

# CIRCUITO DE RETORNO en tracción eléctrica

(Extracto del capítulo 15 del libro SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN A LA TRACCIÓN FERROVIARIA)

## 1.- GENERALIDADES

Al comienzo del ferrocarril los carriles estaban formados por tramos, barras, de longitudes pequeñas, (6 a 8 metros) uniéndose estas barras entre sí mediante bridas, que tenían como misión dar continuidad mecánica a la barra para formar el carril continuo. Esta unión presentaba una resistencia eléctrica relativamente elevada que hacía que la resistencia longitudinal del carril se incrementara como consecuencia del elevado número de uniones por cada kilómetro de vía.

Además para permitir las dilataciones y contracciones del carril, las barras colocadas una a continuación de otra, no estaban completamente unidas sino que entre ellas existía una separación para permitir las dilataciones y contracciones del material en función de la temperatura. Esta separación entre barras era la causante del ruido clásico de las vías antiguas (cha-ca-cha)



Figura 1. Unión mecánica de los carriles mediante bridas.

Experimentos realizados por la administración francesa de la compañía del Midi demostraron que en una vía unida simplemente con bridas, la conductividad depende del estado de las uniones, variando entre 600 a 100Ω con bridas en servicio y con tornillos sin apriete, mientras que dicha conductividad baja a

0,005Ω si se limpian bien las bridas y el apriete es el correcto, teniendo en cuenta que dicha resistencia varía con la temperatura por las variaciones de dilatación y contracción de los propios carriles.

Para mejorar (reducir) la resistencia eléctrica de las uniones, inicialmente se utilizaron conexiones eléctricas de cobre que se alojaban entre la brida y el alma del carril para evitar posibles robos.

Posteriormente se han utilizado distintos tipos de unión, bien a través de soldadura eléctrica o aluminotérmica, bien con casquillo cónico o tornillería.

Aunque aparentemente la sección metálica del carril es muy elevada, por ejemplo para un carril de 54kg/ml le corresponde una sección de 6923 mm<sup>2</sup>;  $\frac{5.4}{7.8} = 0.6923m^2 = 6923mm^2$

El valor equivalente en cobre de dicha sección, suponiendo que la resistencia del acero es 15 veces a lo del cobre, sería de aproximadamente 460mm<sup>2</sup> por cada carril.

Comparando la sección equivalente en cobre de un carril (460mm<sup>2</sup>) con la sección de una catenaria, por ejemplo del tipo CR160 (2 hilos de contacto de 107mm<sup>2</sup> y sustentador de 153mm<sup>2</sup>), la sección en cobre de la catenaria es de 367 mm<sup>2</sup>, y en el caso de ser necesario utilizar un feeder de refuerzo de 153 mm<sup>2</sup> tendríamos una sección de catenaria de 520 mm<sup>2</sup>, siendo por tanto la sección conductora del carril inferior a la sección conductora de la catenaria, para el caso de utilizar un solo carril como

circuito de retorno, y ello sin considerar el incremento de resistencia debido a las conexiones de continuidad del carril. Igual ocurriría en el caso de utilizar secciones o tipologías de catenaria de mayor sección eléctrica.

Por tanto se comprueba la importancia de diseñar el circuito de tracción en un conjunto, tanto el circuito de distribución de lo corriente y de retorno de forma conjugada y coordinada.



Figura 2. Aseguramiento de la unión eléctrica de los carriles a través de la brida.

El valor de la resistencia provocada por las uniones entre carriles fue estudiado por distintas administraciones ferroviarias que establecieron normas reguladoras; por ejemplo, los ferrocarriles alemanes fijaron un aumento máximo del 20% en la resistencia del carril debido a las conexiones. En España se fijó que la resistencia de cada junta no debe ser mayor que la de 3m de carril equivalente a un 25%

aproximadamente.

La llegada de la vía soldada y la liberación de las tensiones en el carril mejoró notablemente estas restricciones disminuyendo notablemente las caídas de tensión en los carriles; no obstante no hay que olvidar que durante el diseño será necesario atender a la reducción necesaria de la resistencia del circuito de tracción, considerando la posibilidad de utilizar los dos carriles como elementos participantes en el circuito si no existen restricciones en los circuitos de señalización y en caso contrario se deberá acudir a reforzar dicha sección mediante el tendido de feeder negativos de refuerzo.



Figura 3. Detalle de soldadura de carriles



El valor de la resistencia eléctrica que se incrementa por cada kilómetro de carril es la siguiente:

	Tipo de barra (longitud de la barra)		
	12m	24m	36m
Nº de conexiones (por cada km de vía)	166	82	54
Incremento de longitud por efecto de la resistencia (m)	498	246	162

*Tabla 1 Incremento de la longitud del carril a efecto de cálculo de la resistencia eléctrica del circuito de retorno.*

## 2.- CORRIENTES DE RETORNO

El pantógrafo de los trenes es el elemento que se encarga de transmitir la corriente eléctrica a los motores y circuitos auxiliares del tren. Así, la corriente que circula por la catenaria pasaría a través del pantógrafo a los motores del tren, y de ellos a través de la propia estructura metálica de la máquina a las ruedas que en perfecto contacto con los carriles devolverían la corriente hacia la subestación.

En la mayoría de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria se utilizan los carriles de rodadura como conductores para cerrar el circuito eléctrico de tracción entre el sistema de alimentación (catenaria, tercer carril, etc.), y la subestación de alimentación que alimente el tramo donde se encuentra la unidad tractora o locomotora. Por ello, los carriles, desde el punto de vista eléctrico deben ser considerados como conductores, y como todos deben garantizar la sección mínima para la intensidad máxima, incluyendo la de cortocircuito.

Toda la corriente que sale de la subestación, pasa por la catenaria y los motores del tren, y tiene que regresar de nuevo a la subestación de donde salió. La mayor parte de esta corriente circulará en su camino de vuelta a través de los carriles, pero sin embargo hay una parte que regresa por cualquier circuito metálico que exista con un cierto paralelismo a la vía, así como por la propia tierra. A éste tipo de corrientes se le denomina corrientes vagabundas.

### 2.1. CIRCUITO DE RETORNO EN CORRIENTE ALTERNA

El circuito de retorno en las instalaciones de corriente alterna está constituido por los siguientes conductores:

- Carriles
- Cable de tierra
- Propia tierra

En los sistemas de corriente alterna, podemos distinguir dos situaciones:

**Vía única:** En las instalaciones de vía única, se suele utilizar el carril más cercano al poste como carril de retorno, (un único carril). Este carril se une al cable de tierra a intervalos de aproximadamente 450 m, constituyendo los dos conductores, carril y cable de tierra, así como la propia tierra el circuito de retorno.

**Vía doble:** En estos casos el circuito de retorno está formado por el carril más externo de cada una de las vías, unidos entre sí y con el cable de tierra, también cada 450 m aproximadamente. Así en corriente alterna y vía doble, el circuito de retorno estará formado por el cable de tierra de cada una de las vías, así como por el carril externo de cada vía, además de por la tierra.

En corriente alterna el circuito de retorno está conectado a tierra, mientras que en corriente continua, lo normal es que se encuentre aislado de tierra.



Además de los conductores indicados, todos los postes van conectados directamente a tierra a través de una pica. Como cable de tierra se utiliza LA-110 y también LA-180.

La determinación del valor de resistencia (impedancia) del circuito de retorno en corriente alterna, está en función de los parámetros eléctricos del conjunto de los conductores que conforman la instalación, así como de la posición de los mismos, de la resistividad del terreno y también de la corriente que circula por ellos, por lo que de forma generalizada solo se puede indicar un valor aproximado.

