 C'}{2} l \quad (10b)$$

dónde:

- R'_k es la resistencia del armónico k del conductor [Ω/m].
- k es el orden de armónico.
- ω_1 es la pulsación a frecuencia fundamental [rad/s].
- L' es la inductancia de la línea [mH/km].
- C' es la capacitancia de la línea [$\mu F/km$].
- l es la longitud de la línea [km]

Como se puede observar, la inductancia serie aumenta con la frecuencia y la admitancia paralelo también.

Además de estas ecuaciones, hay que tener en cuenta el efecto pelicular. La variación de la resistencia toma el valor aproximado:

$$R_k = R_1 \left(1 + \frac{0646k^2}{192 + 0.518k^2} \right) \quad (10)$$

4.2.2. Generadores

Los generadores se representan por el circuito de la figura 20, a la frecuencia fundamental. Puede usarse como fuente de tensión en serie con impedancia o como fuente de corriente de valor

$I_{g1} = \frac{E_g}{Z_g}$ en paralelo con la misma impedancia.

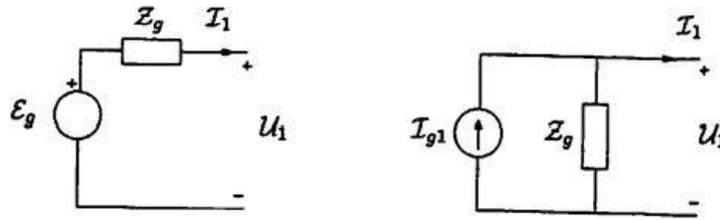


Figura 20. Circuito equivalente de los generadores [7]

A las frecuencias armónicas, el generador solo se representa (puesto que la generación de corriente a estas frecuencias es despreciable) mediante una impedancia de valor:

$$Z_{gk} = R_{gk} + jkX_g \quad (11)$$

Para calcular el valor de R_{gk} se utiliza la ecuación (13).

4.2.3. Transformadores

Los transformadores se modelan a partir de su impedancia serie. Normalmente, la impedancia de la rama magnetizante se suele despreciar (figura 21).

En el modelo de los transformadores también se suele despreciar las capacidades que aparecen entre los devanados y cada uno de ellos con tierra. En el estudio de armónicos estos condensadores se podrían considerar para muy altas frecuencias. Para el simulador no se han tenido en cuenta ya que son del orden de nF o pF por lo que a frecuencias de 2500 Hz (lo máximo que llega el simulador) su efecto es poco relevante.

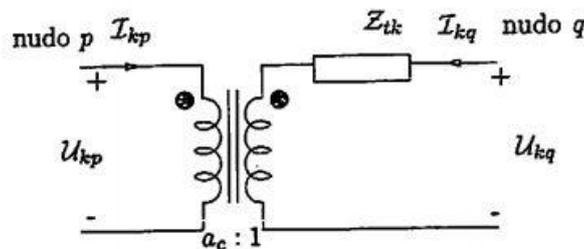


Figura 21. Circuito equivalente de los transformadores [7]

La impedancia Z_{tk} está formada por la resistencia (R_t) y reactancia (X_t) de cortocircuito del transformador. La expresión que rige esta impedancia, teniendo en cuenta el efecto pelicular (13) es la siguiente:

$$Z_{tk} = R_{tk} + jkX_t \quad (12)$$

4.2.4. Carga convencional

No existe una manera de definir el modelo de la carga convencional, ya que cada una tiene características propias. De los diferentes modelos que existen, los dos más utilizados son los modelos serie y paralelo.

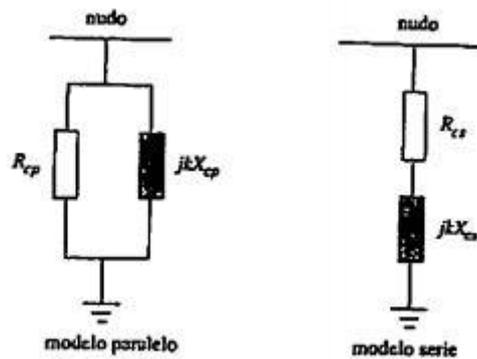


Figura 22. Modelos serie y paralelo de carga convencional [7]

Los valores de los parámetros de las impedancias, a frecuencia fundamental, son:

$$R_{cs} = \frac{P_1 V_1^2}{P_1^2 + Q_1^2} ; \quad X_{cs} = \frac{Q_1 V_1^2}{P_1^2 + Q_1^2} \quad (13)$$

$$R_{cp} = \frac{V_1^2}{P_1} ; \quad X_{cp} = \frac{V_1^2}{Q_1} \quad (14)$$

En donde $R_{cs}, X_{cs}, R_{cp}, X_{cp}$, son las resistencias y reactancias de los modelos serie y paralelo. Los valores de P_1, Q_1, V_1 son los valores de potencia activa, potencia reactiva y tensión del nudo de la carga, respectivamente.

