



**MASTER EN AUTOMOCIÓN**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**SIMULACIÓN ELÉCTRICA DE LÍNEAS  
FERROVIARIAS ELECTRIFICADAS PARA EL  
DISEÑO DE UN SISTEMA DE  
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA LA  
RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.**

Autor: D. Miguel Tuya Merino

Tutor: D. Daniel Moriñigo Sotelo

Valladolid, 1 de Julio de 2015

**Escuela Ingenierías Industriales**

Depto. Ing<sup>a</sup> Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce s/n

47011 Valladolid  
(España)



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**Fundación Cidaut**

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



## INDICE

<b>1. Antecedentes</b> .....	3
<b>2. Objetivos del proyecto</b> .....	7
<b>2.1. Objetivos Técnicos específicos</b> .....	8
<b>3. El proyecto de Ferrolíneas de ADIF</b> .....	9
<b>4. La fase 3 del proyecto</b> .....	13
<b>5. Estado del arte</b> .....	17
<b>5.1. Sistemas de almacenamiento de Energía</b> .....	17
<b>6. Proyectos desarrollados con sistemas de acumulación</b> .....	25
<b>6.1. Sitras ® SES (Siemens Transportation)</b> .....	25
<b>6.2. Sitras ® MES (Siemens Transportation)</b> .....	26
<b>6.3. Sitras ® HES (Siemens Transportation)</b> .....	27
<b>6.4. MITRAC Energy Saber (Bombardier Transportation)</b> .....	28
<b>6.5. Tranvía de París (ALSTOM)</b> .....	29
<b>7. Simulación Eléctrica de Líneas Ferroviarias Electrificadas.</b> .....	31
<b>7.1. Simulador Eléctrico</b> .....	31
7.1.1. Descripción del simulador eléctrico.....	32
<b>7.2. Caso 1: Línea 3 del metro de Madrid.</b> .....	33
7.2.1. Hora Punta Sin Freno Regenerativo.....	34
7.2.2. Hora Punta Con Freno Regenerativo.....	34
7.2.3. Hora Punta Con Freno Regenerativo y SSEE Reversibles .....	35
7.2.4. Hora Valle Sin Freno Regenerativo.....	35
7.2.5. Hora Valle Con Freno Regenerativo.....	36
7.2.6. Hora Valle Con Freno Regenerativo y SSEE Reversibles. ....	37
<b>7.3. Caso 2: LAV Madrid – Zaragoza.</b> .....	40
7.3.1. Hora Punta Sin Freno Regenerativo.....	40
7.3.2. Hora Punta Con Freno Regenerativo.....	44
7.3.3. Hora Valle.....	48
<b>7.4. Conclusiones generales simulador Eléctrico</b> .....	48
<b>8. Conclusiones</b> .....	49
<b>9. Bibliografía</b> .....	51
<b>10. Lista de Figuras</b> .....	53





# **SIMULACIÓN ELÉCTRICA DE LÍNEAS FERROVIARIAS ELECTRIFICADAS PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA LA RECARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.**

## **1. Antecedentes**

En primer lugar cabe destacar que este trabajo fin de máster forma parte de la 3ª fase de un proyecto que comenzó hace algún tiempo, por lo que su denominación correcta sería **Ferrolinera 3.0**.

La Dirección Tecnológica de ADIF se ha visto atraída por el impulso que España está imprimiendo al desarrollo de la implantación de los vehículos eléctricos. ADIF, al conocer gran parte de las iniciativas que se están llevando a cabo en este ámbito por parte del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, y del nivel de implicación que éste está consiguiendo de los diferentes actores de la industria afectada, quiere contribuir y participar en este gran reto.

Mediante la utilización de sus infraestructuras de aparcamientos en estaciones y la propia red de suministro eléctrico –en la cual se incluye la generación de energía limpia proveniente del aprovechamiento del freno regenerativo de los trenes– ADIF puede representar un papel importante en la implantación y desarrollo de una gran red de puntos de recarga de vehículos eléctricos en España.

ADIF es consciente de la cantidad de factores críticos que rodean al mundo del vehículo eléctrico, y la importancia de contribuir a la desaparición de las barreras existentes para el rápido desarrollo de los vehículos eléctricos:

- Necesidad de estandarización.
- Necesidad de gestionar las recargas de forma optimizada (sin influir en el funcionamiento de la red de suministro eléctrico).
- Alto precio de las baterías, y en consecuencia de los vehículos.
- Existencia insuficiente de infraestructuras de recarga.
- Tiempos de recarga.
- Etc.

El concepto de Ferrolinera ha sido diseñado por ADIF y se refiere a aquel punto de recarga de vehículos eléctricos que se encuentra conectado a una red eléctrica ferroviaria.

Las características singulares del sistema eléctrico ferroviario vienen representadas, fundamentalmente, por la gran aleatoriedad de las cargas eléctricas, al tiempo que se trata de cargas móviles (trenes). Esto determina que este tipo de punto de recarga pueda diferenciarse respecto al resto de instalaciones de este tipo.

Cabe destacar que en ADIF existen redes de tracción alimentadas a 3.000 V en corriente continua (3.000 V c/c) y redes de tracción alimentadas a 25.000 V en corriente alterna monofásica (25.000 V c/a). Las redes de 3.000 V c/c se emplean en la red convencional mientras que la red de 25.000 V c/a se emplea en líneas de Alta Velocidad.

El problema de alimentar masivamente vehículos eléctricos desde una catenaria ferroviaria estribaría en la modificación de la curva de carga de la subestación eléctrica (S/E) correspondiente. Como es de esperar, si existen cargas eléctricas adicionales a las que representan los trenes, la potencia nominal de la subestación podría no ser suficiente, pudiendo existir limitaciones técnicas importantes para la alimentación de más trenes. Este hecho no interesa pues en todo caso no sería admisible alimentar vehículos eléctricos en detrimento de limitar la alimentación de los trenes.

En la figura 1 se ha representado de manera esquemática la curva de carga existente en una subestación tipo (color azul). Este tipo de curvas de carga se caracterizan por su perfil irregular debido a la característica de la carga que representa el tren (carga variable en el espacio y en el tiempo).

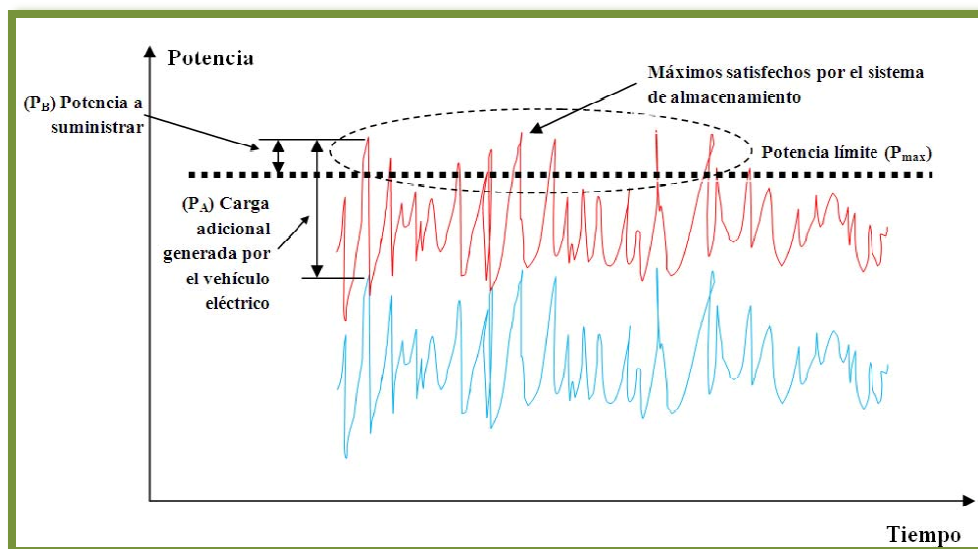


Figura 1: Curva de cargas en SSEE de Tracción.

En el caso de que se conectaran a la catenaria una serie de Ferrolineras, se genera una carga adicional constante (PA) a la subestación (color rojo). Si se considera que P<sub>max</sub> es la potencia eléctrica máxima que la subestación puede proporcionar, se observa que al conectar estas nuevas cargas pueden producirse consumos puntuales superiores a P<sub>max</sub>. La subestación no es capaz de satisfacer estas puntas de consumo, lo que supone que puntualmente no pudiera alimentar a los trenes (o a las cargas representadas por las Ferrolineras) de acuerdo a la potencia demandada. Como puede observarse en la figura, la sobrecarga es representada por PB.

### Proyectos de Ferrolineras anteriores: Ferrolinera 1.0 y Ferrolinera 2.0.

Conscientes de las posibilidades que puede ofrecer ADIF a la carga masiva de este tipo de vehículos, desde mediados de 2010 se ha desarrollado (y se están desarrollando) diferentes proyectos y experiencias de aprendizaje del nuevo sistema Ferrolinera. De entre todos ellos cabe destacar Ferrolinera 1.0 y Ferrolinera 2.0, precursores del presente proyecto tecnológico propuesto.

El proyecto Ferrolinera 1.0, ya finalizado, fue un primer proyecto piloto para analizar los posibles problemas que se puedan producir por este tipo de operaciones de carga. Ha consistido en probar en el laboratorio de Energía de ADIF, cuatro escenarios de carga de un vehículo eléctrico. Para ello se ha empleado un cargador comercial, si bien se han desarrollado diferentes equipos electrónicos propios que posibiliten su conexión al sistema eléctrico ferroviario.

El proyecto Ferrolinera 2.0, actualmente en fase de desarrollo, parte de los resultados anteriores y tiene por objeto seguir trabajando con un cargador comercial pero ya conectado fuera del entorno controlado como es el Laboratorio de Energía de ADIF. Se realiza la instalación en la Estación de AVE de María Zambrano en Málaga.



## **2. Objetivos del proyecto**

El objetivo del proyecto Ferrolinera 3.0 es el desarrollo, experimentación y validación de un innovador sistema de carga de vehículos eléctricos (VE), mediante el empleo de la energía limpia procedente del frenado regenerativo de los trenes de alta velocidad y de la red de metro.

El principal fin de este innovador proyecto es conseguir instalar una red de puntos de recarga de VE conectados a la red ferroviaria, denominados Ferrolineras, que ofrezcan al mercado una nueva solución tecnológica para este tipo de procesos de recarga eléctrica. De manera adicional, el proyecto contempla la instalación de un sistema fotovoltaico como fuente extra suministradora de energía, que servirá de refuerzo eléctrico en caso de necesidad por parte del usuario final.

Para comprobar la viabilidad de la innovación propuesta se desarrollará un estudio piloto en 2 ubicaciones distintas, el Laboratorio de Energía de ADIF y el metro de Málaga.

Es también objeto del proyecto establecer las bases para su comercialización y puesta en explotación.

A continuación se resumen los objetivos globales perseguidos:

- Demostrar la viabilidad de una nueva tecnología no empleada anteriormente por ninguna entidad, realizando un efecto tractor sobre el fomento de las energías sostenibles.
- Ayudar a equilibrar la carga eléctrica futura que se prevé que existirá sobre la red de transporte y distribución de energía eléctrica, al hacer posible la utilización de la propia infraestructura eléctrica del ferrocarril.
- Contribuir a la sostenibilidad mediante el aprovechamiento de la energía eléctrica limpia que el sistema ferroviario produce en los procesos de frenado de los trenes.
- Fomentar el desarrollo de una de las mayores infraestructuras de recargas de vehículos eléctricos

Hay que tener en cuenta que aunque el vehículo eléctrico no produce emisiones contaminantes durante su funcionamiento, la generación de energía eléctrica necesaria para mover el vehículo da lugar a emisiones contaminantes y, con ello, al consumo de recursos no renovables en mayor o menor medida. Por ello, se pretende fomentar la generación de electricidad renovable como fuente de energía primaria y, llegando más allá, con una fuente de energía novedosa a escala mundial.

## 2.1. Objetivos Técnicos específicos

Los objetivos específicos del proyecto **Ferrolinera 3.0** son los siguientes:

- Desarrollar los elementos constitutivos de la Ferrolinera como nuevo sistema de recarga de vehículos eléctricos.
  - Estructura
  - Sistema de carga lenta y/o carga rápida.
  - Almacenamiento de la energía generada en el frenado de los trenes.
  - Plataforma de gestión remota.
  - Sistema de gestión del usuario.
- Desarrollar el sistema de apoyo fotovoltaico a la Ferrolinera
- Instalar y probar los elementos anteriores.
- Validación y generación de especificaciones técnicas.
- Analizar la fabricación y comercialización posterior del producto para todos los entornos ferroviarios, incluyendo la exportación del mismo a otros países.

Este proyecto de ADIF es muy amplio, y por esta razón, tal y como se ha indicado anteriormente, este trabajo fin de máster sólo se ocupará de una parte dentro de la etapa de diseño del sistema de almacenamiento de energía generada en el frenado de los trenes.

Dentro de esta etapa de diseño, se pueden diferenciar 2 sub-etapas:

- Evaluación de los sistemas ferroviarios electrificados mediante la experimentación con un Simulador Eléctrico.
- Diseño del sistema de almacenamiento de energía con los elementos adecuados según el estudio previo.

Como se ha indicado, este trabajo fin de máster se ocupa de realizar el **estudio y evaluación de los distintos elementos que podemos introducir en un sistema ferroviario electrificado mediante un Simulador Eléctrico** para su posterior integración en el diseño del sistema de almacenamiento de energía.

A continuación se explicará con más detalle las fases previas del proyecto Ferrolinera, se realiza un estudio de los elementos que formarán parte del sistema de almacenamiento de energía –baterías y supercondensadores-. Posteriormente se realiza un estudio acerca de los proyectos internacionales relacionados con la materia y por último nos centramos en el simulador Eléctrico y la simulación de 2 escenarios ferroviarios electrificados, una línea de metro de Madrid y un tramo de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Barcelona.

### 3. El proyecto de Ferrolineras de ADIF

El proyecto **Ferrolinera** tiene como objetivo promover el desarrollo de la movilidad eléctrica urbana mediante el aprovechamiento de la energía generada al frenar los trenes y la integración de los sistemas auxiliares de apoyo basados en energías renovables, a través de puntos de recarga para vehículos eléctricos conectados a la red ferroviaria, lo que podría convertir a la red de ADIF en el mayor agregador de estos puntos.

Se trata de un proyecto pionero a nivel mundial en el área de investigación tecnológica sobre sostenibilidad y eficiencia energética. Para desarrollar este sistema, se formó un consorcio con la Universidad de Málaga, la Universidad de Sevilla, el Instituto Andaluz de Tecnología, y las empresas Green Power Tech, Affirma Energy, MP Sistemas y MP Productividad, siendo ADIF el líder del proyecto.

#### Ferrolinera 1.0

El proyecto comenzó como Ferrolinera 1.0, en el laboratorio de energía de ADIF en Cerro Negro (Madrid), integrando el almacenamiento de energía de frenado de los trenes en un volante de inercia y un sistema de apoyo fotovoltaico, implementado en una marquesina diseñada para sostener el punto de recarga.