Así, para el caso de sistemas de corriente alterna, con carril de 60 kg/m.l. y en la configuración clásica de alta velocidad a cielo abierto, y para un consumo del orden de 300 A, el valor de la impedancia de cada uno de los elementos que conforman el circuito de retorno sería:

#### Caso 2x25 kV:

Impedancia feeder negativo:  $0,3+j1,36$  ohmios/km  
Impedancia cable de tierra:  $0,21+j0,38$  ohmios/km  
Impedancia carril izquierdo:  $0,054+j0,35$  ohmios/km

#### Caso 1x25 kV:

Impedancia cable de tierra:  $0,3+j0,99$  ohmios/km  
Impedancia carril izquierdo:  $0,126+j0,366$  ohmios/km

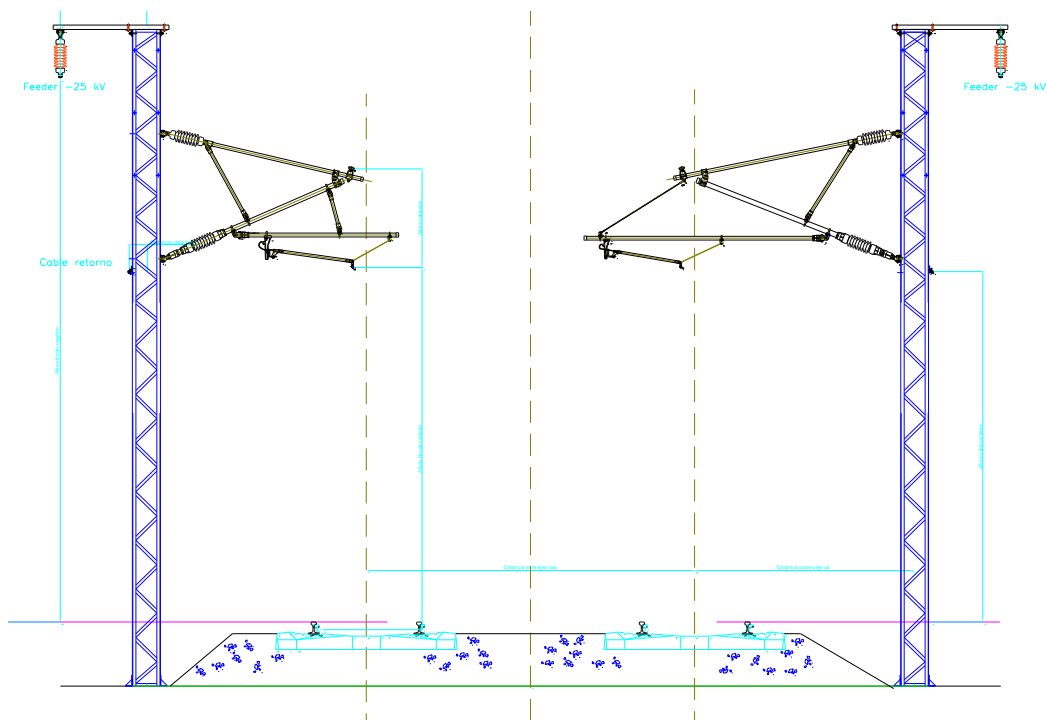


Figura 4. Distribución típica de conductores catenaria corriente alterna 2x25 kV

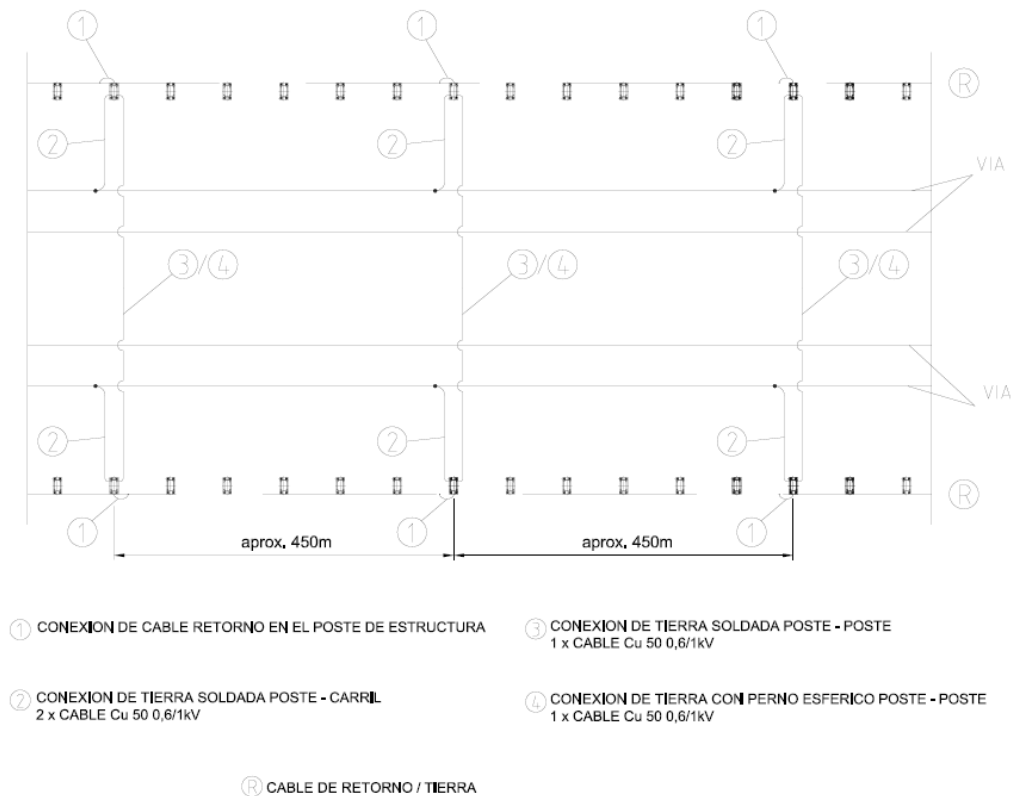


Figura 5. Conexión de circuito de retorno en corriente alterna y vía doble.

## 2.2. CIRCUITO DE RETORNO EN CORRIENTE CONTINUA

En los sistemas de tracción de corriente continua, tanto ferroviaria como tranviaria, el negativo del rectificador se conecta a los carriles de la estación, estando (o debiendo estar) los carriles a lo largo del trayecto aislados de tierra.

En las instalaciones de corriente continua, el circuito de retorno está formado exclusivamente por los carriles y en su caso los refuerzos de sección.

El cable de tierra no se debe considerar como retorno de tracción ni debe de estar unido directamente a los carriles. Se pretende de esta forma que las corrientes de tracción no pasen de los carriles al cable de tierra y por tanto a tierra, con objeto de evitar o disminuir en la medida de lo posible las corrientes vagabundas.

Con respecto a la conexión en la subestación de tracción del negativo de tracción, así como de los carriles con tierra, existen dos sistemas de conexión:

- Negativo unido a tierra: En este caso el negativo del rectificador y por tanto los carriles están unidos a tierra en la subestación de tracción.
- Negativo aislado de tierra: En este caso el negativo del rectificador está aislado de tierra, debiendo de existir un elemento de protección que el valor de la tensión entre la tierra de la subestación y el negativo del rectificador, uniendo estos elementos cuando se supere el valor de referencia (60 o 120 V)

Cada uno de los dos sistemas indicados anteriormente presenta de forma generalizada las siguientes ventajas e inconvenientes.

Sistema de conexión	Ventajas	Inconvenientes
Negativo unido a tierra en la subestación de tracción	Permite referenciar el valor de la tensión a tierra	Favorece la circulación de corrientes vagabundas
	Equipotencialidad entre el potencial de las tierras de la subestación y el negativo de tracción.	Dificulta la detección de derivaciones de la tensión a tierra en el trayecto.
Negativo aislado de tierra en la subestación de tracción	Disminuye las corrientes vagabundas	No referencia la tensión directamente a tierra
	Permite detectar con facilidad las derivaciones a tierra de la catenaria en el trayecto.	No equipotencialidad entre las tierras de la subestación y el negativo de tracción.

Si el circuito de retorno, es decir los carriles y en su caso los cables de refuerzo de los carriles, no se encuentran convenientemente aislados de tierra en toda su longitud, las corrientes vagabundas pueden llegar a ser del orden del 30% al 40% del valor de la corriente total, y producen en las tuberías metálicas, pantallas protectoras de cables, verjas de protección de carreteras y autopistas, etc., los efectos destructores de la corrosión por fenómenos de electrolisis, con deterioros en la superficie metálica por la que sale la corriente hacia la subestación u otro punto.