4.2.5. Carga armónica

Las cargas no lineales son las que generan los armónicos, como ya se ha comentado. Se han modelado como una carga PQ para el armónico fundamental y como una fuente de corriente proporcional a la corriente de primer armónico para los demás armónicos.

Para obtener los valores de la fuente se realizan mediciones reales y se usan para estudiar el efecto que tienen sobre la red. En este trabajo, se han utilizado los datos teóricos de los rectificadores.

4.3. Proceso del simulador

El simulador consta de dos partes claramente diferenciadas. En la primera parte, a partir de los datos de la red y los diferentes consumos, se resuelve la red de media tensión mediante un flujo de cargas, suponiendo que no existen armónicos. Los resultados que se obtienen del flujo de carga (FdC) son la tensión e intensidad de todos los nudos del sistema, con sus respectivos ángulos. Estos datos obtenidos sirven como datos de entrada para la segunda parte.

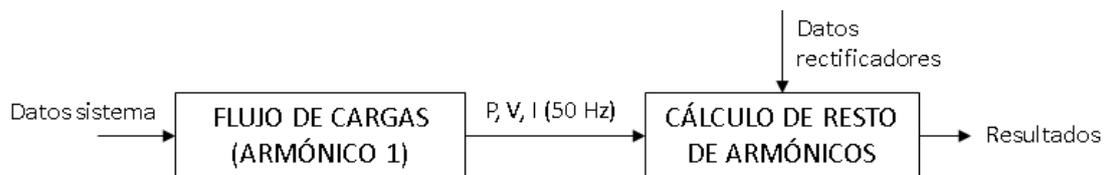


Figura 23. Partes del simulador.

En la segunda parte es donde se calculan las corrientes armónicas producidas por los rectificadores que alimentan a los trenes, y su efecto en cada uno de los nudos. Además de los datos que se obtienen del FdC, para esta parte es necesario conocer los datos del tipo de rectificador, así como los armónicos que presenta. Los resultados que se obtienen son las tensiones y corrientes de cada uno los nudos, así como los valores de THD_i y de THD_v . Además, se calculan las pérdidas que se produce en las líneas debido a los armónicos.

En los siguientes subapartados se entrará en detalle de cada una de las partes de este proceso.

4.3.1. Flujo de cargas

El objetivo que se pretende conseguir al usar el flujo de cargas, es obtener las tensiones en cada uno de los nudos de la red, tanto módulo como argumento. Con estos valores, se pueden obtener los flujos de intensidad y potencia por las líneas, a partir de los datos de generación y demanda de la red. El flujo de cargas se resuelve mediante un proceso iterativo usando el balance de potencias en la red.

A continuación se va a definir los datos de entrada necesarios, el método de resolución, y los resultados que se obtienen.

Datos de entada

En primer lugar, hay que conocer los datos de las líneas de transmisión de potencia. Para ello, lo normal es conocer el tipo de conductor que lleva cada línea de transmisión y su longitud. A partir del tipo de conductor se puede obtener la impedancia por kilómetro [Ω/km], y conociendo la longitud [km], la impedancia de cada línea ($Z_l = Z_l' \cdot l$).

Para cada nudo de la red se tienen en cuenta cuatro variables: potencia activa, potencia reactiva, tensión y ángulo de la tensión. Para poder resolver el FdC se clasifican los nudos del sistema en tres clases:

- Nudo referencia o compensador. Este nudo siempre es un nudo de generación cuyos valores de potencia generada no se fijan para que tomen el valor requerido para cumplir el balance de potencias en el sistema. Además, este nudo fija la tensión y ángulo como referencia fasorial.
- Nudos PQ. En este tipo de nudo se fijan la potencias netas del nudo (generadas menos demandada), tanto activa como reactiva, dejando libres las variables de tensión y ángulo.
- Nudos PV. En este tipo de nudo se especifica la potencia activa generada, y la magnitud de la tensión.

En la figura 24 se resume lo anterior:

Tipo de Bus	Variables conocidas o especificadas	Incógnitas obtenidas en el proceso de solución.
	P_D Q_D P_G Q_G $ V $ δ	P_G Q_G $ V $ δ
<u>Tipo de Bus</u>		
<u>Referencia</u>	• • • •	• •
<u>Bus PQ</u>	• • • •	• •
<u>Bus PV</u>	• • • •	• •

Figura 24. Clasificación de nudos [8]

Método de resolución

De entre los métodos que se suelen usar para resolver el FdC, el método usado ha sido el Newton-Raphson.