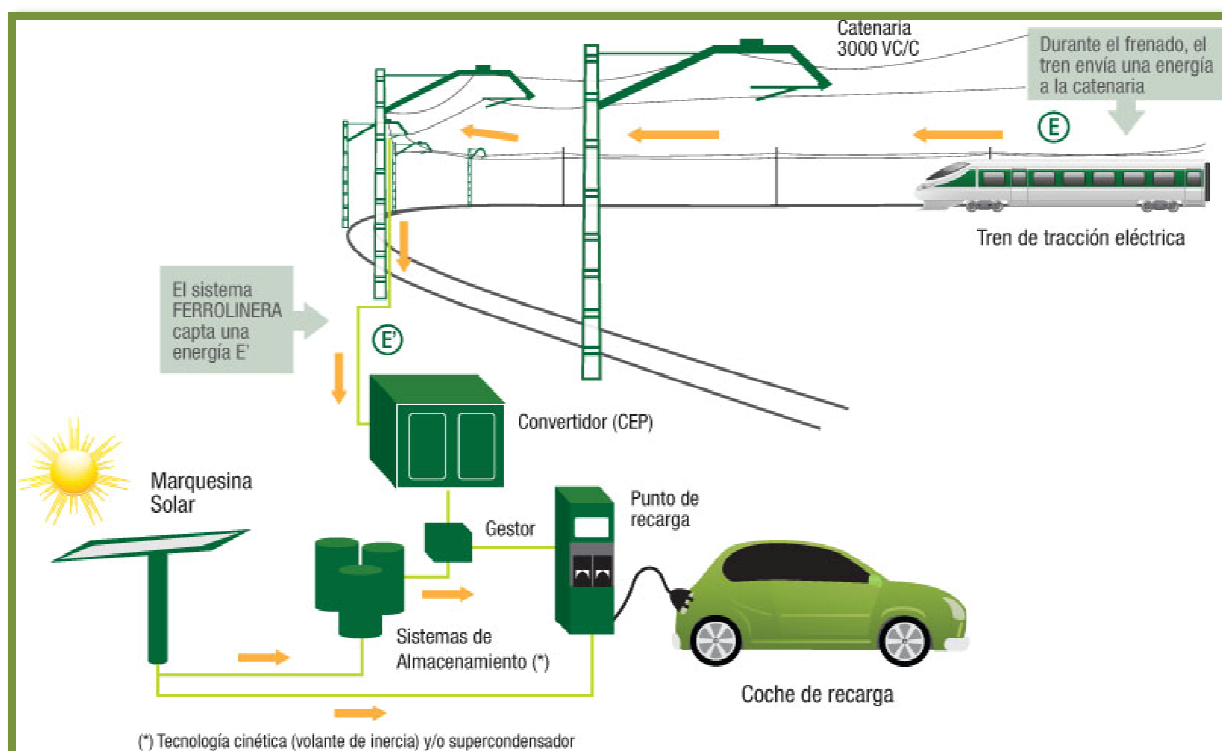


Figura 2: Conexión vehículos eléctricos a la catenaria del ferrocarril.

Vamos a detallar a continuación los 4 escenarios contemplados en esta fase de proyecto.

### 1. Escenario 1

Este primer escenario es el más simple de todos. Considera únicamente la alimentación de la Ferrolinera desde un transformador reductor de la tensión de una línea de distribución. No es necesario instalar ningún tipo de equipamiento específico adicional.

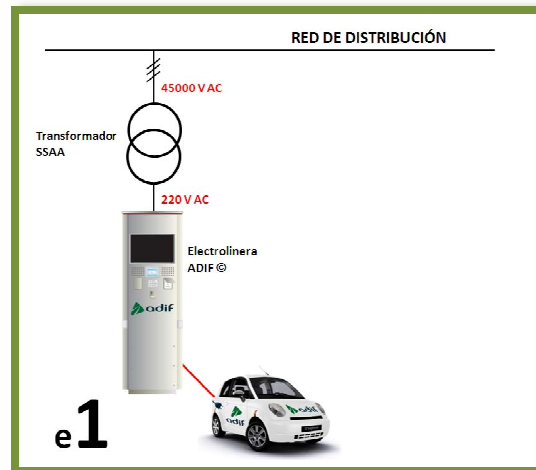


Figura 3: Escenario 1 del Proyecto Ferrolinera 1.0

### 2. Escenario 2

En este escenario que considera la alimentación de la Ferrolinera desde la red de tracción de 3000 V C/C. Este sistema de alimentación es propio de las líneas de ferrocarril convencional o líneas de cercanías, por lo que es la alimentación más común usada en todo el territorio nacional. Se precisa de un convertidor electrónico de potencia para ser conectado a dicha red y así adecuar los niveles de tensión a los de la Ferrolinera.

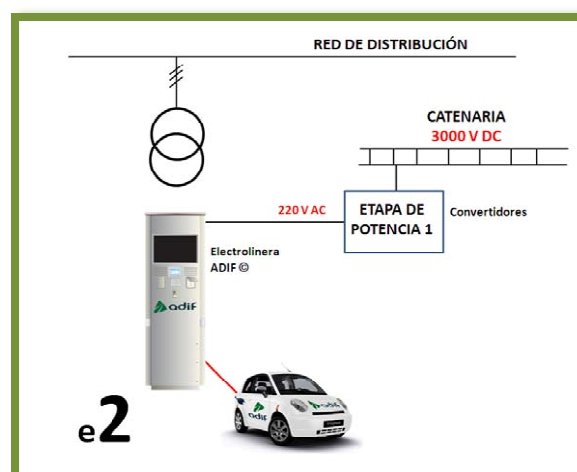


Figura 4: Escenario 2 del Proyecto Ferrolinera 1.0



### 3. Escenario 3

Este escenario sería similar al escenario 2, si bien ahora se incorpora la posibilidad de alimentar la Ferrolinera desde un equipo de almacenamiento de la energía generada en el frenado de los trenes. Es decir, el sistema de carga tendría la posibilidad de alimentarse desde dos fuentes (carga dual):

- Directa desde la red de tracción de 3.000 V C/C (escenario 2).
- Desde un sistema de almacenamiento.

El criterio para emplear una u otra y bajo qué condiciones, sería parametrizable, y en todo caso será un sistema de control el que gobierne y ejecute estas órdenes pre-programadas.

Se puede intuir del esquema de la Figura 3 como la incorporación de un sistema que almacene energía eléctrica (en este caso, aquella que se genera cuando los trenes frenan por recuperación y que no es consumida por otros trenes existentes en el cantón eléctrico correspondiente) permitiría compensar las necesidades generadas por las Ferrolineras. De esta manera, el sistema de almacenamiento proporcionaría la potencia necesaria al módulo de Ferrolineras. Es decir, la alimentación de la Ferrolinera únicamente desde la red de tracción podría producir una limitación a la alimentación eléctrica de los trenes, sobre todo en los períodos de gran densidad de tráfico.

La incorporación de un sistema de almacenamiento permitiría que en estos casos la Ferrolinera se alimentara desde dicho sistema, no existiendo limitación técnica a la alimentación de los trenes mientras el sistema disponga de energía suficiente (En todo caso, los períodos de puntas máximas no deben ser muy largos en el tiempo).

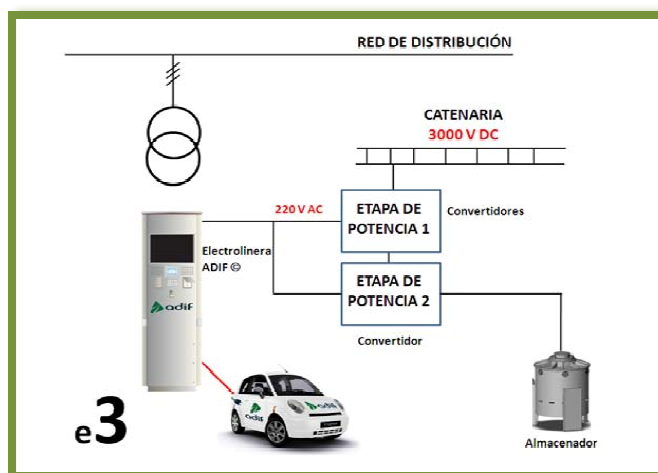


Figura 5: Escenario 3 del Proyecto Ferrolinera 1.0

#### 4. Escenario 4

Por último, este escenario considera la alimentación de la Ferrolinera desde la red de tracción de 25.000 V C/A –propia de las Líneas de Alta Velocidad– y precisa de un transformador reductor, un estabilizador de tensión y un filtro de armónicos que, conectados a dicha red, permitan adecuar los niveles de tensión a los de la Ferrolinera.

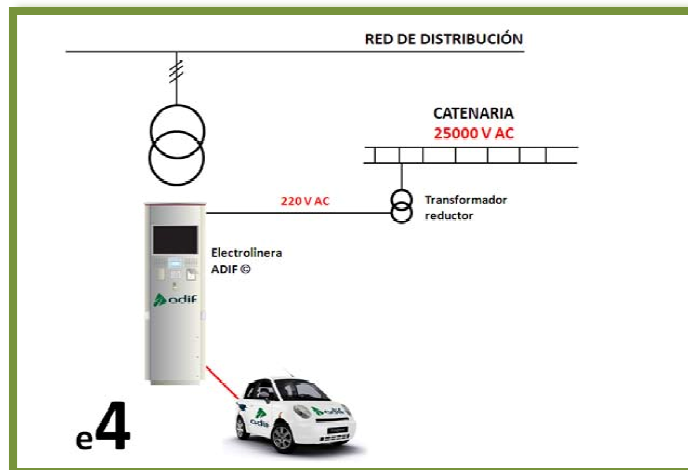


Figura 6: Escenario 4 del Proyecto Ferrolinera 1.0

El proyecto explicado anteriormente, continuó como Ferrolinera 2.0 integrado por dos proyectos, el primero de los cuales utiliza la energía recuperada de frenado a partir de la catenaria de alta velocidad, alimentando al primer punto público de recarga en la estación de María Zambrano de Málaga desde noviembre de 2011, donde actualmente se realizan recargas de vehículos eléctricos con energía procedente del sistema ferroviario.

El segundo proyecto, llamado Genera, desarrolla un prototipo de sistema de generación mixta eólico-fotovoltaica utilizable en la recarga, situado en el Centro de Tecnologías Ferroviarias (CTF) de ADIF también ubicado en Málaga.

Actualmente se está ejecutando el proyecto Ferrolinera 3.0, que integra un sistema de almacenamiento híbrido basado en baterías de ión-litio y supercondensadores junto con los nuevos puntos de recarga rápida en corriente continua y alterna. Además, desarrolla un sistema de gestión de usuarios.

El proyecto favorece el desarrollo de la movilidad eléctrica urbana, tiene impacto directo en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>, al aprovechar la energía de frenado en la carga de vehículos eléctricos, e impulsa la demanda de este tipo de vehículos.

La red de puntos de recarga de vehículos eléctricos puede ser extendida por toda España, utilizando los espacios disponibles en 1.500 estaciones de ADIF y terminales logísticas. En la actualidad, además del ubicado en la estación de Málaga María Zambrano, hay otro punto en el CTF, ambos utilizados ya de forma habitual por usuarios de vehículos eléctricos.

## 4. La fase 3 del proyecto

En la Figura 7 se muestra un esquema general del proyecto.

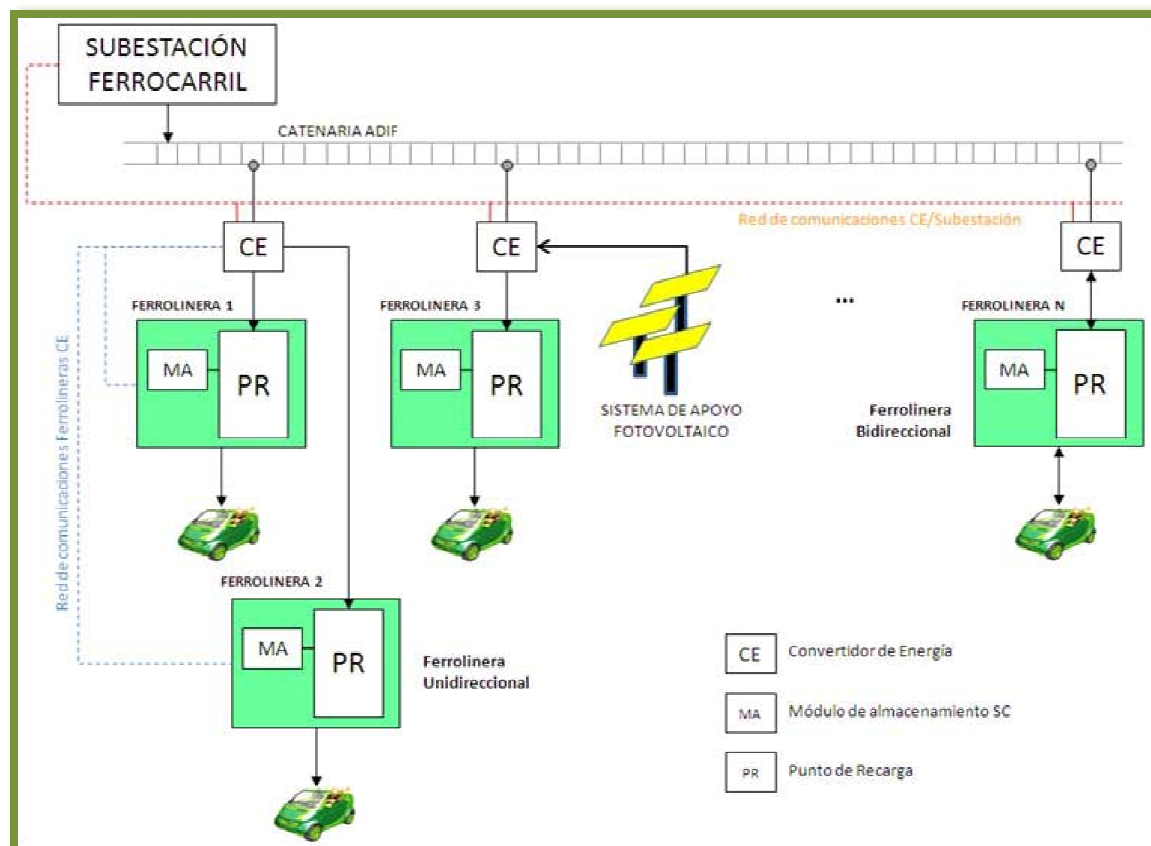


Figura 2: Esquema general del Proyecto Ferrolinera 3.0

El esquema anterior no se debe considerar vinculante en el sentido de que considera diferentes Ferrolineras distribuidas en el sistema. No obstante, sí refleja de manera realista en qué consiste el sistema, resumiéndose de la siguiente forma:

- Existe una catenaria ferroviaria que se alimenta de una subestación eléctrica de tracción.
- Cada ciertos kilómetros existe un punto de conexión a la catenaria. Este punto alimenta a un convertidor de energía (convertidor DC/AC en el caso de una catenaria de corriente continua o incluso un transformador en el caso de corriente alterna monofásica).
- El convertidor se encuentra conectado a la Ferrolinera de ADIF, disponiendo de un **módulo de almacenamiento (MA)** en el que se concentra la energía procedente del frenado eléctrico de los trenes. Como se verá más adelante, este módulo será desarrollado con tecnología de supercondensadores y/o baterías.
- PR es el punto de recarga que forma, junto al sistema de almacenamiento, la Ferrolinera.

