



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Trabajo de Fin de Grado

ELECTRÓNICA DE POTENCIA EN LA TRACCIÓN
FERROVIARIA
POWER ELECTRONICS IN RAILWAY TRACTION

Autor: Sofía Martínez Fernández
Tutor: Natalia Prieto Fernández

(Julio, 2022)

UNIVERSIDAD DE LEÓN Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial GRADO EN INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA Trabajo de Fin de Grado	
ALUMNO: Sofía Martínez Fernández	
TUTOR: Natalia Prieto Fernández	
TÍTULO: Electrónica de Potencia en la Tracción Ferroviaria	
TITLE: Power Electronics in Railway Traction	
CONVOCATORIA: Julio, 2022	
<p>RESUMEN: Los sistemas de tracción que se encuentran en las locomotoras actuales están compuestos por dispositivos electrónicos de potencia. Estos dispositivos son los encargados de la alimentación del resto de los elementos del tren. Gracias a la evolución de los semiconductores han aparecido nuevos modelos de trenes más eficientes y que permiten una circulación más flexible. Estos nuevos modelos permiten solventar el problema de los 80.000 Km de vías sin electrificar que existen por toda Europa.</p> <p>En este trabajo de fin de grado, se analizará el funcionamiento de los elementos de potencia encargados del control de los sistemas de tracción ferroviaria. Además, se estudiarán los nuevos modelos de locomotoras que implementan mejoras en los sistemas de tracción, así como, los distintos sistemas de frenado que se incorporan en los trenes y la recuperación de la energía que permiten los frenos regenerativos.</p>	
<p>ABSTRACT: The traction systems found in today's locomotives are made up of power electronic devices. These devices are responsible for powering the rest of the train's elements, and thanks to the evolution of semiconductors, new models of trains have appeared that are more efficient and allow for more flexible circulation. These new models make it possible to solve the problem of the 80,000 km of unelectrified tracks that exist throughout Europe.</p> <p>This final degree project will analyze the operation of the power elements responsible for the control of railway traction systems. It will also study the new models of locomotives that implement improvements in traction systems, as well as the different braking systems that are incorporated in trains and the energy recovery that regenerative brakes allow.</p>	
Palabras clave: electrónica, tracción, ferroviaria, control, potencia	
<ul style="list-style-type: none"> • Firma del alumno: 	<ul style="list-style-type: none"> • VºBº Tutor/es:

Resumen

Las locomotoras eléctricas de los trenes actuales disponen de un sistema de tracción, el cuál se compone principalmente por dispositivos electrónicos de potencia, encargados de la alimentación de los distintos componentes que forman la tracción ferroviaria. La evolución de los semiconductores ha influenciado en la determinación de los elementos que componen la tracción ferroviaria.

En la actualidad, gracias a la evolución de estos equipos, han ido apareciendo distintos prototipos de locomotoras que permiten una circulación más flexible, debido a que, pueden circular por distintas vías independientemente de su ancho o tipo de electrificación. Algunos de estos prototipos simplemente buscan una alimentación de los motores más eficiente y responsable con el medio ambiente.

En este trabajo de fin de grado, se van a analizar los elementos de potencia encargados del control de los sistemas de tracción, así como, su funcionamiento y su finalidad en el control de la potencia y la velocidad que se suministra a los motores eléctricos de la tracción ferroviaria. Este análisis de sus componentes nos va a permitir determinar las distintas maneras de controlar la tracción ferroviaria. Además, se van a estudiar algunos modelos de locomotoras que implementan mejoras en los sistemas de tracción o, incluso, nuevos sistemas que permiten solventar el problema de los miles de kilómetros de vías sin electrificar que existen por toda Europa.

Otro de los temas que se van a tratar consiste en los distintos sistemas de frenado que pueden llevar incorporados los trenes. Estos sistemas de frenado son muy importantes, no solo para la seguridad y el confort de los pasajeros, para la mejora de la eficiencia de los trenes. Esta mejora se ha producido con la aparición de nuevos frenos que permiten la recuperación de la energía disipada en el momento del frenado, como son los frenos regenerativos.

Abstract

The electric locomotives of today's trains have a traction system, which is mainly made up of power electronic devices, responsible for supplying the various components that make up the railway traction. The evolution of semiconductors has had a considerable influence on the determination of the elements that make up the railway traction.

Nowadays, thanks to the evolution of these devices, different prototypes of locomotives have been appearing that allow for more flexible circulation, as they can run on different tracks regardless of their gauge or type of electrification. Some of these prototypes simply seek a more efficient and environmentally responsible power supply for the engines.

In this final degree project, we will analyze the power elements responsible for the control of traction systems, as well as their operation and their purpose in controlling the power and speed supplied to the electric motors of railway traction. This analysis of their components will enable us to determine the different ways of controlling railway traction. In addition, we will study some locomotive models that implement improvements in traction systems or even new systems that allow us to solve the problem of the thousands of kilometres of unelectrified tracks that exist throughout Europe.

Another issue to be addressed is the different braking systems that can be incorporated in trains. These braking systems are very important, not only for the safety and comfort of passengers, but also for improving the efficiency of trains. This improvement has come about with the appearance of new brakes that allow the energy dissipated during braking to be recovered, such as regenerative brakes.

Índice de contenidos

1. Introducción	9
1.1 ANTECEDENTES	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA	10
2. Contexto histórico del tren eléctrico	12
3. Control de potencia en sistemas de tracción ferroviaria	13
3.1 INTRODUCCIÓN	13
3.2 CONVERTIDORES ESTÁTICOS	14
3.3 CONVERTIDORES CONTINUA - CONTINUA	22
3.3.1 CONTROL REOSTÁTICO DE POTENCIA	22
3.3.2 CONTROL MEDIANTE CHOPPER	25
3.4. CONVERTIDORES ALTERNA - ALTERNA	27
3.4.1 TRANSFORMADORES	27
3.4.2. VARIADORES	30
3.5 CONVERTIDORES ALTERNA – CONTINUA	33
3.5.1 RECTIFICADORES	33
3.6 CONVERTIDORES CONTINUA - ALTERNA	36
3.6.1 ONDULADOR TRIFÁSICO	37
3.7 TRENES BITENSIÓN	41
3.8 ELEMENTOS AUXILIARES	47
4. Sistema de frenado	50
4.1 FRENO REGENERATIVO	53
5. Modelos de trenes nuevos y en desarrollo	58

5.1 TREN HÍBRIDO (SERIE S-730)	58
5.2 CAF OARIS	61
5.3 TALGO AVRIL	62
5.4 TREN MAGLEV	63
5.5 TREN DE HIDRÓGENO	66
6. Conclusiones	69
7. Referencias	71