En la formulación del flujo de carga se definen las siguientes variables:

- P_i : potencia activa del nudo i.
- Q_i : potencia reactiva del nudo i.
- V_i : tensión del nudo i.
- δ_i : ángulo de tensión del nudo i.
- Y_{ik} : módulo de la admitancia de la línea del nudo i al nudo k.

- θ_{ik} : ángulo de la admitancia de la admitancia Y_{ik} .
- G_{ii} : parte real de la admitancia Y_{ii} ,
- B_{ii} : parte imaginaria de la admitancia Y_{ii} ,

A continuación se explica el proceso de resolución del FdC, en la figura 25 se muestra el diagrama de flujo que sigue el programa.

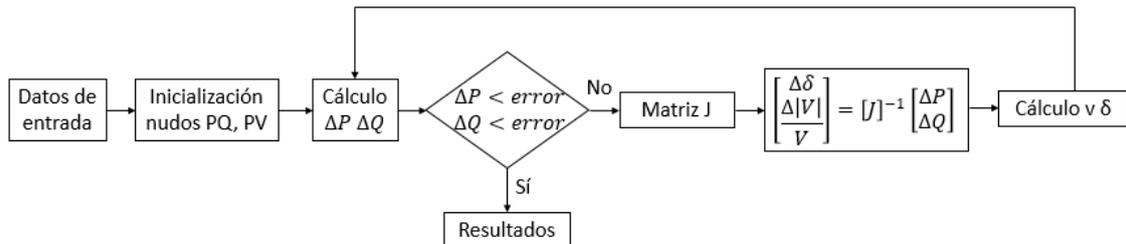


Figura 25. Diagrama flujo FdC

- 1) **Inicializar las variables.** Para los nodos PQ se conocen los valores de potencia activa y reactiva especificadas, y se inicializan los valores para tensión ($|V_i|$) y para ángulo (δ_i), generalmente igual a los valores del nudo referencia. Los nodos PV se especifican los valores de $|V_i|$ y P_i^{espec} , y se inicializan los valores de δ_i y Q_i^{espec} .

$$P_i^{espec} = P_{Gi} - P_{Di} \quad ; \quad Q_i^{espec} = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (15)$$

En este punto también se calcula la matriz de admitancias nodales del sistema Y_{bus} .

- 2) **Cálculos de potencias.** En los buses tipo PQ se calculan el valor de P y Q, así como el incremento de estos valores. En los buses PV se calcula el valor de P y su incremento.

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (16)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)$$

$$\Delta P_i = P_i^{espec} - P_i$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{espec} - Q_i \quad (17)$$

En caso que los valores de la ecuación (20) sean menores a un error definido (en el caso del simulador se ha empleado $1e-3$), el FdC se considera resuelto. En caso contrario prosigue el proceso.

- 3) **Cálculo de la matriz Jacobiana.** La matriz Jacobiana es la matriz numérica de las primeras derivadas parciales respecto de las variables. A continuación se definen los diferentes elementos que aparecen en esta matriz para resolver un FdC.

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

- Elementos de la diagonal y fuera de la diagonal (fd) de J_1

$$[J_1]_{diag} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (18)$$

$$[J_1]_{fd} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = -|V_i||Y_{ik}||V_k| \text{sen}(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (19)$$

- Elementos de la diagonal y fuera de la diagonal (fd) de J_2

$$[J_2]_{diag} = |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (20)$$

$$[J_2]_{fd} = \frac{\partial P_i}{\partial |V_k|} = |V_i Y_{ik} V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (21)$$

- Elementos de la diagonal y fuera de la diagonal (fd) de J_3

$$[J_3]_{diag} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = P_i - |V_i|^2 G_{ii} \quad (22)$$

$$[J_3]_{fd} = -|V_i Y_{ik} V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (23)$$

- Elementos de la diagonal y fuera de la diagonal (fd) de J_4

$$[J_4]_{diag} = |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (24)$$

$$[J_4]_{fd} = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_k|} = -|V_i||Y_{ik}||V_k| \text{sen}(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (25)$$

- 4) **Resolución.** En este punto se calculan los incrementos de ángulo y tensión de los nudos mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \frac{\Delta |V_i|}{V_i} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Hay que mencionar que si tenemos n nudos PV, entonces las ecuaciones que involucran a ΔQ y a ΔV serán eliminadas. Así mismo, las ecuaciones para el nudo de referencia se eliminan también.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, se procede a calcular los nuevos valores de tensión y ángulo:

$$\begin{aligned}\delta_i^1 &= \delta_i^0 + \Delta\delta_i^0 \\ |V_i^1| &= |V_i^0| + \frac{\Delta|V_i^0|}{V_i}\end{aligned}\quad (27)$$

Con estos valores obtenidos, se vuelve al punto 2, para calcular los incrementos de potencia.