- Puede existir un sistema de apoyo fotovoltaico que alimenta la Ferrolinera a través de su correspondiente Convertidor de Energía (CE).
- También existen Ferrolineras bidireccionales, esto es, que las baterías del vehículo al que alimentan pueden a su vez contribuir a la alimentación del sistema eléctrico ferroviario si existiera la necesidad.
- Existe una red de comunicaciones (CE) que conecta todos los equipos con el equipo gestor de la subestación eléctrica, de manera que se emiten consignas de funcionamiento a cada CE en función de la curva de carga de la subestación. Aunque no se encuentra indicado en el esquema anterior, este sistema también se encuentra conectado al correspondiente sistema de planificación y control de tráfico. (No obstante, esta red de comunicaciones no se encuentra en el alcance del proyecto tecnológico Ferrolinera 3.0.).
- Además, en el caso de aquellos CE que alimentan a varias Ferrolineras, también existe una red de comunicaciones interna que regula el funcionamiento de cada una de ellas en función de la consigna de control del CE. (A diferencia del apartado anterior, esta red de comunicaciones sí se encuentra en el alcance del proyecto tecnológico Ferrolinera 3.0.).

Uno de los aspectos más importantes dentro del proyecto, es el establecimiento de un sistema de almacenamiento energético sostenible, puesto que la recarga eléctrica se realiza mediante la energía acumulada obtenida del frenado de los trenes, o mediante un sistema generador sostenible, con el empleo de marquesinas fotovoltaicas.

Para ello se realizará un estudio pormenorizado de los sistemas de almacenamiento energético que permitan cumplir las necesidades de potencia energética, cumpliendo con las especificaciones necesarias para ser integrado en el punto de recarga de cada Ferrolinera.

Los sistemas de almacenamiento energéticos actuales, se basan en grandes infraestructuras centralizadas para poder satisfacer las necesidades de almacenamiento. Con la inclusión de un sistema híbrido, se minimiza la infraestructura integrando pequeños sistemas de almacenamiento en cada punto de recarga, que funcionarán de manera coordinada unos con otros, mediante baterías de iones de litio y supercondensadores.

Con el empleo de supercondensadores se dispondrá de un sistema con una mayor densidad energética y a la vez con una potencia suficiente para poder absorber la energía del frenado de los trenes y poder satisfacer las necesidades de recarga (sobre todo las necesidades de carga rápida) de los vehículos eléctricos.

Este sistema proporcionará la capacidad de hacer cargas rápidas y ultrarrápidas sin necesidad de modificar la instalación. Esta capacidad de almacenamiento permitirá a la Ferrolinera posicionarse en una situación estratégica en las infraestructuras públicas de electromovilidad.

## AREA DE INVESTIGACIÓN PROPUESTA

Por lo expuesto en los objetivos generales y específicos, se desprende que existen dos áreas de investigación en el ámbito de este proyecto: Edificación y Obra Civil y Energía y Medio Ambiente. Esto último, no sólo por las distintas naturalezas de la energía empleada, su control, gestión y almacenamiento, sino por la búsqueda de los sistemas más eficientes, de menor consumo, más optimizados para la funcionalidad que se busca y cuyo impacto medioambiental sea mínimo, teniéndose en cuenta en el desarrollo del proyecto todo el ciclo de vida de los componentes y sistemas que forman parte del mismo.

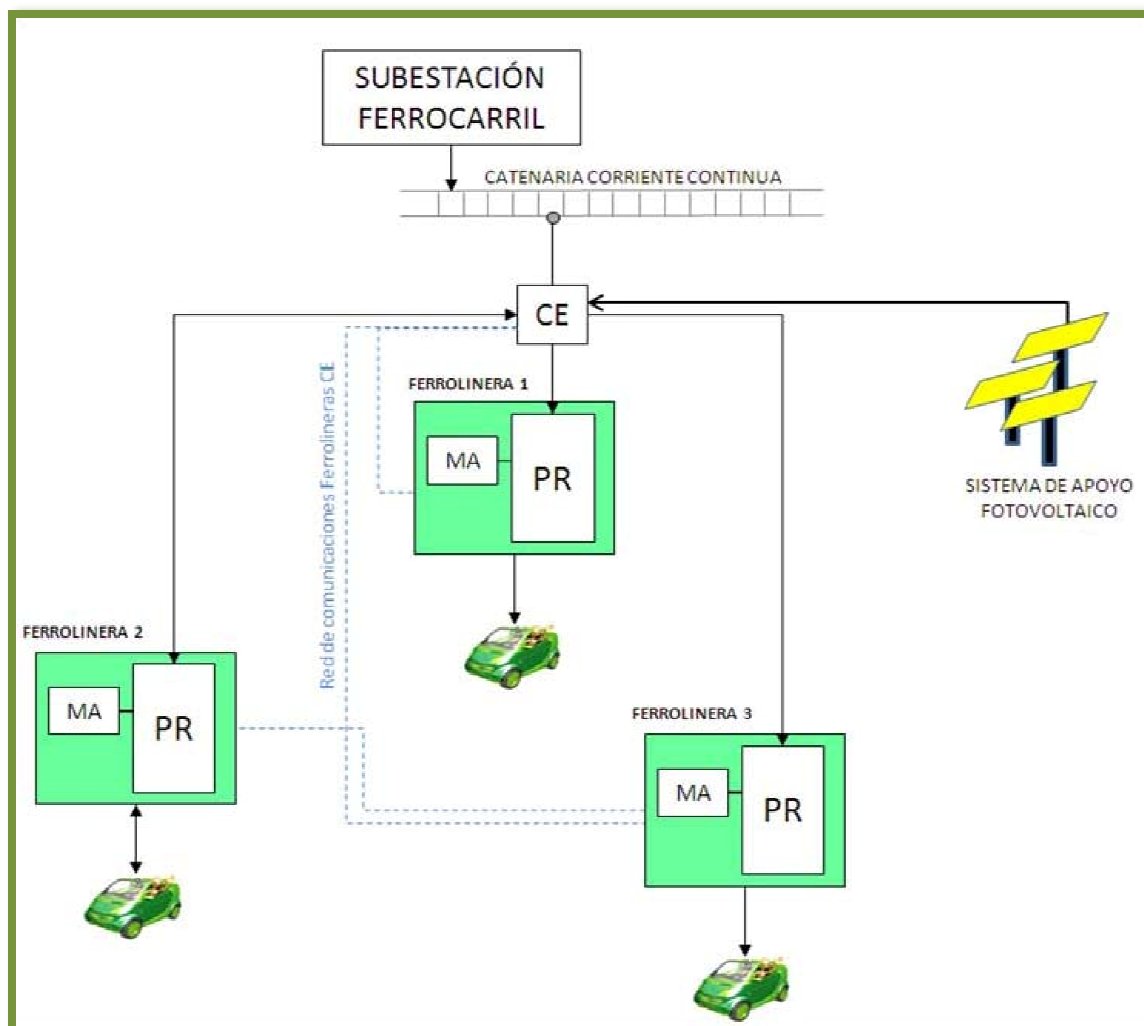


Figura 3: Alcance del Proyecto Ferrolinera 3.0

En la Figura 8 se presenta el esquema del sistema a desarrollar. A partir de éste se van a definir las diferentes tecnologías estudiadas y que implicación tienen en el proyecto –se presenta más adelante en el documento, el estado del arte de las tecnologías implicadas así como las innovaciones tecnológicas derivadas del proyecto-. Por otro lado, se verá que no existe una única solución para la ejecución del proyecto, dejando como parte del mismo el estudio de cuál de las posibles soluciones es la óptima.

Además, se desarrollarán los equipos de electrónica de potencia necesarios para llevar a cabo el trasvase energético entre la catenaria, el sistema de almacenamiento distribuido, y las fuentes de energía renovable integradas, así como para asegurar la calidad de la micro-red eléctrica generada. Esta tecnología busca un aumento de la eficiencia energética del sistema, no sólo lo que provocaría su propia funcionalidad, sino también lo que se deriva de la optimización individual en el diseño de cada uno de los equipos que lo conforman.

Todo ello irá complementado por el desarrollo de tecnologías tipo TIC's para la comunicación de todos estos sistemas existentes en la instalación, permitiendo supervisar, gestionar y controlar toda la información residente en el sistema: flujos energéticos, estado del almacenamiento, estado de los puntos de recarga, existencia de fallos en el sistema, señales de alarma, tarificación al usuario, calidad de red, etc.

El empleo conjunto de todas de estas tecnologías permite minimizar los costes de implantación del sistema, y los volúmenes de los equipos, aumentar su escalabilidad y flexibilidad y permitir la ampliación de la instalación a nuevas necesidades o valores añadidos.

## 5. Estado del arte

Se presenta a continuación una visión global del estado actual de las diferentes tecnologías que se van a desarrollar en el proyecto Ferrolineras 3.0. En concreto, debido a la naturaleza del mismo y al marco de aplicaciones que en él se abarcan, son estas cinco las líneas tecnológicas objeto de estudio y desarrollo:

- Tecnología de sistemas de almacenamiento de energía.
  - Tecnología de Supercondensadores.
  - Tecnología de Baterías.
- Tecnología del punto de recarga de vehículos eléctricos (PR-VE).
- Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).
- Tecnologías destinadas a la Eficiencia Energética y Calidad de Red.
- E-maintenance.

En este trabajo fin de máster, el tema que nos ocupa es el primer punto del listado anterior, es decir, los **Sistemas de Almacenamiento de Energía**.

### 5.1. Sistemas de almacenamiento de Energía

Los acumuladores de energía, como su propio nombre indica, permiten almacenar energía en alguna de sus formas, para que pueda ser utilizada posteriormente. De esta manera se consigue desacoplar la generación de energía de la demanda de ésta.

Los sistemas de acumulación de energía es un campo que está en constante evolución, lo que hace que a las tecnologías ya existentes se vayan sumando, poco a poco, nuevas soluciones que se adaptan a las necesidades de los trenes o incluso mejoran algunas de las prestaciones ya ofrecidas.

Las tecnologías actuales de almacenamiento son muy variadas, diferenciándose en múltiples factores como la energía almacenada, la potencia necesaria, el volumen disponible, la rapidez de respuesta, etc. La decisión para utilizar un sistema de almacenamiento u otro dependerá de los requisitos del uso y del coste de las soluciones alternativas.

Respecto al sistema eléctrico, estos dispositivos permiten mejorar su eficiencia y fiabilidad, absorbiendo la energía producida bien desde la red, durante los valles de demanda (bajo coste de generación), o bien desde fuentes de energía renovables intermitentes en caso de existencia de excedente, y liberándola en los momentos de mayor demanda, elevado coste de generación o cuando no existe otra fuente de energía disponible.

Las principales tecnologías para el propósito de almacenamiento son:

- Baterías electroquímicas.
- Supercondensadores.
- Almacenamiento Magnético Superconductor (SMES).

- Almacenadores cinéticos de energía (flywheels).
- Almacenamiento de aire comprimido.
- Hidroelectricidad bombeada.

Teniendo en cuenta que el requerimiento energético para este proyecto exige un sistema de almacenamiento de densidad energética media y con una gran capacidad de respuesta, de las anteriores tecnologías enumeradas sólo se estudiarán a fondo las dos primeras.

De modo general, los dispositivos de almacenamiento de energía son empleados básicamente en cuatro escenarios:

- Aumentar la eficiencia de los sistemas eléctricos, al reducir la necesidad de generación de respaldo, suministrando los picos de potencia en la demanda diaria.
- Aumentar la fiabilidad del sistema, al reducir las posibilidades de corte de suministro.
- Aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (energía solar, eólica, etc.).
- Aumentar la eficiencia y el uso racional de la energía en procesos industriales.

A continuación se describen más en profundidad las 2 primeras tecnologías:

#### a) Baterías Electroquímicas

Son dispositivos capaces de acumular energía eléctrica mediante procedimientos electroquímicos. Dicha energía es posteriormente devuelta casi en su totalidad. Este ciclo se repetirá un determinado número de veces, dado por la vida útil del dispositivo. Existen diversos tipos de baterías con distintas características, acumuladores de plomo, baterías alcalinas de manganeso, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico, de iones litio, polímero de litio, etc. La densidad de energía de este tipo de acumuladores oscila entre 30 y 130 Wh/Kg.

Una batería es un elemento acumulador eléctrico que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Es un generador eléctrico secundario. No produce energía eléctrica en sí, sino que libera la que anteriormente se ha almacenado durante su carga. El número de cargas y descargas vendrá limitado por su vida útil.

La principal virtud de las baterías es la mayor densidad de energía que poseen frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Una de ellas es la baja velocidad de carga y descarga permitida (baja potencia). Una batería tiene restricciones de tiempos y corrientes de carga y descarga. Por su naturaleza, no son dispositivos capaces de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas sin que ello no repercuta negativamente en su vida útil. Su rendimiento no es muy elevado, del orden del 80%, debido a su resistencia interna, la cual es notable en los procesos



de carga y descarga del dispositivo. Otra característica desfavorable es la propia autodescarga con el tiempo debida a la resistencia de fugas.

Algunos tipos de baterías presentan el llamado "efecto memoria", en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad de almacenamiento, debido a corrientes elevadas, altas temperaturas, al envejecimiento del dispositivo, imposibilitando el aprovechamiento de toda su energía. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos tipos de baterías, que constituyen un problema medioambiental grave. Se está intentando reducir esta toxicidad con la sustitución por nuevas sustancias menos contaminantes. Las principales tecnologías de baterías existentes son:

- Plomo-Ácido.
- Sodio - Azufre (NaS).
- Níquel - Cadmio (Ni-Cd).
- Níquel - Metal Hidruro (Ni-Mh).
- Ión-Litio (Li-ión).

Las baterías de plomo han sido las más desarrolladas y utilizadas en sistemas de potencia. El resto de baterías están siendo utilizadas en aplicaciones donde las restricciones de tamaño y peso son críticas. Las baterías de ión litio son las que mayores ventajas presentan, en cuanto a densidades de energía y potencia específica, eficiencia en el almacenamiento, mayor rendimiento en la descarga, ausencia de efecto memoria. Por contra, dichos dispositivos son caros.

Las baterías más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía de fuentes de energía renovables son las baterías estacionarias. Son baterías de plomo-ácido de bajo contenido de antimonio. Éstas poseen unos 2.000 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20% (es decir que la batería estará con un 80% de su carga) y unos 1.200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50%. Estas baterías tienen una autodescarga menor del 3% y una eficiencia del 75%. Pueden soportar descargas del 80% y tener una vida de unos 15 años. Son utilizadas en instalaciones de grandes potencias.

Estas baterías se comercializan en celdas unitarias de 2V, o en bancadas que suelen ser de 12V ó 24V que no es más que una asociación encapsulada de celdas unitarias. Estas celdas son capaces de dar altas tasas de energía (Ah). Se puede conseguir la tensión de trabajo deseada mediante la asociación en serie de estos dispositivos.

La tecnología de baterías de plomo-ácido ya es madura, y los precios de mercado son los más competitivos. Las tendencias futuras pasan por la investigación de nuevas tecnologías de baterías, y el desarrollo de las que ya se están comercializando para conseguir unos precios competitivos que consigan hacer competencia a las baterías de plomo-ácido. En especial las de Ión-Litio, cuyas mayores densidades de potencia, energía y mayores rendimientos las hacen más atractivas para estas aplicaciones. En el caso de las baterías de Ion-Litio

industriales, poseen capacidades que van desde los 4 Ah hasta los 400 Ah, aunque sus precios son bastante superiores a las baterías estacionarias de plomo-ácido.

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Densidad de energía: 20-100 Wh/Kg.
- Densidad de potencia: 20-200 W/kg.
- Rango de energía: para sistemas de hasta 100MWh.
- Rango de potencia: 1kW-30MW.
- Tiempos de carga y descarga: horas.
- Número de ciclos de carga y descarga: 1.000 – 3.000.
- Rendimiento: 75% – 99% según tecnologías.
- Autodescarga: 0 – 20 % al mes según tecnologías.
- Precios bajos para Pb-ácido, medios para Ni-Cd y elevados para Li-ión.
- Según tipo puede poseer elementos tóxicos

#### b) Supercondensadores

Los supercondensadores de doble capa son condensadores electroquímicos con una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores convencionales, generalmente miles de veces mayor que un condensador electrolítico de alta capacidad. Son dispositivos de almacenamiento de energía con una capacitancia mayor a un faradio, pudiendo llegar a hasta miles de faradios. Estos dispositivos poseen una densidad de energía máxima de hasta 30 Wh/Kg.