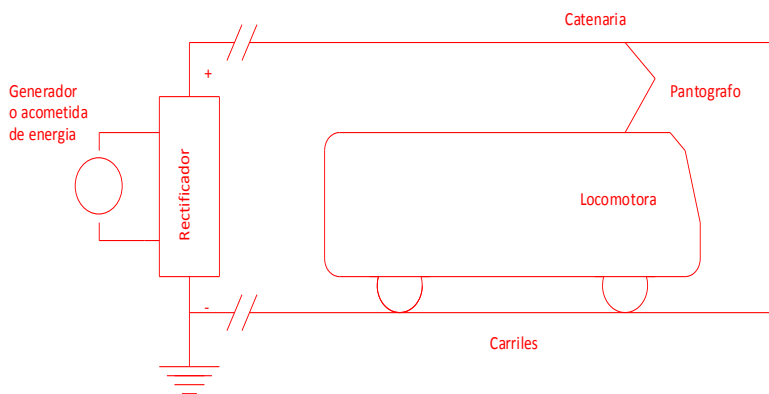


Figura 6. Esquema sistema de alimentación en corriente continua con negativo rectificador unido a tierra.

Las acciones encaminadas a disminuir las corrientes vagabundas pasan obligatoriamente por independizar a lo largo de todo el trayecto los circuitos de tierra y los de retorno. Los circuitos de tierra estarán encaminados a proteger las personas y las instalaciones de las posibles derivaciones, debiendo adoptarse los correspondientes sistemas de protección para detectar la derivación y provocar la actuación de las protecciones una vez detectada. Mientras que los circuitos de retorno tendrán como objeto cerrar el circuito de alimentación de los trenes, reconduciendo la corriente que salió por la catenaria hacia la subestación.

La unión de dichos circuitos, de retorno y de tierras, sólo se realizará cuando se realice la descarga de la línea para la ejecución de los trabajos de mantenimiento, permaneciendo unidos catenaria, tierras y circuito de retorno mientras duren dichos trabajos y realizándose dicha unión mediante las correspondientes pértigas de protección.

Cada uno de los sistemas de conexión antes mencionados, requiere distinto tipo de protecciones en la subestación de tracción, ya que cuando el negativo está unido a tierra la protección se debe de realizar por corriente, mientras que cuando el negativo está aislado de tierra, la protecciones debe de realizar por tensión, conectando en este caso los relés de puesta a masa de la subestación directamente al negativo del rectificador.



En las subestaciones de ADIF en corriente continua, el negativo del rectificador se encuentra unido a tierra. En las instalaciones tranviarias, especialmente en las de nueva construcción, el negativo del rectificador suele ir aislado de tierra.

La resistencia óhmica por kilómetro de longitud de los carriles se obtiene mediante la expresión:

$$R = \frac{0,19 \cdot 7,8}{n \cdot \text{Peso}}$$

Donde

n corresponde al número de carriles utilizados para el retorno

Peso es el peso de un metro lineal de carril.

Así, para un circuito de retorno formado por dos carriles de 60 kg/m.l. el valor de resistencia por kilómetro será de 0,01235 ohmios por cada kilómetro de vía.

### 3.- CONEXIONADO DEL CIRCUITO DE RETORNO EN SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA

Al igual que cualquier circuito eléctrico, los conductores que integran el circuito de retorno, es decir, los carriles, necesitan estar perfectamente unidos en toda su longitud al objeto de que la resistencia que opongan al paso de la corriente sea la mínima posible.

En las líneas de elevado tráfico, no sólo por disminuir el valor de la resistencia óhmica, sino por aumentar la calidad de la vía, ésta se encuentra soldada al menos en longitudes iguales a la longitud del circuito de vía, con lo que no es necesario instalar en ese intervalo de longitud ningún dispositivo especial para cerrar el circuito de retorno, ya que queda asegurado por los propios carriles.

La corriente que circula por los carriles, no es solamente la que corresponde a la de tracción, sino que además también existen las corrientes de señalización.

En las líneas electrificadas los sistemas de uso más general, son los denominados circuitos de vía de corriente alterna y los de actual implementación denominados circuitos de vía de audiofrecuencia, caracterizándose estos de una forma global por no necesitar juntas aislantes, ni inductivas.

Cuando la señalización sobre los carriles se realiza mediante circuitos de vía de corriente alterna, y la línea no está electrificada, es suficiente con aislar los dos carriles a intervalos y conectar directamente sobre ellos el circuito de señalización. Sin embargo en las líneas electrificadas, además de las corrientes de señalización deben circular también por los mismos carriles las corrientes de tracción, por lo que se deben conjugar las dos necesidades. De un lado cantonar la vía, es decir, aislar un tramo de otro cada cierta longitud, y por otro lado permitir que aún a pesar de estar aislado para la corriente alterna un tramo de otro, la corriente continua de tracción pueda circular sin interrupción a lo largo de todo el trayecto entre la subestación y el punto donde se encuentra el tren.

Los sistemas de señalización desde el punto de vista del circuito de retorno, los podemos dividir en dos grupos generales denominados, circuitos de vía sin juntas aislantes y circuitos que necesitan para su funcionamiento juntas aislantes.

#### 3.1.- CONEXIONADO DEL RETORNO EN CIRCUITOS DE VIA CON JUNTAS AISLANTES

En este tipo de circuitos de señalización, para la separación de un cantón de bloqueo de otro, se necesita instalar una junta aislante y asociada a ella una junta inductiva.

La junta aislante, es un dispositivo que separa eléctricamente un carril en dos partes. Esta constituida por un material aislante que le da al carril la continuidad mecánica pero no la continuidad eléctrica. Asociada a la junta aislante y en múltiples ocasiones a ambos lados de esta, se suele conectar una junta inductiva, que es un equipo eléctrico formado básicamente por unos devanados que permiten el paso de la corriente continua y bloquean el paso a la corriente alterna.



*Fig. 7.- Detalle de montaje de junta aislante*

Normalmente en los trayectos entre estaciones, el circuito de retorno se realiza al igual que el de señalización, por los dos carriles. Es al llegar a la estación, y especialmente en la zona de agujas, donde es necesario pasar de un retorno bicarril a otro monocarril, al objeto de dejar el carril restante para la realización de las inversiones de polaridad en la zona de agujas. El cambio de retorno bicarril a monocarril, se realiza mediante una junta inductiva que conecta de un lado con los dos carriles que vienen del trayecto y por otro lado con uno solo que va hacia la zona de agujas. Manteniéndose normalmente el retorno a través de un sólo carril en todas las vías de la estación que dispongan de circuitos de señalización. Esta característica es importante ya que nos condiciona el carril en el que se debe de conectar la tierra de protección cuando se realizan los cortes de tensión para los trabajos de mantenimiento

En estas condiciones, el negativo del rectificador se puede unir directamente a las vías de la estación con señalización monocarril.

Sin embargo en determinadas estaciones, con vías de estacionamiento suficientemente largas, las vías situadas frente a la subestación tienen señalización bicarril, por lo que no se pueden unir directamente entre sí y con el negativo del rectificador, ya que produciríamos una ocupación de los circuitos de vía por derivación a tierra de las corrientes de señalización. En estos casos la solución para el conexionado del circuito de retorno al negativo del rectificador en la subestación, y por tanto con la tierra general de la subestación, pasa por las siguientes soluciones:

- \* Conectarlo a vías secundarias que no estén dotadas de circuito de señalización. En este caso el circuito eléctrico de retorno quedaría unido a las vías del trayecto mediante la zona de agujas. Este sistema no es el más idóneo cuando los consumos de corriente son elevados, ya que las vías secundarias no suelen estar soldadas y es necesario dar solución de continuidad eléctrica a los carriles, con un aumento de la resistencia óhmica al paso de la corriente.
- \* Hacer un tendido de feeder de retorno desde la tierra general de la subestación o negativo del rectificador a la primera junta inductiva de trayecto, conectándose al neutro de la misma. Este feeder de retorno deberá estar formado al menos por dos cables de cobre de  $153 \text{ mm}^2$ .