Índice de figuras

Figura 3.1 Diagrama de bloques de un Sistema de Potencia	13
Figura 3.2 Tipos de convertidores estáticos.....	15
Figura 3.3 Ejemplo de Rectificador no controlado.....	16
Figura 3.4 Ejemplo de Rectificador controlado	16
Figura 3.5 Ejemplo de Regulador CA	17
Figura 3.6 Ejemplo de Cicloconvertidor	18
Figura 3.7 Ejemplo de Inversor.....	18
Figura 3.8 Ejemplo de Chopper	19
Figura 3.9 Serie R-448.....	23
Figura 3.10 Serie R-470.....	23
Figura 3.11 Esquema simple del control reostático del motor	24
Figura 3.12 Esquema de maniobra del control reostático	25
Figura 3.13 Serie S-446	26
Figura 3.14 Modelo de tren S-100.....	28
Figura 3.15 Modelo de tren S-120.....	28
Figura 3.16 Modelo de tren S-104.....	29
Figura 3.17 Ejemplo de transformador de uso ferroviario.....	30
Figura 3.18 Diagrama de bloques del variador de frecuencia.....	32
Figura 3.19 Esquema de un puente rectificador mixto	34
Figura 3.20 Representación de las formas de ondas en los distintos elementos del rectificador	35
Figura 3.21 Esquema de un inversor de puente completo	38
Figura 3.22 Formas de ondas mediante control sin deslizamiento de fase.....	39
Figura 3.23 Formas de ondas mediante control con deslizamiento de fase	40
Figura 3.24 Modelo de tren S-9000.....	41
Figura 3.25 Modelo de tren Serie 1000.....	42
Figura 3.26 Modelo de tren Serie 439.....	42
Figura 3.27 Modelo de tren S-730.....	43

Figura 3.28 Esquema combinación Serie-Paralelo (1500V) y Serie (3000V).....	44
Figura 3.29 Esquema combinación Paralelo (1500V) y Serie-Paralelo (3000V).....	44
Figura 3.30 Esquema de un tren bitensión	46
Figura 3.31 Esquema de alimentación de los elementos auxiliares	48
Figura 4.1 Freno neumático.....	51
Figura 4.2 Esquema de frenado reostático	52
Figura 4.3 Modelo de tren S-251.....	52
Figura 4.4 Modelo de tren S-253.....	53
Figura 4.5 Diagrama de flujo de un freno regenerativo.....	54
Figura 4.6 Esquema de devolución de energía a la catenaria	55
Figura 4.7 Modelo de tren S-114.....	56
Figura 4.8 Modelo de tren Avlo.....	56
Figura 4.9 Modelo de tren S-121.....	57
Figura 4.10 Modelo de cercanías 447	57
Figura 5.1 Tren híbrido (serie S-730).....	58
Figura 5.2 Coche extremo técnico del equipo diésel	59
Figura 5.3 Funcionamiento con tracción eléctrica (serie S-730).....	60
Figura 5.4 Funcionamiento en tracción diésel (serie S-730).....	60
Figura 5.6 Talgo Avril de Renfe.....	62
Figura 5.7 Transrapid. Tren maglev alemán	63
Figura 5.8 Esquema del sistema EMS.....	64
Figura 5.9 Esquema del sistema EDS.....	65
Figura 5.10 Sistema de guía lateral	66
Figura 5.11 Sistema de propulsión	66
Figura 5.12 Talgo Vittal-One.....	67

1. Introducción

En este trabajo de fin de grado se plantea la situación actual de los sistemas de control presentes en los sistemas de tracción ferroviaria.

Este documento reflejará todas estas tecnologías desde un punto de vista tanto actual como futuro. Para ello, se utilizarán los conocimientos adquiridos a lo largo de las distintas materias estudiadas y la documentación existente sobre los sistemas de tracción ferroviaria.

1.1 ANTECEDENTES

Hoy en día, el tren es uno de los medios de transporte más utilizados en todo el mundo, en España el transporte en tren representa el 61% de los desplazamientos. En cuanto al comercio y traslado de mercancías, el transporte ferroviario es el medio principal. Esto es gracias al gran avance y desarrollo que se está llevando a cabo en la industria del ferrocarril actualmente a nivel mundial. El principal foco de atención de esta industria se centra en la alta velocidad. En España hay 3100 km de líneas utilizadas para la alta velocidad, lo que nos convierte a la cabeza de esta industria, siendo el primer país de Europa y el segundo del mundo.

Todo este desarrollo es posible gracias a la evolución de los dispositivos semiconductores, debido a que los sistemas de control utilizados en la tracción ferroviaria están formados por estos dispositivos.

En este documento se va a realizar un estudio del funcionamiento de los sistemas de control de potencia, compuestos por semiconductores, de la tracción ferroviaria y los distintos modelos de tren que utilizan cada uno de ellos, así como la aparición de nuevos trenes.

1.2 OBJETIVOS

Este trabajo consiste en el análisis y comparativa de los distintos elementos presentes en los sistemas de tracción ferroviaria.

Los objetivos de este estudio son:

- Estudiar la evolución de los trenes a partir de sus componentes.
- Determinar las distintas formas de realizar el control de potencia de un sistema de tracción.
- Explicar el funcionamiento de cada uno de los elementos de potencia presentes en el sistema de control.
- Describir las diversas técnicas de conversión eléctrica utilizadas en el sistema ferroviario.
- Identificar y analizar los distintos sistemas de frenado utilizados en los trenes.
- Establecer las particularidades de los trenes bitensión españoles.
- Analizar los distintos trenes que se encuentran en desarrollo en la actualidad y que son el futuro del sistema ferroviario.

1.3 DESCRIPCIÓN DE LA MEMORIA

Esta memoria comienza con una revisión al momento de la creación de lo que hoy en día conocemos como tren y su historia hasta el desarrollo de las locomotoras actuales.

Posteriormente, se tratarán los distintos sistemas de control de la energía eléctrica utilizada en los sistemas de tracción. Se verá la situación en las que se usan cada uno de ellos dependiendo del tipo de electricidad a la que se alimente la catenaria, así como su funcionamiento. Este punto se divide según los distintos tipos de convertidores que se tratan.

En el siguiente punto se estudiarán los diferentes sistemas de frenado que se emplean en los trenes actuales. El frenado regenerativo será el elemento principal de esta parte del documento, así como su funcionamiento.

A continuación, se verán las distintas tecnologías que se utilizan o se pretenden utilizar en los trenes modernos, mediante prototipos.

Para finalizar se sacarán una serie de conclusiones sobre los distintos apartados que han sido tratados a lo largo del este trabajo.

2. Contexto histórico del tren eléctrico

En este capítulo se va a ver la evolución del tren eléctrico a lo largo de los años desde su creación hasta la actualidad con los trenes más modernos.