La acumulación de energía se basa en la confinación de cargas electrostáticas en pequeños dispositivos, formados por pares de placas conductoras separadas por un medio dieléctrico. La construcción y funcionamiento es similar a un condensador convencional a gran escala. Los supercondensadores se caracterizan por poder ser cargados y descargados en tiempos del orden de segundos, lo cual los hace especialmente apropiados para responder ante necesidades de puntas de potencia o ante interrupciones de suministro de poca duración. Ello es debido a que el almacenamiento de cargas es puramente electrostático.

En los últimos años, los supercondensadores han surgido como una alternativa o complemento importante para otros dispositivos de producción o almacenamiento de energía eléctrica como las baterías, debido a la mayor potencia que es capaz de inyectar, aunque poseen una menor densidad de energía. Debido a la rapidez de carga y descarga, pueden proporcionar corrientes de carga/descarga altas, cosa que daña a las baterías. Poseen un número de ciclos de vida del orden de millones de veces y no necesitan mantenimiento. Pueden trabajar en condiciones de temperatura muy adversas. Por otro lado, no presentan en su composición elementos tóxicos, muy común en baterías.

La principal desventaja de los supercondensadores es la limitada capacidad de almacenar energía y, a día de hoy, su mayor precio. En realidad, debido a sus diferentes prestaciones, condensadores y baterías no son sistemas que rivalicen entre sí, sino más bien se pueden considerar en muchas aplicaciones como sistemas complementarios donde la batería aporta la energía mientras el supercondensador aporta los picos de potencia.

Las características principales de estos dispositivos se indican a continuación:

- Altas Capacidades: 1-5.000 F.
- Densidad de energía: 1-10 Wh/Kg.
- Densidad de potencia: 1-10 kW/Kg.
- Tiempos de carga y descarga: minutos, segundos.
- Número de ciclos de carga y descarga: 10e6.
- Tensión de trabajo Limitada: 1-500V.
- Rendimiento eléctrico: 95-99%.
- Muy baja autodescarga.
- Precio relativamente alto.
- No necesitan mantenimiento.
- No poseen elementos tóxicos.
- Resistencia a condiciones adversas de temperatura.

En la actualidad los supercondensadores se clasifican de acuerdo con los materiales con los que se fabrican. Principalmente existen cuatro tipos:

- **Supercondensadores electrolíticos de entrecaras de carbono de doble capa.**  
Los principales son los que utilizan hidróxido de sodio y potasio o ácido sulfúrico. En ellos la disolución se disocia en iones positivos de sodio o potasio, que ante la presencia de voltaje por aumento de la atracción entre cargas se acumula una mayor energía eléctrica.
- **Supercondensadores no electrolíticos de interfaces de carbono de doble capa.**  
Los principales son los elaborados como aerogeles, soles, nanotubos de carbono y carbón activo. Los soles son dispersiones de partículas sólidas en líquido que se encuentran indefinidamente en movimiento browniano. En cambio, un gel es un sólido que posee una gran cantidad de líquido y una estructura que permite que se encuentren ambas fases combinadas. Para la formación de soles para capacitores se forma el óxido de metal elegido en agua, ya sea a altas temperaturas o con un exceso de base para formar el sol. Posteriormente el sol es gelado por deshidratación o aumento de pH. También se pueden formar soles orgánicos con resorcinol en formaldehído.

El resultado de los procesos es la formación de un material homogéneo muy poroso que permite una alta capacitancia. Si el sol es combinado con la interfaz de carbono se calcula que puede alcanzarse una capacitancia de 400 faradios por gramo.

- **Supercondensadores acuosos de óxido de doble capa con pseudocapacitancia redox.** Los principales son los de óxido de litio, bióxido de rutenio, bióxido de iridio, óxido de cobalto y bióxido de manganeso. Los supercondensadores pueden fabricarse siguiendo la metodología de la sección anterior para elaborar un sol. Otra forma de obtenerlo es por la deposición de un óxido metálico por medio de un procedimiento de electrólisis. Se han hecho investigaciones donde se han alcanzado capacitancias de 400 F/g con óxido de rutenio. Supercondensadores más rentables de alrededor de 50 F/g se han logrado con óxido de níquel. Una forma alternativa para generar la estructura porosa es la adición de óxido de litio a un metal como el platino; a este material se le agrega ácido para retirar el litio y mantener la estructura porosa de escala nanométrica.

- **Supercondensadores de polímeros conductores.**

Se define polímero conductor como una sustancia orgánica que conduce la electricidad de manera parecida a la de un metal, con buena reversibilidad entre estado conductor y no conductor y flexibilidad mecánica. Los principales son los de politiofeno, polipirrol y polianilina. Tienen una densidad de energía mayor a 500 W/Kg, y aún se estudian sus propiedades de capacitancia.

La investigación en supercondensadores se encuentra motivada por las enormes ventajas que su uso representa para el desarrollo de circuitos eléctricos:

- Gran período de operación.
- Capacidad de manejar altos valores de corriente.
- Valor de carga fácil de monitorear.
- Alta eficiencia.
- Gran rango de tensión.
- Gran rango de temperatura.
- Ciclos de funcionamiento largos.
- Facilidad de mantenimiento.

La vida útil de un supercondensador disminuye conforme aumenta su capacitancia, pero actualmente existen dispositivos que superan una vida útil de veinte años con pérdidas en la tensión suministrada de alrededor de un voltio.

Debido a estas propiedades de vida útil y manejo de tensión y corriente, los supercondensadores han sido utilizados en diversas aplicaciones:

- **Automóviles híbridos.**

Por la eficiencia en el uso de la energía estos dispositivos son un elemento prometedor para el desarrollo de medios de transporte que combinen la energía solar con la proveniente de combustibles fósiles. Su aprovechamiento se debe fundamentalmente a que permiten una mejor descarga de energía durante la aceleración del vehículo. Una aplicación importante es el uso de supercondensadores para el desarrollo de la unidad de apoyo auxiliar.

- **Apoyo energético.**

Muchos proyectos en ingeniería, como el diseño de elevadores, requieren de ciclos donde en una etapa se requiera una baja descarga de energía y otros de una alta descarga (como cuando el elevador desciende y asciende). Esta demanda requiere de sistemas que permitan una regulación precisa de la energía suministrada y una alta capacidad de almacenamiento de energía. De esta manera, los supercondensadores suministran la energía necesaria para subir el elevador sin necesidad de sobrecargar la red eléctrica.

- **Almacenamiento de energía.**

- **Sistemas de transferencia de potencia.**

En el área de energía las propiedades de los supercondensadores son de gran importancia para la transferencia de energía. Los sistemas STATCOM (Compensadores Estáticos) son dispositivos de la familia de los sistemas de transmisión de corriente flexible alternante (FACTS), y se utilizan para el control de los picos de tensión en sistemas eléctricos. Cuando se conectan con sistemas de transferencia de potencia a elementos STATCOM, se produce una gran inductancia que produce un incremento en la corriente y picos de tensión, por lo que es necesario tener condensadores de gran capacitancia para compensar este fenómeno. Su uso permite mantener una corriente constante y menores picos de tensión para facilitar la transmisión de la energía eléctrica.



## 6. Proyectos desarrollados con sistemas de acumulación

Se enumeran y detallan a continuación algunos de los sistemas de acumulación que existen en la actualidad en su contexto de aplicación, así como algunos proyectos Europeos orientados al ahorro y la eficiencia energética.

### 6.1. Sitras ® SES (Siemens Transportation)

El **Sitras SES** (Stationary Energy Storage System) es un sistema de almacenamiento de Energía basado en ultracondensadores e instalado en tierra que almacena la energía de las frenadas de los vehículos que se alimentan de la catenaria conectada al Sitras y aporta los picos de potencia cuando lo requiere cualquier vehículo.

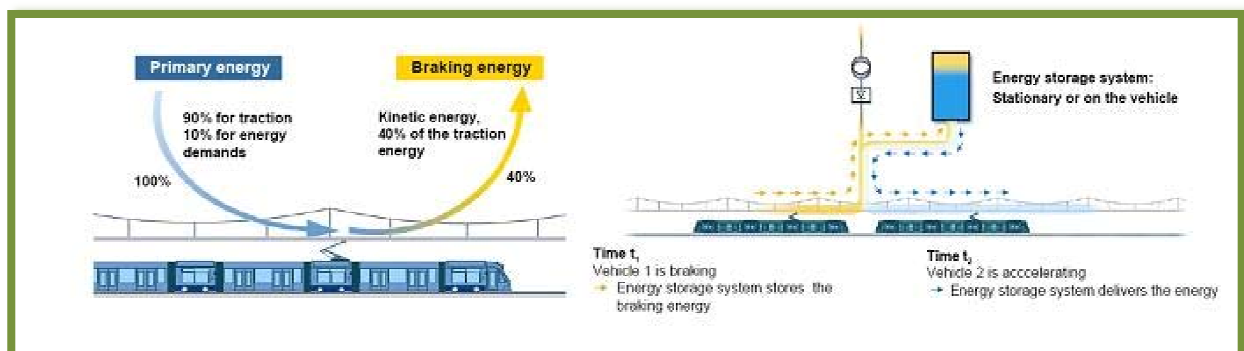


Figura 9: Sistema de almacenamiento de energía Sitras SES

Esto supone una combinación económica y ecológica, ya que reduce el consumo de la energía de la catenaria hasta un 30% y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, estabiliza la catenaria y minimiza su coste de mantenimiento.

Se trata de un banco de ultracondensadores con las siguientes características:

- Número de ultracondensadores: 1152.
- Capacidad total: 94 F.
- Energía utilizable: 2.5 kWh.
- Ahorro energético por hora: 80 kWh/h.
- Máxima potencia: 0.7 MW.
- Rango operable de tensión: 600-750 V.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2 cubos de 1.4x0.7x2.6 m<sup>3</sup> + 2 cubos de 1.3x1x2.6 m<sup>3</sup>.
- Peso: 4.3 Tn

Este sistema se está aplicando en varias ciudades Europeas como Colonia y Madrid, y en EEUU como por ejemplo en Portland y Oregon.

El resto de proyectos que veremos a continuación están formados por equipos embarcados en los propios vehículos, y aunque se distancien un poco de la idea del

proyecto, nos dará una visión global de los proyectos en los que se está trabajando en este sentido en el sector ferroviario.

## 6.2. Sitras ® MES (Siemens Transportation)

El **Sitras MES** (Mobile Energy Storage System) es un sistema de almacenamiento de Energía basado en el uso de ultracondensadores. Este banco de ultracondensadores, a diferencia del anterior, está instalado a bordo del vehículo, en el techo de éste, por lo que se clasifica dentro de los sistemas embarcados, y ayuda a la recuperación de parte de la energía generada en las frenadas.

El ahorro energético obtenido es similar al caso en el que el sistema estuviera instalado en tierra (como sucede en el Sitras SES), con la diferencia de que se dan menores pérdidas energéticas ya que la energía recorre una menor distancia. De esta manera, tiene valores de reducción del consumo en catenaria de hasta un 30% y una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta 80 Tn por año. Además, este sistema ayuda a la estabilización de la tensión de la catenaria, lo cual, aumenta la disponibilidad de circulación de vehículos ferroviarios.

El banco de ultracondensadores se conecta eléctricamente al punto de alimentación mediante un chopper, el cual, permite tanto integrarlo en vehículos nuevos (Integrated Concept) como instalarlo en vehículos ya existentes (Independent Concept). Ambos sistemas están aprobados por "BOStrab" (German Construction and Operating Code for Tramways).

A continuación se muestran los datos técnicos de los ultracondensadores empleados en este sistema:

- Energía utilizable: 0.85 kWh.
- Máxima potencia: 2x144 kW.
- Rango operable de tensión: 190-480 V.
- Refrigeración: forzada.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2000x1520x630 mm<sup>3</sup>.
- Peso: 820 kg.

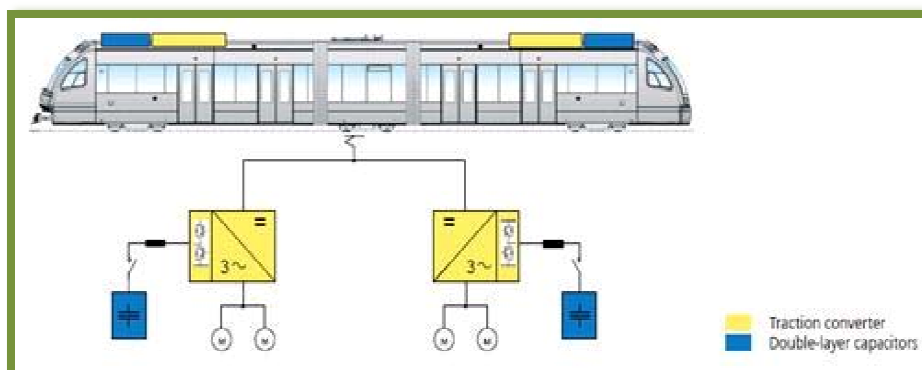


Figura 10: Sistema de almacenamiento de energía Sitras MES



### 6.3. Sitras ® HES (Siemens Transportation)

**Sitras HES** (Hybrid Energy Storage system) es un sistema híbrido que combina dos unidades de almacenamiento: el banco de ultracondensadores del Sitras MES y un sistema de tracción formado por baterías de NiMH.

El sistema, instalado en el techo del tren y conectado al punto de alimentación mediante un chopper, se carga en los tramos provistos de catenaria, en las paradas o con la energía que se regenera durante la frenada. Esta reserva de energía proporciona al vehículo autonomía suficiente para recorrer tramos de hasta 2500m.

Al igual que el Sitras MES, el Sitras HES obtiene una reducción en la demanda de energía de hasta un 30%, emite 80 Tn menos de CO<sub>2</sub> al año y estabiliza la tensión de la línea. Asimismo, este sistema puede integrarse en vehículos nuevos o en sistemas ya existentes.

Características del banco de ultracondensadores:

- Energía utilizable: 0.85 kWh.
- Máxima potencia: 2x144 kW.
- Rango operable de tensión: 190-480 V.
- Refrigeración: forzada.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2000x1520x630 mm<sup>3</sup>.
- Peso: 820 kg.

Características del sistema de baterías (normalmente, 44 bloques de celdas de NPH10-340 conectadas en serie):

- Energía utilizable: 18 kWh.
- Máxima potencia: 105 kW.
- Tensión nominal: 528 V.
- Refrigeración: agua.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 1670x1025x517 mm<sup>3</sup>.
- Peso: 826 kg.

El primer tren con el sistema Sitras HES lleva varios años en servicio en el sur de Portugal, realizando con éxito trayectos entre Almada y Seixal.