Normalmente las dos soluciones indicadas anteriormente se utilizan al mismo tiempo, ya que de una parte es necesario reforzar el retorno del negativo de tracción que viene del trayecto y por otra parte es necesario dar continuidad eléctrica a las vías secundarias de la estación.

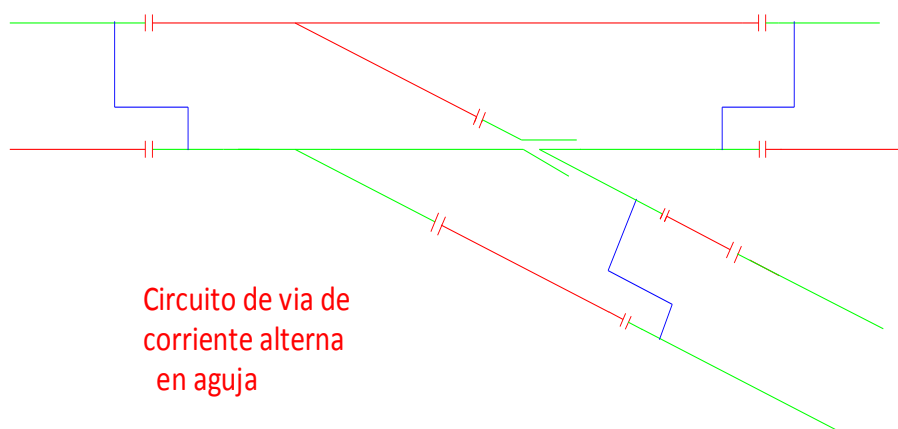


Fig. 8.- Circuito de vía en corriente alterna en aguja

Las líneas de azul corresponden a los lazos de unión entre distintos carriles y permiten realizar las inversiones de carril correspondientes para detectar la presencia del tren a su paso por la aguja y permiten al mismo tiempo la continuidad de las corrientes de tracción.

Se indica a continuación el esquema del circuito de señalización para el cambio de circuito de vía de bicarril a monocarril. Este tipo de circuito se utiliza en las agujas. Se observa que las corrientes de retorno que circulan por los dos carriles pasan a través de la junta inductiva hacia el carril único.

A efectos de electrificación presenta el inconveniente de que disminuye la sección de carril, al pasar de dos a uno y por tanto aumenta la resistencia, produciéndose por tanto mayores caídas de tensión.

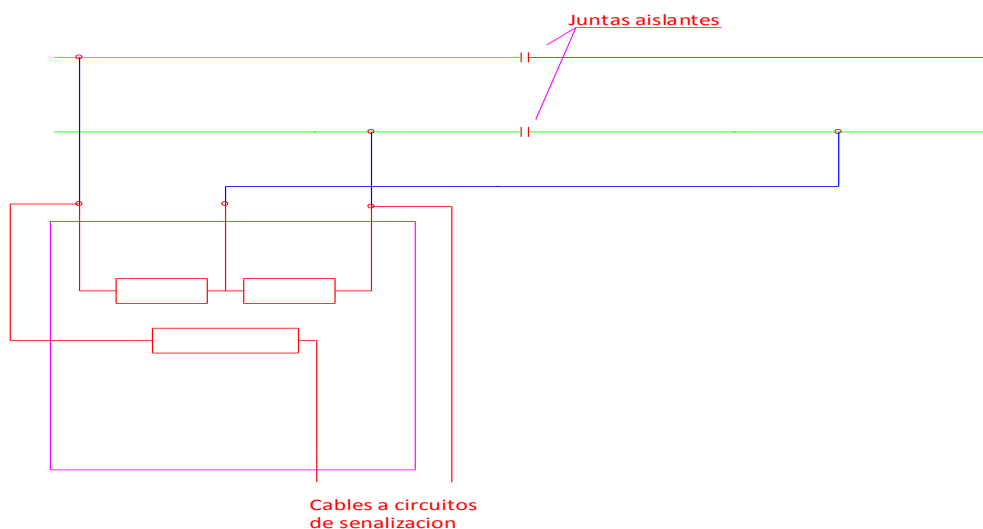


Fig. 9.- Esquema de montaje para el cambio de circuito de señalización de bicarril a monocarril.

A lo largo del trayecto, los circuitos de vía están formados por los dos carriles, separándose un circuito de otro mediante dos juntas inductivas. El conexionado de las juntas inductivas de indica en la figura 15.10 Nótese que la corriente de tracción circula entre un circuito de vía y otro por el punto



central de la unión de las dos juntas inductivas. Este punto se podría conectar directamente al negativo de la subestación.

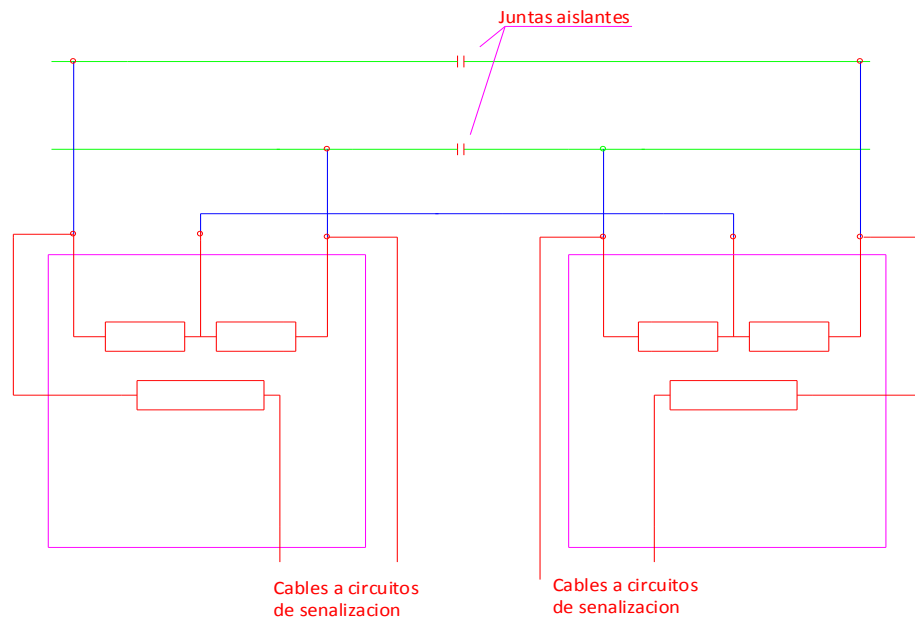


Fig. 10.- Conexión de juntas inductivas entre dos circuitos de vía bicarril



Figura 11. Detalle de conexión de circuito de vía con junta inductiva de bicarril a bicarril

#### 4.- CONEXIONADO DE RETORNO CON CIRCUITOS DE VIA SIN JUNTAS AISLANTES

Los circuitos de vía de audiofrecuencia, van sustituyendo a los circuitos de vía de corriente alterna, ya que son más fiables y sencillos de realizar.