En el año 1802, la primera locomotora de vapor fue creada por un mecánico inglés llamado Richard Trevithick. Esta locomotora de vapor, la cual no superaba la velocidad de un hombre andando, se usaba en las minas de carbón de piedra inglesas. Sin embargo, el hierro colado de su caldera no soportaba bien el peso de la locomotora, por lo que se rechazó su uso.

Años más tarde, en 1825, apareció un ingeniero mecánico británico, llamado George Stephenson, que desarrolló la primera locomotora a vapor confiable. EL vapor fue el principal sistema de tracción hasta que, en el año 1898, el ingeniero mecánico alemán Rudolf Christian Karl Diesel inventó, cómo su nombre indica, la tracción por diésel. Este sistema de tracción se utilizó durante muchos años hasta el año 1879 con la aparición de la primera locomotora eléctrica diseñada por Werner von Siemens que es la predecesora de los trenes que se usan actualmente.

La tecnología está siempre en constante expansión, por esta razón se están investigando nuevas formas de tracción ferroviaria, como la pila de hidrógeno o el gas natural licuado, que en algún futuro podrán sustituir a los trenes por tracción eléctrica actuales. [1] [2]

3. Control de potencia en sistemas de tracción ferroviaria

Gracias a la evolución de la electrónica de potencia, surgió una revolución de los sistemas de tracción ferroviaria. Esto facilitó todo lo necesario para la adecuación de las tensiones y las corrientes necesarias, a partir de su transformación y su regulación, para los distintos elementos que componen la tracción ferroviaria.

3.1 INTRODUCCIÓN

La electrónica de potencia es la rama de la electrónica que combina la energía eléctrica, la electrónica y el control, con el objetivo de manejar y transformar la energía de una forma más eficiente a partir de los sistemas de potencia. Esta rama es la encargada del estudio de los procedimientos, circuitos y dispositivos necesarios para la transformación y el control de las tensiones y corrientes a ciertos niveles, a partir del procesamiento, el control y la conversión de la electricidad. [3]

Un equipo electrónico de potencia está compuesto principalmente por dos partes:

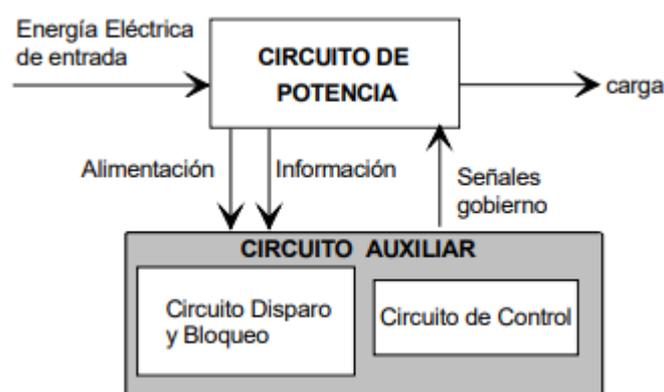


Figura 3.1 Diagrama de bloques de un Sistema de Potencia

(Fuente: [4])

El circuito de potencia liga la fuente de alimentación con la carga, mientras que el circuito de mando es aquel que determina la conducción de los semiconductores que se controlan mediante una fase y una secuencia conveniente, mediante la generación de unas señales de excitación. [4]

En la tracción ferroviaria, la electrónica de potencia se encarga de adaptar y transformar la energía eléctrica proveniente de las catenarias para alimentar a los motores de forma controlada, transformando la energía eléctrica de continua a alterna o viceversa mediante unos convertidores. A partir del empleo de los dispositivos electrónicos adecuados se puede controlar la velocidad y el funcionamiento de los motores. [5]

A continuación, se va a estudiar los distintos elementos de la electrónica de potencia que se emplean en los sistemas de tracción ferroviaria.

3.2 CONVERTIDORES ESTÁTICOS

Los convertidores estáticos de energía, también conocidos como convertidores de energía, son sistemas compuestos por circuitos que, en vez de utilizar máquinas eléctricas, utilizan semiconductores para el procesamiento de la energía. En el pasado se utilizaban convertidores electromecánicos y máquinas giratorias en los sistemas ferroviarios para convertir la energía entre las redes ferroviarias monofásicas y las redes nacionales trifásicas. Hoy en días, con la aparición de los convertidores estáticos se logra obtener un desempeño más adecuado en el procesamiento de la energía, por lo que estas técnicas no son utilizadas. [6]

Un convertidor estático de energía es un conjunto de elementos estáticos que constituyen un circuito electrónico. Este circuito forma una red que actúa como un equipo de conexión y transmisión entre la catenaria y los motores de un tren.[5]

Los convertidores estáticos ideales permiten que la energía eléctrica se transfiera sin pérdidas del generador al receptor, sin embargo, esto no es muy realista. Puesto que los convertidores no son ideales, cualquier convertidor de potencia tiene por objetivo la transformación de la energía eliminando las pérdidas y con el mayor rendimiento posible, desde un punto de vista energético, económico y ecológico. Para lograrlo se emplearán

ciertos dispositivos como interruptores conmutables (abiertos y cerrados) y condensadores, transformadores y bobinas como elementos auxiliares. [6]

Dependiendo del tipo de energía a la entrada y salida, podemos encontrar distintas clases de convertidores de potencia como se puede observar en la siguiente figura:

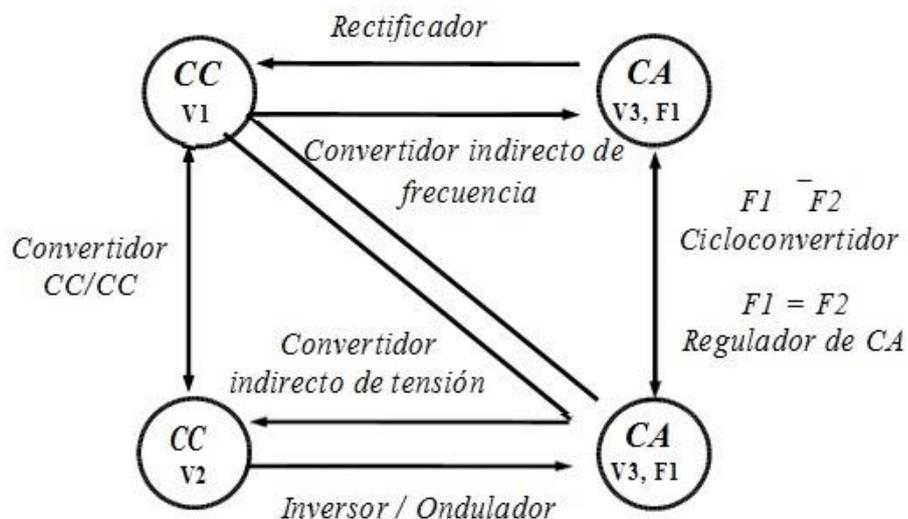


Figura 3.2 Tipos de conversores estáticos

(Fuente: [6])