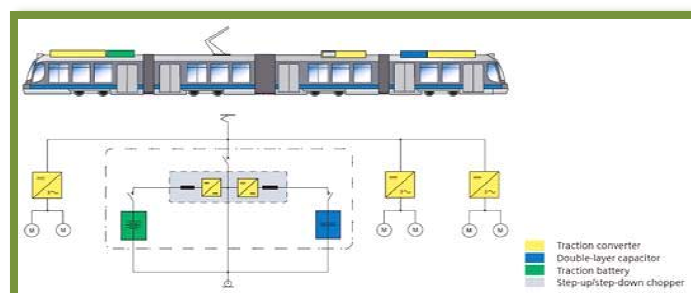


Figura 11: Sistema de almacenamiento de energía Sitras HES

#### 6.4. MITRAC Energy Saber (Bombardier Transportation)

El concepto de **MITRAC Energy Saver** es el mismo que el del **Sitras MES**, es decir, almacena la energía recuperada en la frenada en un banco de ultracondensadores para su posterior uso durante la aceleración.

La ventaja de almacenar la energía en un sistema móvil, en lugar de en subestaciones fijas, es que se evitan las pérdidas que se producirían al llevar la energía al sistema a través de la catenaria.

Con este sistema se reducen el consumo de la catenaria en un 30% y los picos de potencia hasta un 50%. Al reducir la potencia de pico, se reduce la demanda de corriente, por lo que son necesarias menos subestaciones que estarán más alejadas entre sí. De esta manera, disminuye el coste de la infraestructura.

En el caso de vehículos DMU (Diesel Multiple Units), el sistema MITRAC reduce el consumo energético en un 35%.

Además de durante la aceleración, la energía almacenada puede utilizarse en momentos en los que hay una demanda extra de energía, o cuando se producen caídas de tensión en la red. También permite recorrer tramos cortos sin catenaria de manera que, en caso de fallo en ésta, el tranvía pueda llegar a la siguiente estación (500m).

Las características del banco de ultracondensadores son:

- Aplicación: Light Rail Vehicle
- Energía instalada: 1.17 kWh.
- Máxima potencia de salida: 100 kW.
- Refrigeración: convección natural.
- Peso: 466 kg.
- Dimensiones: 1800x1500x250 mm<sup>3</sup>.
- Aplicación típica: 6 cajas/4 coches, 7kWh, 600kW.

El prototipo **MITRAC Energy Saver** está en funcionamiento desde Septiembre de 2003 en Mannheim, Alemania, donde completó un período de prueba de 4 años con un ahorro energético del 30%.

Otro beneficio de este sistema de almacenamiento de energía basado en ultracondensadores realizado por Bombardier, es la reducción del tamaño de los motores diesel. En los casos en que no exista ningún sistema de almacenamiento, el motor diesel debe ser dimensionado para proporcionar los picos de potencia. Si esos picos pueden ser proporcionados por los ultracondensadores, el tamaño del motor diesel se reduce considerablemente, ya que sólo deberá dar la energía media. Por otro lado, se reduce el coste energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 25% y un 30% y se da la posibilidad de apagar los motores en las estaciones y túneles.

## 6.5. Tranvía de París (ALSTOM)

El sistema de almacenamiento de energía del tranvía de París, en servicio comercial desde Septiembre de 2009, está basado en el cofre de ultracondensadores STEEM. Éste está formado por 48 módulos (1 módulo contiene 20 celdas conectadas en serie) distribuidos en 6 ramas en paralelo, cada una de ellas con 8 módulos en serie.

A continuación se indican algunas características del cofre:

- Energía utilizable: 1.62 kWh.
- Máxima potencia: 500 kW.
- Tensión: 400 V.
- Velocidad de carga: 15 segundos.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2300x1600x590 mm<sup>3</sup>.
- Peso: 1340 kg.

Mediante el empleo del freno regenerativo la energía de frenado es acumulada en los ultracondensadores y empleada en la fase de propulsión. La mejora en el consumo obtenida por un tranvía con cofre STEEM al compararlo con el consumo de un tranvía clásico es de alrededor del 20%-24%.

Una de las principales ventajas de este sistema es la alta velocidad de carga y descarga. Sin embargo, una de las limitaciones importantes es que no es adecuado para trayectos sin catenaria, ya que no tiene reserva de energía para modos degradados. Además, el sobrepeso tiene un efecto importante en el consumo energético (variaciones de hasta 2.5 kWh en el consumo energético entre tranvía vacío y tranvía a plena carga).



## **7. Simulación Eléctrica de Líneas Ferroviarias Electrificadas.**

En este apartado se mostrarán los pasos a seguir para poder escoger y desarrollar las mejores características para el sistema de almacenamiento de energía. Una vez analizado el estudio del arte y los principales proyectos desarrollados en diferentes países, utilizamos un simulador eléctrico a través del cual poder simular todos los escenarios posibles y de este modo, obtener resultados teóricos para poder elegir la mejor opción. Dicho simulador eléctrico nos permite analizar sistemas ferroviarios electrificados en corriente continua, corriente alterna y mixtos. Además permite incluir los elementos más relevantes para el ahorro de energía como son el freno regenerativo, las subestaciones reversibles, los equipos embarcados y en tierra, etc.

### **7.1. Simulador Eléctrico**

Como se ha comentado, el simulador eléctrico permite analizar líneas ferroviarias electrificadas con los siguientes tipos de alimentaciones:

- Líneas alimentadas en corriente continua (c.c.)
- Líneas alimentadas en corriente alterna (c.a.)
- Líneas mixtas (circuitos acoplados con partes en c.c. y partes en c.a.)

Para analizar los sistemas alimentados en corriente continua, el simulador permite incorporar los elementos más relevantes desde el punto de vista del consumo de energía:

- Frenado Regenerativo: Se escoge la opción que más nos interese, que la energía de frenado del tren se disipe mediante reóstatos (sin devolverse a la red) o dicha energía se devuelve a la catenaria siempre que dicho sistema lo permita.
- Subestaciones reversibles: La mayor parte de las subestaciones existentes en corriente continua sólo permiten el flujo desde la red hacia la línea férrea. Las subestaciones reversibles permiten el flujo en dirección contraria. El simulador permite configurarlo de la forma deseada.
- Acumuladores: El almacenamiento de energía es un elemento clave para el ahorro de energía, ya que como se ha comentado con anterioridad, el consumo de energía en un sistema ferroviario es irregular en el tiempo. El simulador permite escoger entre sistemas de acumulación embarcados o sistemas de acumulación fijos en tierra en distintos puntos del sistema ferroviario.

De la misma forma el simulador permite configurar los siguientes elementos para los sistemas de corriente alterna:

- Frenado Regenerativo
- Sistemas de alimentación: El simulador permite configurar el sistema de alimentación escogido para la línea ferroviaria, ya sea monotensión (1x25 kV

como se alimenta la LAV Madrid – Sevilla) o bi-tensión (2x25 kV como se alimentan el resto de líneas de Alta Velocidad en España). También permite otros modos de alimentación más novedosos, como es el modo bi-tensión asimétrica (25kV/–75kV).

- Bancos de condensadores: Se trata de una estrategia utilizada en sistemas eléctricos para controlar la potencia reactiva, y con ello las pérdidas y los niveles de tensión.

Una vez elegida la configuración que más se ajusta al sistema que se quiere analizar, el simulador resuelve los problemas eléctricos que se suceden al moverse los trenes y se generan los resultados necesarios para analizar el ahorro de energía:

- Consumo eléctrico en subestaciones y trenes.
- Regeneración en trenes y consumo en los reóstatos.
- Pérdidas en líneas de transmisión, catenaria, subestaciones, autotrafos, etc.
- Tensiones mínimas y máximas alcanzadas en la línea.
- Factores de aprovechamiento de la red.

#### 7.1.1. Descripción del simulador eléctrico

El simulador eléctrico utilizado para analizar las líneas ferroviarias electrificadas y sus elementos correspondientes está formado por 3 módulos que se describen a continuación:

- Generador de escenarios eléctricos: Según los elementos de la infraestructura que formen parte de nuestra línea ferroviaria y del tipo de explotación que se considere para dicha línea, se generan una serie de circuitos eléctricos que la herramienta deberá resolver.

Hay que tener en cuenta que los circuitos eléctricos no son fijos ya que los trenes cambian continuamente su posición y por lo tanto el consumo varía en función del tiempo. Dentro de este módulo se consideran los siguientes elementos principales:

- Infraestructura: Esta parte es fija y se refiere a la electrificación de la línea, es decir, las características eléctricas de la catenaria, la posición de las subestaciones, tensión de alimentación, la longitud del tramo a simular, etc.
- Malla de circulación: Se refiere a el número de trenes considerados en el sistema. Se indica el número de trenes involucrados y la periodicidad de los mismos.
- Marchas: Indica el comportamiento de un tren individualmente, es decir, su consumo, velocidad, etc.. en cada punto del sistema.
- Flujo de cargas: La resolución de dichos circuitos eléctricos consisten en este segundo módulo.

Cada circuito eléctrico generado en el módulo anterior lo llamamos flujo de carga y el simulador lo resuelve aplicando el método iterativo Newton-

Raphson. Para cada circuito se genera un fichero de resultados. Con estos ficheros el siguiente módulo del simulador realizará los diferentes estudios (consumos de energía, comparativas de tensiones, evaluación de potencias, etc.). Este fichero contiene todas las magnitudes eléctricas necesarias para realizar los citados estudios.

Cabe destacar que el simulador comprueba en cada iteración que las condiciones que se están considerando son realistas, es decir, por ejemplo los trenes tienen una tensión máxima de funcionamiento por lo que si dicha tensión se alcanza (por ejemplo cuando están frenando), cambia el modo de funcionamiento y el tren entrega parte de la energía al freno reóstático para que la tensión no continúe subiendo.

- Cálculo de las magnitudes resumen: Como se ha indicado anteriormente este módulo utiliza los datos obtenidos en el módulo de flujos de cargas para realizar los cálculos correspondientes. Por ejemplo el módulo anterior almacena los datos correspondientes a las potencias instantáneas y este módulo es el encargado de integrar dichas potencias para calcular la energía consumida.

## 7.2. Caso 1: Línea 3 del metro de Madrid.

Hemos realizado una simulación utilizando la Línea 3 del metro de Madrid. A continuación se muestra el esquema eléctrico simplificado.

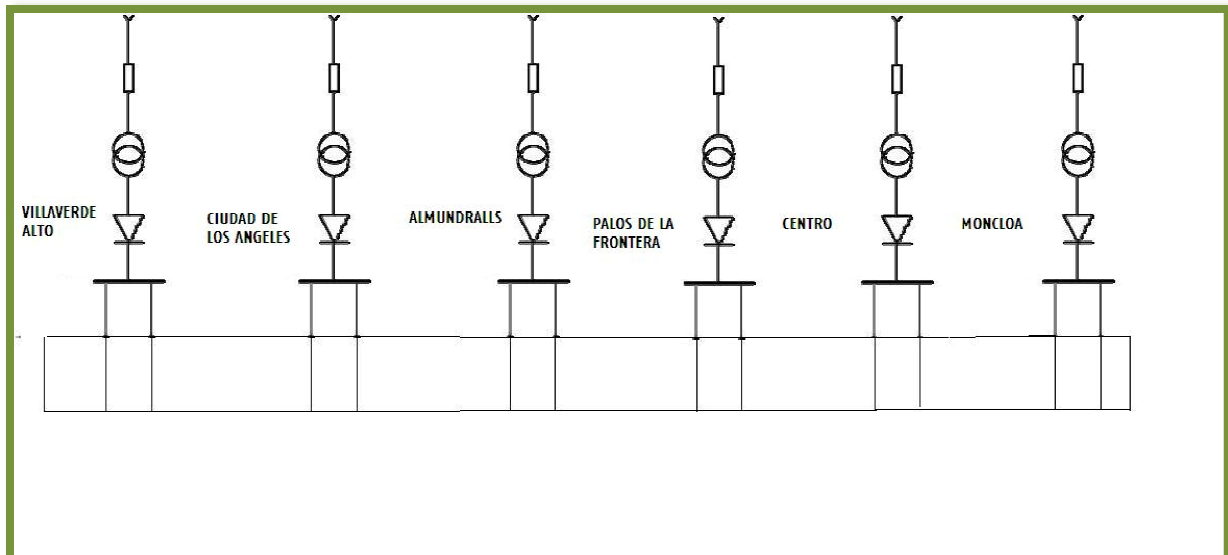


Figura 12: Esquema Eléctrico Línea 1 metro Málaga

Sus características principales son las siguientes:

- 6 Subestaciones con rectificadores de 12 pulsos.
- Línea electrificada en c.c. a 1500 V nomiales, 1750 V en vacío.
- Vía doble.

### 7.2.1. Hora Punta Sin Freno Regenerativo

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos considerando la configuración de **Hora Punta** (tren cada 2 minutos) y con 3 escenarios posibles:

En la figura 13 se muestran las tensiones –muy importantes en un sistema ferroviario– tanto del lado de corriente continua como del lado de corriente alterna de la subestación de Villaverde alto así como la potencia consumida en la misma sin freno regenerativo.

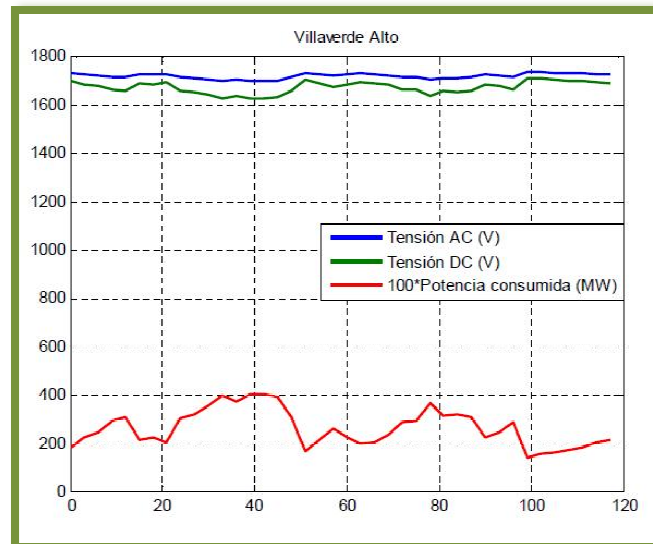


Figura 13: Tensiones y Potencias Villaverde Alto SIN Freno Regenerativo

### 7.2.2. Hora Punta Con Freno Regenerativo

En la figura 14 se muestra el gráfico en el caso en el que los trenes disponen de freno regenerativo.

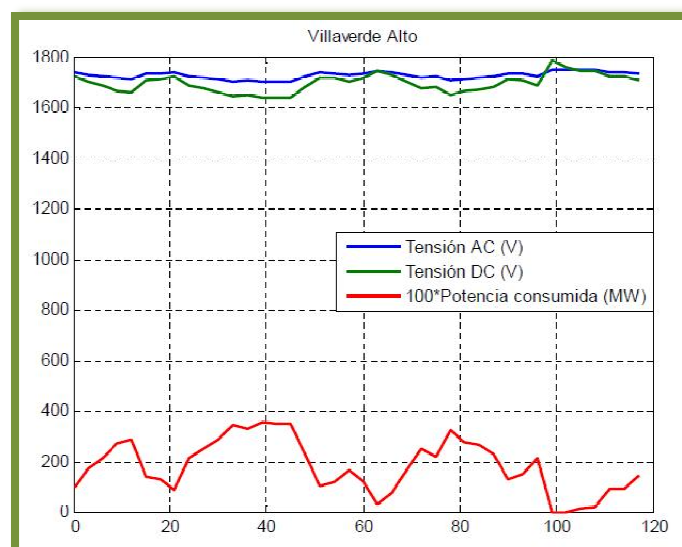


Figura 14: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo



En este caso, cuando el tren frena la energía no se envía a los reóstatos; sino que después de alimentar a sus propios sistemas auxiliares, trata de reintegrarla en la catenaria para que sea consumida en otro punto, aunque no siempre es posible.