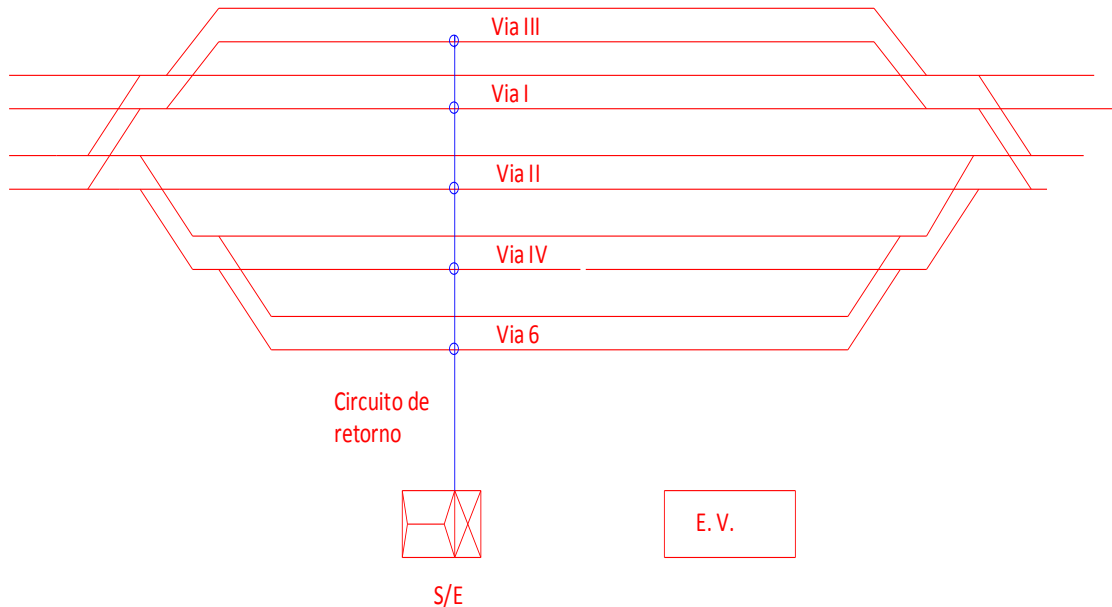


Fig. 12.- Representación esquemática del circuito de retorno en una estación con circuitos de vía de audiofrecuencia

La característica más significativa de estos circuitos de vía a efectos de electrificación es que no necesitan juntas aislantes para la separación eléctrica entre circuitos de vía, por lo que la corriente de retorno de electrificación circula por los dos carriles, tanto en los trayectos como en las estaciones.

El conexionado del negativo del rectificador se puede realizar en las estaciones dotadas con este tipo de circuitos, en las propias vías generales. Para ello y al objeto de evitar ocupaciones de circuito de vías, se elegirá por cada vía un sólo carril, que bien pudiera ser el situado en el lado de la subestación y después se irán uniendo entre sí todas las vías, conectándose después con la tierra general y el negativo del rectificador en la subestación.

Una vez cosidas todas las vías, se procederá por parte de los servicios técnicos de mantenimiento de señalización a realizar los ajustes necesarios en cada uno de los circuitos de vía, al objeto de compensar la inductancia correspondiente a los cables de retorno.

La delimitación entre un circuito de vía y el contiguo se realiza mediante un lazo, formado por un cable aislado y con una forma determinada que constituye de por sí la propia junta eléctrica de separación, pudiendo existir de distintos tipos.

##### 4.1.- LAZOS DE UNION EN CIRCUITOS SIN JUNTAS INDUCTIVAS

El lazo de unión entre circuitos sin juntas inductivas, normalmente denominado **Lazo de unión "S"**, este tipo de lazo, que tiene la forma que se indica en las figuras 13 y 14, y se utiliza para separar dos secciones de vía dotadas de circuitos de vía por audiofrecuencias, denominados genéricamente **circuitos de vía de audiofrecuencia**, permitiendo además de la separación eléctrica de ambos, su sintonización y la compensación de la corriente de retorno de los dos carriles.

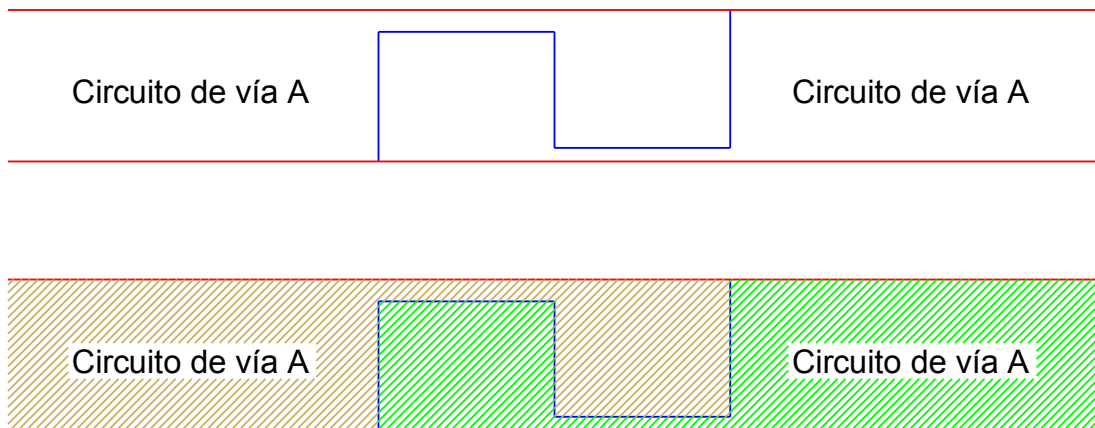


Fig. 13.- Representación esquemática de lazo tipo "S"

En la figura 13 se representa un lazo de unión tipo S, que une con una forma característica los carriles entre si. La longitud entre el punto del lazo entre una vía y otra puede ser variable en función del tipo de tecnología a emplear y las características del propio circuito de vía, pero un valor tipo puede ser de 18 m.

Como se puede observar el circuito de vía A, se encuentran separado del circuito de vía B, por el indicado lazo de unión. Existiendo una zona común entre uno y otro o zona de solape.

A continuación en la figura 14 se representa la configuración de varios circuitos de vía de audiofrecuencia con lazos de tipo "S", a partir de una junta aislante.

La zona aislante puede separar a otro tramo de vía, que o bien no existe señalización o bien tiene otras características de señalización, en este caso, en las inmediaciones de las juntas aislantes se inserta un lazo de terminación de cortocircuito, y a partir de dicho punto se sucede la instalación de los distintos circuitos de vía, que como se puede observar van alternándose las distintas frecuencias de sintonía entre un circuito y otro, y por tanto independizando los circuitos de vía entre sí.

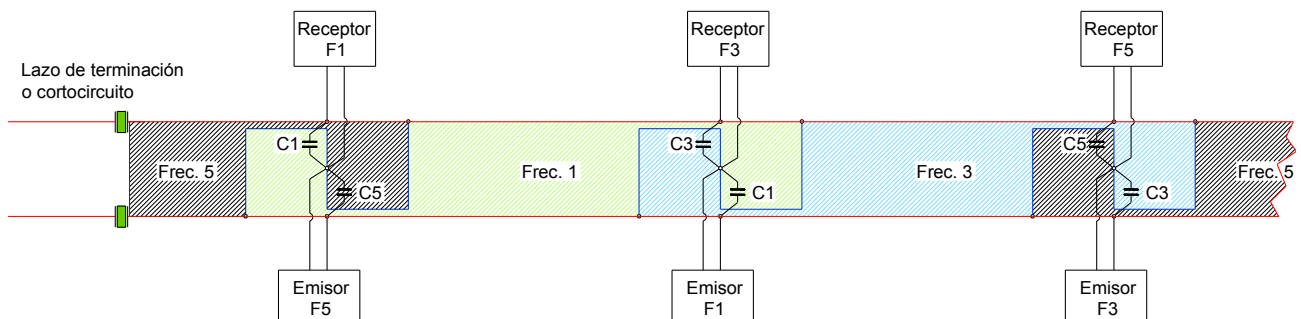


Fig. 14. Representación de circuito de vía con lazos tipo "S"



La forma del lazo de separación entre dos circuitos depende de la tecnología utilizada por el fabricante del sistema, pudiéndose como se indica en las figuras 13 y 14 o bien de otras formas similares, aunque todos ellos con la misma función, establecer la separación entre dos circuitos de vía consecutivos.



Figura 15. Detalle de un lazo de separación de circuitos de vía

El lazo de cortocircuito, representado en la figura 16 se utiliza para pasar de una sección de vía dotado de contador de ejes o sin señalizar a otra con circuito de vía de audiofrecuencia, permitiendo la sintonización de dicho circuito y compensando la corriente de tracción.