- **Rectificadores no controlados:** son aquellos que transforman la corriente alterna de voltaje constante en continua de voltaje constante. Están formados exclusivamente por diodos que no necesitan circuitos de mando porque conmutan de manera natural al ser forzados por la fuente de alimentación. Además, constituyen montajes irreversibles.[4] [7]

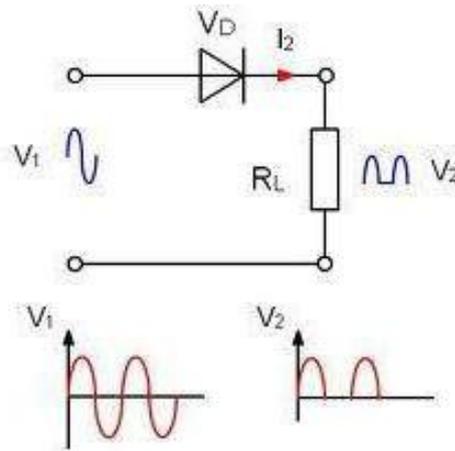


Figura 3.3 Ejemplo de Rectificador no controlado

(Fuente: [8])

- Rectificador controlado:** estos convertidores están formados por diodos o por tiristores, de forma que se puede obtener un sistema de rectificación controlada o semicontrolada. Se obtiene una corriente, cuya tensión es variable, mediante la transformación de una corriente alterna de voltaje fijo. Estos rectificadores pueden ser reversibles, también conocidos como inversores no independientes. [9] [8]

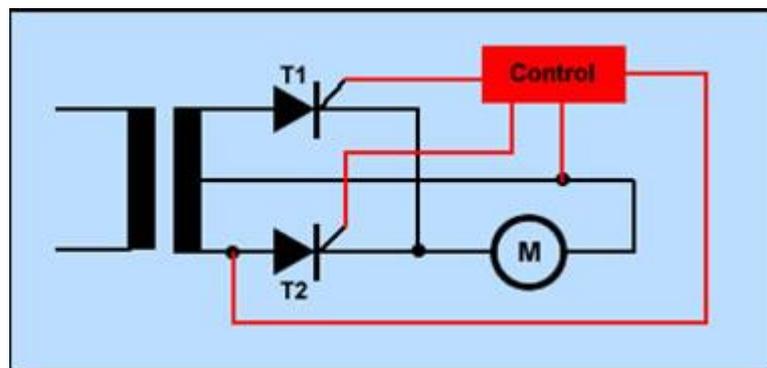


Figura 3.4 Ejemplo de Rectificador controlado

(Fuente: [8])

- **Reguladores de Corriente Alterna:** estos sistemas, a partir de la transformación de la corriente alterna de tensión constante, obtienen una corriente alterna con su tensión variable y con la misma frecuencia que la anterior. Estos reguladores se utilizan en trenes con la catenaria situada justo a la entrada de la maquinaria y está alimentada en corriente alterna, se utilizan estos reguladores. [10] [5]

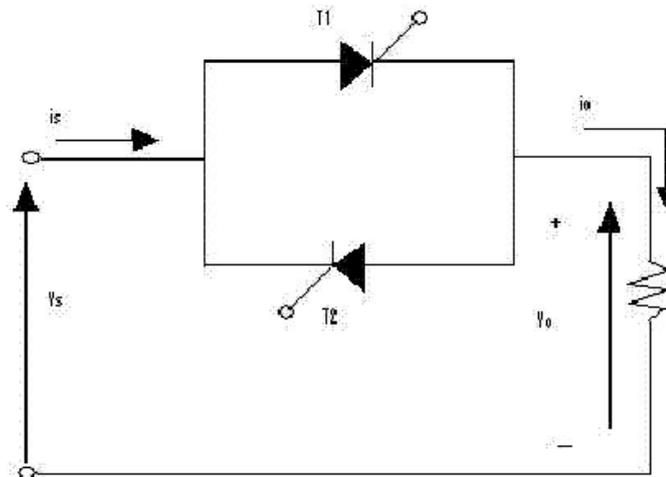


Figura 3.5 Ejemplo de Regulador CA

(Fuente: [11])

- **Cicloconvertidores:** son reguladores de alterna o convertidores directos de corriente alterna en corriente alterna con una frecuencia distinta, siendo esta siempre inferior a la frecuencia de entrada. Estos sistemas son capaces de proporcionar una corriente alterna mono o polifásica de amplitud y frecuencia regulables.[5] [12] [4]

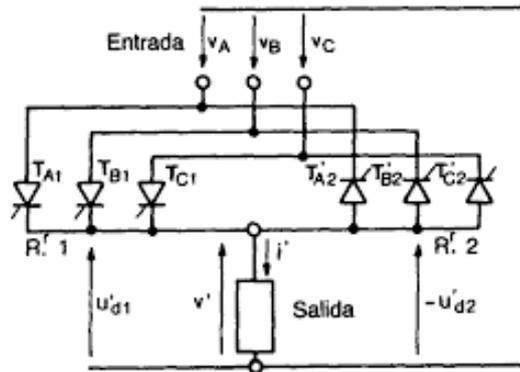


Figura 3.6 Ejemplo de Cicloconvertidor
(Fuente: [12])

- **Ondulador autónomo o inversor:** son aquellos dispositivos que permiten la transformación de la corriente continua en una de alterna con frecuencia fija o variable cuando en el lado de alterna únicamente hay receptores de energía. Este tipo de convertidor estático se encuentra muy presente en los ferrocarriles debido a que se encargan de la ondulación de la corriente que sale de los elementos de control para inyectarla en los motores de corriente alterna que se utiliza en la tracción de los trenes. [5] [8] [13]

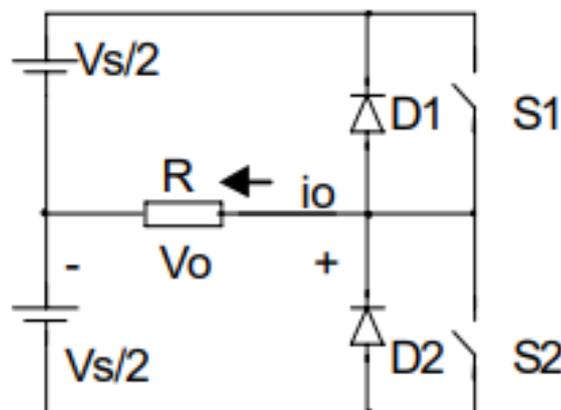


Figura 3.7 Ejemplo de Inversor
(Fuente: [13])

- **Convertidor CC/CC o Troceador:** son sistema que convierten una corriente continua constante en una corriente continua de tensión variable y de la misma frecuencia. También se les denomina “choppers”. Estos elementos los estudiaremos más detenidamente a continuación debido a que son los más utilizados en trenes conectados a una catenaria de corriente continua para alimentar a los motores de corriente continua[14] [5]