Resultados

Una vez resuelto el FdC, se conocen todos los valores de potencia y tensión en cada uno de los nudos. Además se pueden obtener los valores de pérdidas en cada una de las líneas, mediante la siguiente ecuación:

$$P_{perd_{ik}} = I_{ik}^2 * R_{ik} \quad (28)$$

4.3.2. Cálculo de armónicos

Una vez resuelto el FdC, se procede a calcular los armónicos y su efecto en el sistema.

Datos de entrada

En primer lugar es necesario conocer la topología de la red y los datos de potencia, tensión e intensidad de cada uno de los nudos. Estos datos se obtienen del FdC ya resuelto.

También es necesario conocer el tipo de rectificador usado en las cargas no lineales y en que nudo se encuentran. Como el simulador es para uso ferroviario se utilizan rectificadores de 12 pulsos.

Desarrollando la serie de Fourier de este tipo de rectificador, se obtiene la relación de intensidad entre el armónico fundamental (f=50 Hz) y el resto de armónicos. Como ya se comentó en el apartado 3.3.1.1, los armónicos producidos por el rectificador de 12 pulsos siguen la ecuación $12k \pm 1$. Se han calculado los armónicos hasta el 50 (2500 Hz), siendo la relación de intensidad respecto al valor de la frecuencia fundamental:

Tabla 2. Relación de intensidades armónicas con respecto al fundamental

Armónico	11	23	25	35	37	47	49
Relación I_{armk}/I_{fund} (%)	9.0	7.6	4.3	4.0	2.8	2.7	2.0

Método de resolución

Se ha utilizado el método de superposición, por lo que se resuelven tantos circuitos como número de armónicos. Es decir, en caso de tener en cuenta n armónicos (además del fundamental), el simulador resolverá n veces el sistema con diferentes valores, para cada armónico k .

El proceso de resolución para cada circuito de superposición es el siguiente:

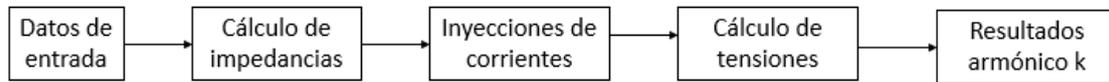


Figura 26. Diagrama de flujo cálculo armónico k

- 1) **Cálculo de impedancias.** En el apartado 4.2, se explica cómo afecta la frecuencia al comportamiento de los elementos de la red y el modelo para cada uno de los elementos. A partir de esas ecuaciones se obtienen los valores de las impedancias para el armónico k .
- 2) **Inyecciones de corriente.** Las cargas no lineales se modelan como fuentes de corrientes que inyectan intensidad en la red. Como se conoce el valor de la intensidad a frecuencia fundamental, se puede obtener el valor que inyectan los rectificadores, a sus respectivos nudos, a partir de la Tabla 2.

$$I_{ik} = \frac{I_{armk}}{I_{fund}} \cdot I_{i1} \quad (29)$$

- 3) **Resolución por método de nudos.** Conocidas las inyecciones y habiendo modelado todos los elementos de la red, se resuelve la red mediante el método de nudos:

$$[Y][V] = [I] \quad (30)$$

Resultados

Los resultados que se obtienen del estudio armónico son la tensión total de los nudos y la intensidad total que circula por cada uno de ellos.

- Tensión total por nudo: $V_{Ti} = \sum_{k=1}^n V_{ki}$
- Intensidad total por nudo $I_T = \sum_{k=1}^n I_k$
- Intensidad total por rama $I_{Tik} = \frac{V_{Ti} - V_{Tk}}{Z_{ik}}$
- Pérdidas por ramas $P_{perdik} = I_{Tik}^2 * R_{ik}$

Los resultados que se presentan, una vez finalizado el proceso de simulación, son los valores de THD_i y THD_v, junto a las señales de tensión e intensidad en cada nudo. Además se va a medir el porcentaje de pérdidas producido por los armónicos en cada una de las líneas.

5. Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado es la red ferroviaria de MT del metro de Yakarta (Indonesia). Los datos conocidos del sistema eléctrico es su esquema unifilar.

El esquema unifilar no proporciona la información completa necesaria por poder usar el simulador, por lo que se han considerado ciertos valores:

- **Rectificadores.** El rectificador que aparece en el esquema unifilar es de 12 pulsos, pero no se conoce si es controlado o no. Se ha supuesto que son rectificadores de 12 pulsos, cuyo factor de potencia es 1.
- **Cargas ferroviarias.** A partir del esquema se sabe dónde están y que se alimentan con rectificadores de 12 pulsos, pero no se conoce un valor de potencia. Se ha considerado que el consumo en estos nudos varía entre 2 y 6 MW.
- **Transformadores.** Se conoce su potencia nominal y la relación de tensiones, pero no su impedancia, por lo que se han considerado los valores típicos de la tabla 3. Además la relación r/x suele ser un 3-4%.