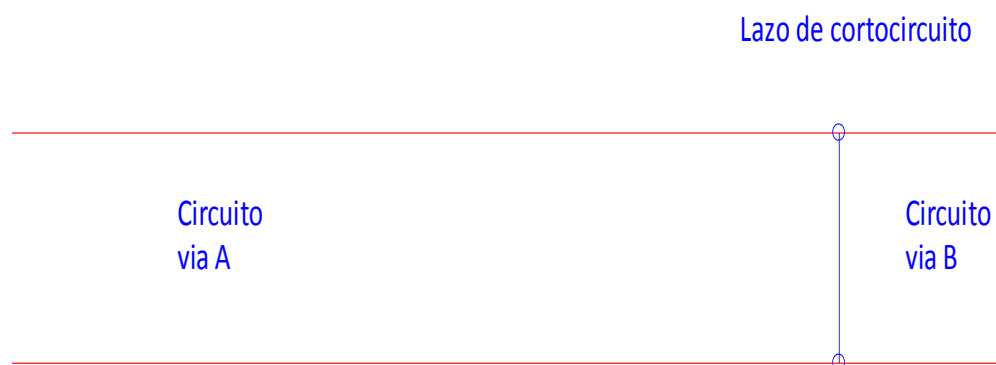


Figura 16 Detalle de conexionado de lazo de cortocircuito.

Además del lazo de cortocircuito, existe lo que se denomina **lazo de terminación**, representado en la figura 16 y se emplea para la transición entre un circuito de vía de audiofrecuencia y otro con juntas aislantes: El lazo sirve para la sintonización del circuito de vía de audiofrecuencia y para la compensación del potencial debido a la corriente de retorno. Así el circuito de vía A sería un circuito del tipo de audiofrecuencia y el circuito de vía B sería de otro tipo que necesitara juntas aislantes.

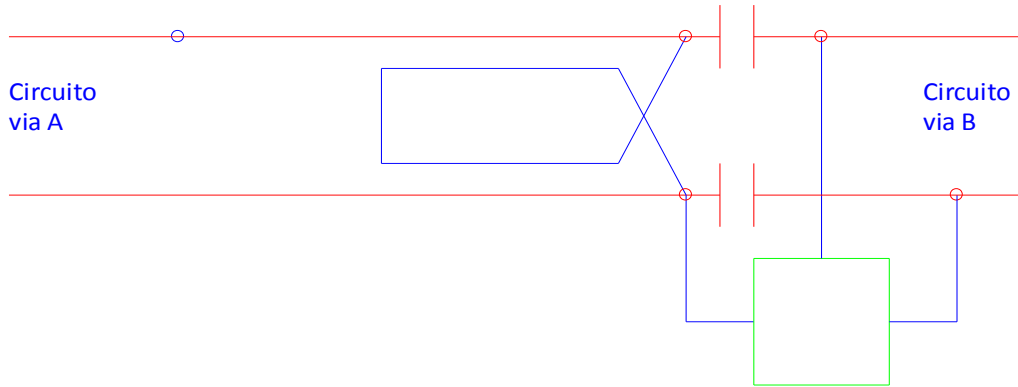


Figura 17.- Transición de circuito de vía de audiofrecuencia a circuito de vía bicarril.

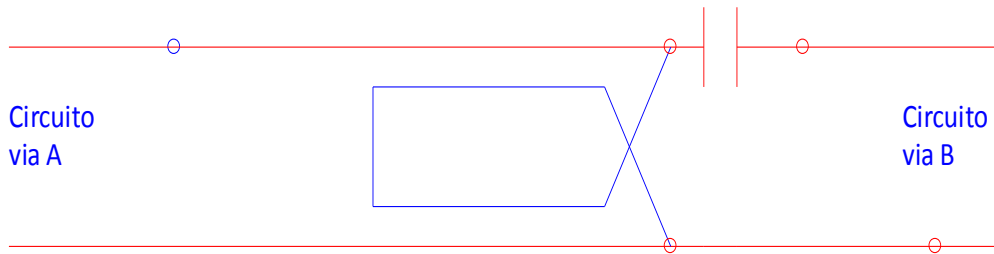


Figura 18.-Transición de circuito de vía de audiofrecuencia a monocarril

Cuando las longitudes del circuito de vía de audiofrecuencia son muy elevadas, superiores a 1.000 metros, el circuito de vía se suele alimentar desde el punto central, y en este caso se instala en el centro un lazo de compensación de potencial de los carriles, tal y como se representa en la figura 15.19

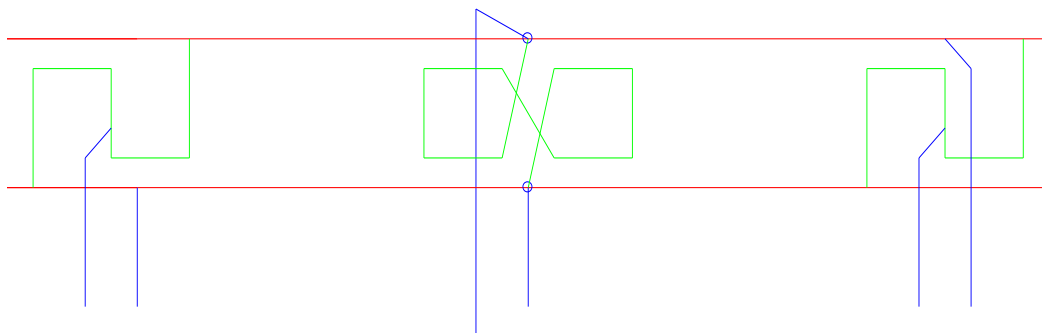


Figura 19.- Representación gráfica de un circuito de vía de audiofrecuencia con alimentación central.

## 5. CONDUCTANCIA DE LOS CARRILES RESPECTO A TIERRA.

Los valores máximos de la conductancia entre carril y tierra para una línea tranviaria, se indican en la **Tabla 1: Valores recomendados de conductancia por unidad de longitud**, de la norma **EN 50122-2**, con las consideraciones expresadas en su versión de **Corrigendum** (publicación posterior):

Sistema de tracción	Aire libre (S/km)	Túnel (S/km)
Ferrocarril	0,5	0,5
Sistema de transporte masivo en formación abierta	0,5	0,1
Sistema de transporte masivo en formación cerrada	2,5	-

Tabla 2. Valores recomendados de conductancia por unidad de longitud.  
Fuente UNE EN 50122-2.

En el que los distintos sistemas de tracción indicados son los siguientes:

- Ferrocarril: Lo constituye el sistema clásico formado por traviesas, bien de madera u hormigón, sobre base de balasto.
- Formación abierta: Lo constituye aquel en que la parte superior de los carriles no se encuentra a la misma altura que la superficie que le rodea (los carriles están más altos). Este caso corresponde a la configuración típica de los carriles en instalaciones metropolitanos de metro.
- Formación cerrada: Lo constituye aquel en que la parte superior de los carriles se encuentra a la misma altura que la superficie que lo rodea. Este caso constituye la configuración típica tranviaria.

### 5.1. MEDIDA DE LA CONDUCTANCIA EN LOS CARRILES

La conductancia es la inversa de la resistencia eléctrica, se designa por G y se mide en  $\Omega^{-1}$  o siemens en el sistema internacional.

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \text{ (Siemens)}$$

Antes de realizar las medidas será necesario comprobar que en la zona de medida no existen conexiones entre carriles de la misma vía o entre vías.

El método de medida de la resistencia del carril queda determinado en la norma UNE EN 50122-2 de acuerdo con la forma siguiente:

- Las mediciones deberán realizarse sin que exista ningún tren en el tramo correspondiente.
- Deberá realizarse varias mediciones para evitar errores y que estadísticamente esta dentro de los valores apropiados
- La inspección de corriente se realizará conectándose y desconectándose de forma periódica  
 $AV = Mon - Moff$
- Se tomaran dos tramos contiguos midiendo la caída de tensión la longitudinal Ma y Mb



Para la medida de la conductancia de la vía se deberá elegir un tramo que no excede de los 2km de longitud.

Las conexiones a realizar se harán de acuerdo con el circuito que se indica a continuación y que está basado en lo descrito en la norma UNE EN 50122-2.

La corriente inyectada tendrá un valor mínimo de 10A, conectando y desconectando el circuito de forma periódica.