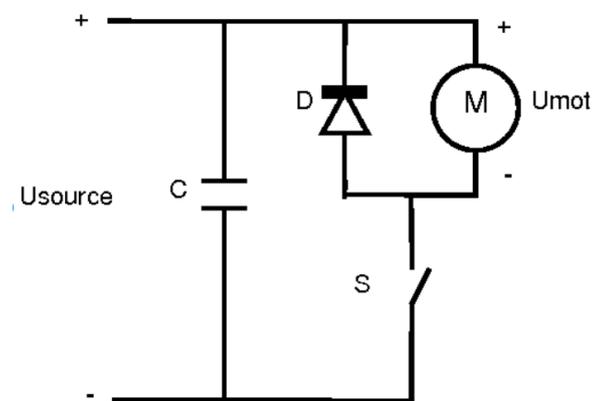


Figura 3.8 Ejemplo de Chopper
(Fuente: [15])

Para entender bien los convertidores estáticos de potencia, es necesario conocer los distintos interruptores y fenómenos de conmutación que forman estos convertidores. A continuación, se explicarán cada uno de estos dispositivos de conmutación y sus características estáticas. [6]

Los diodos semiconductores son dispositivos semiconductores que actúan básicamente como un interruptor de dirección única para la corriente. Estos componentes permiten el flujo de la corriente en una dirección, pero no en la opuesta. Los diodos pueden utilizarse para la conversión de corriente debido a que, cuando el polo positivo de la batería se conecta al ánodo y el negativo lo hace al cátodo, el diodo permite el paso de la corriente. Mientras que, si la conexión se realiza al revés, se opone al flujo de la corriente. Sin

embargo, el uso de estos dispositivos no nos permite la posibilidad de controlar el convertidor debido a que no podemos controlar el disparo de este.[16] [17]

A continuación, se van a estudiar los dispositivos que permiten el control del disparo y, a veces, la extinción para el control adecuado de la tensión y la corriente. Para ello, se comenzará por el tiristor cuyo apagado no puede producirse de manera natural y requiere de circuitos con tiristores auxiliares para su apagado. [5]

Los tiristores son componentes electrónicos biestables que constan de un cátodo y un ánodo y funcionan con tensión realimentada para producir la conmutación. Estos dispositivos son capaces de cortar por completo el paso de corriente o dejarla pasar plenamente sin soportar grandes sobrecargas de corriente. La particularidad de los tiristores es que pasan al estado de encendido cuando llega un pulso de corriente a su puerta o terminal de control, pudiéndose apagar el dispositivo invirtiendo el paso de corriente o apagando la fuente de tensión.[18]

Estos dispositivos electrónicos necesitan el uso de unos tiristores auxiliares para devolverlos al estado de bloqueo, cuando estos son aplicados en circuitos de corriente alterna. Estos circuitos son bastantes complejos porque están formados por muchos elementos y, en consecuencia, tienen una baja fiabilidad, pero un rendimiento muy bueno. Otro problema que presentan es que las frecuencias de conmutación de estos dispositivos son relativamente bajas, por tanto, es necesario la instalación de unos filtros para evitar los armónicos que generan. [5]

Posteriormente aparecen los tiristores GTO o tiristores de compuerta apagada. Estos tiristores tienen una gran ventaja sobre el tiristor “convencional”, ya que se le puede ordenar que se apague sin la necesidad de circuitos complejos formados por tiristores auxiliares.[19]

Los convertidores formados por tiristores GTO presentan una mayor fiabilidad y un rendimiento mucho mejor, aunque siguen presentando grandes armónicos debido a las bajas frecuencias de conmutación.[20]

Los diodos y tiristores son dispositivos capaces de conmutar a frecuencias de 200 – 300 Hz, sin embargo, hay unos dispositivos capaces de conmutar a frecuencias mucho más altas, de varios kHz. Estos dispositivos son los transistores, los cuales, tienen un rendimiento menor.[5]

Los transistores son dispositivos electrónicos semiconductores, capaces de modificar una señal eléctrica de salida como respuesta a una de entrada. El control de estos dispositivos se realiza a través de la corriente de la base, si esta es nula, el transistor permanece bloqueado. La ganancia en corriente en saturación es bastante pequeña, por lo que requiere una gran corriente de base para saturar correctamente el transistor, lo cual, se convierte en un inconveniente a tener en cuenta. El disparo del dispositivo se basa en aplicar una corriente de base positiva, con lo que se genera una corriente a su vez entre colector-emisor, que crece hasta su valor máximo, para obtener el bloqueo de forma rápida es necesario extraer las cargas acumuladas en la base del transistor mediante una corriente de base negativa.[21] [5] [22]

Hoy en día, su simplicidad y capacidad de conmutación a frecuencias altas hacen que los transistores IGBT (híbrido entre un MOSFET y un bipolar) sean más adecuados para aplicaciones de tracción ferroviaria, aunque no se puede decir que tengan unos rendimientos mejores a los de los tiristores. Además, estos transistores ofrecen una mayor fiabilidad y reducen las pérdidas de las máquinas en las que operan. [19]

Un convertidor podría mejorar sus rendimientos si conmutara con una frecuencia menor, sin embargo, esta conmutación produce ondas con muchos armónicos, por lo que se producen mayores pérdidas en los motores y en los transformadores. [5]

Ahora que han sido vistos los elementos fundamentales que nos vamos a encontrar en los sistemas de tracción ferroviaria, se procederá a investigar sobre los distintos convertidores que hacen posible el funcionamiento y el control de los trenes convencionales de alta velocidad.

3.3 CONVERTIDORES CONTINUA - CONTINUA

Los convertidores de corriente continua a corriente continua se emplean para controlar los equipos que componen los sistemas de tracción ferroviaria y para alimentar a los equipos auxiliares.

El sector ferroviario utiliza estos sistemas para convertir la tensión de la batería principal en la entrada de los sistemas electrónicos de los trenes que circulan por vías cuya catenaria se alimenta en corriente continua, este es el caso de los trenes modernos de alta velocidad que circulan por líneas de 3000 V de corriente continua, aunque en la mayoría de los trenes los convertidores llevan a continuación un ondulator debido a que, la mayoría de los trenes de hoy en día utilizan motores asíncronos trifásicos.[23] [5]

A pesar de esto, en España aún quedan en circulación unos trenes cuyo motor de tracción es de corriente continua al igual que su alimentación. Este es el caso de la serie de cercanías de Renfe, S-446, estos trenes utilizan la tecnología "Chopper", que explicaremos más adelante. [24]

Antes de explicar del chopper, se estudiará la tecnología de control de potencia utilizada en las series de trenes más antiguas. Este método es el control reostático de potencia.

