

## **Análisis de las perturbaciones producidas por el sistema eléctrico de potencia de ferrocarriles de alta velocidad alimentados a frecuencia industrial**

### *Analysis of disturbances produced by the electric power system of high speed railways fed at industrial frequency*

José Conrado Martínez Acevedo

Jefe de Área de Proyectos de I+D+i  
Dirección de Ingeniería e Innovación, ADIF

#### **Resumen**

Los trenes de alta velocidad que funcionan con frecuencia industrial (frecuencia de red), son fuente de perturbaciones en las líneas eléctricas de alimentación y en el propio entorno ferroviario, afectando al resto de instalaciones existentes. Aunque estas perturbaciones no pueden ser eliminadas, sí son reducidas empleando diferentes técnicas y esquemas de conexión entre los elementos afectados (línea eléctrica de alimentación, subestación eléctrica de tracción y catenaria).

Palabras clave: Perturbación, línea eléctrica de alimentación, subestación eléctrica de tracción, catenaria.

#### **Abstract**

*High speed trains that operate with industrial frequency (network frequency) are a source of disturbances in the power lines and the own railway environment. In this case, the disturbances affect the rest of existing equipment. Although these disturbances cannot be removed, they can be reduced using techniques and schemes of connection between the affected elements (power line, railway electric substation and catenary).*

*Keywords: Disturbance, power line, railway electric substation, catenary.*

## **1. Introducción**

Puede afirmarse que el sistema eléctrico ferroviario empleado en ferrocarriles de alta velocidad, es un sistema perturbador como consecuencia de sus características técnicas de funcionamiento: Se trata de una carga alimentada con corriente alterna monofásica, variable en el espacio y en el tiempo, y de naturaleza muy singular debida, entre otros motivos, a la electrónica de potencia que equipan las locomotoras. Esta electrónica produce componentes armónicas de la corriente de tracción que circula por la catenaria para después retornar por el terreno circundante. Este hecho complica aún más el escenario operativo, teniendo en cuenta que el resto de instalaciones de la línea ferroviaria precisan de cables eléctricos para su funcionamiento.

En general, si bien la corriente alterna monofásica ofrece una ventaja importante sobre la corriente continua como es su facilidad de transformación, como inconveniente está su propiedad de inducir tensiones en conductores paralelos. Nótese que en la utilización normal de la corriente alterna en sistemas trifásicos, las inducciones de cada fase se ven compensadas por las inducciones de las otras fases. Este hecho no se da en la electrificación monofásica pues se produce una perturbación electromagnética que puede ser importante para las otras instalaciones ferroviarias.

Este artículo analiza las perturbaciones que este tipo de ferrocarriles producen sobre el entorno en el que se encuentran operando, así como las principales soluciones técnicas que permiten minimizarlas. Se entiende por perturbación a la interacción mutua entre diferentes sistemas eléctricos que se encuentran bajo tensión y por los cuales circulan corrientes eléctricas.

El análisis se reduce al caso de los sistemas de potencia ferroviarios que emplean la frecuencia industrial para su funcionamiento<sup>1</sup>. Este hecho implica la conexión directa al sistema eléctrico general de potencia (Figura 1).

Las perturbaciones producidas por el tren de alta velocidad pueden ser clasificadas en dos grupos (Figura 2):

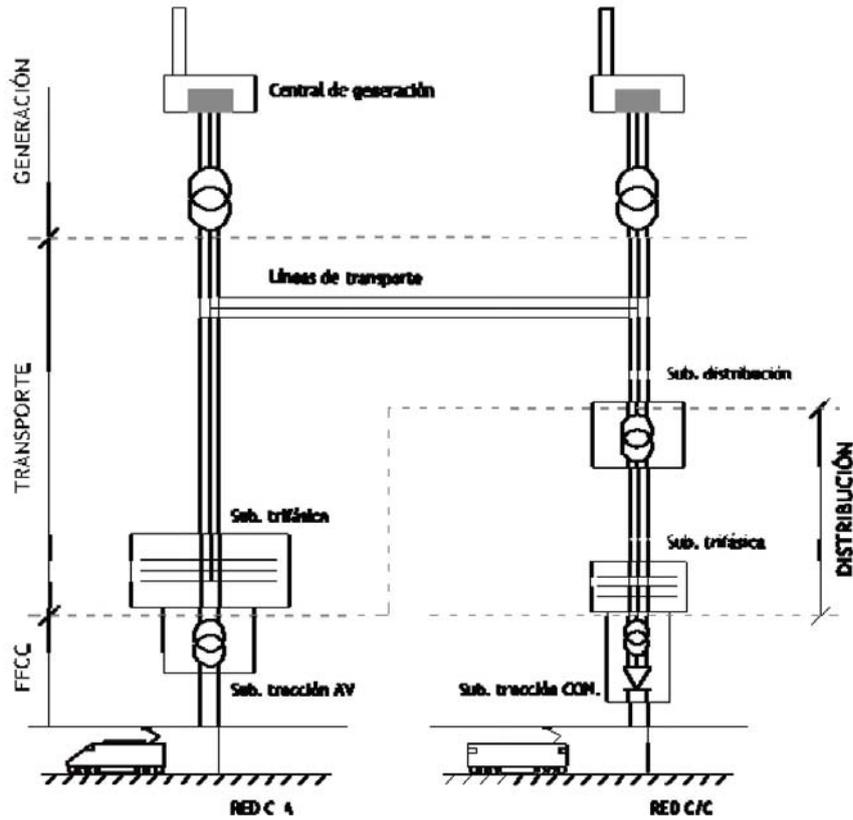
Perturbaciones producidas sobre la línea eléctrica de transporte, como consecuencia de encontrarse conectada a ella<sup>2</sup>.

Perturbaciones sobre las instalaciones existentes en el entorno de la línea ferroviaria, ya que la catenaria se encuentra muy próxima a los cables y equipos de estas instalaciones, produciendo interferencias electromagnéticas.

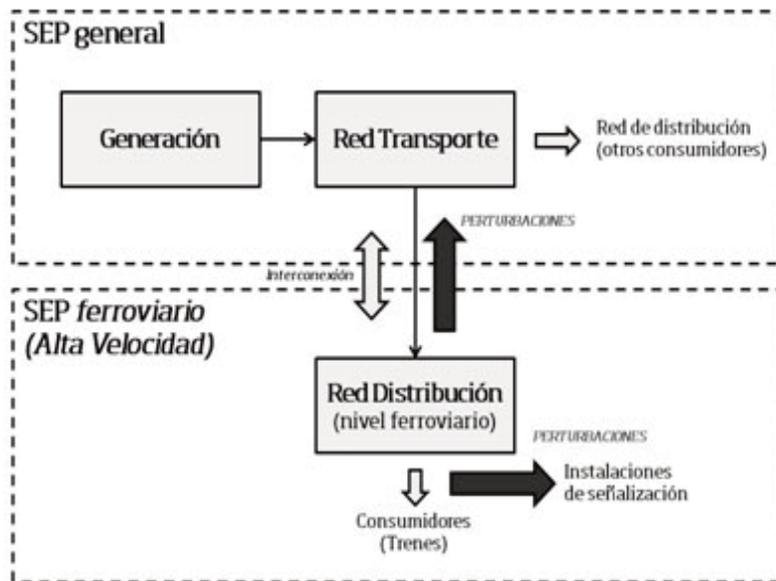
---

<sup>1</sup> Este es el caso de la mayor parte de los ferrocarriles que emplean corriente alterna para su funcionamiento. Por el contrario, diversas administraciones ferroviarias europeas emplean frecuencia especial en sus redes (16,7 Hz), no siendo aplicable el estudio aquí contemplado.

<sup>2</sup> Debido a las altas potencias de cortocircuito que se precisan, la red eléctrica de los ferrocarriles de alta velocidad suele conectarse directamente a líneas de transporte por lo que éstas actúan como auténticas líneas de distribución de la energía eléctrica demandada.



**Figura 1.** Esquema de conexión eléctrica entre el sistema ferroviario y el sistema de transporte y generación. (Fuente propia).



**Figura 2.** Representación de las perturbaciones producidas por el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) ferroviario en el SEP general (línea de transporte) y en su propio entorno (por ejemplo, instalaciones de señalización). (Fuente propia).

## **2. Planteamiento del problema**

En el estudio de los distintos tipos de orígenes, medios de propagación e influencias que las perturbaciones pueden ejercer sobre otros circuitos distintos de los que las generan, se manejan diferentes conceptos que pueden resumirse en los siguientes:

- Origen o fuente de la perturbación.
- Medio de propagación.
- Receptor afectado.