Por otro lado, se puede observar que la tensión en continua sube con respecto al caso del freno regenerativo en algunos instantes. Obviamente esos instantes corresponden con momentos de frenadas significativas. Las pérdidas en reóstatos son muy pequeñas. Lo más **significativo** es que **el consumo en las subestaciones desciende aproximadamente un 30%**.

### 7.2.3. Hora Punta Con Freno Regenerativo y SSEE Reversibles

En la figura 15 se muestra el gráfico en el caso en el que los trenes disponen de freno regenerativo y las subestaciones son reversibles.

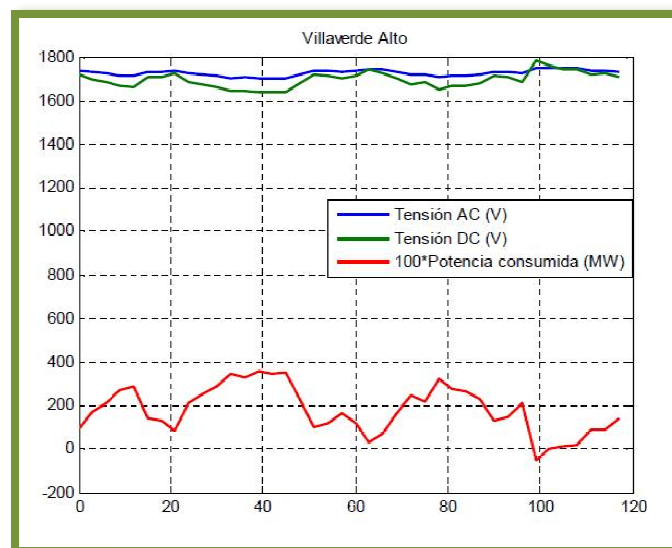


Figura 15: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo y SSEE reversibles

No se observan grandes diferencias con respecto al caso anterior. Las tensiones en continua suben un poco. Lo más significativo es que las tensiones de continua pueden superar a las tensiones de alterna cuando se produce una frenada fuerte cerca de una subestación. En ese momento la subestación está actuando como inversora y la potencia es puntualmente negativa lo que quiere decir que se está entregando energía a la parte de alterna.

Antes se ha comentado que la mejora debida al freno regenerativo era notable, pudiendo llegar al 30% de ahorro. Sin embargo la aportación de **las subestaciones reversibles NO mejora sustancialmente el consumo energético en estas circunstancias.**

A continuación se muestran los resultados obtenidos considerando la configuración de Hora Valle (un tren cada 15 minutos) y los 3 escenarios anteriormente expuestos.

### 7.2.4. Hora Valle Sin Freno Regenerativo

Al igual que ocurría al principio de este apartado, en la figura 16 se muestran las tensiones tanto del lado de corriente continua como del lado de corriente alterna de la subestación de Villaverde alto así como la potencia consumida en la misma sin freno regenerativo, en este caso al paso de un tren cada 15 minutos.

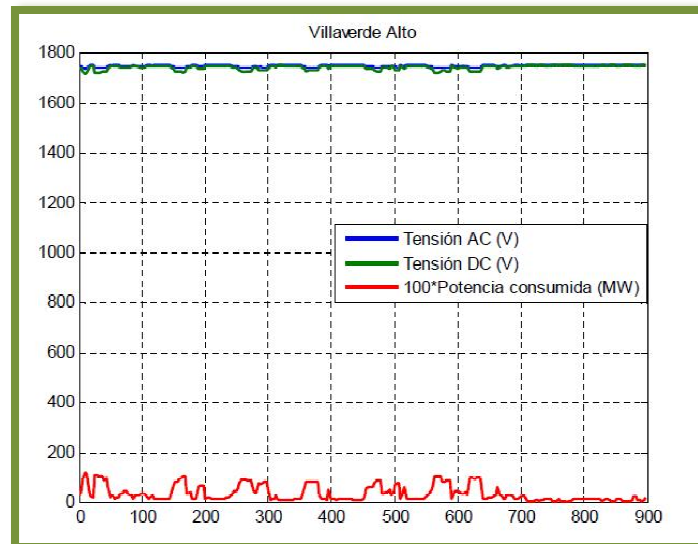


Figura 16: Tensiones y Potencias Villaverde Alto SIN Freno Regenerativo

Como pudimos observar, la línea está muy bien dimensionada y la tensión de vacío está ajustada a un nivel alto, lo cual provoca que las tensiones sean muy altas, incluso más elevadas que en el caso de hora punta.

#### 7.2.5. Hora Valle Con Freno Regenerativo

En la figura 17 se muestra el gráfico en el caso en el que los trenes disponen de freno regenerativo en Hora Valle.

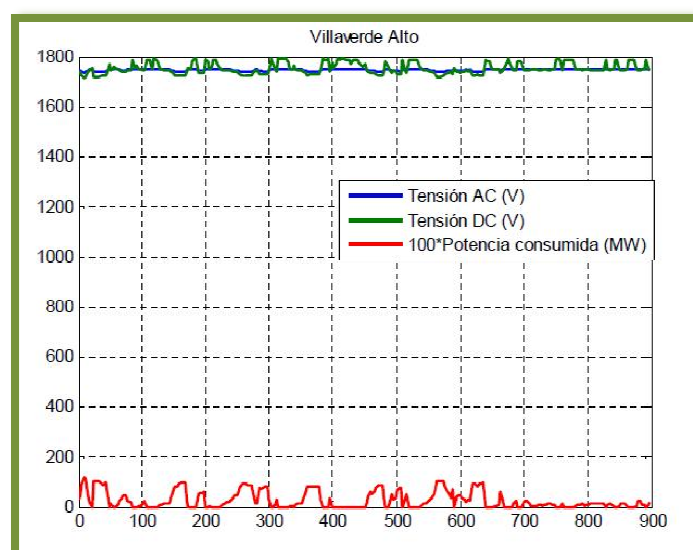


Figura 17: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo

De nuevo se puede observar que la tensión de continua sube con respecto al caso anterior cuando se produce una frenada significativa. El consumo en este caso desciende un 25% aproximadamente en las subestaciones.

#### 7.2.6. Hora Valle Con Freno Regenerativo y SSEE Reversibles.

En la figura 18 se muestra el gráfico en el caso en el que los trenes disponen de freno regenerativo en Hora Valle y las subestaciones son reversibles.

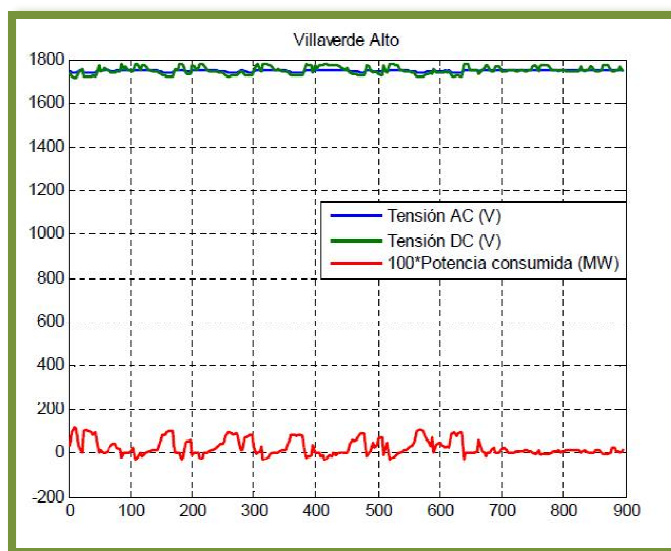


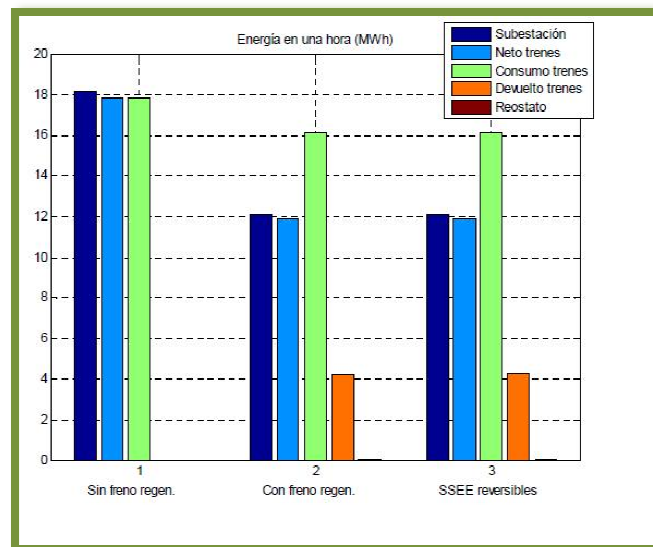
Figura 18: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo y SSEE Reversibles

Al igual que en hora punta lo más significativo es que cuando se produce una frenada significativa en un tren cercano a una subestación, ésta actúa como inversora y la potencia es puntualmente negativa por lo que se está entregando energía a la parte de alterna.

El consumo en las subestaciones podría descender un 30% frente al caso inicial sin freno regenerativo.

## Conclusiones con los resultados obtenidos

Se muestran las siguientes gráficas para extraer conclusiones de los resultados obtenidos:



**Figura 19: Balance de Energía en una hora en Hora Punta**

La gráfica 19 muestra el balance de Energía en una hora para el caso de Hora Punta. Se puede observar lo comentado anteriormente:

- El consumo en la subestación disminuye considerablemente al introducir el freno regenerativo (un 30 % aproximadamente), sin embargo no se produce ninguna mejora al introducir las subestaciones reversibles.
- Se produce el mismo efecto en el consumo neto del conjunto de trenes. El freno regenerativo hace posible devolver la mayoría de la energía a la catenaria.
- El consumo de los trenes es la suma del conjunto de tracción y de los servicios auxiliares. Debido a ello, cuando se dispone de freno regenerativo disminuye el consumo de los trenes, ya que parte del consumo de servicios auxiliares procede del frenado. La energía devuelta que se representa en la gráfica no es real ya que se ha descontado la parte que utilizan los servicios auxiliares.

La gráfica 20 muestra el balance de Energía en una hora para el caso de Hora Valle.

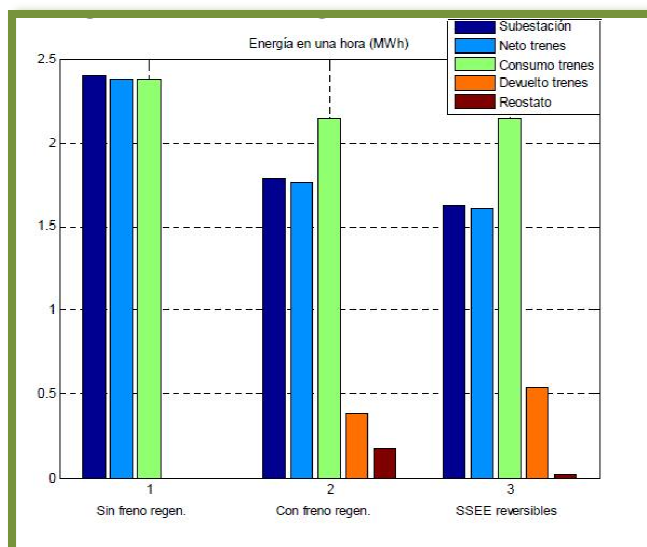


Figura 20: Balance de Energía en una hora en Hora Valle

Podemos observar lo siguiente:

- La Energía total involucrada es mucho menor que en el caso anterior ya que la circulación de trenes es mucho menor también.
- Como se contó anteriormente, la introducción del freno regenerativo supone un decremento importante de la energía consumida en las subestaciones (aproximadamente del orden de un 25%).
- A diferencia de lo que ocurre en el caso de hora punta, en este caso si que es apreciable la introducción de las subestaciones reversibles. Pasa de un 25% a un 30 % de ahorro. Ese ahorro es importante en términos relativos, no tanto en términos absolutos al tratarse de hora Valle.
- Esa mejora es debida a que sin subestaciones reversibles existía una pequeña cantidad de energía que se quemaba en reóstatos y con las subestaciones reversibles dicha energía se elimina casi totalmente.

Las principales **conclusiones generales** que se pueden extraer son:

- ✓ El **Freno Regenerativo** podría aportar un **gran ahorro de Energía**, entre un 25% y un 35% para los escenarios considerados.
- ✓ Las **Subestaciones Reversibles** no suponen una aportación significativa en hora punta pero si en hora Valle. No obstante, en ese escenario la energía involucrada es menor por lo que sería aconsejable realizar un estudio detallado para poder valorar si compensa realizar la instalación de las subestaciones Reversibles.

### 7.3. Caso 2: LAV Madrid - Zaragoza.

La otra simulación realizada tiene como escenario la Línea de Alta Velocidad Madrid – Barcelona – Frontera Francesa, analizando el tramo comprendido entre Madrid y Zaragoza. El esquema eléctrico simplificado es el siguiente:

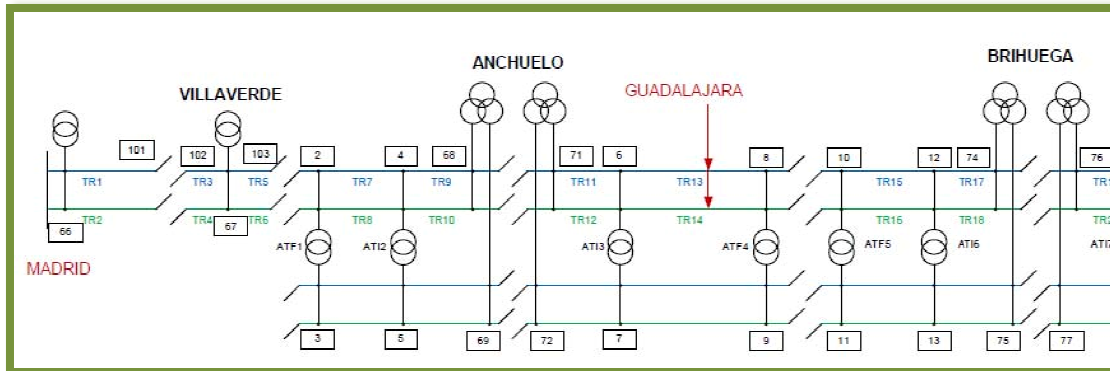


Figura 21: Esquema eléctrico simplificado LAV Madrid – Zaragoza

Podemos observar en la figura 21 el esquema eléctrico simplificado entre Madrid y la Subestación de Brihuega, con los elementos más significativos que forman parte de la instalación. El primer tramo, desde Madrid hasta después de la Subestación de Villaverde es un tramo de 1x25 kV. Desde ese punto la línea es de 2x25 kV. Cada subestación es alimentada por 2 transformadores trifásicos (60 MVA) que alimentan a secciones consecutivas (con alternancia de fases para no desequilibrar la red). Las principales características son las siguientes:

- Alimentación bitensión  $\pm 25$  kV.
- Auto-transformadores para estabilizar la tensión.
- Seccionamientos en la catenaria para la separación de fases de las SSEE.

Los siguientes datos nos muestran más detalles sobre la explotación de la línea:

- Tren  $\rightarrow$  Talgo – Bombardier de la serie 102.
- Potencia máxima de tracción 8000kW, con rendimiento de la cadena de tracción de 0,91.
- Potencia máxima de frenado 8,333kW con rendimiento 0,9.
- Consumo de auxiliares de 325kW/h.
- Factor de potencia de los trenes de 0,95.

