

Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria (I)

General review and future perspective of railway traction infrastructure (I)

José Conrado Martínez Acevedo

Jefe de Área de Investigación, Desarrollo e Innovación. Dirección de Ingeniería e Innovación. ADIF
Coeditor de IEEE Electrification Magazine (Electric Trains Area)

Resumen

La tracción eléctrica continúa posicionándose como el principal tipo de tracción en los ferrocarriles de los países desarrollados. Ello está potenciando el desarrollo actual y futuro de nuevos equipos y sistemas que permitan, principalmente, la mejora de la Eficiencia Energética en la tracción, la mejora de la integración de las redes ferroviarias con las redes eléctricas generales y la mejora de la interoperabilidad de los sistemas eléctricos ferroviarios. En el presente artículo se trata expresamente qué tecnologías actuales y futuras son y serán desarrolladas previsiblemente para la mejora de la Eficiencia Energética en lo referente a la tracción.

Palabras clave: Sistema Eléctrico de Potencia, Corriente Continua, Corriente Alterna, Eficiencia Energética, Investigación y Desarrollo, Energía eléctrica regenerada.

Abstract

Electric traction continues to position itself as the main type of traction on the railways in developed countries. This is enhancing the current and future development of new equipment and systems to primarily improve energy efficiency in traction, improved integration of rail networks with general electrical networks and improving the interoperability of electric rail systems. In the present article deals specifically what current and future technologies are expected to be developed and improved energy efficiency regarding traction.

keywords: Power Electric System, DC, AC, Energy Efficiency, R&D, Electric energy regenerated.

1. Introducción

La tracción eléctrica ofrece, frente a la tracción diesel, ventajas como la posibilidad de construir vehículos de gran potencia y velocidad, mejores rendimientos desde el punto de vista del consumo energético y menor impacto medioambiental. Sin lugar a dudas, esta tracción es la tracción del presente y del futuro en los ferrocarriles, ocupando actualmente el primer lugar en los sistemas ferroviarios de los países desarrollados con la única excepción importante de los Estados Unidos de América. En los países en vías de desarrollo, este tipo de tracción es también la que tiende a instaurarse en la totalidad de sus ferrocarriles principales.

Por el contrario la tracción eléctrica requiere grandes inversiones económicas en instalaciones propias (líneas eléctricas de alimentación, subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica para alimentación al tren), por lo que precisa de estudios económicos importantes. En cualquier caso, en líneas de elevadas velocidades de circulación y/o de tráfico intenso como es el caso de las líneas de alta velocidad, el empleo de energía eléctrica es siempre imprescindible.

Energía eléctrica con corriente continua y con corriente alterna

El uso de energía eléctrica en el ferrocarril a lo largo de los años, ha supuesto el desarrollo de sistemas con *corriente continua* (C/C) y con *corriente alterna* (C/A). El uso de la corriente continua vino motivado principalmente por la facilidad que suponía el uso del motor de tracción de corriente continua. Por su parte, los sistemas de corriente alterna permitían incrementar las distancias entre los puntos de consumo del ferrocarril (subestaciones de tracción) al ser más reducidas las caídas de tensión por emplear tensiones eléctricas mayores.

A diferencia de lo que ocurre con la generación de energía eléctrica en las centrales, en las que siempre se genera corriente alterna en tres ondas desfasadas (*corriente alterna trifásica*), el empleo de corriente alterna en ferrocarriles sólo utiliza una onda (*corriente alterna monofásica*).

En la infraestructura de los sistemas eléctricos ferroviarios es frecuente la modificación o conversión de la corriente entre los dos tipos anteriores, destacando:

- A.** Conversión de C/A trifásica a C/C. Este proceso se denomina rectificación y puede ser: 1) no controlada, cuando se realiza exclusivamente por diodos y 2) controlada, cuando se emplean otros semiconductores del tipo tiristor o IGBT.
- B.** Conversión de C/C a C/A trifásica. Este proceso se denomina ondulación ó inversión.
- C.** Conversión desde un nivel de tensión de C/A a otro nivel de tensión de C/A, manteniendo constante la potencia entregada y la frecuencia de trabajo. Este proceso se denomina transformación.

La conversión **C** es la que siempre se emplea en ferrocarriles alimentados en corriente alterna a frecuencia industrial mientras que la conversión **A** es la propia de ferrocarriles alimentados en corriente continua (actualmente casi siempre del tipo no controlada). La conversión **B** representa actualmente un nuevo proceso, también en ferrocarriles de corriente continua, por el cual la energía eléctrica generada en el frenado eléctrico de los trenes es recuperada y ondulada a C/A mediante un convertidor electrónico de potencia (situado en la subestación) y ser posteriormente inyectada a la red de distribución. Este proceso de conversión ha tomado importancia desde el momento en que esta energía exportada es compensada a las compañías ferroviarias en algunos países.

En todo caso y como se verá en próximos apartados, la recuperación de la energía eléctrica de frenado en redes de C/C representa actualmente una de las principales estrategias de mejora de la Eficiencia

Energética en este tipo de infraestructuras. En efecto, esta energía podrá ser inyectada a la red – según se acaba de explicar – o almacenarla para ser posteriormente utilizada. También podrá reconducirse de manera óptima en la propia línea de transmisión a los trenes para permitir que cuando un tren frena se pueda alimentar a otro que acelere.

Caso específico de la corriente continua

La corriente continua es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica rectificadoras. Estas instalaciones son conectadas a una red de corriente alterna trifásica para después realizar dos etapas:

- Proceso de transformación, mediante un transformador que reduce la tensión de la red a otra de trabajo del rectificador.
- Proceso de rectificación, mediante un rectificador de diodos – rectificación no controlada – que acondiciona la tensión a la de alimentación del tren.

La tensión de salida del rectificador – por tanto la de alimentación al tren – ha sido muy diversa, llegando actualmente hasta los 3.000 V de tensión nominal. Otros valores normalizados en la actualidad son 750 y 1.500 V. Este tipo de electrificación es la que generalmente se emplea en ferrocarriles urbanos, metropolitanos y tranviarios.

Caso específico de la corriente alterna

La principal ventaja de este tipo de corriente es que permite emplear valores de tensión eléctrica elevados, lo que posibilita una caída de tensión menor. Si bien en el pasado existieron electrificaciones ferroviarias con corriente alterna trifásica, en la actualidad sólo se emplea la corriente alterna monofásica. El sistema trifásico se desarrolló de manera insuficiente debido, principalmente, a los graves inconvenientes que presentaban las instalaciones, sobre todo por su complejidad, tanto en lo referido a la infraestructura como al material rodante empleado. Debe considerarse que era necesario disponer de tres instalaciones independientes de alimentación eléctrica al tren – una por fase – y vehículos motores dotados de tres pantógrafos de captación.

Como consecuencia de esta situación resultaba muy atractivo el desarrollo de un sistema de electrificación en corriente alterna monofásica con alta tensión y sección conductora reducida. La corriente alterna monofásica es obtenida en subestaciones de tracción eléctrica transformadoras que se conectan a una red de corriente alterna trifásica para después realizar un único proceso de transformación. En este proceso se emplean transformadores reductores de la tensión de la red a la de alimentación del tren. Estos transformadores son especiales porque, precisamente, la tensión del devanado secundario es monofásica y no trifásica como ocurre en los sistemas de transporte y distribución.