3.3.1 CONTROL REOSTÁTICO DE POTENCIA

Este es un sistema de control de velocidad que, a pesar de estar prácticamente en desuso en la actualidad, se sigue utilizando en algunos trenes de cercanías y de media distancia españoles, concretamente en las series R-448 y R-470 de Renfe.[25] [24]



Figura 3.9 Serie R-448

(Fuente: [24])



Figura 3.10 Serie R-470

(Fuente: [24])

Para el control de la velocidad se utilizan unas resistencias instaladas en los techos de los trenes, o bien una resistencia variable, las cuáles se colocan o se quitan del circuito de alimentación dependiendo de las necesidades de ese momento.[5]

Se pueden encontrar tres sistemas de control reostático de potencia: control por reóstato en serie, mediante un reóstato colocado en el devanado en serie o en paralelo modificando el flujo magnético de la excitación y, por último, el control a través de un reóstato en serie con el inducido que modifica la red de alimentación del motor. La opción más idónea es la última debido a que produce menos pérdidas que las anteriores y que, al contrario de las

demás, no se produce un calentamiento excesivo producido por la elevada corriente en el momento de arranque.[25]

En el caso de los R-448 y R-470, el arranque y regulación de la velocidad era posible gracias a unas resistencias conectadas al inductor de corriente continua y que se accionan a partir de unos contactores de levas accionados por el conductor del tren. Este sistema no era muy cómodo para los pasajeros debido a que se producían frenazos bruscos y tirones ante las variaciones en la potencia de los motores al acelerar y frenar.[21] [25]

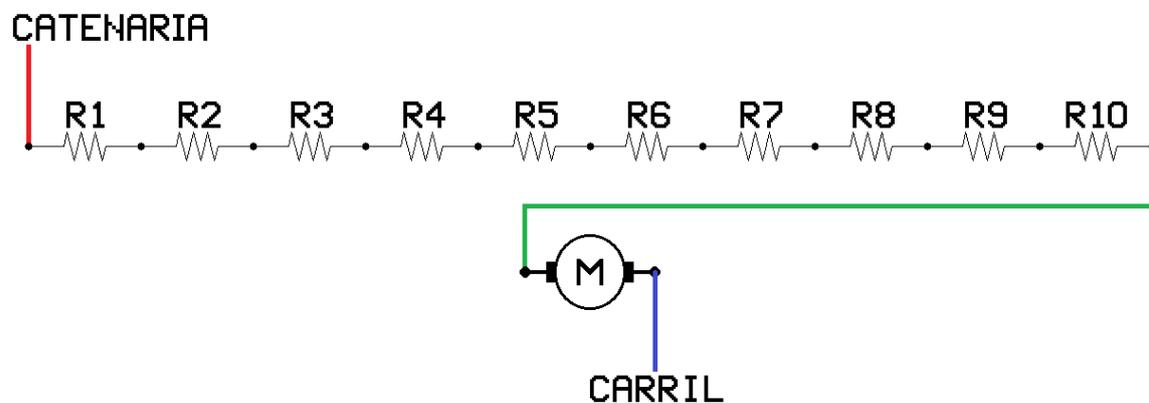


Figura 3.11 Esquema simple del control reostático del motor
(Fuente: [26])

Según la figura 3.11 tenemos 10 resistencias conectadas en serie entre ellas, interpuestas entre la catenaria y el motor. Una de las bornas está en las ruedas, que están conectadas eléctricamente al carril, y la otra podrá desplazarse entre las bornas de las resistencias mediante los contactores de levas mencionados anteriormente.

Cuando el motor está parado la borna que se desplaza mantiene el circuito abierto. Cuando queremos poner en marcha el motor, se conecta la borna móvil a continuación de la resistencia R10. Así, nos lleva una tensión 10 veces menor que la de la catenaria, es decir, estamos alimentando el motor con 300 Vcc para que gire a 100 rpm. Para que el maquinista pueda ir aumentando la velocidad cuando quiera, se acciona un contactor de levas que

desplaza la borna móvil entre las distintas resistencias, así la tensión de corriente continua que llega a nuestro tren es mayor y aumenta la velocidad de este. [26]

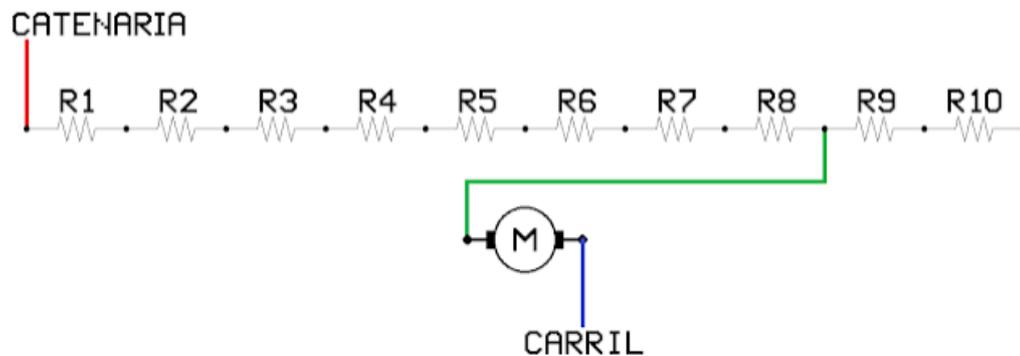


Figura 3.12 Esquema de maniobra del control reostático

(Fuente: [26])

Actualmente, este sistema está en desuso debido a que las resistencias tienden a calentarse con el avance de la corriente generando una gran cantidad de pérdidas en forma de disipación de calor. Además, este calor debe ser disipado para que no se quemara la máquina..[26]

Después de esta explicación sobre el control reostático de potencia, se puede dar paso al siguiente sistema de convertidor de corriente continua. Este sistema, denominado “chopper”, se utiliza bastante en los sistemas de tracción ferroviaria que se alimentan a partir de corriente continua y con cualquier tipo de motor.

3.3.2 CONTROL MEDIANTE CHOPPER

Un chopper es un interruptor electrónico usado en la apertura o cierre de una señal eléctrica controlada por otra. Es el encargado de la transformación de la corriente de la catenaria en continua en otra que se puede variar a voluntad.[27]

En el sistema ferroviario, se refiere como chopper a un circuito electrónico que se utiliza para controlar o regular los motores de corriente continua y los motores de corriente alterna (si van seguidos de un ondulator), pero siempre se utiliza en trenes cuya catenaria está alimentada en corriente continua.[5] [27]

La principal ventaja de la utilización del chopper es un considerable ahorro de energía evitando las pérdidas en el circuito de potencias, debido a que no utilizan resistencias en el sistema de arranque. Este ahorro supone que los arranques y las paradas son más suaves, al contrario que en el control reostático, eliminando el desgaste de elementos móviles. Todo esto conlleva menor mantenimiento y una mayor fiabilidad.