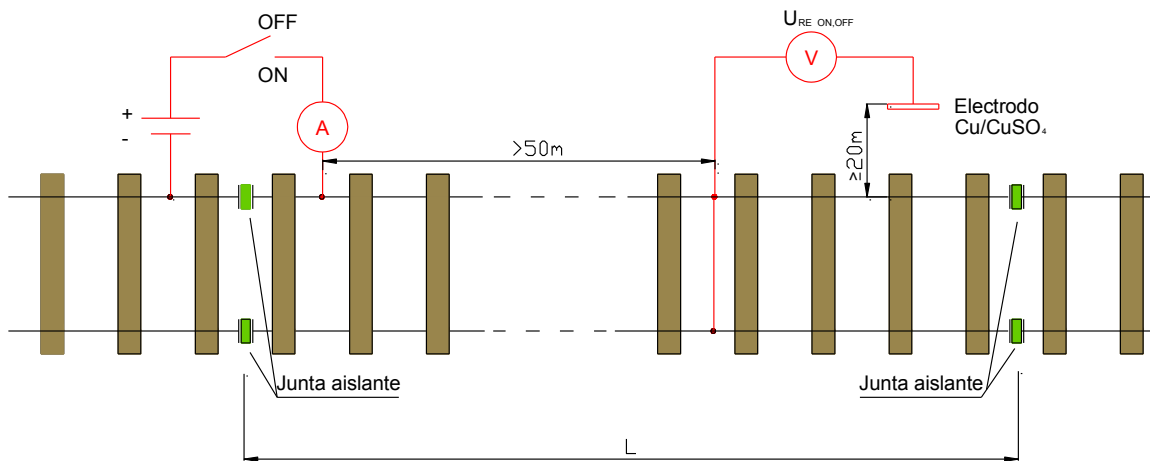


Figura 21. Esquema para la medida de la conductancia de los carriles

El valor de la conductancia se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$G_{RE} = \frac{1}{L} \times \frac{I}{\Delta U_{RE}} \quad \text{Donde: } \Delta U_{RE} = U_{RE,ON} - U_{RE,OFF}$$

siendo:

I=Intensidad inyectada en A

L=longitud del tramo en km

$\Delta U_{RE}$ =tensión entre carril y tierra en V

$G_{RE}$ =Conductancia por unidad de longitud entre vía y tierra, esperada en siemens por km

En algunos casos, y especialmente cuando las longitudes de vía a medir son pequeñas o tienen un elevado aislamiento con respecto a tierra, es difícil conseguir un valor de corriente de 10 A, por lo que es necesario recurrir a realizar la medición con valores de corriente mas reducidos.

## 5.2. MEDIDA DE LA RESISTENCIA LONGITUDES DE LOS CARRILES

La medida de la resistencia longitudinal de los carriles, o la comprobación de las misma, se realizará de acuerdo con la figura 19, en donde se instalarán tres lazos de cierre, situados uno en el punto a aplicar la tensión (punto central), y otros dos situados uno a cada lado de la zona a medir.

Para la realización de las medidas y teniendo en cuenta el reducido valor de resistencia, es necesario que las conexiones a los carriles del equipamiento de medida y lazo de cierre se realice limpiando esmeradamente la zona de conexión, ya que el óxido o un mal contacto pueden falsear de forma considerable el resultado de la medida.

La distancia de colocación del lazo de cierre deberá ser superior a la zona a medir, y se deberá comprobar que entre lazos de cierre no existe ninguna junta aislante.

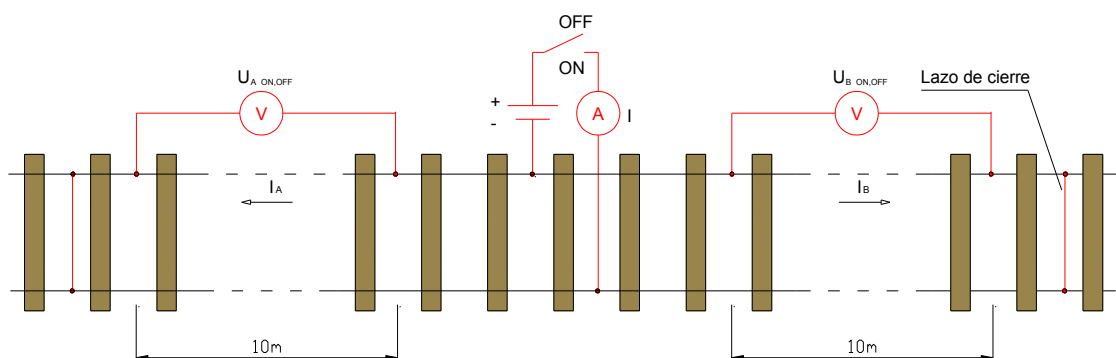


Figura 22. Conexión para medida de resistencia longitudinal de los carriles.

El valor de la resistencia del carril, (para un tramo de 10 m), se obtendrá mediante la siguiente expresión:

$$R_{\text{carril}}(10\text{m}) = \frac{(U_{A,on} - U_{A,off}) + (U_{B,on} - U_{B,off})}{I}$$

donde

I=Intensidad inyectada en A

$U_{A,on}$ =tensión en el lado A con el interruptor cerrado, en voltios

$U_{A,off}$ =tensión en el lado A con el interruptor abierto, en voltios

$U_{B,on}$ =tensión en el lado B con el interruptor cerrado, en voltios

$U_{B,off}$ =tensión en el lado B con el interruptor abierto, en voltios

$R_{\text{carril}}(10\text{m})$ =Resistencia longitudinal de carril (hilo) por cada 10 m de longitud

## 6. LA ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA Y LA CORROSIÓN

El entorno ferroviario se caracteriza por la proximidad de instalaciones que existen en el entorno de los carriles, que a la vez son parte del circuito de tracción, por el que pueden circular intensidades de valores elevados.

Como se ha dicho anteriormente, los carriles (para sistemas de tracción en corriente continua) van aislados del terreno, bien sea por las propias traviesas o por placas aislantes donde descansa el propio carril, no obstante la degradación del aislante con el paso del tiempo, o bien por problemas de degradación del conjunto motivados por el movimiento o las condiciones propias del terreno, hace que la corriente además de circular por los carriles, una parte de la misma circule en su camino hacia la subestación por el terreno, y que si en el mismo se encuentran elementos como canalizaciones metálicas o u otro tipo de conducciones, se conviertan en elementos conductores o portadores de dicha corriente.

Es bien conocido el proceso de corrosión de los metales en sus distintas variantes:

- Corrosión anaeróbica
- Corrosión por agresividad del medio
- Corrosión por aireación diferencial
- Corrosión galvánica
- Corrientes vagabundas

### 6.1 CORRIENTES VAGABUNDAS

El fenómeno de corrosión aparece cuando parte de la corriente, que se escapa del circuito de tracción, se establece por un conductor o conducción paralela volviendo a integrarse al circuito de tracción en las proximidades de la subestación, utilizando el terreno como elemento de unión entre ambos elementos.

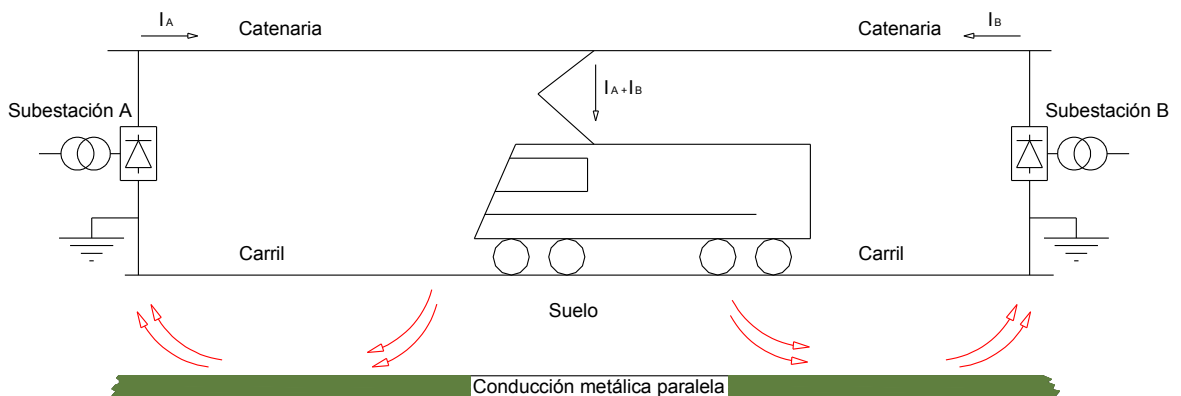


Figura 23. Esquema de circulación de las corrientes vagabundas por efecto de la tracción eléctrica

El terreno puede llegar a ser un buen conductor de la corriente eléctrica, teniendo en cuenta, su contenido de humedad, sales y material orgánico y ello dependerá de la propia resistividad del terreno que será proporcional a su estructura, dimensiones de las partículas que las constituyen, porosidad y permeabilidad, así como del contenido en agua y contenido en iones.