Al igual que en los sistemas de C/C, la tensión de salida del transformador también ha sido muy diversa, siendo usualmente 15.000 ó 25.000 V de tensión nominal. La frecuencia de funcionamiento también ha sido variada según la época y la explotación considerada. Esta frecuencia condiciona de manera importante las instalaciones ferroviarias a emplear. Como se ha indicado, la energía eléctrica se genera en corriente alterna trifásica a una frecuencia denominada industrial. De esta manera si el sistema eléctrico ferroviario de corriente alterna funciona a esta frecuencia, su conexión al sistema eléctrico general puede ser directa. Este hecho no se da en otros países del centro de Europa, en los que la red ferroviaria se encuentra alimentada a una frecuencia distinta de la industrial. Precisamente es este valor de frecuencia de la red es el que condiciona la existencia de centrales de energía específicas para alimentar al ferrocarril.

2. Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) Ferroviario

Un sistema eléctrico ferroviario es un sistema en el que es posible absorber o generar energía y distribuirla a los trenes de forma eficaz y segura. Por tanto este sistema representa en sí mismo un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con características propias que hacen adecuado su análisis de forma independiente.

En la mayor parte de los casos el *SEP ferroviario* está interconectado al *SEP general del país* (Figura 1) o, por el contrario, constituye un sistema eléctrico propio. Como es de esperar, en el primer caso los sistemas de C/A ferroviarios funcionarán a la frecuencia industrial mientras que en el segundo lo harán a una frecuencia distinta.

Una característica común es que la energía eléctrica, desde su generación hasta su entrega a los trenes, pasa por diferentes etapas de adaptación, transformación y maniobra.

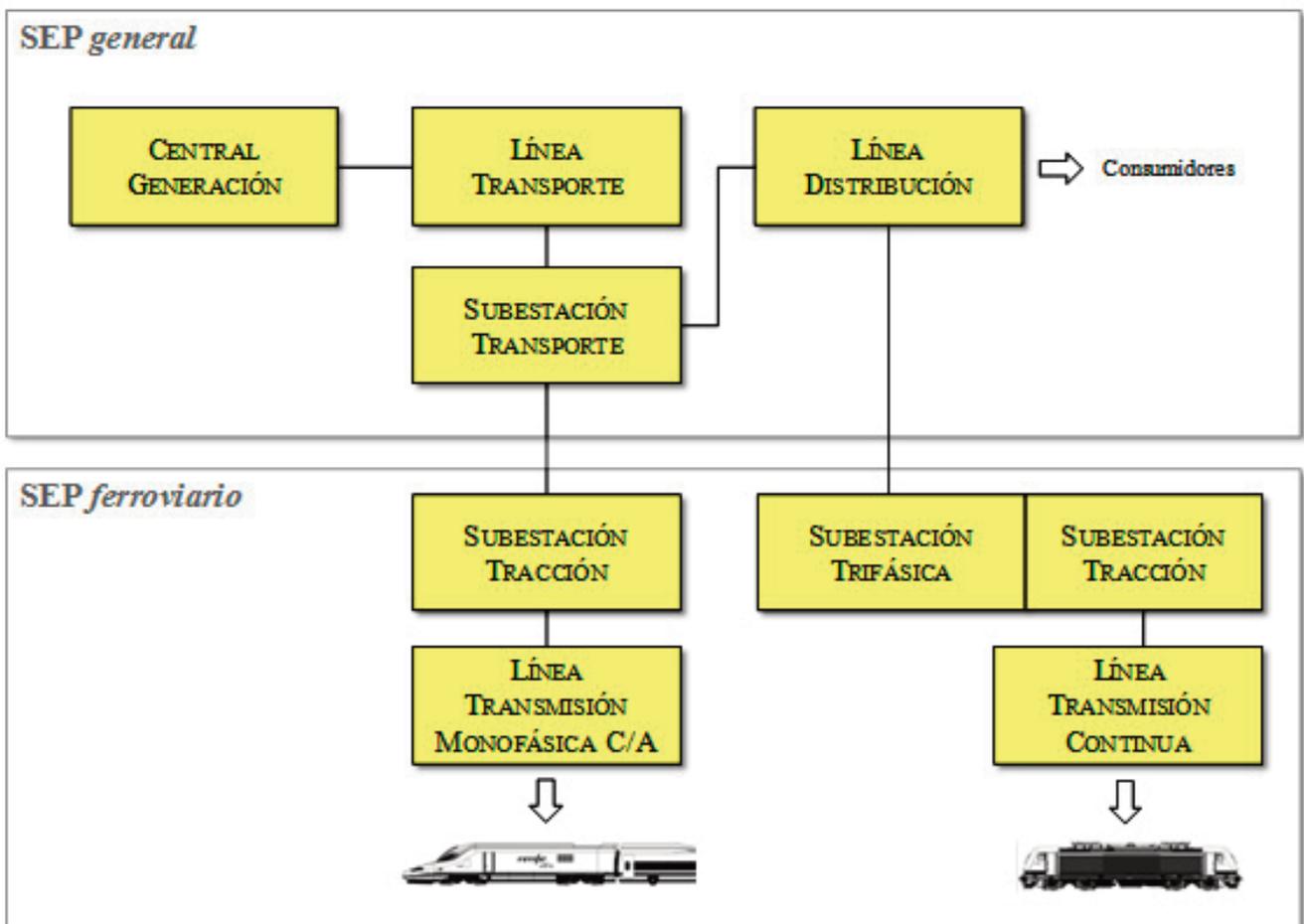


Figura 1. Esquema básico de un Sistema Eléctrico de Potencia 'general' y 'ferroviario'. El SEP ferroviario viene representado por todo el conjunto de elementos necesarios para que pueda funcionar un tren con tracción eléctrica. En el caso más común: 1) Sub-sistema Generación (Central de generación de energía eléctrica trifásica); 2) Sub-sistema Transporte (Subestación eléctrica trifásica de transporte y línea trifásica de transporte); 3) Sub-sistema Distribución (Subestación eléctrica trifásica y línea trifásica de distribución); 4) Sub-sistema Tracción Eléctrica de Alta Velocidad (Subestación de tracción de Alta Velocidad, línea monofásica de transmisión eléctrica al tren (catenaria) y tren); 5) Sub-sistema Tracción Eléctrica Convencional (Subestación de tracción convencional, línea DC de transmisión eléctrica al tren (catenaria) y tren. (Fuente propia).

3. Prospectiva tecnológica en la infraestructura de tracción eléctrica

Si bien es arriesgado afirmar cuáles serán las tecnologías futuras que primarán y se desarrollarán en el campo de la infraestructura para tracción eléctrica ferroviaria, aquí se presenta un análisis basado en los diferentes proyectos tecnológicos que actualmente viene desarrollando diferentes gestores ferroviarios y empresas tecnológicas del sector. El análisis realizado se ha clasificado en tres grupos principales de tecnologías:

- **Mejora de la Eficiencia Energética (E/E) en la tracción.** El consumo de energía eléctrica de tracción sigue representando el mayor coste de explotación de las empresas ferroviarias por lo que se continua (y continuará) investigando y desarrollando tecnología que permita reducir este consumo.
- **Mejora de la integración del SEP ferroviario de C/A con el SEP general.** El SEP ferroviario que funciona con C/A a frecuencia industrial es un sistema perturbador del SEP general como consecuencia de sus características técnicas de funcionamiento¹. La gran expansión que está teniendo este tipo de líneas ferroviarias (casi siempre referidas a líneas de alta velocidad) está produciendo el desarrollo actual y futuro de elementos y componentes de tracción en tierra que permitan reducir las perturbaciones producidas sobre el SEP general.
- **Mejora de la interoperabilidad de los sistemas eléctricos ferroviarios.** La interoperabilidad ferroviaria sigue presentándose como uno de los objetivos actuales y futuros que más importancia tiene en el campo de la electrificación ferroviaria. Si bien se ha establecido un nivel mínimo de armonización técnica, definiendo parámetros interoperables, continúan existiendo casos específicos que por su grado de implantación existente no resultan económicamente rentables modificar, debiendo convivir de manera permanente con el resto de parámetros interoperables. Son estos casos específicos lo que están haciendo desarrollar diferentes modalidades de tecnología que permita operar con esta diferencia de parámetros.