En el caso de un sistema eléctrico de potencia ferroviario de alta velocidad, el esquema a considerar sería el que sigue:

- Origen: Tren de alta velocidad.
- Medio de propagación: Catenaria, equipos de potencia de las subestaciones de tracción y cables de las instalaciones cercanas.
- Receptores: Línea eléctrica de transporte e instalaciones ferroviarias.

### ***Técnicas generales de eliminación***

Por lo general, hay tres modos de eliminar la perturbación producida:

- Eliminándola en la propia fuente.
- Disminuyendo la energía transmitida a través del medio de propagación.
- Insensibilizando el receptor.

Considerando de nuevo el caso del sistema eléctrico de potencia ferroviario de alta velocidad:

- Ya que la electrónica de potencia que equipan las locomotoras es responsable de la generación de armónicos de corriente, éstos pueden ser atenuados mediante la instalación de filtros o modificando la estrategia de control de los equipos de la propia locomotora. Cabe destacar que estos armónicos, con frecuencia múltiplo de la frecuencia industrial, afectan tanto a la línea de transporte como a las líneas de comunicación cercanas al trazado ferroviario. Este sería un caso de eliminación de la perturbación en la propia fuente.
- Para actuar sobre el medio por el que se propagan las interferencias electromagnéticas, que en el caso de las líneas ferroviarias son principalmente cables, deberá disminuirse la energía de la perturbación a través del acoplamiento, teniendo que actuar sobre el diseño del propio cable. Este diseño consiste en la incorporación de una pantalla metálica que rodea los conductores de los cables y que permite atenuar la propagación de los campos eléctricos, magnéticos y electromagnéticos.
- Interesa reducir la corriente de tracción que circula por la catenaria y por el terreno. Para ello, y aunque no se puede eliminar la componente fundamental de esta corriente, el empleo de configuraciones específicas de alimentación a la catenaria, permitirá que la circulación de esta corriente disminuya (estas configuraciones serán explicados en próximos apartados).

- Del mismo modo, debe considerarse que para suministrar las potencias eléctricas requeridas, en los ferrocarriles de alta velocidad se incrementa la tensión de funcionamiento y se reduce la corriente que circula por la catenaria<sup>3</sup>, siendo por tanto una manera indirecta de reducir las perturbaciones.

### **3. Perturbaciones sobre las instalaciones existentes en la línea ferroviaria**

En el caso de las perturbaciones en el entorno de la línea ferroviaria, éstas se centran en el circuito de tracción eléctrica y en sus componentes. El motivo principal se debe a la circulación de corrientes eléctricas elevadas y muy especialmente a la existencia de corrientes de retorno por tierra.

Estas perturbaciones son principalmente interferencias electromagnéticas de tipo conducido y radiado. Ambos tipos pueden interrumpir, degradar o limitar el rendimiento de los sistemas afectados, incapacitándolos para realizar la misión para la que fueron diseñados y produciendo riesgo para la seguridad de las instalaciones e incluso de las personas. Es por ello que su tratamiento debe ser especialmente considerado en el diseño y operación posterior. Es importante señalar que las perturbaciones transmitidas son siempre proporcionales a la distancia que existe entre los cables de señalización y los cables pertenecientes al sistema eléctrico de potencia.

Considerando el caso específico de las instalaciones de señalización, los cables empleados serían los transmisores de las perturbaciones producidas por el tren hasta los propios equipos de señalización. Según se ha señalado, la pantalla de los conductores es el medio de reducir las interferencias, minimizando la energía transmitida.

Centrando el análisis en el caso de las interferencias radiadas, existen dos tipos de perturbaciones:

- Perturbación o acoplamiento capacitivo.
- Perturbación o acoplamiento inductivo.

El acoplamiento capacitivo, también denominado acoplamiento electrostático, se produce a causa de las capacidades que existen entre los cables del sistema perturbado y la fuente de interferencias. En este tipo de perturbaciones la severidad depende de la velocidad de cambio de las tensiones en la fuente de interferencias y de la impedancia que exista entre ambos elementos. Este efecto se puede cuantificar, por ejemplo, calculando las capacidades entre los cables de la catenaria y los cables del sistema de señalización.

Debido a las perturbaciones capacitivas, determinadas partes de la instalación pueden quedar sometidas a altas tensiones. Esto se produce cuando dichas partes no están puestas a tierra y discurren en paralelo a las instalaciones sometidas a tensión. Considerando que las pantallas son conectadas a tierra, estas perturbaciones no suelen ser importantes.

Las perturbaciones inductivas son producidas por las variaciones de corrientes que circulan por los cables de la catenaria y principalmente, por la corriente que retorna por tierra. Las variaciones de corriente en un conductor modifican las distribuciones del campo magnético, y a su vez, estas variaciones de campo originan tensiones inducidas en el resto de conductores. Estas perturbaciones son más importantes que las anteriores, debiendo ser analizadas en detalle mediante el cálculo de los enlaces de flujo existentes.

---

<sup>3</sup> Así, si se considera una tensión de 3 000 V C/C en el caso de ferrocarriles convencionales y una tensión de 25 000 V C/A en ferrocarriles de alta velocidad, se tiene que la tensión se aumenta en ocho (8) veces, por lo que a igualdad de potencia, la corriente que debe circular es la octava parte, siendo las afecciones producidas menores.

#### 4. Perturbaciones sobre la línea eléctrica de transporte

Estas perturbaciones son las siguientes (Figura 3):

Desequilibrios de las intensidades y tensiones de línea en los diferentes puntos de la red, originados por el carácter de la carga monofásica.

Corrientes y tensiones armónicas que producen el fenómeno de distorsión armónica. Suelen originarse por los equipos electrónicos de la locomotora e incluso por los arcos eléctricos producidos en la interacción entre el pantógrafo y la catenaria. La distorsión armónica afecta a las características de la tensión de la red, deteriorando la calidad del servicio (de esta manera, aquellos usuarios con aparatos eléctricos y electrónicos sensibles a las deformaciones de la onda de tensión, serán los más afectados).

Fluctuaciones de tensión en la red. Tiene su origen en las variaciones del régimen de la carga, es decir, en la aleatoriedad de las circulaciones de los trenes y en la variabilidad de la potencia demandada por cada uno de ellos. Las fluctuaciones de tensión provocan variaciones en la tensión de alimentación a los usuarios próximos al punto de conexión común (próximos a la subestación eléctrica de tracción).

Huecos de tensión. Son provocados por defectos en el circuito de tracción originando efectos nocivos que pueden llegar a ser inaceptables por los usuarios conectados en el entorno del punto de conexión común.

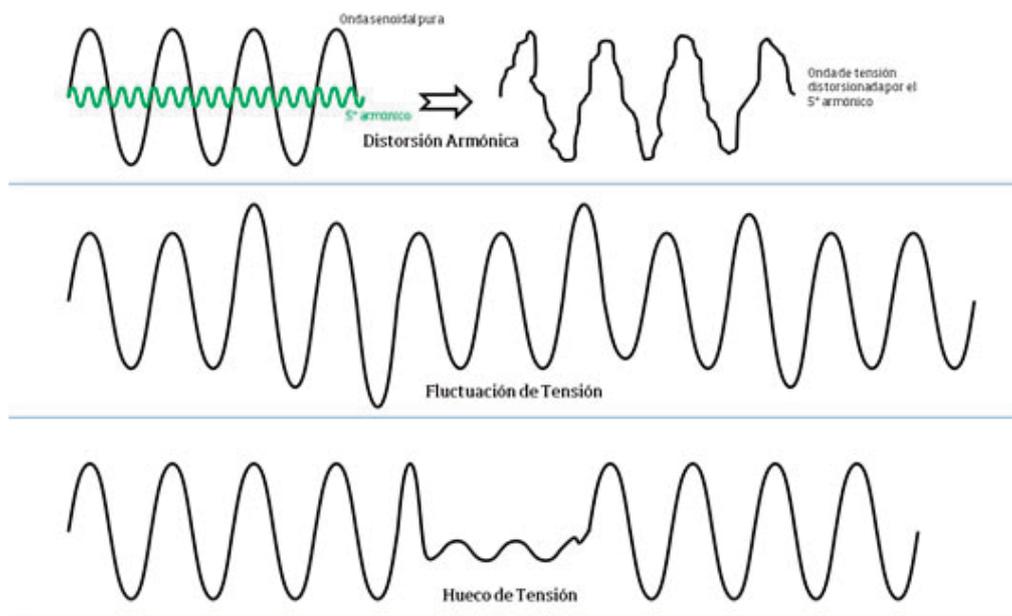
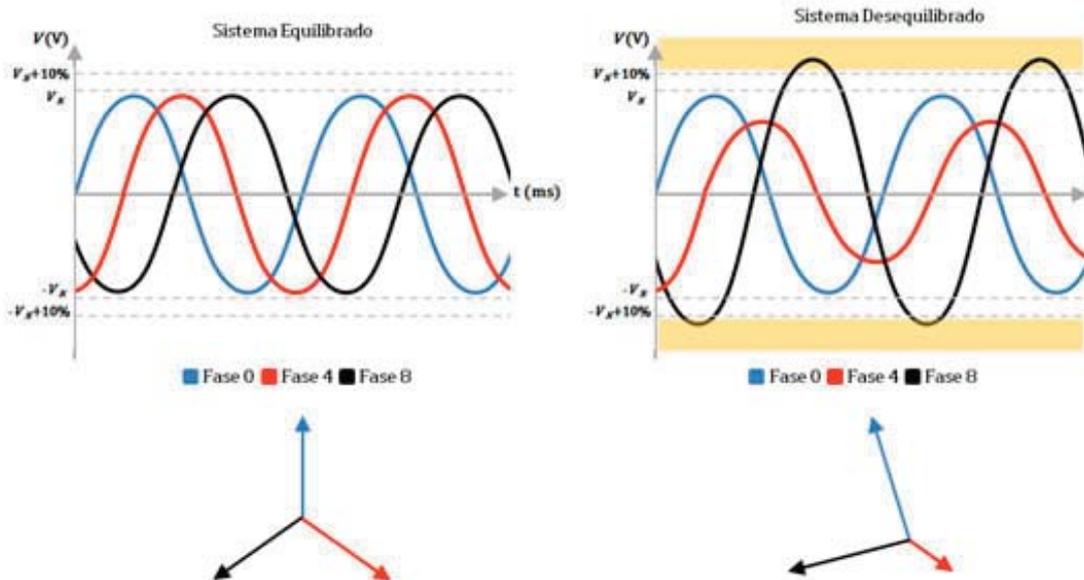