Tabla 3. Impedancia típica de cortocircuito de transformadores. IEC 60076-5

Short-circuit impedance at rated current	
Rated power kVA	Minimum short-circuit impedance %
25 to 630	4,0
631 to 1 250	5,0
1 251 to 2 500	6,0
2 501 to 6 300	7,0
6 301 to 25 000	8,0
25 001 to 40 000	10,0
40 001 to 63 000	11,0
63 001 to 100 000	12,5
above 100 000	>12,5

- **Thévenin.** Se ha considerado una potencia de cortocircuito de 10000 MVA.
- **Carga lineal.** Para la carga lineal que existe en el nudo 3, se ha considerado que consume 2 MW y 1,5 MVA.
- **Conductores.** Sí que se conoce el tipo de conductor usado. Son conductores 3xXLPE 300mm². La impedancia serie de estos conductores es $0.077 + j0.1 \Omega/km$. La capacidad de las líneas de estos conductores son 0.3 $\mu F/km$.

El sistema eléctrico tras las consideraciones y modificaciones se muestra en la figura 27.

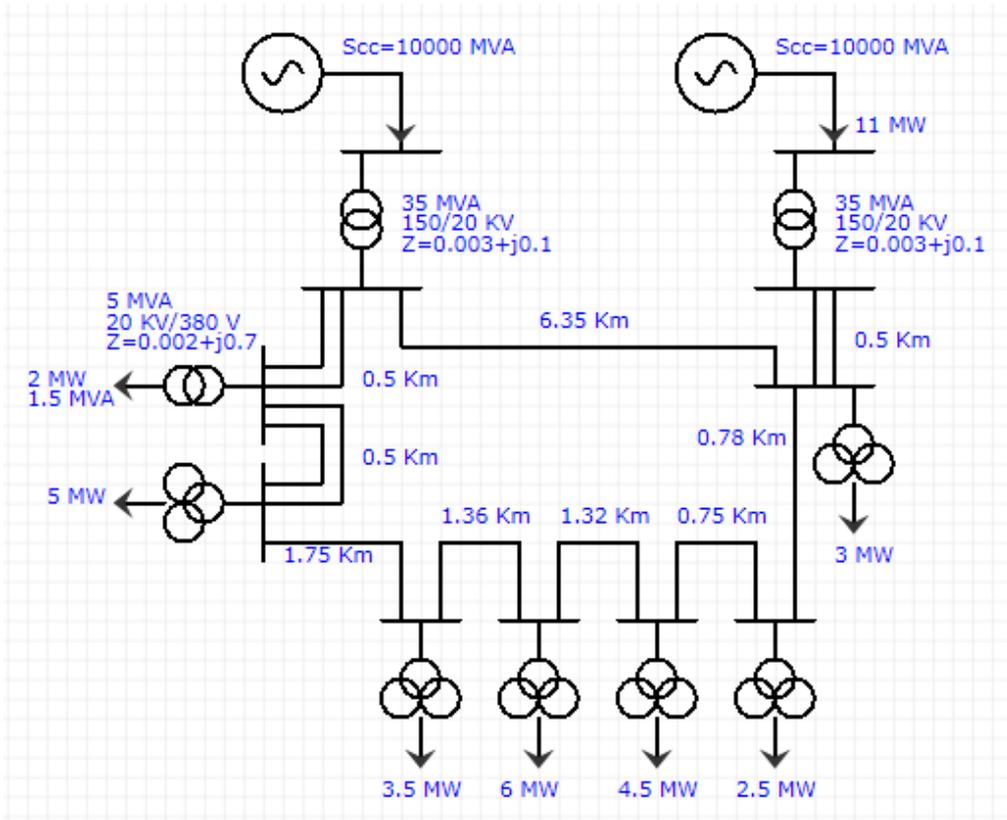


Figura 27. Sistema eléctrico caso estudio

5.1. Resultados

Una vez introducidos los datos en el simulador, los resultados que se obtienen son los siguientes.