Como se verá a continuación, una característica común a todos los grupos considerados estriba en el empleo de nuevos equipos y sistemas electrónicos de potencia en tierra. Estos equipos, que no han tenido el nivel de penetración en la infraestructura de tierra que sí han tenido en el campo del material rodante, están demostrando su misma efectividad al ser muy versátiles y al hacer uso de tecnologías ya maduras².

4. Tecnología para la mejora de la E/E en la tracción

Junto a la Industria, el sector Transporte se encuentra entre los sectores de actividad que más energía consumen en los países desarrollados. Es por ello que el consumo de energía en este sector es un serio problema social, siendo su crecimiento muy superior al de otros usos. En el caso del sector ferroviario y considerando la energía eléctrica consumida durante 2.012 por el Administrador de Infraestructuras

¹ 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.

² Cabe no obstante destacar el caso de las compañías ferroviarias japonesas (JR), las cuales son pioneras en el desarrollo e implantación de sistemas electrónicos de potencia en la infraestructura desde hace décadas: La potencia total instalada de estos equipos en el año 2.000 ya rondaba los 1.500 MVA.

Ferrovias (ADIF), se tiene que este consumo fue de aproximadamente 2.800 GWh (aproximadamente el 1,1% del consumo total del país) de los cuales un 84% se destinaron a energía eléctrica de tracción.

Cabe destacar que el incremento de la velocidad de los trenes es uno de los atributos de mayor calidad del servicio que produce mayores consumos específicos pues gran parte de la resistencia al avance crece con el cuadrado de la velocidad. Por otra parte, un mejor servicio al cliente supone siempre, en cada relación de tráfico, una mayor frecuencia de trenes debiendo vencer un mayor número de “veces” la resistencia al avance con el consiguiente aumento del consumo específico de energía. Por último, el uso de los servicios auxiliares (calefacción y aire acondicionado principalmente) también produce importantes aumentos del consumo específico de energía.

Es por ello que un reto actual y futuro de la tracción eléctrica debe ser su mejora continuada en el campo de la Eficiencia Energética. Si bien otros modos están mejorando dicha eficiencia, existe todavía una brecha notable a favor del ferrocarril en comparación con el transporte por carretera y por avión. Aún así, el ferrocarril no debe descuidar en su ventaja competitiva y debe continuar innovando para reducir su consumo energético de tracción. Cabe destacar que los diferentes planes de investigación de un gran número de administradores y compañías ferroviarias tienen como un objetivo común la mejora de la eficiencia energética de sus redes (de nuevo se reseña que el gasto económico destinado a energía de tracción es uno de los costes de explotación más importantes).

Se puede resumir a continuación algunas líneas de trabajo que se están potenciando:

- **Implantación de procedimientos y nuevos componentes para la reducción de pérdidas eléctricas** en los diferentes elementos de la red eléctrica ferroviaria.
- **Implantación de planes de conducción económica.** Este tipo de conducción, definida como aquella que permite obtener el máximo aprovechamiento de la energía de tracción, evita en lo posible la utilización de los frenos pues trata de aprovechar al máximo la marcha en deriva, es decir, la energía cinética y potencial del tren con objeto de recorrer el mayor número de kilómetros sin aplicar la tracción.
- **Implantación de nuevas tecnologías para el aprovechamiento de la energía eléctrica generada con el freno regenerativo de los trenes.** Respecto a esta línea de trabajo, en el siguiente apartado se describen los tipos principales de estas tecnologías.

No debe olvidarse las actuaciones propias a realizar en el material rodante para mejorar la Eficiencia Energética del sistema en su conjunto. A diferencia de las anteriores, estas actuaciones son puestas en práctica principalmente por los fabricantes y las empresas operadoras de cada tipo de vehículo. De acuerdo a [2] el gran ahorro de energía ya se ha realizado en el caso de los equipos eléctricos embarcados. Concretamente se afirma que los nuevos desarrollos en el material rodante producirán sólo pequeñas mejoras, entre el 1 y el 0,5% de ahorro, por lo que los principales ahorros tienen que venir de nuevos enfoques derivados principalmente de la operación y el diseño de la infraestructura.

Generación de energía eléctrica mediante el uso del freno regenerativo

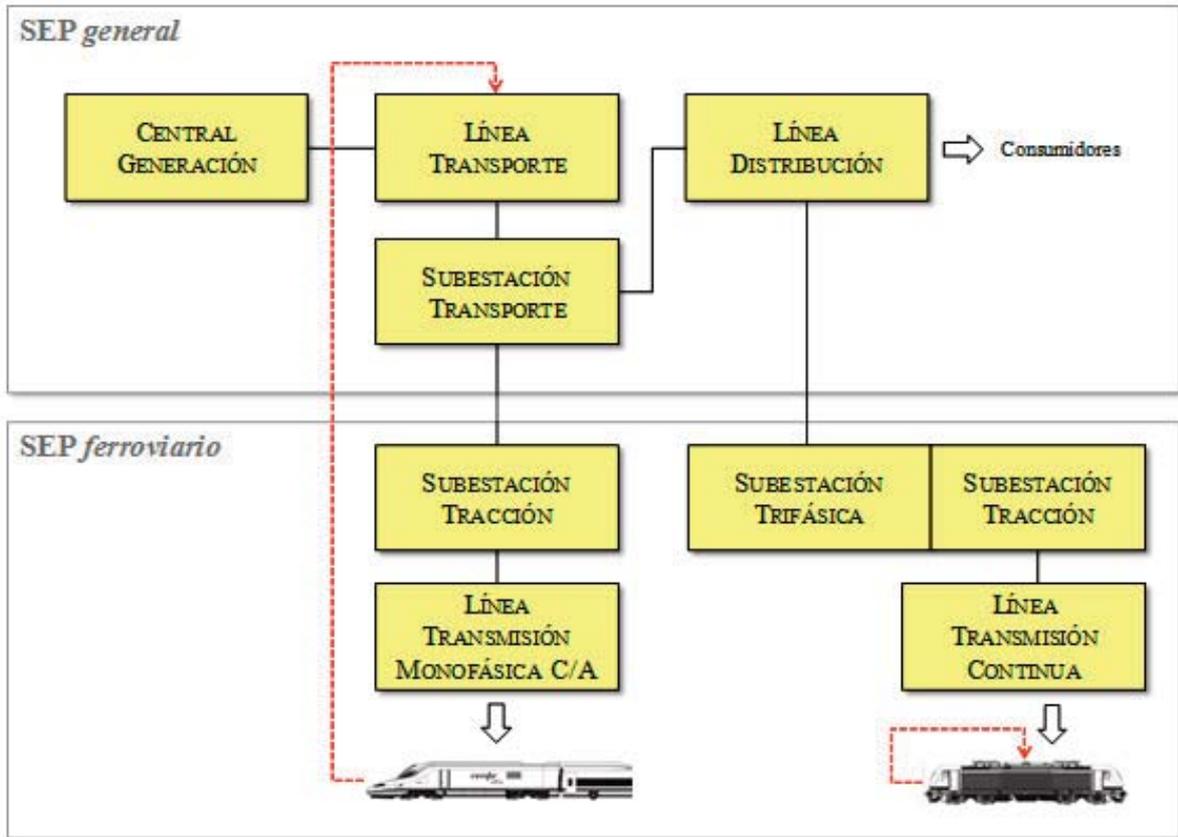
Los trenes de tracción eléctrica producen energía durante el proceso de frenado, convirtiendo su energía cinética o potencial en energía eléctrica. Si bien en algunos casos esta energía generada es disipada en resistencias eléctricas del propio tren, en otras ocasiones es enviada a la línea de transmisión, pudiendo ser utilizada por otro tren que se encuentre acelerando o incluso enviada a la red eléctrica de suministro si no se da este hecho.