#### 7.3.1. Hora Punta Sin Freno Regenerativo

En primer lugar vamos a considerar el escenario de Hora Punta (trenes cada 2 minutos). Se representa en la figura 22 el balance de potencia activa para el caso SIN Freno Regenerativo:

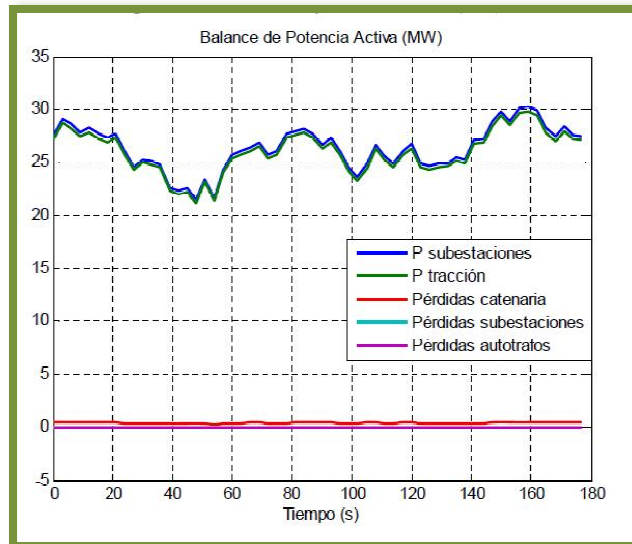


Figura 22: Balance Potencia Activa (MW) SIN Freno Regenerativo

Podemos observar en el gráfico que la potencia consumida en las subestaciones es muy poco más que la consumida en los trenes, debido a que las pérdidas que existen en la instalación son mínimas.

En la figura 23 se muestra el balance de Potencia Reactiva obtenido para el caso de Hora Punta y SIN Freno Regenerativo.

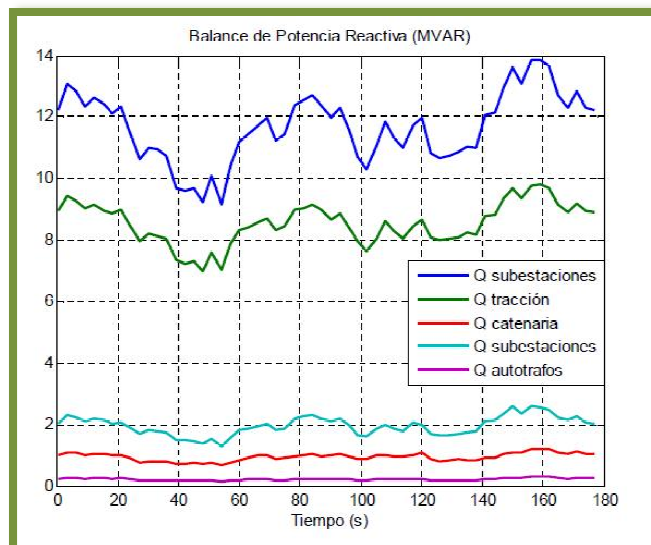


Figura 23: Balance Potencia Reactiva (MVAR) SIN Freno Regenerativo

A diferencia de lo ocurrido con la Potencia Activa, en este caso la Potencia Reactiva consumida en las subestaciones es mucho mayor que la consumida en los trenes. Esto es debido a que las subestaciones, la catenaria y los autotransformadores también consumen Potencia Reactiva.



A continuación en la figura 24 se muestra un gráfico con el balance de Energías en las 6 subestaciones comprendidas en el tramo considerado. Se muestra en color azul la energía correspondiente a la Potencia Activa, en color verde la energía correspondiente a la potencia Reactiva (no es propiamente una energía pero da información interesante sobre el exceso de corriente y por tanto sobre el exceso de carga de la instalación con respecto a la útil que es la activa). En color granate se representa la potencia aparente que engloba a ambas.

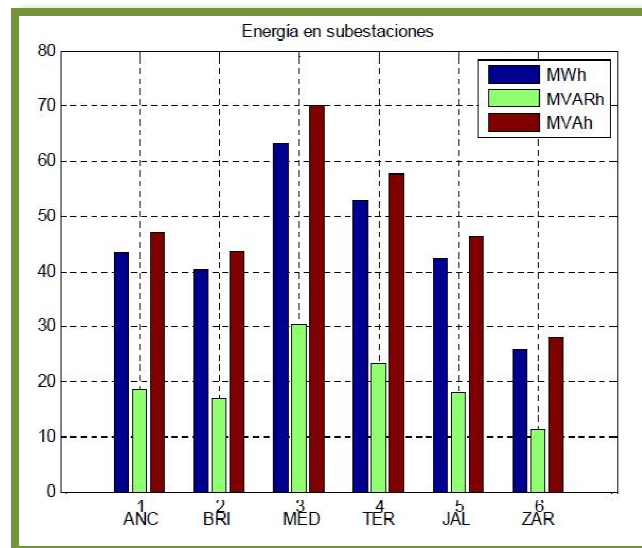


Figura 24: Balance Energía Subestaciones SIN Freno Regenerativo

### Bancos de condensadores

Como hemos observado en los gráficos anteriores tenemos una Potencia Reactiva muy elevada. Una práctica habitual para hacer frente a ese consumo de Potencia Reactiva es la instalación de **Bancos de Condensadores**. En el caso que nos ocupa, una línea ferroviaria, existen multitud de ubicaciones donde colocar dichos equipos: en las propias subestaciones, en los autotransformadores o incluso en un punto intermedio. Sin embargo no hay mucha diferencia entre una ubicación u otra.

Las principales consecuencias de utilizar los bancos de condensadores serían las siguientes:

- La Potencia Reactiva consumida en el sistema ya no sólo corresponde a la aportada por las subestaciones sino también a la generada por los bancos de condensadores. En este caso se han simulado bancos de condensadores que generan el 50% de la reactiva consumida por el sistema en dicho escenario.
- Mejora el factor de potencia equivalente en las subestaciones.
- Bajan un 10% las pérdidas en catenaria al disminuir la componente reactiva de las corrientes.
- Aumenta la tensión mínima de la línea hasta los 24.600V. Ello tiene como consecuencia un aumento de la capacidad de tráfico de la línea.



En la figura 25 se representa el balance de potencia activa obtenida con la incorporación de los bancos de condensadores. Se sigue manteniendo el escenario de Hora Punta y SIN Freno Regenerativo.

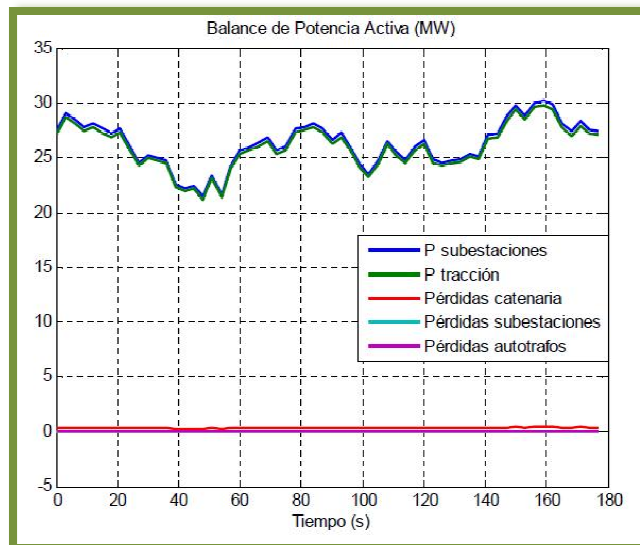


Figura 25: Balance Potencia Activa (MW) SIN Freno Regenerativo con banco de Condensadores

En este gráfico no observan cambios significativos con respecto al gráfico 22 ya que hemos comentado que influye indirectamente en la potencia Activa y de forma directa en la Potencia Reactiva como se puede observar en el gráfico 26.

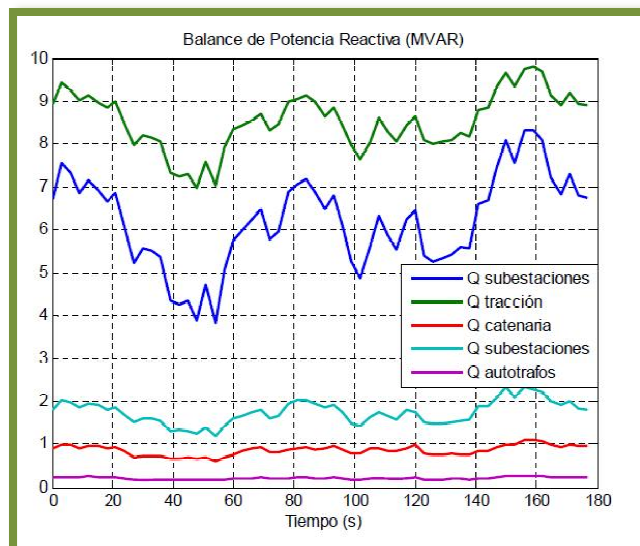


Figura 26: Balance Potencia Reactiva (MVAR) SIN Freno Regenerativo y con banco de Condensadores

Comparando esta gráfica con la gráfica 23 se observa que la energía consumida en los trenes es la misma. Sin embargo, la potencia reactiva consumida en las subestaciones ahora es mucho menor ya que el resto de potencia reactiva consumida en el sistema está siendo aportada por el banco de condensadores. Los demás consumos de reactiva varían ligeramente.

Por último se muestra en el gráfico 27 el balance de energía en las subestaciones con la incorporación de los bancos de condensadores. Se observa claramente la reducción aproximadamente a la mitad de la energía reactiva. En consecuencia la energía aparente también disminuye considerablemente.

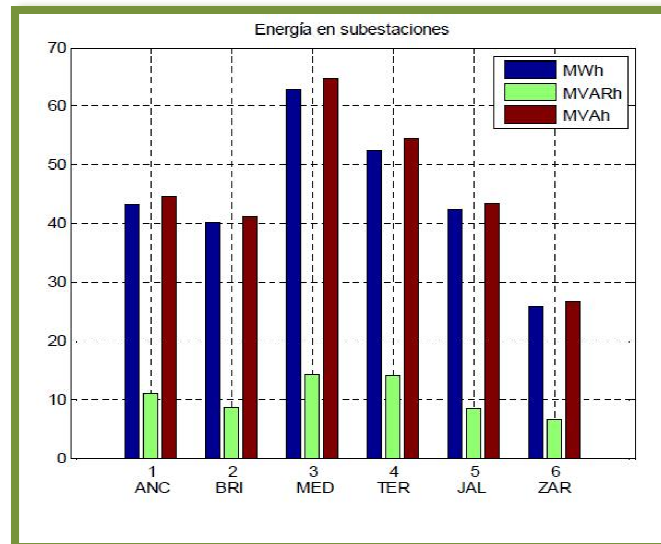


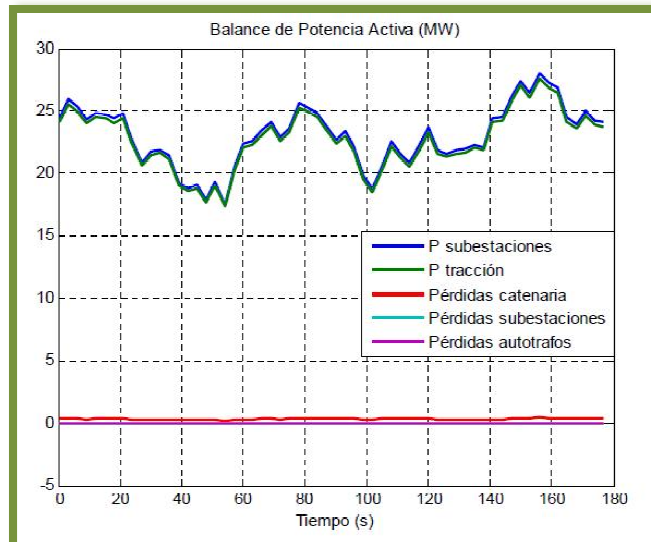
Figura 27: Balance Energía Subestaciones SIN Freno Regenerativo y con banco de Condensadores

### 7.3.2. Hora Punta Con Freno Regenerativo

Realizamos las simulaciones anteriores introduciendo el Freno Regenerativo. Ello va a suponer cambios significativos ya que vamos a poder aprovechar la energía procedente del frenado de los trenes. Las principales diferencias son:

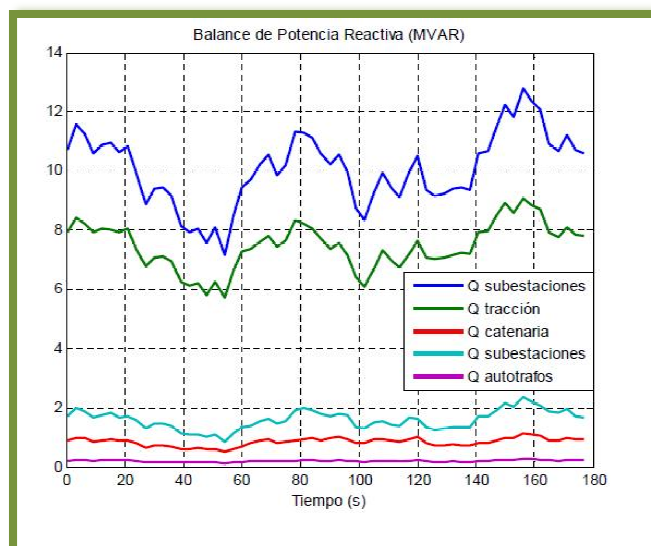
- Descenso del consumo neto del tren (tanto Potencia Activa como Potencia Reactiva) un 12% aproximadamente. Ese descenso también se produce en las subestaciones.
- El descenso de consumo no se produce en todas las subestaciones de igual modo ya que el frenado del tren depende del perfil de la línea.
- Disminuyen las pérdidas en catenaria un 10% aproximadamente.

Se representa en la figura 28 el balance de potencia activa obtenido. Es interesante comparar esta gráfica con la equivalente SIN Freno Regenerativo (gráfica 25) y observar que la potencia consumida en las subestaciones es algo superior a la consumida en los trenes debido a las pequeñas pérdidas en la instalación. Sin embargo, se observa una reducción en la Potencia consumida.



**Figura 28: Balance Potencia Activa (MW) CON Freno Regenerativo**

La figura 29 muestra el balance de energía reactiva CON Freno Regenerativo



**Figura 29: Balance Potencia Reactiva (MVAR) CON Freno Regenerativo**

Al igual que ocurría en el caso SIN Freno Regenerativo, la potencia reactiva consumida en las subestaciones es mayor que la consumida en los trenes ya que las propias subestaciones, los autotransformadores y la catenaria también consumen energía reactiva.

La gráfica de la figura 30 muestra el balance de Energía en las Subestaciones. Comparándola con la gráfica obtenida en la figura 27 correspondiente al mismo tramo pero sin freno regenerativo observamos que la energía disminuye manteniéndose la proporción entre activa y reactiva.