Intensidades por los nudos

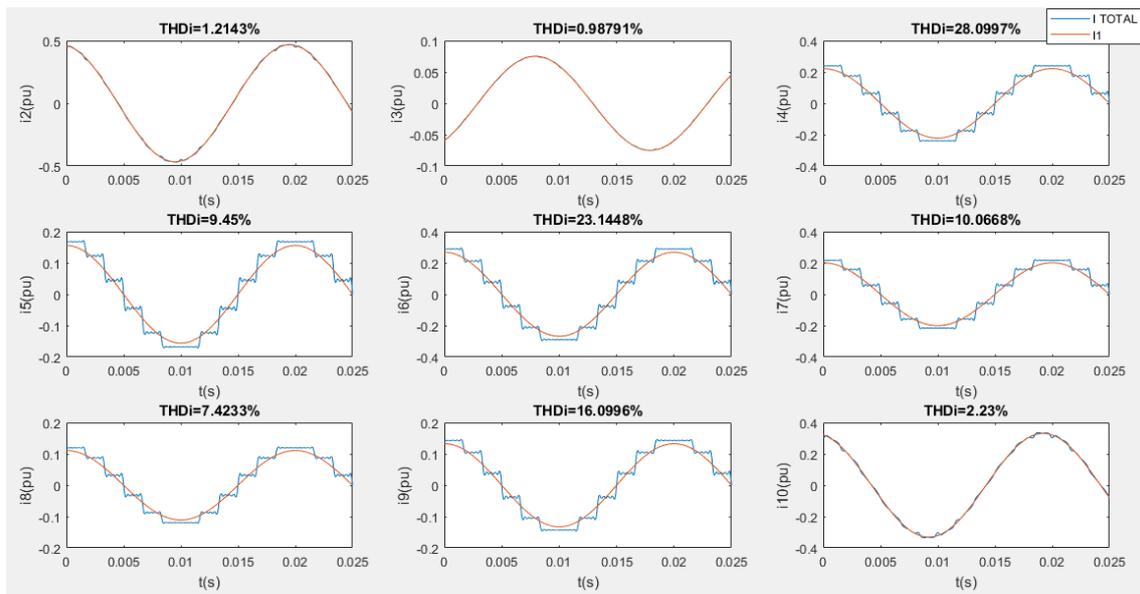


Figura 28. Intensidades armónicas por los nudos y THDi

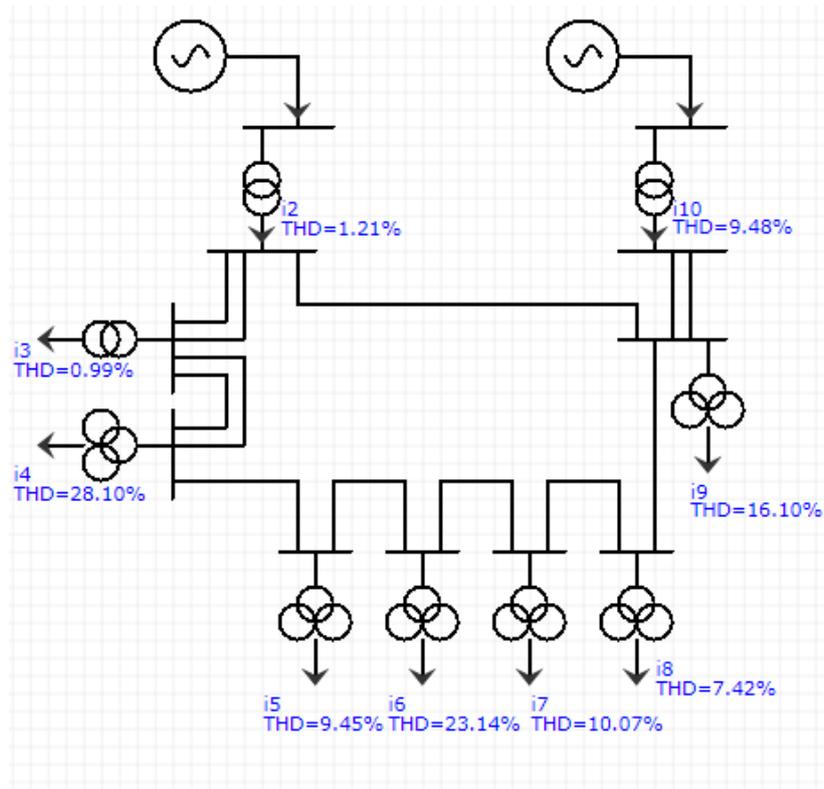


Figura 29. Resultados corrientes caso estudio

En la figura 28 se muestra las gráficas de intensidad total en cada uno de los nudos (azul) junto a las del primer armónico (rojo). Además, se indica el THD_i en cada uno de los nudos. En la figura 29 se muestra el THD_i en cada nudo, junto con la nomenclatura usada en las gráficas.

Se puede observar que en los nudos con cargas no lineales (i4 hasta i9) la intensidad total tiene 12 pulsos. Comparándola con la figura 14, se observa que la forma de la señal es prácticamente idéntica, por lo que la simulación del rectificador es correcta.