Actualmente, los chopper funcionan mediante el uso de tiristores GTO y transistores IGBT gestionados mediante microprocesadores, vistos anteriormente, que ofrecen un mejor rendimiento y control. [5]

Para su funcionamiento, el chopper crea, a la salida de este, una nueva señal de corriente continua de menor tensión, a partir de troceamiento de la señal de entrada de corriente continua. Mediante el cierre y la apertura de los distintos transistores y tiristores que hay en el interior del chopper, se puede controlar el valor de la tensión de salida..[28] [5]

En España, el primer tren que se construyó con un equipo chopper fue la serie S-446, la cual, Renfe sigue utilizando para líneas de cercanías y de media distancia. [27] [24]



Figura 3.13 Serie S-446

(Fuente: [24])

3.4. CONVERTIDORES ALTERNA - ALTERNA

En los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria se utilizan otro tipo de transformaciones de energía que son las de corriente alterna a corriente alterna (ca/ca), realizadas por los convertidores CA/CA.

Partiendo de una tensión de entrada en alterna, estos dispositivos producen a la salida una tensión también en alterna, pero de distinto valor eficaz, frecuencia o ambas.[29]

Los convertidores ca/ca se utilizan, sobre todo, en las líneas de alta velocidad. En ellas, la catenaria alimenta la línea con una corriente alterna de 25 kV y 50 Hz. Esta corriente es necesaria adaptarla a una tensión más baja para que los distintos elementos de potencia puedan operar con ella, ya que esta es demasiado elevada.[5]

A continuación, se van a ver estos convertidores de los que se está hablando.

3.4.1 TRANSFORMADORES

Un transformador es una máquina eléctrica estática y reversible que permite aumentar o disminuir la tensión eléctrica en un circuito de corriente alterna, sin variar la potencia eléctrica. La potencia a la entrada de un transformador ideal y a la salida es exactamente la misma, en un transformador real esto no ocurre debido a las pérdidas relacionadas con el propio transformador.

Un transformador está formado por dos bobinas de conductores con espiras enrolladas sobre un núcleo de un material ferromagnético y aisladas eléctricamente entre ellas. El devanado está constituido por una bobina primaria y una secundaria. En el devanado primario es donde se aplica la tensión de entrada y en el devanado secundario se obtiene la tensión de salida.[30]

Los modelos de trenes de alta velocidad que utilizan transformadores son aquellos que se alimentan de corriente continua, como las series S-100, S-102/112, S-103, siendo estas de alta velocidad AVE. Después, en el caso de los ALVIA, tenemos las series S-120, S-130. Y para finalizar en los AVANT, encontramos las series S-104, S-114 y S-121.[24]



Figura 3.14 Modelo de tren S-100
(Fuente: [24])



Figura 3.15 Modelo de tren S-120
(Fuente:[24])



Figura 3.16 Modelo de tren S-104
(Fuente: [24])

Las catenarias de alta velocidad alimentan a los modelos de tren mencionados anteriormente con 25 kV y 50 Hz de corriente alterna, aunque algunos de ellos son los denominados trenes bitensión, debido a que están alimentados con una corriente alterna de 25 kV, pero también pueden estar alimentados a 3000 V de corriente continua.[24] [5]

A continuación, se va a explicar el funcionamiento de los transformadores.

El principio de funcionamiento de los transformadores está basado en el fenómeno de la inducción electromagnética, explicado matemáticamente a partir de las ecuaciones de Maxwell. Este fenómeno consiste en la capacidad de un campo magnético de generar corriente eléctrica y/o viceversa.

Una corriente eléctrica empieza a circular atravesando las espiras que componen el devanado primario o inductor, la cual, genera un campo o un flujo magnético a su alrededor. Este flujo magnético es variable debido a que la corriente que lo genera es alterna, como se explica en la ley de Lenz, y avanza a través del núcleo ferromagnético hasta el devanado secundario. Como el flujo magnético es variable, según la ley de Faraday, en el devanado secundario o inducido surge una fuerza electromotriz. De este modo, a partir de un campo magnético, se produce el acoplamiento del circuito primario y del secundario, a pesar de estar separados galvánicamente. La relación de transformación

refleja el voltaje inducido en el secundario respecto al voltaje recibido en el primario, relacionando el número de espiras de ambos devanados. [5] [30]



Figura 3.17 Ejemplo de transformador de uso ferroviario

(Fuente: [31])

Los transformadores que se emplean en la tracción ferroviaria emplean dos rangos de transformación, por lo que una de las salidas del secundario está a 1500V. Estos transformadores se utilizan para la alimentación de los motores después de la actuación de los rectificadores. Además, se dispone de una salida de un terciario que suele ser a 380 V, la cual se utiliza para el suministro energético de los sistemas auxiliares que porta el tren, como son los sistemas de confort (aire acondicionado, calefacción...), el sistema de iluminación y los sistemas de control, en los cuales los elementos utilizados para la monitorización que funcionan a 12 Vcc serán abastecidos mediante el uso de baterías.[5]

3.4.2. VARIADORES

Como se ha visto en el apartado anterior, los transformadores permiten controlar los motores de los trenes sin modificar la corriente eléctrica, sino que estos se encargan de disminuir la tensión de la catenaria para que se pueda controlar el resto de los elementos que porta el tren.

A continuación, se verá un tipo de convertidor ca/ca que proporciona el control de la tensión de salida. Los variadores permiten el control de los motores de corriente alterna de los trenes, a través de la modificación de la frecuencia de la tensión de la catenaria en alterna.[5]

Un variador de frecuencia es un dispositivo electrónico de precisión que se diseña y utiliza principalmente en la regulación de la velocidad de los motores de inducción monofásicos y trifásicos de corriente alterna, similares a los de los trenes. Es decir, es un tipo de sistema de control de motores que acciona un motor eléctrico partiendo de la variación de la frecuencia y la tensión que se suministra al motor.[32]

El variador de frecuencia también puede controlar la aceleración y desaceleración del motor en los momentos de arranque o parada, respectivamente.

El funcionamiento de un variador de frecuencia consta de un circuito electrónico que se divide en tres etapas principales, un convertidor de entrada, un bus de corriente y un inversor de salida.