El frenado que un tren realiza, entre otros motivos, para detenerse en los puntos de parada prescritos, o para bajar las pendientes existentes en su recorrido, o para cumplimentar las limitaciones de velocidad impuestas, puede tener consecuencias importantes en el cómputo total de la energía eléctrica demandada en una línea ferroviaria.

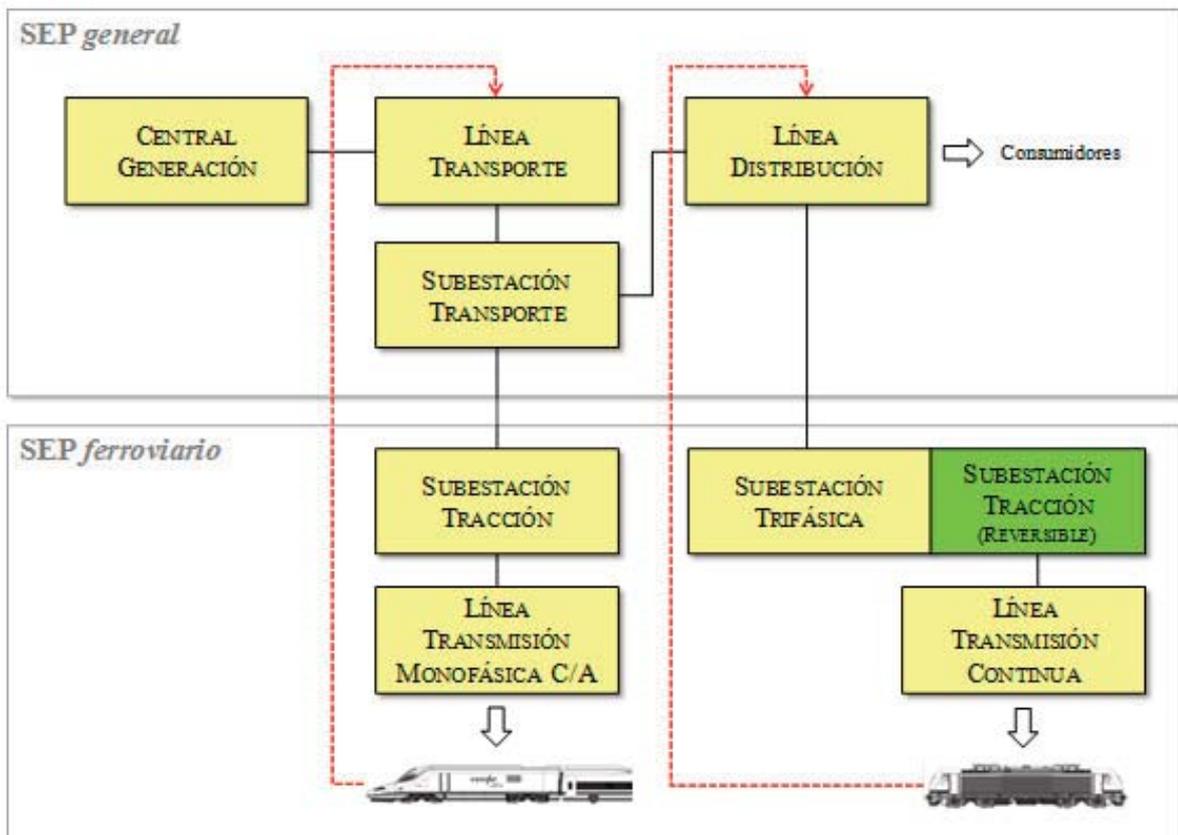
En efecto, de la energía que se disipa en el proceso de frenado, una parte se pierde en los frenos de fricción (frenos de accionamiento neumático), sin ningún aprovechamiento útil, y otra parte es disipada por los frenos dinámicos, que para el caso de los trenes de tracción eléctrica (o de tracción diesel eléctrica), suponen la generación de energía eléctrica.

En la actualidad la energía eléctrica que se genera en este tipo de freno puede tener varios destinos:

- Si el tren no tiene freno regenerativo, la energía es disipada en forma de energía calorífica en resistencias eléctricas embarcadas en el propio tren (frenado reostático).
- Si el tren sí tiene freno regenerativo, la energía es devuelta a la línea de transmisión. En este caso, si hay otro tren que se alimenta desde el mismo sector eléctrico y que demanda energía, la consume, constituyendo un proceso óptimo desde un punto de vista energético. Si no existe un tren demandando energía, se presentan tres casos adicionales:
 - o Si se trata de una electrificación en C/A, la energía generada es devuelta a la red eléctrica de suministro, pudiendo ser utilizada por otros consumidores conectados a ella (Figura 2A).
 - o Si se trata de una electrificación en C/C con un grupo rectificador en la subestación, la energía es disipada en las resistencias del freno reostático que lleva instalado el tren (Figura 2A).
 - o Si se trata de una electrificación en C/C con un grupo rectificador en la subestación y un inversor en paralelo (subestación *reversible*), la energía generada es devuelta a la red eléctrica de suministro, pudiendo ser utilizada por otros consumidores conectados a ella (Figura 2B).



A)



B)

Figura 2. Diagrama de flujo de la energía eléctrica generada. (Fuente propia).

Cabe destacar que entre 2.007 y 2.009 un grupo de empresas e instituciones españolas³ desarrollaron el proyecto de investigación *Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables* (proyecto *ELECRAIL*). En dicho proyecto se estimó que para un año tipo, los trenes que circulan por las redes ferroviarias españolas disipan anualmente en el freno unos 1.200 GWh de energía. De esta cantidad de energía, sólo se aprovecha en la actualidad algo menos del 50%. El resto se pierde: O bien porque algunos trenes no tienen freno regenerativo, o bien por la imposibilidad de devolver energía eléctrica desde de la red ferroviaria convencional a la red eléctrica general.

4.1. Tecnologías para el aprovechamiento de la energía del freno regenerativo

El aprovechamiento interno de la energía regenerada por los trenes debe afrontarse mediante la incorporación en la infraestructura de tecnologías muy diversas por lo que la I+D cobra una especial relevancia en este proceso.