El grado de corrosión que se produzca será función de la intensidad y del tipo de alimentación del ferrocarril que sea de corriente continua o alterna, siendo mayor para el primer caso por dos factores fundamentales que son habituales, mayor intensidad del circuito de tracción ( hasta 2500-3000 A) y la direccionalidad constante de la corriente.

En el lugar que la corriente vagabunda abandona la estructura metálica o tubería tiene lugar una reacción de corrosión anódica en el punto de salida de la corriente, dando como resultado la oxidación del metal o disolución del mismo.

Esta disolución corresponde a una pérdida de masa que sigue la ley electrolítica de Faraday, la cual calcula que para una superficie desnuda de hierro o acero que se comporta como ánodo (salga la corriente del elemento) para una corriente continua de valor 1A disuelve 9,1kg/año de hierro.

La corriente de procedencia anódica esperada como fenómeno de corrosión para corriente continua de  $1A/mm^2$  da como resultado una velocidad de corrosión de 1,1mm al año de hierro.

La corriente que circula entre la estructura metálica o tubería hacia el circuito de retorno a través del terreno provoca una caída de tensión denominada IR en el electrolito (terreno) circundante.

En el caso de la corriente catódica, la corriente, entra en la estructura pudiendo producir la reducción del oxígeno y la producción de iones, por ello, la velocidad de corrosión es inferior a la corriente anódica, dando como resultado una velocidad de corrosión inferior a  $10\mu m/año$ .

## 6.2 CONSIDERACIONES ACTUALES SOBRE EL CIRCUITO DE RETORNO

El diseño de los nuevos trenes y la mayor frecuencia de trenes en la malla ferroviaria han dado lugar a un gran incremento de la corriente de tracción. Esto exige cumplir las medidas necesarias para garantizar la seguridad y la afección a instalaciones próximas en cuanto a:

- Compatibilidad electromagnética (CEM)
- Seguridad eléctrica
- Estabilidad de la tensión

Los tres aspectos indicados crecen proporcionalmente a la corriente de tracción, siendo necesario compatibilizar la conducción de dichas intensidades, adoptando varias soluciones técnicas según las necesidades y la administración ferroviaria.

Entre ellos podemos citar:

- Cable de retorno
- Transformaciones de subción o Booster.
- Sistemas de autotransformadores

El montaje del tendido ferroviario actual permite conocer de antemano los distintos valores eléctricos del circuito de tracción pudiendo diseñar la instalación ferroviaria acorde a dichas necesidades poniendo especial interés en aquellos aspectos que puedan ser perjudiciales o tener una afección clara sobre otras partes de la instalación.

En el caso del retorno de la corriente de tracción se deberá tener en cuenta varios aspectos sencillos que a la vez son determinantes en un funcionamiento óptimo:

- Balasto adecuado y limpio
- Traviesas con sistemas de sujeción aislante y adecuado

- Limpieza en el enrasado del balasto sobre las traviesas para evitar que entre en contacto con los carriles
- Diseño adecuado de la plataforma ferroviaria para un buen drenaje del agua
- En el caso de la vía en placa se pondrá especial atención a las resinas de relleno para que cumplan las características de aislamiento adecuado
- Una resistencia lo más baja posible del circuito de retorno por carril, utilizando preferiblemente, barra larga soldada y en caso contrario poniendo conexiones a carril eficiente.

Según la norma UNE EN 50122-2 indica que dicha resistencia de la vía (teniendo en cuenta los dos carriles) cuando se utiliza junta de carril no debe superar el 5%

- Cualquier elemento conectado al circuito de retorno debe estar aislado de tierra
- Los valores recomendados por la norma UNE EN 50122-2 para la conductancia ( $G'$ ) Por unidad de longitud en vía única se fija en 5,5 S/km
- El aislamiento de los carriles deberá garantizar que las tensiones accesibles de carril a tierra no sobrepasen los valores indicados en la norma UNE EN 50122-1
- Las conexiones adicionales que instalemos tanto longitudinales como transversales deberán diseñarse aisladas de tierra
- En las electrificaciones ferroviarias alineadas en corriente alterna deberá tener en cuenta la reducción de la sección conductora de los carriles debido al fenómeno del efecto pelicular.

Comparando la resistencia entre un conductor recorrido por una corriente continua, esta se distribuye de forma uniforme por dicha sección, mientras que la corriente alterna varía con la frecuencia y en consecuencia aumentan las pérdidas por efecto Joule, siendo mayor cuanto mayor sea la sección del conductor.

En la práctica, para la evaluación del efecto pelicular que se relaciona entre el valor de la resistencia efectiva y un equivalente en corriente continua se pueden emplear las fórmulas definidas en la norma UNE 21114 en el apartado 4, o bien la ecuación siguiente simplificada

$$R_{ca} = k \times R_{ca}$$

Siendo  $K$  un coeficiente que va a depender de la sección del conductor, del tipo de material y de frecuencia.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones el proyectista podrá determinar las limitaciones que pueden existir al utilizar exclusivamente los carriles como único conductor para el retorno de la corriente.

En los ferrocarriles alimentados en corriente continua, suele bastar con la sección de los carriles como conductores para la corriente de retorno, no obstante en algunos tramos, debido a las fuertes rampas o en aquellos donde es necesario hacer un recorrido más largo para salvar montañas donde se consigue a través de trazados tortuosos se puede añadir un feeder de retorno de refuerzo, bien a través del tendido en paralelo al trazado ferroviario; o bien, teniendo un feeder transversal al trazado minimizando la resistencia del circuito, a este se le llama feeder de acortamiento.



## BIBLIOGRAFÍA.

- Real decreto 919/2006 de 28 de índice para soluciones para la instalación de las tramas de tierra.
- Normas MI-IP03, MI-IP04 sobre aportaciones para soluciones para la instalación de las tomas de tierra.
- UNE 109502.- Instalación de tanques de acero enterrados para almacenamiento de carburantes y combustibles líquidos
- UNE 12954.- Protección catódica de estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Principios generales y xxxxx para tuberías.
- UNE EN 13509.- Técnicas de medida en protección catódica
- UNE EN 13636.-Proteccion catódica de tanques metálicos enterrados y de las tuberías asociadas.
- UNE EN 14505.-Proteccion catódica de estructuras complejas
- CEN/TS 15280 IN.- Evaluación del riesgo de corrosión por corrientes alternas de las tuberías enterradas. Aplicación a las tuberías protegidas catódicamente.
- UNE EN 50122-2.- Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Parte 2. Medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas de tracción de corriente continua
- UNE EN 50162.- Protección contra la corrosión de corrientes vagabundas de sistemas de corriente continua
- Conducción de la corriente de retorno a los trayectos de alta potencia de los ÖBB. A Gruber.
- Sistemas de retorno de corriente y puesto a tierra de instalaciones ferroviarias. Tercera parte: ferrocarriles de corriente continua. Revista elektrische Bahnen. Vol 96, nº4. Abril 1998. Autor: deustchmann, P; zachmeier, M.
- Electrificación ferroviaria de C.A. con cable de retorno activo. Autor; TUTTAS, C. elektrische Bhnen, vol 99, nº 6/7. Junio/Julio 2001
- Señalización Ferroviaria. Autor: Mariano Puebla remacha. Renfe 1982
  - Acortamientos
  - Feeder negativo a juntas de trayecto
  - Mejora del circuito de retorno con ayuda de cables o adicionales