La corriente que absorbe la carga lineal (i3), prácticamente no se ve afectada, ya que van superpuestas casi a la perfección, además de que tiene un THD_i muy bajo, siendo la distorsión perfectamente despreciable.

La intensidad inyectada por la red de AT (i2 e i10) se puede ver como en el caso de i2, no afectan casi nada los armónicos, mientras que en i10 sí que se observa una pequeña distorsión en la onda. Sin embargo, para ambos caso el THD_i es muy bajo, por lo que las corrientes armónicas no afectarán

Observando los THD_i , se puede ver que en todos los nudos con carga no lineal el valor es superior al 10%, por lo que puede dañar a los equipos de la subestación de tracción.

Tensiones en los nudos

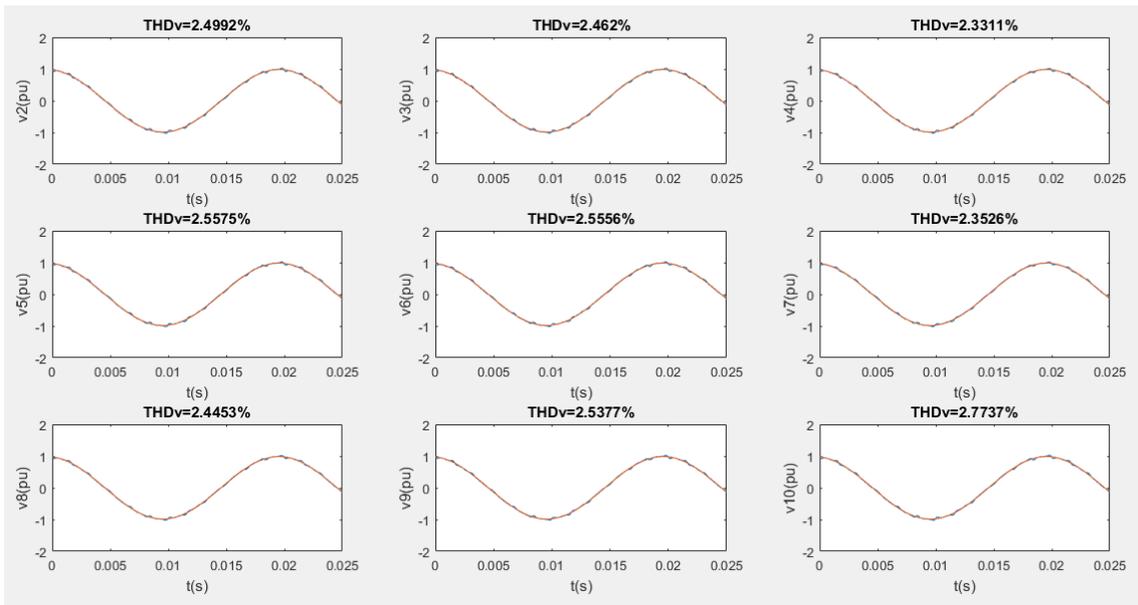


Figura 30. Tensiones armónicas en los nudos y THDv

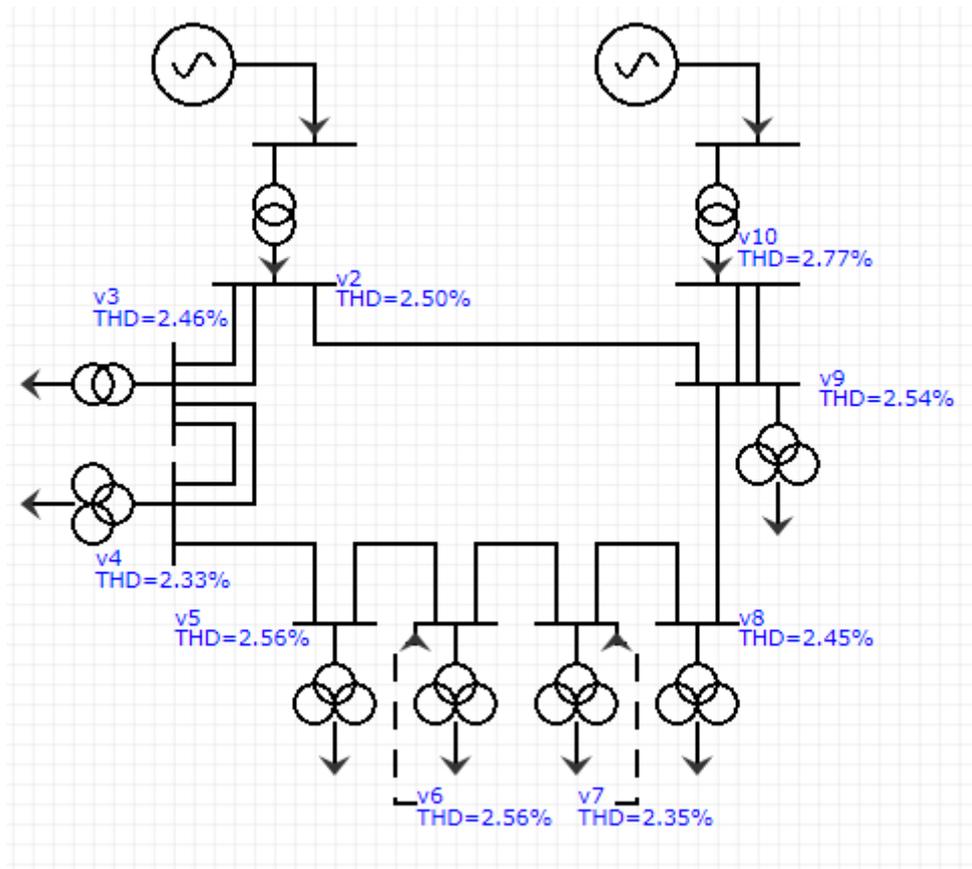


Figura 31. Resultados tensión caso estudio

A primera vista se ve que las tensiones sufren menos distorsión que las intensidades. Como las corrientes armónicas son muy pequeñas, la tensión no se ve tan afectada.

El THD_v es preocupante si es mayor al 5%. Como se puede observar en ningún caso se supera este valor, por lo que la distorsión de tensión no es necesaria.

Pérdidas en las líneas

Como ya se ha comentado, además de tensiones e intensidades se ha calculado el porcentaje que tienen las pérdidas provocadas por las corrientes armónicas, frente a las totales.

$$\%P_{perd} = \frac{\sum_{k=2}^n P_{perd_k}}{P_{perd_{TOT}}} \quad (32)$$

Los resultados se muestran en la tabla 4

Tabla 4. Pérdidas provocadas por corrientes armónicas

Línea	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	2-9
%Perd	0.02	0.12	2.30	0.25	0.14	0.39	0.88	0.33

Como se puede observar en la tabla 4, las pérdidas producidas por las corrientes armónicas son perfectamente despreciables, ya que su valor es muy pequeño frente a las pérdidas a frecuencia fundamental. Únicamente en la línea 4-5 se podrían tener en cuenta, ya que es un 2.30%.

6. Conclusiones

En este proyecto, se ha realizado una revisión del modelado de los diferentes elementos de un sistema eléctrico para altas frecuencias es muy complejo, pero se ha visto que existen modelos que se asemejan mucho al comportamiento de estos a la realidad.