Figura 3. Perturbaciones sobre la línea eléctrica de transporte. (Fuente propia).

#### *Desequilibrios de intensidades y tensiones*

De todas las perturbaciones producidas sobre la línea de transporte, los desequilibrios de las intensidades y tensiones de línea son las más importantes (Figura 4). Si siempre se empleara la misma fase eléctrica de la red, el sistema trifásico sería descompensado. Por ello en la alimentación eléctrica de las líneas de alta velocidad siempre se alternan o rotan las fases de la red.



**Figura 4.** Izq.) Sistema trifásico equilibrado; Dcha.) Sistema trifásico desequilibrado. (Fuente propia).

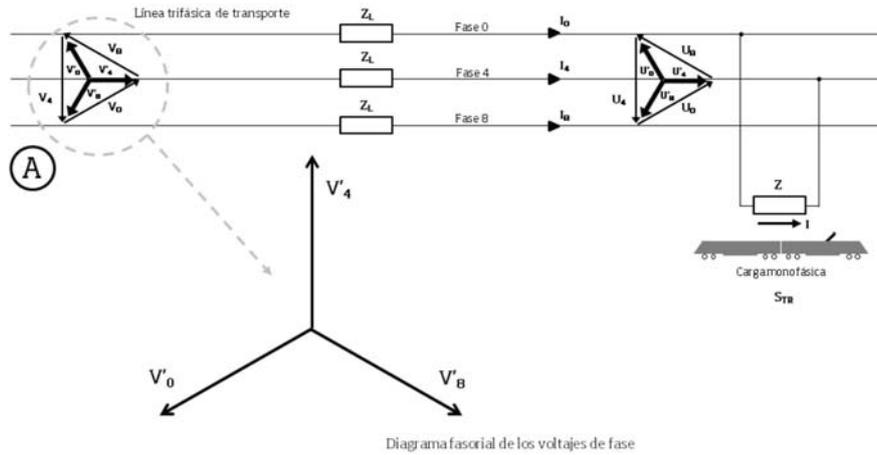
En la Figura 5 se ha representado una red trifásica a la que se encuentra conectada una carga monofásica representada por un tren de alta velocidad. Si se consideran los sistemas desequilibrados de intensidades y tensiones de un punto A cualquiera de la red, ambos pueden representarse por dos sistemas simétricos equilibrados, uno directo y otro inverso, expresando el cociente de las componentes simétricas respectivas el grado de desequilibrio. Aplicando la transformación de *Fortescue* al cálculo de las componentes simétricas, se obtienen los valores correspondientes, directo e inverso, de la tensión entre fases en el punto A. La relación en última instancia, da el siguiente valor práctico aproximado del factor de desequilibrio en tensiones:

$$\tau = \frac{V_{0i}}{V_{0d}} \cong \frac{S_{TR}}{S_{CC}}$$

En la anterior ecuación:

- $\tau$  es el factor de desequilibrio en tensiones.
- $V_{0i}$  es la tensión inversa.
- $V_{0d}$  es la tensión directa.
- $S_{TR}$  es la potencia monofásica demandada por el tren.
- $S_{CC}$  es la potencia de cortocircuito de la línea de transporte.

Este factor de desequilibrio en tensión, el más importante a considerar, condiciona en gran medida el tipo de conexión eléctrica a emplear entre la subestación de tracción ferroviaria y la línea de transporte.



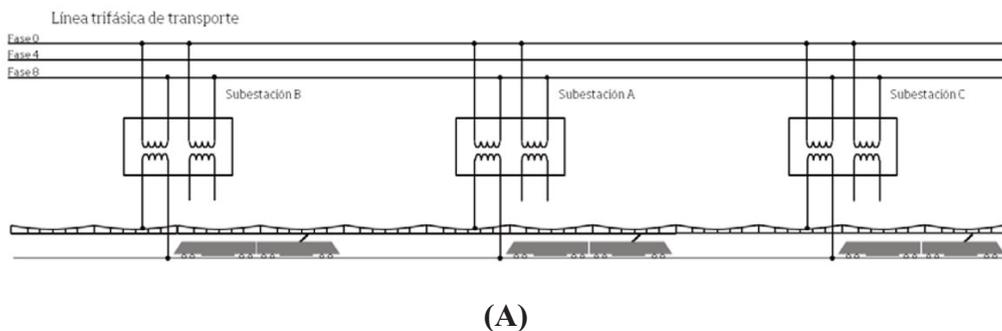
**Figura 5.** Representación esquemática de una carga monofásica (tren) conectada a la línea trifásica de transporte. Esquema de un sistema trifásico equilibrado. (Fuente propia).

La normativa técnica de la red siempre establece el grado de desequilibrio que se puede producir. Así por ejemplo, en el caso de la red eléctrica de transporte española, su operador técnico<sup>4</sup> establece que este desequilibrio no debe ser superior al 0,7% para una duración de minutos y del 1% para una duración de segundos. Admitiendo cargas de entre 50 MW y 100 MW, el sistema de alimentación debe tener un nivel de cortocircuito de al menos 5 000 MVA a 10 000 MVA para que permanezca dentro de los requisitos de desequilibrio.

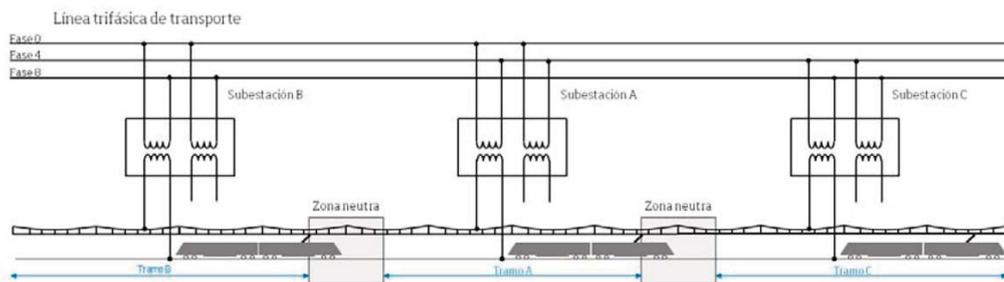
## 5. Técnicas y esquemas de conexión entre la subestación eléctrica y la línea de transporte

Aunque la solución ideal para la operación ferroviaria sería conectar las subestaciones de tracción de acuerdo a la Figura 6 (A), en la práctica las subestaciones se conectan alternativamente a las fases de la red según se muestra en las Figuras 6 (B) y 6 (C). Dichas conexiones suelen denominarse *conexiones monofásicas puras*.