Reaprovechamiento de la energía de frenado a través de una configuración y/u operación óptima de la red en líneas de C/C y C/A

El objetivo es propiciar la situación en la cual un tren frena y otro acelera de manera que éste último consuma la energía eléctrica regenerada por el primero. Para propiciar que este hecho se produzca de forma frecuente, se pueden realizar distintas acciones; Así por ejemplo se podría configurar el circuito eléctrico de tracción permitiendo secciones más largas y por tanto con mayor densidad de trenes en ellas. También se podría implantar una malla de explotación en la que se sincronicen los procesos de aceleración y frenado de los trenes en una misma estación.

En la actualidad son las líneas con alta densidad de tráfico – normalmente líneas metropolitanas y de cercanías – en las que suele producirse esta situación. Ello es debido al alto número de paradas que los trenes realizan en estas explotaciones, lo que implica frecuentes procesos de aceleración y frenado. Se ha estimado que se está llegando a recuperar entre el 15 y el 30% de la energía consumida.

Como es de esperar, en las líneas de alta velocidad (con C/A) la situación en la cual un tren frena y otro acelera es menos probable si se compara con las líneas ferroviarias anteriores. Y es que además de existir por lo general una menor densidad de tráfico, también hay que considerar la existencia de zonas neutras de separación de fases eléctricas en la línea de transmisión. Lógicamente la existencia de un mayor número de estas zonas puede implicar que los sectores eléctricos sean más cortos por lo que se hace menos probable que varios trenes coexistan en un mismo sector y que por tanto se puedan dar procesos de reaprovechamiento energético internos.

Inversión de corriente en líneas de C/C

Según se ha indicado anteriormente, mientras que en las electrificaciones de C/A monofásica la devolución de energía a la red de suministro es algo que se hace por las propias características técnicas del sistema, no ocurre lo mismo en las electrificaciones de corriente continua. En este caso la existencia de rectificadores de diodos impide la circulación de corriente hacia la red exterior.

³ Consultar Tabla II del presente artículo.

Si bien la tecnología ha estado disponible todos estos años para poder permitir la circulación de esta corriente desde la subestación de C/C a la red de distribución, normalmente mediante la incorporación de un inversor de corriente en paralelo con el grupo transformador/rectificador (Figura 3A), no ha existido un marco legal y sobre todo económico, que incentivara el proceso por parte de los gestores y empresas ferroviarias. En esta situación sólo se beneficia el SEP general, pues recibe grandes cantidades de energía procedente de las redes ferroviarias sin que éstas reciban ninguna compensación económica. La creación de este marco (en España regulado por el Real Decreto 1011/2009) ha permitido que la instalación de inversores de potencia sea cada vez mayor, posicionándose como una de las soluciones más rentables para las empresas ferroviarias.

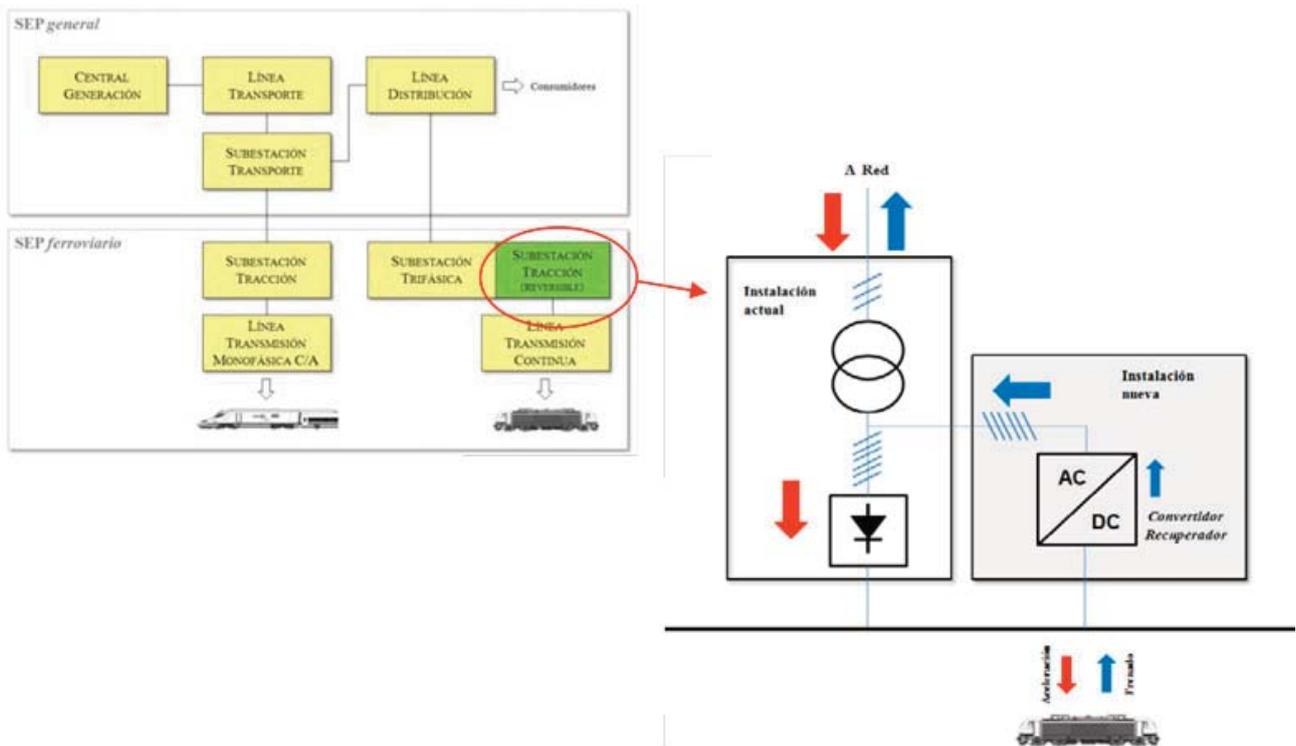
Almacenamiento de energía en tierra en líneas de C/C

El principio de funcionamiento consiste en almacenar la energía regenerada en plantas de almacenamiento situadas en tierra. Estas plantas, que se pueden situar en la propia subestación de tracción o a lo largo de la línea, suministrarían la energía almacenada cuando los trenes volvieran a demandarla (Figura 3B).

Si bien las tecnologías actuales de almacenamiento son muy variadas, la mayor parte de los proyectos ferroviarios en este campo están empleando baterías, supercondensadores y/o volantes de inercia, siempre conectados a un convertidor de potencia conectado a su vez con la línea de transmisión.

Trasvase de corriente entre líneas de C/C y C/A

La expansión continuada de las líneas de alta velocidad (C/A) plantea la posibilidad de conectar desde ellas las líneas de C/C, en aquellos puntos en los que ambos tipos de redes coexisten. Para ello se instalaría un convertidor electrónico de alta potencia que permita trasvasar la energía regenerada en la línea de alta velocidad a la línea de C/C y viceversa.