Asimismo, se ha desarrollado un simulador en MATLAB que permite resolver cualquier tipo de red de MT ferroviaria. Únicamente hay que conocer los diferentes elementos de la red, y a partir de los cuales, se puede estudiar el efecto de los armónicos sobre ellos.

A partir de dicho simulador, se ha analizado un caso real que permite validar la pertinencia de las hipótesis realizadas. Se ha verificado que la simulación de los rectificadores de 12 pulsos es correcta, ya que la onda tiene la forma correcta.

Además de que los objetivos han sido cumplidos, el simulador puede ayudar mucho a la hora de diseñar una red de MT para alimentar sistemas ferroviarios. Se pueden obtener los valores de distorsión y evaluar si es necesario el uso de filtros, y con qué parámetros. No obstante, de cara a la utilización futura de esta herramienta en proyectos reales, sería necesario realizar una validación completa del simulador, validación que queda fuera del alcance de este proyecto.

De cara al futuro, resulta interesante la incorporación al simulador de una herramienta de diseño de filtros, que permitiría, una vez conocido los valores de distorsión, calcular el filtro necesario e incorporarlo al caso simulado para recalcular la distorsión.

Bibliografía

- [1] *“La electrificación ferroviaria”*, José Conrado Martínez Acevedo.
- [2] *“Instalaciones eléctricas de enlace y centros de transformación”*, McGraw-Hill.
- [3] *“Armónicos en sistemas eléctricos”*, José Dariel Arcila.
- [4] *“Rectificador multipulso”*, Universidad Alcalá.
- [5] *“Detección y filtrado de armónicos”*, Schneider Electric.
- [6] *“Análisis de señales”*, Alexander Ardila Cuellar.
- [7] *“Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica”*, Antonio Gómez Expósito.
- [8] *“Análisis de flujo de cargas”*, Line Coria Cisneros.
- [9] *“Simulación de sistemas eléctricos con cargas no lineales y variables en el tiempo”*, William Carvajal Carreño, Gabriel Ordoñez Plata, Andrés L. Moreno Wandurraga, Cesar A. Duarte Gualdrón.