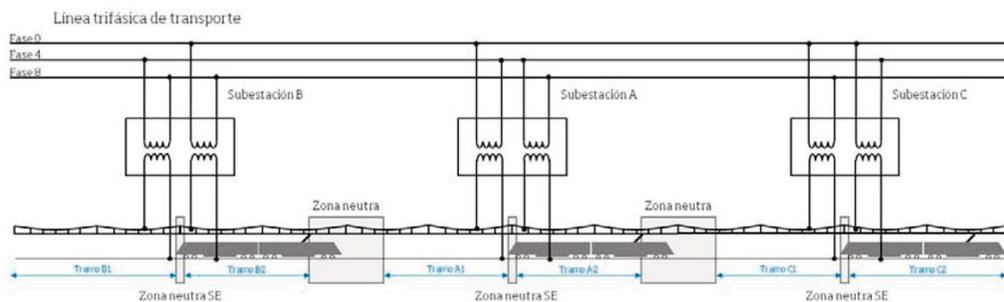
En todos los casos las tensiones que pueden aplicarse entre los terminales del devanado primario de los transformadores de potencia, son las tensiones compuestas que pueden obtenerse combinando las tres tensiones de fase de la red trifásica de transporte.



<sup>4</sup> Red Eléctrica de España (REE).



(B)



(C)

Figura 6. Conexiones monofásicas puras en subestaciones de tracción de C/A. (Fuente propia).

En el caso indicado, se considera una red con una tensión nominal de 220 ó 400 kV. Dichas tensiones, representadas en la Figura 7, se encuentran desfasadas 120° ideales. En la figura se considera además que presentan índices horarios 0, 4 y 8. También se han representado las tensiones compuestas con índices horarios 1, 3, 5, 7, 9 y 11, obtenidas combinando las tres tensiones de fase anteriores.

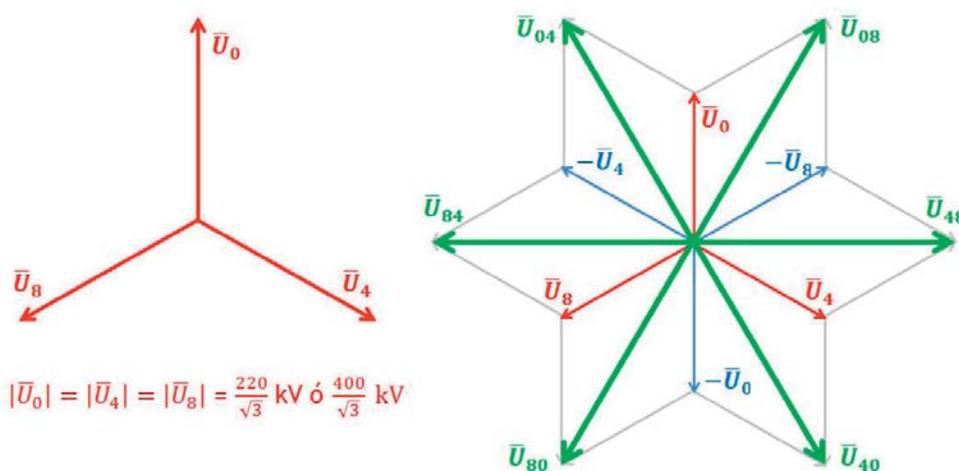
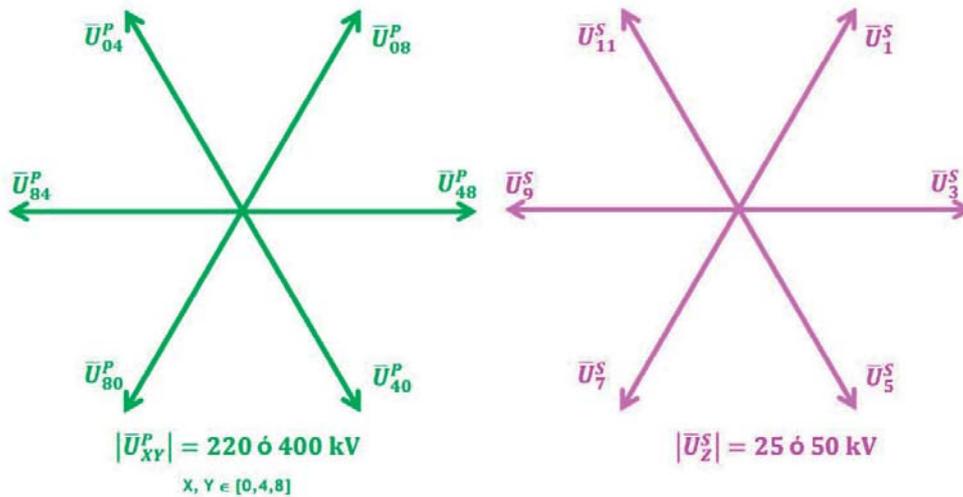


Figura 7. Izq.): Tensiones simples o de fase de la red de transporte; Dcha.): Tensiones compuestas mediante la combinación de las tensiones de fase. (Fuente propia).

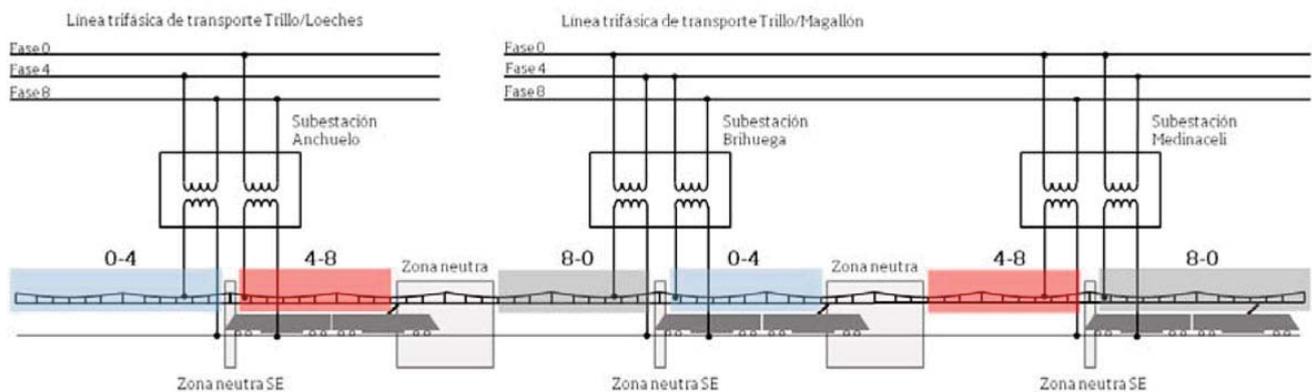
Precisamente las tensiones posibles en el devanado primario de los transformadores de la subestación de tracción, son las tensiones compuestas mostradas en la Figura 7, habiendo sido representadas de manera más sencilla en la Figura 8.



**Figura 8.** Izq.): Tensiones compuestas en el primario (P); Dcha.): Tensiones compuestas en el secundario (S). (Fuente propia).

Por su parte, las tensiones en el devanado secundario de los transformadores se obtienen aplicando su relación de transformación a las tensiones primarias (se considera una tensión nominal de 25 000 ó 50 000 V). Los índices horarios de las tensiones secundarias son 1, 3, 5, 7, 9 y 11, no habiendo variado pues para la obtención de dichas tensiones sólo se ha multiplicado por un escalar a las tensiones primarias.

En el caso de la Figura 6 (B) se dice que la rotación de fases es por subestación eléctrica (los dos transformadores están conectados a la misma fase). En el caso de la Figura 6 (C) la rotación es por transformador. A modo de ejemplo, en la Figura 9 se ha recogido el esquema de rotación de fases eléctricas de la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona, en el trayecto comprendido entre las subestaciones eléctricas de Anchuelo y Medinaceli. Como puede observarse se trata de una rotación por transformador (Figura 6 (C)).



**Figura 9.** Esquema de rotación de fases eléctricas entre Anchuelo y Medinaceli (LAV Madrid-Barcelona). (Fuente propia).

### Conexiones especiales

Las conexiones vistas en las Figuras 6 (B) y 6 (C) suelen ser las que se emplean cuando hay suficiente potencia de cortocircuito en la red trifásica de alimentación a la subestación. Se observa que los transformadores de potencia de la subestación ferroviaria no se conectan a las tres fases.

Ahora bien, si la red trifásica de alimentación no dispone de suficiente potencia de cortocircuito, no se puede emplear una conexión monofásica pura, existiendo otras conexiones especiales como la conexión *Scott*, la conexión en *V* y la conexión *Le Blanc* entre otras. Este sería el caso de la red ferroviaria japonesa, donde este tipo de conexiones son implementadas frecuentemente debido a que en ocasiones la alimentación a los trenes de alta velocidad (Shinkansen) es suministrada desde redes eléctricas de bajas prestaciones.