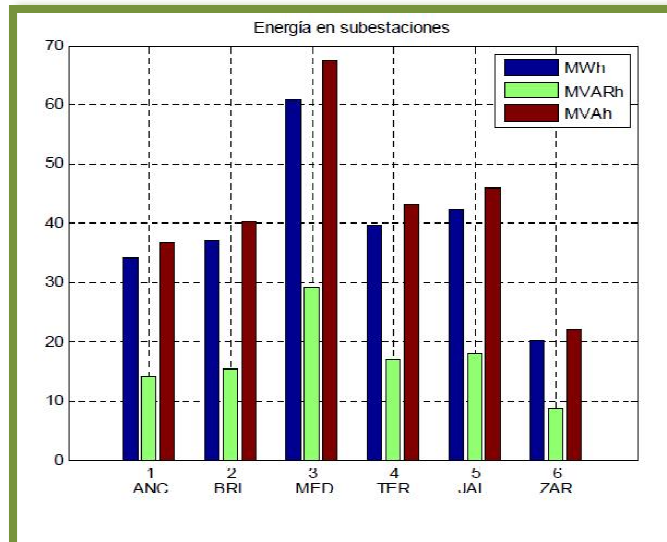


Figura 30: Balance Energía Subestaciones CON Freno Regenerativo

### Bancos de condensadores

Al incorporar los bancos de condensadores se obtienen mejoras similares al caso sin freno regenerativo:

- Las pérdidas en catenaria se reducen un 20% con respecto al caso de trenes sin freno regenerativo y un 10% respecto al caso con freno regenerativo pero sin bancos.
- La tensión mínima sube a 24.700V aumentando la capacidad del tráfico de la línea.

En la figura 31 se representa el balance de potencia activa obtenida con la incorporación de los bancos de condensadores. Se sigue manteniendo el escenario de Hora Punta y CON Freno Regenerativo.

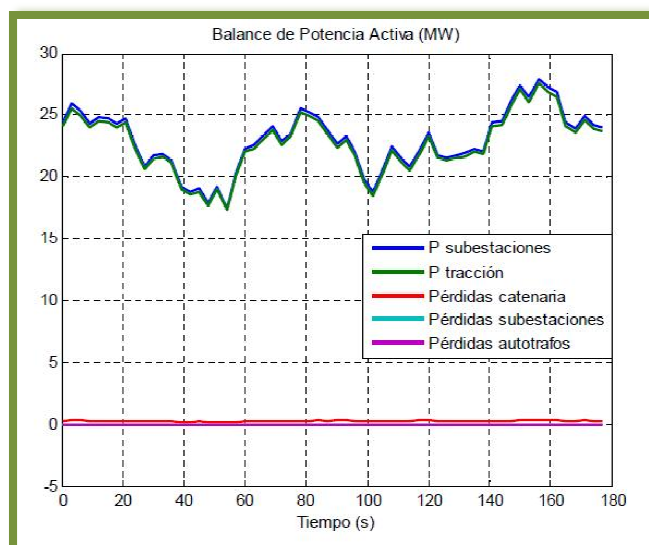
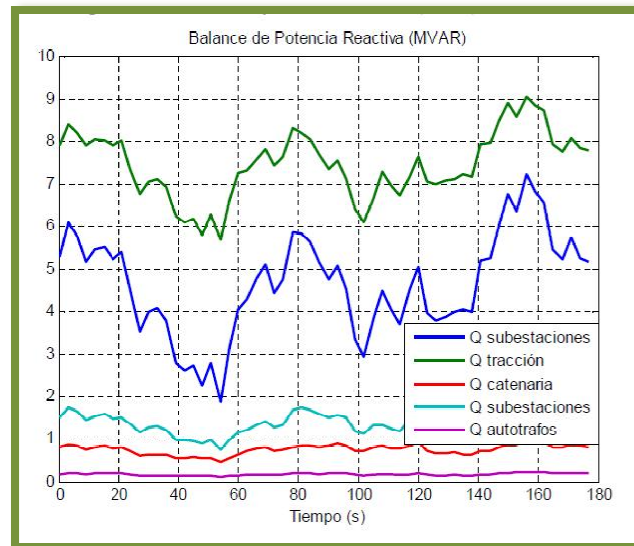


Figura 31: Balance Potencia Activa (MW) CON Freno Regenerativo y banco de condensadores

La potencia consumida en las subestaciones es muy poco superior a la consumida en los trenes debido a las pequeñas pérdidas en catenaria y al compararla con la correspondiente a no tener bancos de condensadores (figura 28) se observa una pequeña diferencia en la reducción de las pérdidas en catenaria.

En la figura 32 se representa el balance de potencia reactiva obtenida con la incorporación de los bancos de condensadores. Se sigue manteniendo el escenario de Hora Punta y CON Freno Regenerativo.



**Figura 32: Balance Potencia Reactiva (MVAR) CON Freno Regenerativo y banco de condensadores**

La principal diferencia con respecto al caso de no instalar bancos de condensadores es que la potencia reactiva consumida por la subestación es mucho menor ya que dicha potencia está siendo aportada por los bancos. El resto de consumos de reactiva cambia ligeramente.

Po último se representa en la figura 33 el balance de energía en las subestaciones con la instalación del banco de condensadores. Se observa en comparación con la figura 30 que la potencia reactiva se ha reducido a la mitad y como consecuencia de ello la potencia aparente disminuye.

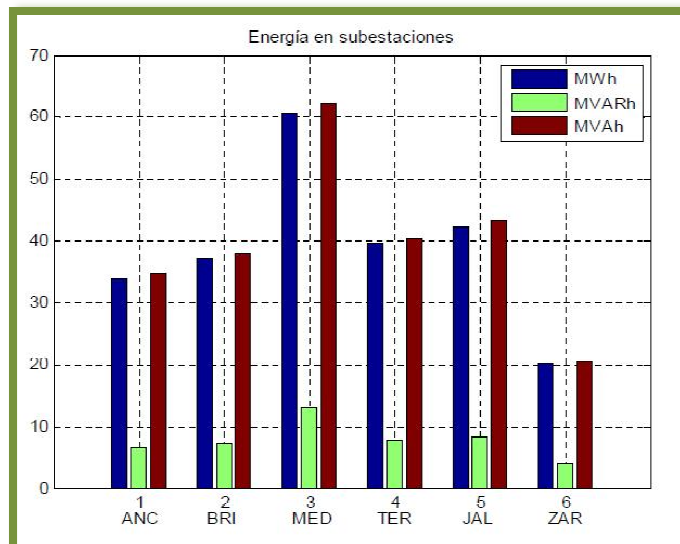


Figura 33: Balance Energía Subestaciones CON Freno Regenerativo y con banco de condensadores

### 7.3.3. Hora Valle

Se ha realizado el estudio mediante el simulador de la línea de Alta Velocidad Madrid – Zaragoza con el escenario de hora Valle (circulación de un tren cada 60 minutos) pero no se muestran los resultados ya que son muy parecidos. Simplemente se detallan las siguientes conclusiones de los resultados obtenidos:

- Se obtiene un rendimiento superior al 99% en potencia activa (entendido como el ratio entre la potencia consumida en los trenes y la potencia consumida en las subestaciones).
- Las pérdidas en catenaria correspondientes por tanto serían inferiores al 1%.
- El frenado regenerativo influye de igual manera que en el caso de el escenario con hora punta reduciendo el consumo en las subestaciones. Como se ha indicado dicha reducción será variable en las subestaciones debido a distinto perfil de la línea en todo el trayecto.
- Los bancos de condensadores deben estar desconectados en este escenario de poco tráfico ya que podría influir en una elevación desmesurada de las tensiones.

## 7.4. Conclusiones generales simulador Eléctrico

Las conclusiones generales que se pueden extraer son:

- El uso del **Freno Regenerativo** supone un **ahorro muy importante**.
- El aumento de la tensión mínima supone un aumento de la capacidad de tráfico en la línea.
- Las pérdidas son muy pequeñas porque las líneas están diseñadas con mucha holgura.
- Para **implantar otras mejoras** hay que **estudiar a fondo** cada caso concreto.

## 8. Conclusiones

A continuación se realiza un resumen del trabajo realizado, los resultados obtenidos y una pequeña reflexión sobre dichos resultados:

- Se ha colaborado en un proyecto de gran envergadura en el que se han visto implicadas grandes empresas durante un período prolongado de tiempo y por tanto se han producido una cantidad de conflictos considerables y se han podido solventar gracias a la colaboración de todo el mundo mediante la propuesta de soluciones para su resolución. De este modo, se adquieren distintos enfoques para afrontar los problemas.
- Aunque sólo se ha participado en una pequeña parte de todo el conjunto del proyecto, la implicación en todas las fases del mismo es necesario y ello ha posibilitado adquirir una gran cantidad de conocimientos en todo los campos que abarca el mismo.
- Gracias al estudio de otros proyectos internacionales que se han realizado en este campo, se pone de manifiesto la gran importancia del ahorro energético en el sector de los transportes y en el sector ferroviario en particular.
- Se han adquirido multitud de conocimientos en la tecnología de baterías y supercondensadores gracias a la abundante búsqueda de información.
- Como se ha recalcado continuamente en el trabajo, lo más importante es la circulación de los trenes por lo que debe ser Prioritario ante cualquier otro objetivo.
- Se ha podido observar que la importancia del Freno Regenerativo es muy alta en comparación con el resto de elementos que se han introducido en la simulación. Además el uso del Freno Regenerativo es más importante en metro que en Líneas de Alta Velocidad ya que su uso es más constante.
- Se ha comprobado que actualmente los diseños de todas las líneas eléctricas ferroviarias están muy avanzados por lo que las pérdidas en catenaria son mínimas (sobre todo en las Líneas de Alta Velocidad al ser más modernas).
- Cabe destacar que los resultados obtenidos con el simulador no dejan de ser teóricos por lo que no deben tomarse como definitivos hasta realizar pruebas reales en las propias instalaciones.





## 9. Bibliografía

En este apartado se recogen las referencias bibliográficas consultadas para la realización de este trabajo y que no han sido citadas propiamente en el texto. Se ha decidido ordenarlas por orden alfabético del apellido del primer autor.

ALSTOM. Enviroment. Urban Integration. Batteries. "The battery. Autonomous on board system"

P. Barrade, B. Destraz, A. Rufer, "Hybrid vehicle in railways applications: spuercapacitive energy storage for diesel-electric locomotives", EPFL.

E. Bersano, "Cost and Energy Savings for Traction Applications", Maxwell, 2005

P.J. Binduhewa, A.C. Renfrew, M. Barnes, "Ultracapacitor Energy Storage for MicroGrid Microgeneration", the 4th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2008.

R. Bonert, L. Zubieta, "Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 36, January- February 2000.

Andrew Burke, "Energy Storage in Advanced Vehicle Systems", Institute of Transportation Studies, 2005.

An overview K.C. Divya Ostergaard, "Battery energy storage technology for power systems", Electronic Power System Research Volume 79, Issue 4, April 2009".

2004, M. Endo y otros. Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century.

Grainger, J.J.; Stevenson, W.D. (1999): Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill, U.S.A.

John M. Miller, "Ultracapacitor Efficiency under Constant Power Conditions: Prospects for Lithium Battery plus Ultracapacitor Hybrid Energy Storage Systems," 3rd International Symposium on Large Ultracapacitor Technology and Application (UCAP), Advanced Automotive Battery Conference, Hyatt Regency hotel, Long Beach, CA, May 2007.

Lin Y, Hwang HS, Lee WJ, "Effect of Surface Treatment of Graphite Particles on the composite Supercondensador of Hydrous Ruthenium Oxides Coatings by Cathodic Deposition Method

Herbert JJ (2000) Electrochemistry and structure of the conducting polymer Poli 3 - (4 Fluorophenil) Tiophene used in electrochemical supercondensadors Los Ángeles: University of California

Hu YS et al Electrochemical lithiation synthesis of nanoporous materials with superior catalytic and capacitive activity. Nature Materials 2006; 5: 713 - 7.

Jean-Paul Moskowitz, "Full tram Project", Alstom, June 2006.

"LIFE and Energy - Innovative solutions for sustainable and efficient energy in Europe"

"Gateway to a new thinking in energy management - supercapacitors", Maxwell, 2005

A Rufer, P Barrade, D Hotellier, "Power electronic interface for a supercapacitor based energy system substation in DC transportation networks", EPFL, 2004.

SAFT. Communique de presse realise "Saft batteries provide high-tech traction battery for Sitras HES hybrid energy storage system on Siemens Mobility's trams".

Sitras HES. "Hybrid energy storage system for rail vehicles". Product Information/Version 1.0.0. [www.siemens.com/mobility](http://www.siemens.com/mobility).

"Siemens Transportation Systems – Shaping Tomorrow's Railways", Siemens Transportation.

Schneider, "Review and comparison of the different Energy Storage Means", 2007

Joseph and M. Shahidehpour, "Battery energy storage systems in electric power systems", IEEE 2006.

M Steiner, J Scholten, "Energy storage on board of DC fed railway vehicles", Bombardier Transportation, PESC 2004.

Tzeng, Y. S.; Chen, N.; Wu, R. N. (1995a): A detailed R-L fed bridge converter model for power flow studies in industrial ac/dc power systems. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE- 42, no. 5, pp. 531–538.

Tzeng, Y. S.; Chen, N.; Wu, R. N. (1995b): Unified AC/DC power flow for system simulation in DC electrified transit railways. IEE proc–Electr. Power Appl., Vol. 142, no.6, pp. 345–354.

Tzeng, Y. S.; Chen, N.; Wu, R. N. (1998): Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations. IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 47, no. 4, pp. 1405–1412.

## 10. Lista de Figuras

Figura 1: Curva de cargas en SSEE de Tracción.

Figura 4: Conexión vehículos eléctricos a la catenaria del ferrocarril.

Figura 3: Escenario 1 del proyecto Ferrolinera 1.0

Figura 4: Escenario 2 del Proyecto Ferrolinera 1.0

Figura 5: Escenario 3 del Proyecto Ferrolinera 1.0

Figura 6: Escenario 4 del Proyecto Ferrolinera 1.0

Figura 7: Esquema general del Proyecto Ferrolinera 3.0

Figura 8: Alcance del Proyecto Ferrolinera 3.0

Figura 9: Sistema de almacenamiento de energía Sitras SES

Figura 10: Sistema de almacenamiento de energía Sitras MES

Figura 11: Sistema de almacenamiento de energía Sitras HES

Figura 12: Esquema Eléctrico Línea 1 metro Málaga

Figura 13: Tensiones y Potencias Villaverde Alto SIN Freno Regenerativo

Figura 14: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo

Figura 15: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo y SSEE reversibles

Figura 16: Tensiones y Potencias Villaverde Alto SIN Freno Regenerativo

Figura 17: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo

Figura 18: Tensiones y Potencias Villaverde Alto CON Freno Regenerativo y SSEE Reversibles

Figura 19: Balance de Energía en una hora en Hora Punta

Figura 20: Balance de Energía en una hora en Hora Valle

Figura 21: Esquema eléctrico simplificado LAV Madrid – Zaragoza

Figura 22: Balance Potencia Activa (MW) SIN Freno Regenerativo

Figura 23: Balance Potencia Reactiva (MVAR) SIN Freno Regenerativo

Figura 24: Balance Energía Subestaciones SIN Freno Regenerativo

Figura 25: Balance Potencia Activa (MW) SIN Freno Regenerativo y con banco de Condensadores

Figura 26: Balance Potencia Reactiva (MVAR) SIN Freno Regenerativo y con banco de Condensadores

Figura 27: Balance Energía Subestaciones SIN Freno Regenerativo y con banco de Condensadores

Figura 28: Balance Potencia Activa (MW) CON Freno Regenerativo

Figura 29: Balance Potencia Reactiva (MVAR) CON Freno Regenerativo

Figura 30: Balance Energía Subestaciones CON Freno Regenerativo

Figura 31: Balance Potencia Activa (MW) CON Freno Regenerativo y banco de condensadores

Figura 32: Balance Potencia Reactiva (MVAR) CON Freno Regenerativo y banco de condensadores

Figura 33: Balance Energía Subestaciones CON Freno Regenerativo y con banco de condensadores