A)

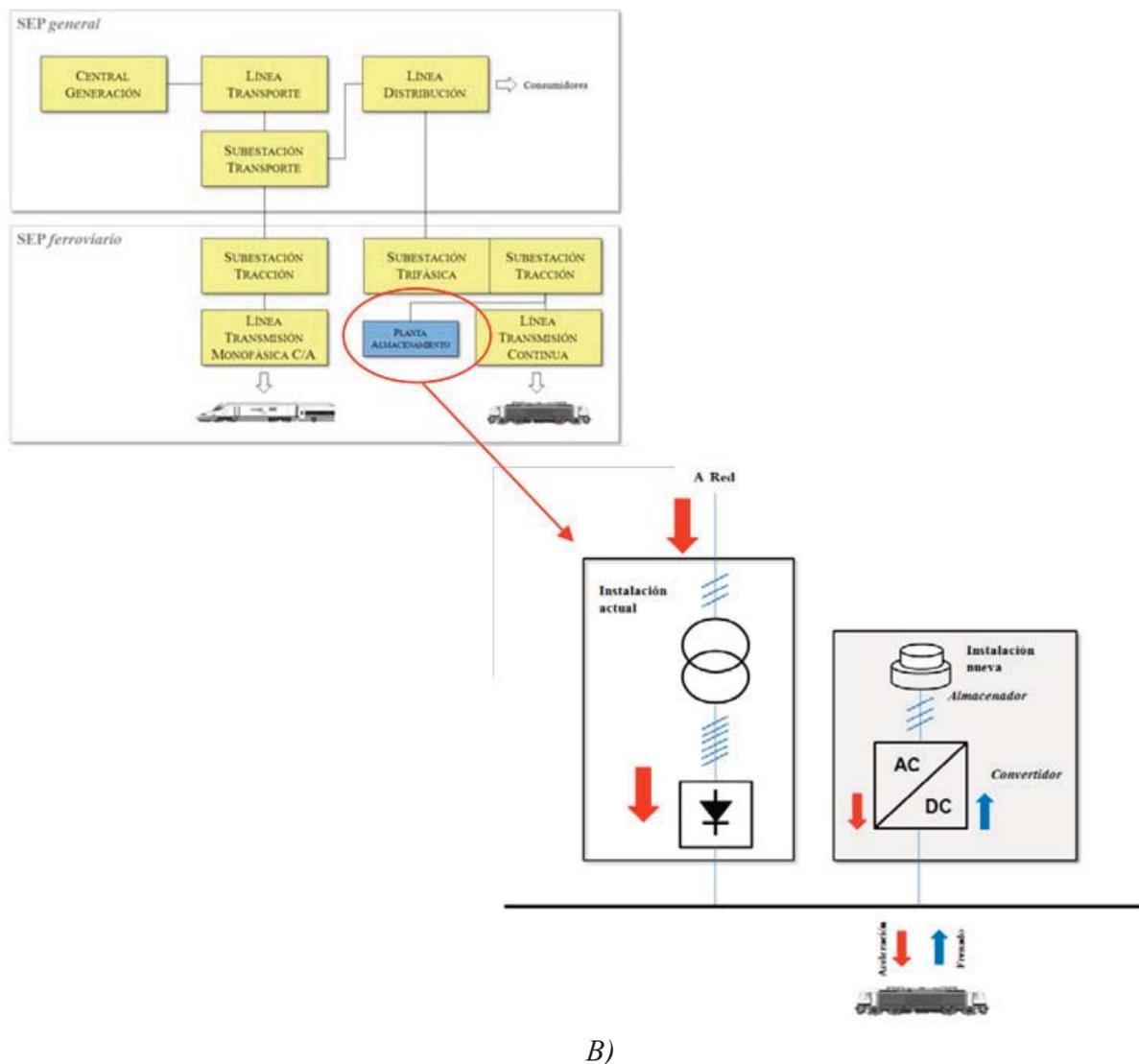


Figura. 3. A) Esquema de inversión de corriente. B) Esquema de almacenamiento de energía en tierra.
(Fuente propia).

4.2. La Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI)

Los administradores ferroviarios se están planteando cuál podría ser el escenario eléctrico ferroviario considerando la adopción de las pautas establecidas por las redes inteligentes. En todos los casos estas pautas permitirían realizar una gestión óptima de la energía de tracción en el SEP ferroviario con el consiguiente ahorro energético.

Una red eléctrica convencional se basa en sistemas de comunicación unidireccionales que proporcionan energía desde las grandes plantas de generación centralizada hasta los centros de consumo, sin intercambio de información. Es una red en la que se generan fallos de manera constante, que ha de funcionar de forma perfecta durante casi todo el tiempo –o los problemas pueden acumularse en forma de cascada– y en la que se pierde mucha energía en la transmisión.

Una red inteligente propone, para ello, una comunicación de doble sentido entre los generadores y los usuarios, de forma que los aparatos y elementos a alimentar sean utilizados únicamente cuando la energía

esté disponible y resulte más barata. Esto permitiría a los proveedores de electricidad un mayor control sobre el estado del sistema, los posibles fallos y la calidad o cantidad de energía disponible en la red en cada momento. Las redes inteligentes suponen, además, un sistema eléctrico donde la micro generación, aquella que se genera cerca del ámbito donde va a ser consumida, juegue un papel mucho más importante.

Un aspecto fundamental que debe considerarse en una *Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente (REFI)*, estriba en controlar de manera óptima el uso de la energía regenerada de los trenes en el supuesto de la existencia de todos los dispositivos que permiten aprovecharla: Plantas de almacenamiento en tierra, interconexión de redes ferroviarias y subestaciones reversibles.

Si se considera que el SEP general envía señales de eficiencia a través del precio, se trataría de optimizar el coste de la energía, ya que la eficiencia no se consigue sólo reduciendo el consumo de energía, sino reduciendo la importación de la red pública en los momentos en los que la producción de energía es más ineficiente (lo que se refleja en su mayor precio). Por ello, según la situación instantánea del mercado eléctrico, podrá ser más interesante almacenar energía, devolverla a la red, producir parte de la electricidad dentro del sistema, circular en deriva, etcétera.

Adicionalmente una REFI debe plantear la integración del SEP ferroviario con los sistemas ATP y con las herramientas de planificación y control de itinerarios de manera que los trenes puedan ser controlados en función de su energía consumida. Así, un tren que fuera adelantado en su horario podría tener restringido el consumo de energía de tracción en ciertos casos mientras que en la situación contraria no debería tener restricciones. Respecto a los sistemas ATP, y con la excepción importante de ciertas explotaciones ferroviarias interurbanas, actualmente el sistema ERTMS no cuenta actualmente con una especificación que permita la conducción eficiente del vehículo desde un punto de vista energético. Una REFI debe permitir alcanzar este objetivo, integrando de manera inteligente las acciones de los trenes que se encuentran conectados a ella con el fin de conseguir un suministro eléctrico eficiente, seguro y sostenible.