La conexión Scott es la manera de obtener dos fases (separadas  $90^\circ$  eléctricos) a partir de una fuente de alimentación trifásica, cuyas fases se hallan separadas  $120^\circ$  eléctricos. Esta conexión consiste en dos transformadores monofásicos con idéntica potencia nominal. Uno tiene derivación en su bobinado primario al 86,6% de voltaje a plena carga. Están conectados tal y como se ilustra en la Figura 10. La derivación del transformador T1 al 86,6%, está conectada a la derivación central del transformador T2.

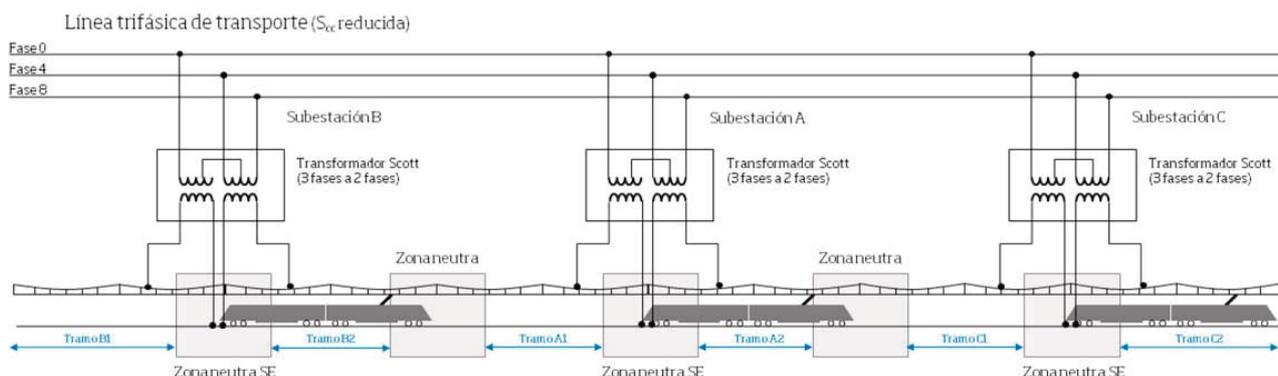


Figura 10. Conexión Scott en subestaciones eléctricas de tracción de C/A. (Fuente: Autor).

### Dispositivo FACT

Puede darse el caso en el que la línea de alta velocidad se encuentra alejada de una línea trifásica de transporte con alta potencia de cortocircuito. En esta situación podría emplearse una línea de menor potencia y prestaciones, aunque habrá que controlar el desequilibrio producido. Si el empleo de conexiones especiales no es aconsejable por determinados motivos, un dispositivo FACT también permitiría conseguir una energía de calidad adecuada con alimentación a tensiones de línea más bajas. Estos equipos son dispositivos estáticos que se controlan mediante sistemas de control junto con electrónica de alta potencia

En general, el empleo de un FACT mejora las afecciones que el sistema eléctrico ferroviario de corriente alterna produce a la línea trifásica de alimentación independientemente de su tensión nominal. Debe tenerse en cuenta que el incremento de tráfico, así como la puesta en servicio de nuevas tipologías de trenes, pueden recomendar el empleo de estos equipos en un momento determinado de la vida útil de la línea ferroviaria.

Se pueden utilizar tanto para compensar desequilibrios como para apoyar dinámicamente las caídas de tensión en la catenaria y reducir los armónicos procedentes de locomotoras equipadas con tiristores.

### La zona neutra de separación de fases eléctricas

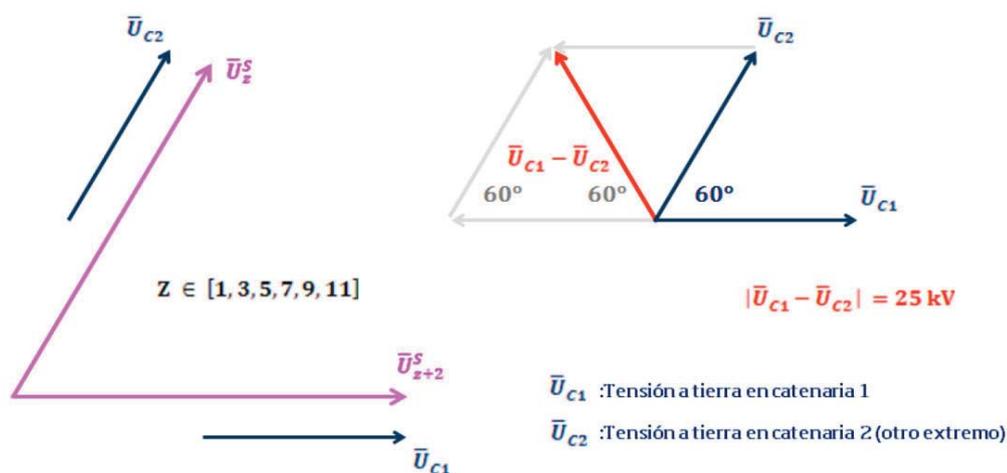
La transición del tren entre tramos de catenaria alimentados a distinta fase eléctrica, debe ser convenientemente proyectada o de lo contrario podría producirse una conexión eléctrica entre dos fases de la línea de transporte. Esta zona de transición es denominada *zona neutra de separación de fases eléctricas*.

En el caso de adoptar una rotación por subestación, no será necesario instalar una zona neutra en ella sino sólo entre subestaciones colaterales. En el caso en el que la rotación se realice por transformador de potencia, sí se precisará una zona neutra en la subestación y otra entre subestaciones colaterales (Figura 6).

Un aspecto importante de la zona neutra se refiere a la diferencia de tensión eléctrica existente entre sus extremos, es decir, entre las fases eléctricas que alimentan ambos extremos. Esta diferencia de tensión debería ser siempre la tensión nominal de la catenaria con objeto de no tener problemas de aislamiento con la catenaria sin tensión. Sólo si los índices horarios de las tensiones de los transformadores de potencia colaterales son consecutivos (desfase de  $60^\circ$ ), la tensión eléctrica entre los extremos de la zona neutra es del orden de la tensión nominal del secundario del transformador. Si los índices no son consecutivos (desfase de  $120^\circ$ ), la tensión entre extremos será del orden de  $\sqrt{3}$  veces la tensión nominal del secundario.

En efecto, de acuerdo a la distribución de tensiones compuestas del devanado secundario del transformador (Figura 8), se puede demostrar que sólo si los índices horarios de estas tensiones son consecutivos (1-3, 3-1, 3-5, 5-3, 5-7, 7-5, 7-9, 9-7, 9-11 ó 11-9), la tensión entre ambos extremos de la zona neutra no es superior a la tensión nominal de alimentación a la catenaria. En el análisis no se considera que dos transformadores contiguos, dentro de la misma subestación o de subestaciones colaterales, estén conectados a tensiones compuestas con índices horarios contrarios (1-7, 7-1, 3-9, 9-3, 5-11 ó 11-5) pues ello significaría que se han conectado entre las mismas fases lo cual no es posible por el desequilibrio producido.

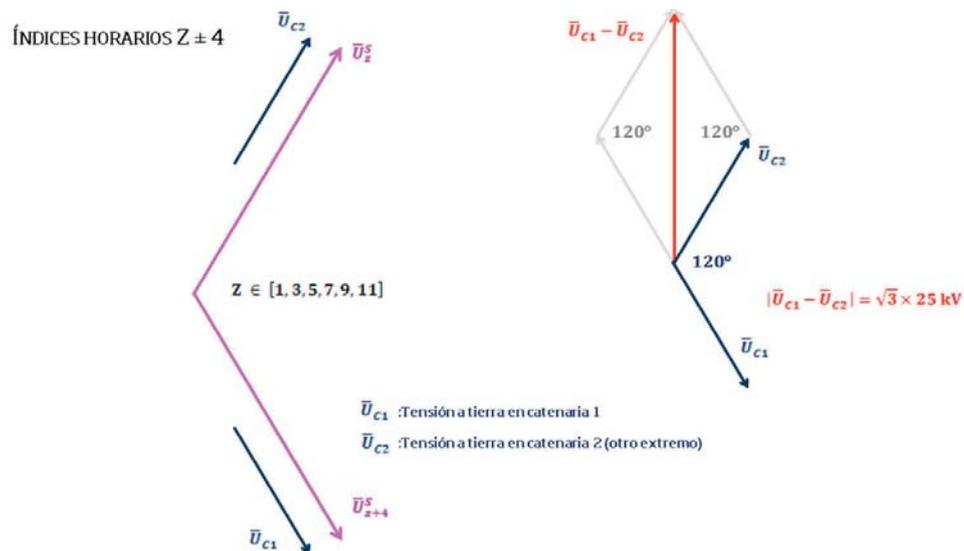
En la Figura 11 se muestra el esquema fasorial de la diferencia de tensión entre extremos de la zona neutra en el supuesto de que los índices horarios de las tensiones entre dos transformadores contiguos sean consecutivos ( $Z \pm Z+2$ ).



**Figura 11.** Diferencia de tensión entre extremos de la zona neutra considerando que los índices horarios de las tensiones entre transformadores contiguos son consecutivos ( $Z \pm Z+2$ ). (Fuente propia).

De la figura anterior se deduce que la tensión entre extremos de la zona neutra es la tensión de alimentación a la catenaria (25 000 V).

Por el contrario, en la Figura 12 se muestra la diferencia de tensión entre extremos de la zona neutra cuando los índices horarios de dos transformadores contiguos no son consecutivos (1-5, 5-1, 3-7, 7-3, 5-9, 9-5, 7-11, 11-7, 9-1, 1-9 ó  $Z \pm Z+4$ ).



**Figura 12.** Diferencia de tensión entre extremos de la zona neutra en el supuesto de que los índices horarios de las tensiones entre dos transformadores contiguos no son consecutivos ( $Z \pm Z+4$ ). (Fuente propia).

Se deduce de la figura anterior que la diferencia de tensión entre extremos de la zona neutra en catenaria es superior a 25 000 V, concretamente  $\sqrt{3} \times 25 \text{ 000 V}$  (@ 43 300 V).

## 6. Técnicas y esquemas de conexión entre la subestación eléctrica y la catenaria

En el apartado 5 se ha podido analizar cuáles pueden ser los criterios y características de conexión de la subestación de tracción a la línea de transporte. En este apartado se analizan las posibles conexiones de la subestación con la catenaria.

Un criterio importante a considerar en la conexión eléctrica de ambos elementos, es el número de puntos de conexión a la red de transporte de los que se dispone. Este número suele ser condicionado a si la red es sólo empleada para la alimentación de la línea de alta velocidad o tiene otros usos que impide la conexión ex profeso al ferrocarril. En todo caso se considera que la red tiene suficiente potencia de cortocircuito para alimentar al tren de alta velocidad.

Como puede intuirse, si el número de puntos de conexión es pequeño y espaciado, la caída de tensión que se puede producir en la catenaria, entre la subestación y el punto más alejado a la misma, podría ser inadmisibles para el escenario de tráfico más restrictivo.

Otro criterio a tener en cuenta es la circulación de corriente de retorno por tierra y por carril, algo que no es deseable considerando las perturbaciones producidas sobre otras instalaciones cercanas. Como se verá a continuación, dependiendo de la conexión empleada, esta circulación de corriente podrá ser disminuida.

### ***Conexión monofásica simple***

La conexión monofásica simple es la configuración adoptada cuando se dispone de suficientes puntos de conexión a la línea de transporte. En este caso la distancia entre subestaciones colaterales suele estar entre 35 y 40 kilómetros.

Si se considera un valor de tensión nominal  $V$  en la catenaria, esta conexión suele denominarse sistema  $1 \times V$  kV. Teniendo en cuenta el valor normalizado de tensión eléctrica en catenaria (25 000 V), se denomina sistema  $1 \times 25$  kV.

El esquema de funcionamiento está representado en la Figura 13.

Generalmente los transformadores de la subestación van conectados a las mismas fases eléctricas por lo que pueden funcionar en paralelo. De esta forma todo el tramo de la subestación está conectado a la misma fase eléctrica, no siendo necesario instalar una zona neutra de separación de fases en dicha subestación. El devanado primario de cada transformador se conecta a una tensión compuesta de la red y transforma dicha tensión a la de funcionamiento del tren (25 000 V). El devanado secundario se conecta por tanto entre la catenaria y tierra.

Esta conexión es económica y fácil de explotar y mantener, si bien ha de disponerse de suficientes puntos de conexión a la red de transporte. Como puede observarse en la Figura 13, la energía se transmite desde la subestación al tren a través de la catenaria (marca azul) y de un conductor de refuerzo si existiese. El retorno de corriente se realiza por los carriles de la vía, el conductor de retorno y el terreno circundante.

### ***Conexión con autotransformador***

La conexión con autotransformador es la configuración adoptada cuando no se dispone de suficientes puntos de conexión a la línea de transporte. En este caso la distancia entre subestaciones colaterales suele estar entre 60 y 80 kilómetros.

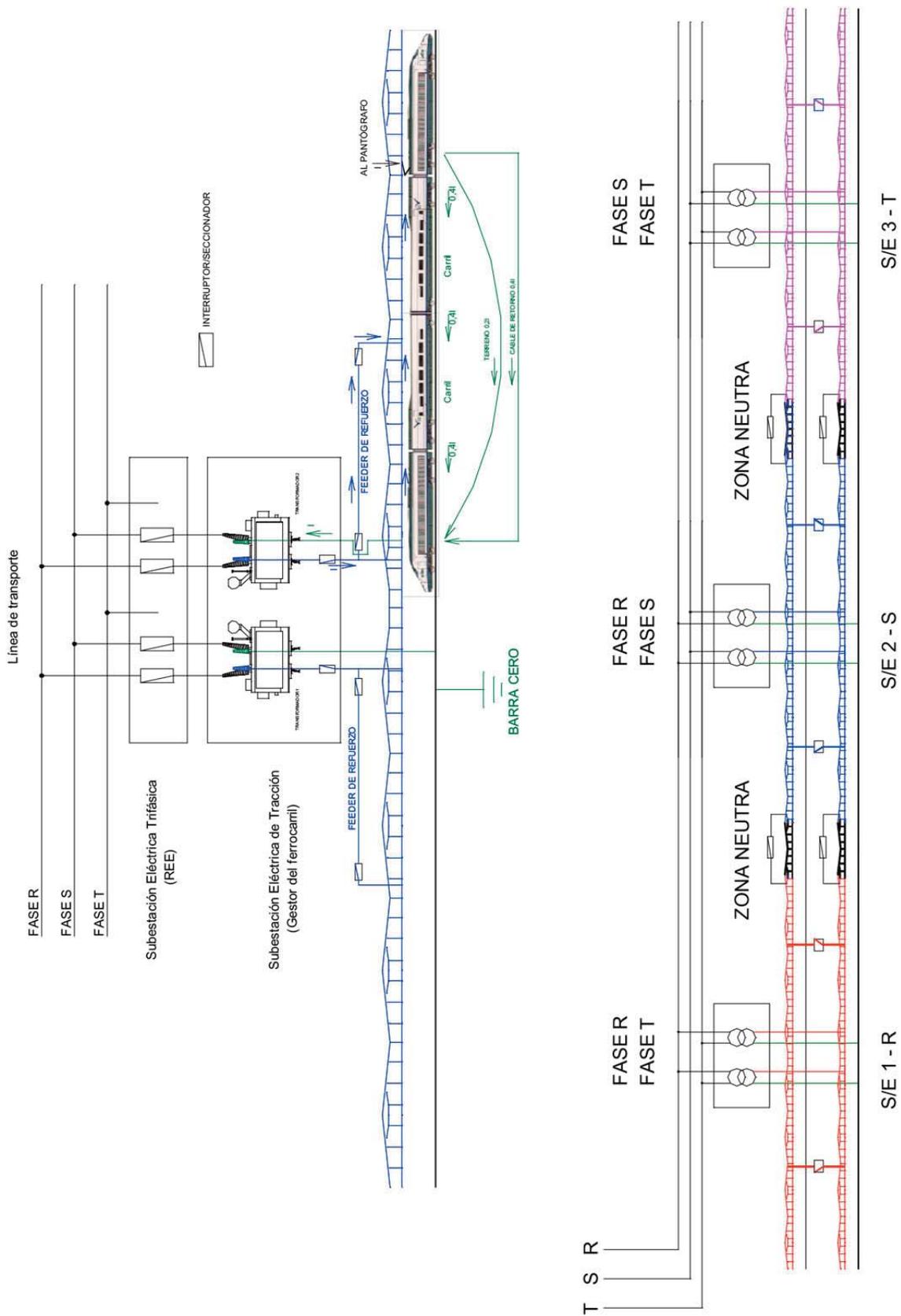
Si se considera un valor de tensión nominal  $V$  en la catenaria, esta conexión suele denominarse sistema  $2 \times V$  kV, pues como se verá a continuación, existen realmente dos circuitos eléctricos en oposición de fase. De nuevo, teniendo en cuenta el valor normalizado de tensión eléctrica en catenaria, se denomina sistema  $2 \times 25$  kV. Este doble circuito obliga al empleo de un conductor adicional (feeder negativo) así como autotransformadores cada ciertos kilómetros (de ahí su denominación).