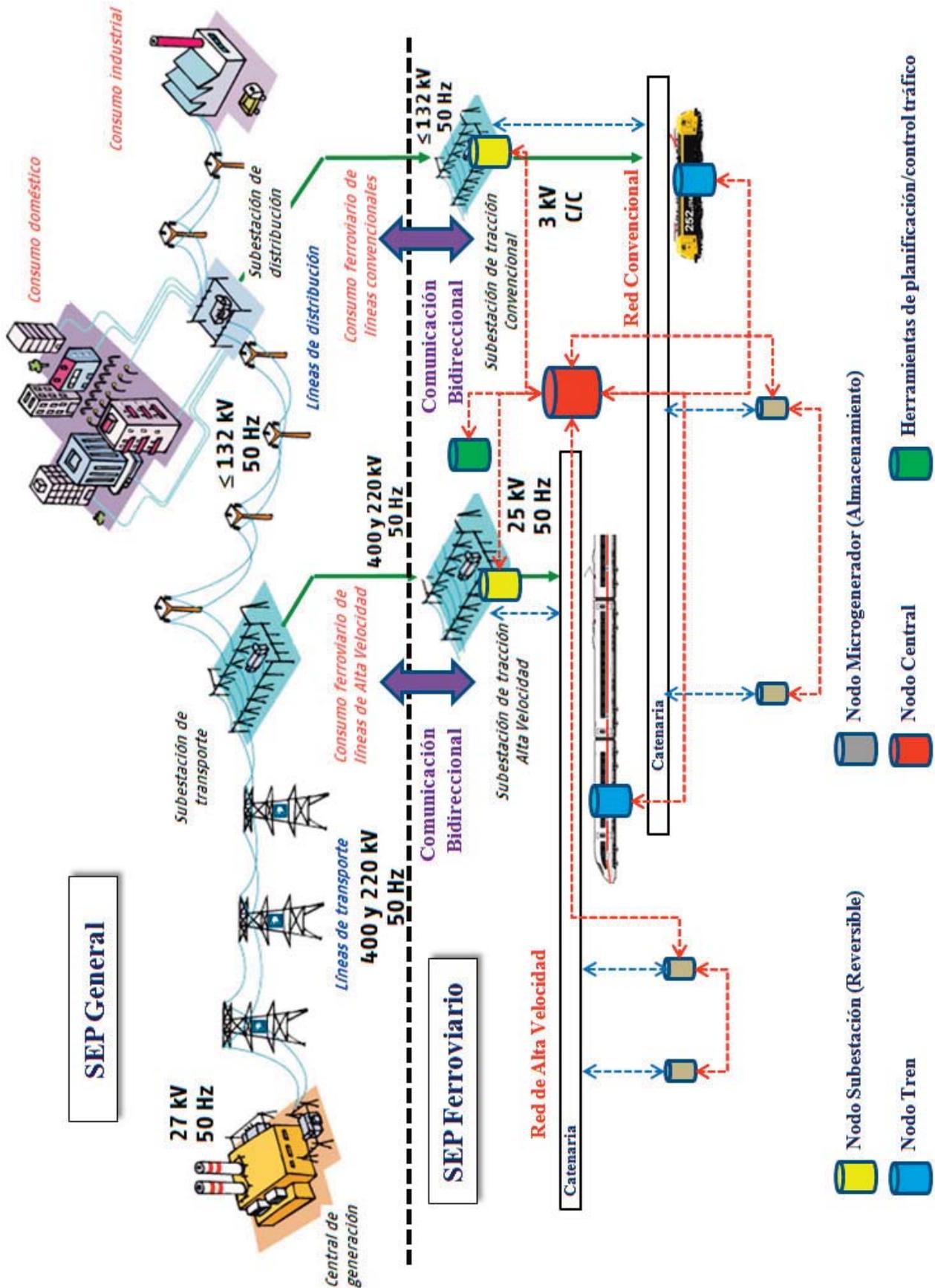


Figura 4. Posible esquema general de REFI. (Fuente propia, con ilustraciones de Red Eléctrica de España (REE)).

4.3. Estrategia tecnológica para la mejora de la E/E en la tracción: Comparativa y síntesis general de las diferentes tecnologías

Es de esperar que la implantación de nuevos componentes que permitan mejorar las pérdidas eléctricas en la red sea una acción que debe considerarse en la fase de diseño y montaje del SEP ferroviario ya sea nuevo o renovado.

Con respecto al aprovechamiento de la energía de frenado, el reaprovechamiento entre trenes a través de la *configuración y operación óptima de la red* es, a priori, la primera solución que podría ser adoptada por parte de los administradores y compañías ferroviarias pues normalmente no suele llevar asociada la ejecución de planes presupuestarios de una cuantía elevada. Todo este paquete de medidas debería ser aplicado indistintamente en líneas de C/C y C/A.

Continuando con el aprovechamiento de la energía de frenado, y aun considerando la puesta en práctica de una configuración y operación óptima de la red, puede afirmarse que siempre existirá energía de frenado susceptible de ser reaprovechada por alguna de las otras tecnologías analizadas. Su implantación, sólo para el caso de líneas de C/C, sí conllevará una inversión económica derivada de la adquisición de los equipos correspondientes, debiendo ir precedida de los correspondientes estudios económicos de amortización. En este capítulo cobra especial importancia la posible remuneración económica que la empresa ferroviaria obtendría por devolver a la red general la energía de frenado no aprovechada, por lo que la tecnología de *inversión de corriente* tiene actualmente un interés creciente por parte de los agentes ferroviarios.

Cabe destacar que, a diferencia de esta tecnología, el *almacenamiento de energía* tiene otra serie de ventajas sobre la red ferroviaria, además del propio ahorro energético producido. En efecto, la incorporación de plantas de almacenamiento en la infraestructura de tierra puede suponer la mejora del flujo de potencia en la red, principalmente representado por el incremento de la tensión de servicio en la línea de transmisión, lo que lleva asociado a su vez menores desconexiones de las protecciones de mínima tensión de la subestación, mejora del funcionamiento de los motores eléctricos de los trenes, etcétera. De esta manera, si no se tuvieran problemas eléctricos de esta naturaleza, la tecnología de inversión de corriente sería a priori más interesante en el momento actual, pues también debe considerarse un menor coste de mantenimiento derivado del menor número de equipos que se precisan en la instalación.

Al igual que se indicaba con las medidas de configuración y operación óptima de la red para posibilitar el reaprovechamiento de energía entre trenes, la implantación de planes de conducción económica tampoco suelen ir asociados con grandes inversiones (al menos aquellos que se ejecutan de manera manual) por lo que también sería deseable su aplicación en todo tipo de líneas y explotaciones. La integración de este tipo de conducción con los sistemas ATP y ATO sería la solución técnica más apropiada, en cuyo caso sí será necesario realizar actuaciones en estos sistemas con los consiguientes costes asociados.

La Tabla I resume de manera general la situación anteriormente expuesta.

	Aplicación	Criterios y observaciones Técnicas	Criterios y observaciones Económicas
Implantación de procedimientos y nuevos componentes para la reducción de pérdidas eléctricas.	Línea D/C. Línea A/C.	Medida especialmente adecuada introducirla durante la fase de diseño/adecuación del SEP ferroviario.	No se plantea una inversión especialmente destacable. Durante la fase de diseño puede no representar ningún coste.
Planes de conducción eficiente.	Línea D/C. Línea A/C.	Importante reducción del consumo energético.	No se plantea una inversión especialmente destacable. Incluso de ser adoptada de manera manual, su coste es ínfimo
Aprovechamiento de la energía de frenado. <i>Aprovechamiento por otros trenes (configuración y operación eficiente).</i>	 <i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	 <i>Proceso óptimo desde el punto de vista energético. Aprovechamientos entre el 20 y el 30% de la energía consumida.</i>	 <i>No se plantean inversiones destacables. La idea es optimizar la red existente.</i>
<i>Devolución a la red eléctrica externa.</i>	<i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	<i>En redes A/C la devolución es inmediata. En redes D/C debe considerarse si la energía es regularizada por la compañía eléctrica a favor de la compañía ferroviaria.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores para recuperación de la energía.</i>
<i>Devolución a otra red eléctrica ferroviaria (AC-DC).</i>	<i>Línea D/C. Línea A/C.</i>	<i>Proceso técnicamente factible si bien precisa actualmente de más estudios.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores para trasvase de la energía.</i>
<i>Almacenamiento.</i>	<i>Línea D/C.</i>	<i>Desde un punto de vista de ahorro energético puede ser menos interesante que la devolución a la red externa (en caso de ser considerada la energía). Tiene otras ventajas relacionadas con la mejora de los flujos y calidad de la energía.</i>	<i>Adquisición e instalación de convertidores y almacenadores de energía.</i>
Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente.	Línea D/C. Línea A/C.	Plantea integrar todas las tecnologías existentes y controlar en todo momento la reducción del consumo aplicando las pautas más adecuadas.	Actualmente plantea un análisis económico en detalle.