El principal objetivo es asegurar una caída de tensión en catenaria adecuada considerando el mayor distanciamiento entre subestaciones colaterales.

El esquema de funcionamiento está representado en la Figura 14.

Los transformadores de la subestación pueden ir conectados a iguales o diferentes fases eléctricas. En este último caso no se podrán conectar en paralelo y cada transformador alimentará a un semitramo de la subestación, siendo necesario instalar una zona neutra en dicha subestación. El devanado primario de cada transformador se conecta a una tensión compuesta de la red y transforma dicha tensión al doble de la tensión de funcionamiento del tren (50 000 V). Realmente el secundario del transformador dispone de dos devanados y una toma central conectada a tierra. Un devanado secundario se conecta entre la catenaria y tierra (25 000 V) y el otro entre el feeder negativo y tierra (-25 000 V).

Cada 10-15 kilómetros, se colocan autotransformadores conectados entre la catenaria y el feeder negativo con su punto medio conectado a tierra. Si se sitúa un tren en un punto del tramo, los autotransformadores,



**Figura 13.** Conexión monofásica simple. (Fuente propia).

que tienen la propiedad de distribuir la corriente que les llega por el punto central en dos partes casi iguales<sup>5</sup>, obligan a la circulación de corrientes que se indica en la Figura 14. Considerando una hipótesis ideal de funcionamiento, el reparto de corriente consumida por el tren se efectúa en un 100% por la catenaria al pantógrafo (téngase en cuenta que en este sistema también puede existir un feeder de refuerzo).

Las corrientes de ida hacia el tren son aportadas dependiendo de la situación de éste. Así, en el esquema de la Figura 14, un 50% de la corriente circula desde la subestación al tren por la catenaria. El 50% restante es proporcionada por los autotransformadores situados a ambos extremos del tren.

Por tanto uno de los objetivos de los autotransformadores es que la corriente de retorno circule por el feeder negativo. Teóricamente la corriente de retorno está limitada al feeder negativo, salvo en una sección compensadora, es decir, aquella existente entre dos autotransformadores consecutivos, cuando además hay un tren tomando corriente.

Así, según puede verse en la Figura 14, si hay un tren situado entre los dos autotransformadores, toda la corriente de retorno circula por los carriles y por la tierra pero únicamente en ese tramo de línea, pues fuera de ella la corriente es transportada únicamente por el feeder negativo. Realmente el sistema no es perfecto debido a la impedancia de fuga de los devanados del autotransformador y al hecho que su potencia es limitada. En consecuencia, la corriente de tracción es suministrada también desde autotransformadores distantes, lo que supone que circule corriente por los carriles en toda la sección de suministro eléctrico. Una parte de esa corriente pasará a tierra, que es la que causa problemas de inducción en las líneas de telecomunicaciones cercanas, aunque en menor proporción que en el sistema 1×25 kV.

Puede notarse que si en una conexión 2×25 kV se prescinde del feeder negativo y de los autotransformadores, se tendría una conexión 1×25 kV (por lo general, en esta situación se deberá explotar el sistema en condiciones degradadas).

### ***Conexión con transformador Booster***

En un sistema de corriente alterna monofásica los elementos que forman parte del circuito de retorno son el cable de retorno, los carriles de rodadura y el terreno circundante. La corriente de retorno que circula por el terreno depende fundamentalmente del aislamiento entre los carriles y tierra. Este aislamiento depende a su vez de factores como la resistividad del terreno, las características del balasto empleado y de la distancia entre el punto en el que se encuentra el tren y el transformador de potencia o el autotransformador en el caso de un sistema 2×25 kV.

Considerando una hipótesis ideal de funcionamiento, es decir, conductores sin resistencia ni pérdidas, así como una tensión de cortocircuito de los transformadores tendiendo a cero, el reparto ideal de la corriente consumida por el tren en un sistema 1×25 kV sería:

- Toda la corriente que el tren consume (100%) se transporta por la catenaria.
- El 40% de la corriente consumida por el tren retorna por los carriles de la vía.
- Otro 34% retorna por el conductor de tierra.
- Otro 6% por las pantallas metálicas de los conductores de instalaciones próximas a la vía.
- El 20% restante retorna por el terreno.

---

<sup>5</sup> Esta pequeña desigualdad viene originada por la caída de tensión en el arrollamiento, que se procura que sea muy pequeña, del orden del 1%.

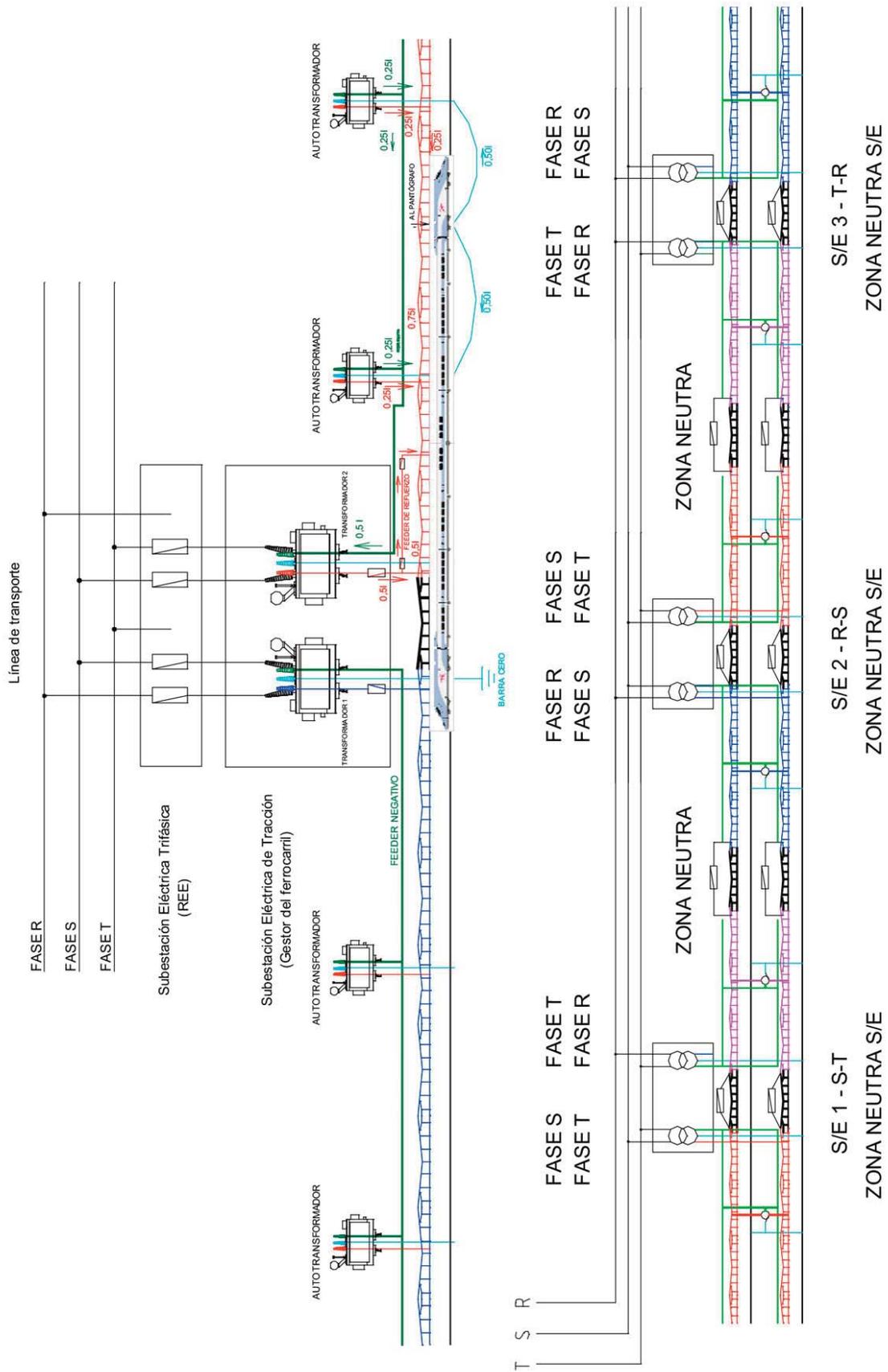


Figura 14. Conexión AT. (Fuente propia).

Aunque estos porcentajes no son aplicables en su totalidad a un sistema  $2 \times 25$  kV, sí se puede considerar un porcentaje de fugas a tierra similar. Esta hipótesis está del lado de la seguridad, ya que los tramos donde la corriente circula por los carriles en la conexión  $1 \times 25$  kV son más largos que en la conexión  $2 \times 25$  kV y por tanto también lo serán las corrientes que retornen por tierra.

La conexión con transformador Booster consiste en un cable de retorno paralelo a la vía y aislado del terreno. Entre 3 y 4 kilómetros se instala un transformador de relación de transformación 1:1 entre la catenaria y el cable de retorno (transformador Booster). En el punto medio entre dos transformadores se realiza una conexión entre el carril de retorno y el cable aislado de retorno. Con esta configuración se consigue que la mayor parte de la corriente de retorno que circula por los carriles circule por el cable aislado de retorno y de esta forma se disminuya las perturbaciones causadas por la corriente de retorno. Cabe destacar que la reducción de corriente de retorno por los carriles es mayor con esta configuración que con la conexión  $2 \times 25$  kV.

### Resumen comparativo

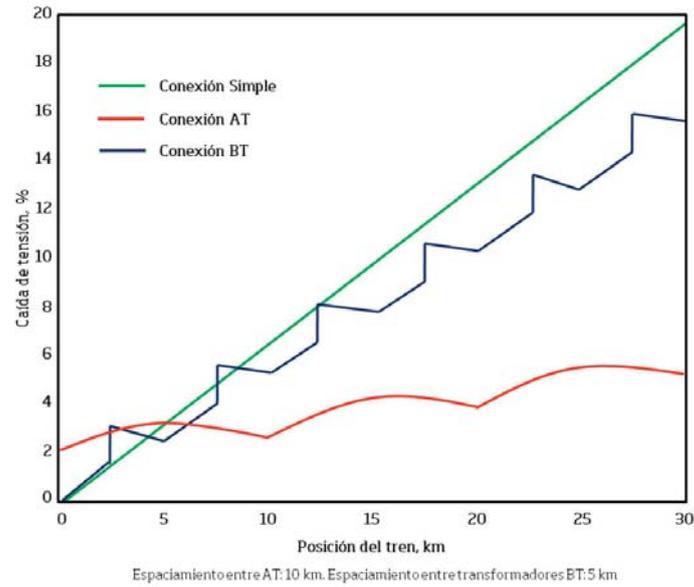
La Tabla 1 recoge una breve comparación de los diferentes sistemas de conexión a catenaria analizados, en función de diferentes parámetros y características.

## 7. Breve análisis de la configuración eléctrica existente en algunas líneas ferroviarias

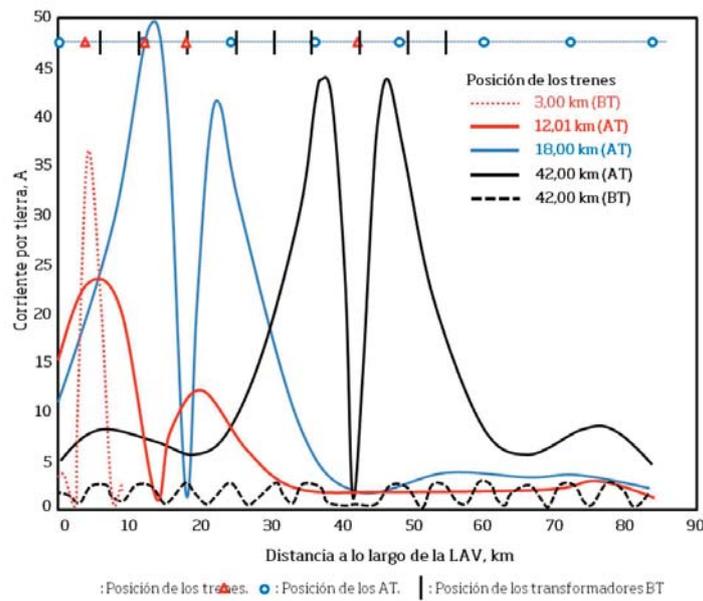
La Tabla 2 recoge un breve análisis realizado sobre diversas líneas ferroviarias de alta velocidad existentes en el mundo, indicando las diferentes técnicas y conexiones eléctricas empleadas.

	Conexión Monofásica Simple	Conexión AT	Conexión BT
Disponibilidad de puntos de conexión a la línea eléctrica de transporte	Se dispone de puntos de conexión abundantes	No se dispone de puntos de conexión	-
Distanciamiento entre subestaciones eléctricas de tracción	30 – 40 km	50 – 60 km	-
Elementos adicionales a la catenaria	No	Feeder Negativo Autotransformador (AT)	Transformador Booster (BT)
Explotación (operación y mantenibilidad)	Sencilla	Compleja	Media
Flexibilidad	Baja	Alta (puede funcionar como conexión monofásica simple)	-
Caída de tensión (consultar Figura 14)	-	Baja caída de tensión eléctrica (y por tanto menores pérdidas) como consecuencia de transportar la energía demandada por el tren al doble de la tensión de funcionamiento (50 000 V)	-
Corriente de retorno por catenaria	Alta	Baja	Alta
Corriente de retorno por tierra (consultar Figura 15)	Alta	Media	Baja

**Tabla 1.** Comparación técnica de los diferentes sistemas de conexión a catenaria analizados. (Fuente propia).



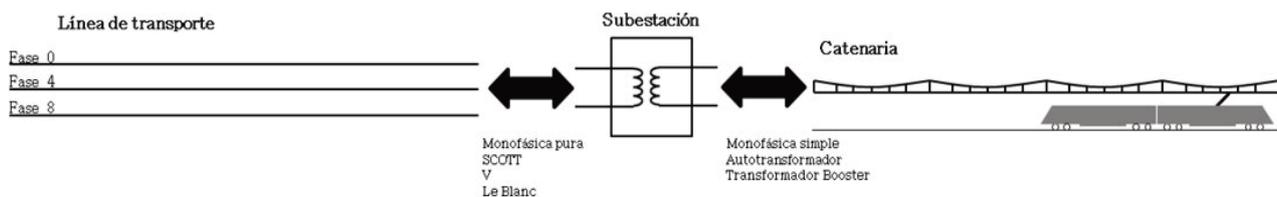
**Figura 14.** Comparación de la caída de tensión producida en las diferentes conexiones. Nota: Se considera un tren de potencia 8 MVA. (Fuente propia con documentación del Prof. György Varju).



**Figura 15.** Comparación de la corriente de retorno por tierra en las conexiones AT y BT. (Fuente propia con documentación del Prof. György Varju).

	Conexión Subestación de Tracción/Red Trifásica de Alimentación	Tensión de Red	Conexión Subestación de Tracción/Catenaria	Dispositivo FACT
España. LAV Madrid-Toledo/Sevilla	Monofásica pura (rotación por subestación)	132 – 220 kV	1x25 kV	No
España. LAV Madrid-Barcelona-Figueras	Monofásica pura. (rotación por transformador)	220 -400 kV	2x25 kV	No
España. LAV Madrid-Alicante/Valencia	Monofásica pura (rotación por subestación)	220 -400 kV	2x25 kV	No
Inglaterra/Francia. Túnel del Canal de La Mancha	Monofásica pura	400 kV	2x25 kV	Sí
Francia. LAV París-Estrasburgo	Monofásica pura	225-400 kV	2x25 kV	No
Italia. LAV Roma-Nápoles	Monofásica pura	380 kV	2x25 kV	No
Japón	Conexiones especiales (Scott entre otras)	77 a 275 kV	2x25 kV	Sí

**Tabla 2.** Análisis de la configuración eléctrica en diferentes líneas ferroviarias de alta velocidad (LAV).  
(Fuente propia).



## Bibliografía

- [1] Willian D. Stevenson. “Elements of power system analysis”. McGraw-Hill Inc. 1982.
- [2] John J. Grainer, Willian D. Stevenson Jr. “Power System Analysis”. McGraw-Hill Inc. 1994.
- [3] Sten Benda. “Interference-free electronics”. Studentlitteratur 1991.
- [4] Hiroaki Morimoto (RTRI). “New-Type Transformer for AC Feeding Systems”. Railway Technology Avalanche No. 20, December 26, 2007.
- [5] Davor Vujatovic y Qingping Zhang. “Harmonics Generated from Railway Operation”. Artículo IEEE 2006 (1-4244-0493-2/06).
- [6] Per Halvarsson (ABB). “Facts for availability and power quality improvement in high speed railway electrification”. 6<sup>th</sup> World Congress on High Speed Rail (Amsterdam) 2008.
- [7] Siemens AG. “N.A.F.A. Madrid - Sevilla Medidas tomadas para evitar perturbaciones intolerables. Sistema de puesta a tierra R11087”.