Tabla I. Comparativa y síntesis general de las diferentes tecnologías. (Fuente propia).

5. Apuntes generales sobre iniciativas tecnológicas destacables

Según se indicó, ya que el consumo de energía eléctrica de tracción representa en la actualidad uno de los mayores costes de explotación de las empresas ferroviarias, son numerosas las iniciativas tecnológicas puestas en marcha por administradores y compañías ferroviarias en colaboración con la industria, universidad y centros tecnológicos.

A tal respecto en la Tabla II se recoge una serie de ellas, tanto a nivel nacional como internacional, indicando sus principales objetivos así como información adicional variada.

Dentro del nuevo programa de investigación europeo Horizonte 2020, la Comisión Europea ha previsto que la actividad de I+D del sector ferroviario se regule mediante una fórmula de colaboración JU (*Joint Undertaking*) bajo el acrónimo *SHIFT²RAIL*. Dicha iniciativa, fundada por varias empresas y administradores ferroviarios, tiene por objetivo apoyar la competitividad de la industria europea en un sector amenazado por la competencia internacional, especialmente la industria asiática.

La importancia de *SHIFT²RAIL* estriba en que bajo su paraguas se desarrollará durante el próximo lustro todos los nuevos programas de I+D asociados a la Eficiencia Energética del ferrocarril. Cabe destacar que este aspecto es prioritario en esta nueva iniciativa tecnológica, lo cual vuelve a demostrar la importancia de este tema en el sector.

De manera más detallada, puede afirmarse que *SHIFT²RAIL* continuará potenciando y desarrollando la tecnología de red eléctrica inteligente, así como la optimización de equipos destinados a las diferentes acciones vistas anteriormente (nuevos convertidores electrónicos, más compactos y optimizados; nuevos equipos de almacenamiento, etc.).

Actuación	Ámbito	Programa I+D	Estado	Objetivos principales y promotores-socios
ELECRAIL.	Nacional.	Fomento-Cedex 2007.	Finalizado.	Analizar de forma sistemática el consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo de modelos y simuladores parametrizables. <i>Participantes: Fundación de los Ferrocarriles Españoles; IIT de la Universidad Pontificia Comillas (ICAD); Facultad de CC. Matemáticas de la Universidad Complutense de Madrid; Adif; Renfe-Operadora; FGC; Metro de Madrid; TMB; Dren; Patentes Talgo; CAF; Dimetronic; IngeTeam; y M. Torres.</i>
RAIL ENERGY.	Europeo.	VI Programa Marco.	Finalizado.	Reducir el consumo de energía mediante el desarrollo de un enfoque holístico marco, nuevos conceptos y soluciones técnicas y tecnológicas integradas para mejorar la eficiencia energética. <i>Participantes: Varios (ninguno español).</i>
ACE ² .	Nacional.	PROFIT.	Finalizado.	Desarrollar una planta de almacenamiento de energía de frenado basada en tecnología de volantes de inercia. <i>Participantes: Adif y Ciemat.</i>
SA ² VE.	Nacional.	PSE 2006.	Finalizado.	Mejorar el desarrollo anterior mediante la optimización del volante de inercia y los equipos de potencia. <i>Participantes: ACCIONA Infraestructuras, Adif, CEDEX, Ciemat, ELYTT Energy, Green Power, Iberdrola, Metro Madrid, TECNKER, Universidad de Sevilla y Zigor.</i>
INVERFER.	Nacional.	-	Finalizado.	Desarrollar un primer prototipo de subestación eléctrica D/C reversible de 3.000 V. Este prototipo se encuentra instalado en la línea de Cercanías Málaga-Fuengirola. <i>Participantes: Adif, Isolux e IngeTeam.</i>
FerroSmartGrid.	Nacional.	ININTERCONECTA 2011.	En ejecución.	Desarrollar un primer prototipo de ámbito local de REFI, sobre una línea ferroviaria en funcionamiento. <i>Participantes: Adif, Tehvent, Schneider Electric, Acisa, Inabensa, Win Inertia, Andel, Adevice e Indra.</i>
MERLIN.	Europeo.	VII Programa Marco.	En ejecución.	Desarrollar la funcionalidad y estándar de una REFI. El valor añadido del proyecto es que interactúan gran número de empresas europeas, lo que permite enriquecer los resultados al disponer y considerar la manera de operar en distintos países. <i>Participantes: Varios (CAF, Adif, Renfe y Fundación de los Ferrocarriles Españoles en el caso español).</i>
SHIFT ² RAIL.	Europeo.	Horizonte 2020.	Previsto.	Nuevo programa de I+D Europeo en el ámbito ferroviario. En el caso del área de Eficiencia Energética, el programa tiene previsto desarrollar una serie de medidas muy ambiciosas con auténticos demostradores en campo: Red Eléctrica Ferroviaria Inteligente, Nuevos equipos de potencia para aplicación en subestaciones reversibles (D/C) y sistemas de almacenamiento.

Tabla II. Iniciativas tecnológicas destacables en materia de E/E para tracción. (Fuente propia)

Bibliografía

[1] **Operación de trenes de viajeros. Claves para la gestión avanzada del ferrocarril.** *Alberto Cillero Hernández, Alberto García Álvarez y Pilar Jericó Rodríguez.* Fundación de los Ferrocarriles Españoles (Colección Técnica). 2.011.

[2] **Los cambios en el sector energético impulsarán la transformación de la tracción ferroviaria (traducido).** *Roger Kemps.* Artículo publicado en *Railway Gazette*. 2.008.

[3] **Tecnologías específicas de electrificación en ferrocarriles de Alta Velocidad.** *José Conrado Martínez Acevedo.* Documentación de Microcurso del mismo nombre. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. 2.012.

[4] **Devolución de energía eléctrica desde el sistema ferroviario a la red de suministro y reaprovechamiento previo.** *José Conrado Martínez Acevedo, Antonio Berrios Villalba, Jorge Iglesias Díaz y Carlos Tobajas Guerra.* Artículo publicado en el II Seminario sobre estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Sitges. 2.008.

[5] **Informe de proyecto de investigación ELECRAIL.** 2.011.

[6] **AC Power Supply system for railways in Japan.** *Tetsuo UZUKA y Dr. Hiroki NAGASAWA.* Railway Technical Research Institute. 2.009.

[7] **Análisis de las perturbaciones producidas por el sistema eléctrico de potencia de ferrocarriles de alta velocidad alimentados a frecuencia industrial.** *José Conrado Martínez Acevedo.* Artículo publicado en 2.014 en *Vía Libre Investigación Ferroviaria*.

[8] **Informe de Red Eléctrica de España (REE) en 2.012.** REE. 2.012.