A continuación, se va a explicar cómo funciona cada una de las etapas de un variador de frecuencia:

- Convertidor de entrada: es la etapa rectificadora de puente. Consiste en una serie de diodos de alta potencia que están dispuestos formando una configuración de puente regular. La red de corriente alterna aplicada, se rectifica y se convierte en una corriente de continua que no está libre de componentes de corriente alterna y armónicos residuales. Esto quiere decir que requiere de un mayor filtrado.
- Bus de CC: es una etapa de filtro, en la que la corriente continua que se ha rectificado se extrae y se filtra de los armónicos sobrantes y de los residuos de la corriente alterna. Para ello, se utilizan condensadores e inductores. Esta etapa permite que la salida de los motores esté totalmente libre de ondulaciones y sea ideal para los motores de corriente alterna.
- Inversor: en esta etapa se convierte la corriente continua en corriente alterna. Consiste en una serie de complejos circuitos integrados de microcontroladores, que

han sido diseñados y programados para producir variaciones en la frecuencia de salida y el voltaje proporcionalmente, y también se utilizan para crear una salida trifásica mediante una entrada monofásica. Esta etapa hace que los variadores de frecuencia sean especialmente únicos e ideales para controlar las velocidades de los motores,

- **Salida:** El comando de los microcontroladores de la etapa anterior se envía a la salida de unos transistores bipolares de puerta aislada (IGBT) que conmuta la tensión recibida del bus de CC en pasos estrechos y cortados. Para ello, se convierte la corriente continua en ondas sinusoidales mediante el uso de la tecnología PWM. Este procedimiento es el responsable que no se pierda electricidad al modificar la tensión y, lo que es más importante, de permitir que el par motor y el flujo magnético se mantengan constantes al cambiar su frecuencia simultáneamente a una velocidad concreta. [32]

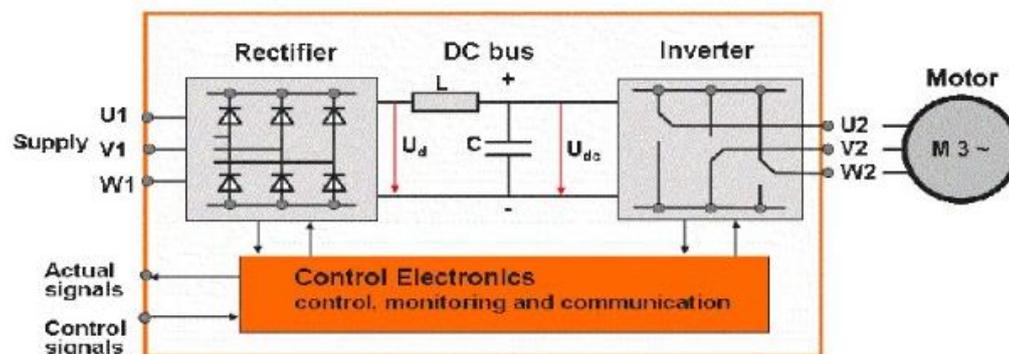


Figura 3.18 Diagrama de bloques del variador de frecuencia

(Fuente: [33])

Los equipos actuales, además de la función de controlar la velocidad, nos proporcionan funciones auxiliares como la protección térmica del motor, así como una protección contra cortocircuitos, sobretensiones, el desequilibrio entre fases, etc.[5]

3.5 CONVERTIDORES ALTERNA – CONTINUA

Existe otro tipo de convertidores que se utilizan en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y los cuales suelen estar acompañados de los anteriormente explicados, estos son los rectificadores que convierten la corriente alterna en corriente continua.

Estos rectificadores están presentes en las subestaciones de tracción para líneas electrificadas en corriente continua cuya alimentación se realice en corriente alterna, debido a que controlar la potencia suministrada a los motores de tracción mediante el control en corriente continua de la electricidad es mucho más fácil, a pesar de que luego es necesario volverla a ondular otra vez porque los motores más utilizados en la tracción ferroviaria son los síncronos y asíncrono trifásicos.[5]

3.5.1 RECTIFICADORES

Es bastante habitual encontrarse un rectificador para complementar al transformador principal en los sistemas con una alimentación de la catenaria en corriente alterna.

Un rectificador es el elemento que convierte la corriente alterna en forma sinusoidal en una corriente continua donde la electricidad tiene un sentido y un voltaje constantes. Para ello se suelen usar puentes de diodos y unos filtros para que se genere una corriente eléctrica lo más continua posible.[34]

En los puentes rectificadores semicontrolados se utilizan alternadamente diodos y tiristores para controlar los disparos a la perfección. Para los puentes rectificadores controlados se utilizan exclusivamente tiristores, ya que los diodos son sustituidos por estos. [35] [5]

Los rectificadores más utilizados en la tracción eléctrica ferroviaria son los puentes rectificadores semicontrolados, los cuales utilizan tiristores y diodos semiconductores para controlar los disparos que regulan la tensión de salida. .[5]

El puente rectificador mixto es una configuración que puede ser utilizada en los distintos modelos de tren de alta velocidad, mencionados anteriormente, que se encuentran

alimentados en corriente alterna. Mediante la figura 3.19, se va a explicar el funcionamiento de este tipo de rectificador.

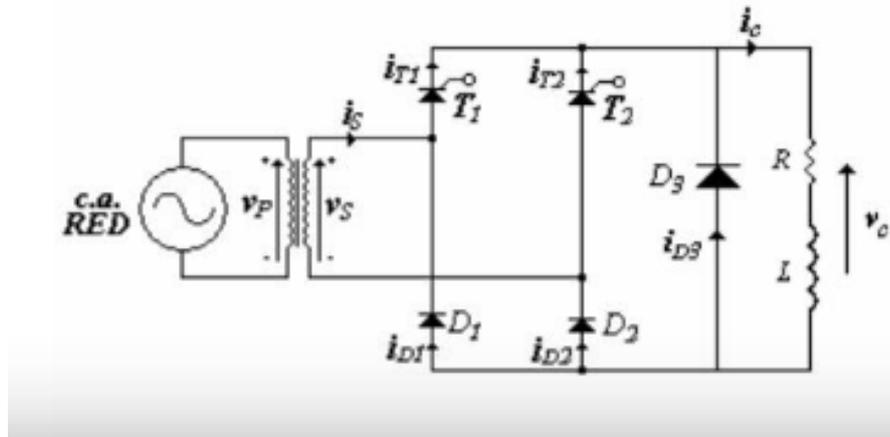


Figura 3.19 Esquema de un puente rectificador mixto
(Fuente:[35])

Durante el semiciclo positivo el tiristor T_1 se encuentra en directo, y cuando $\omega t = \alpha$ conduce el tiristor T_1 y el diodo D_2 lo hace en el intervalo $\alpha \leq \omega t \leq \pi$. Durante el rango $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$, en el secundario hay una tensión negativa que provoca el bloqueo de T_1 y que este y D_2 dejen de conducir, lo que provoca la entrada en conducción del diodo volante D_3 , que es el encargado de transferir la corriente a la carga. En el semiciclo negativo tendremos a T_2 en directo y su conducción comienza en el intervalo de $\omega t = \pi + \alpha$ hasta $\omega t = 2\pi$, conduciendo también D_2 . [35]

A continuación, se van a mostrar las formas de ondas que se obtienen en este tipo de rectificador:

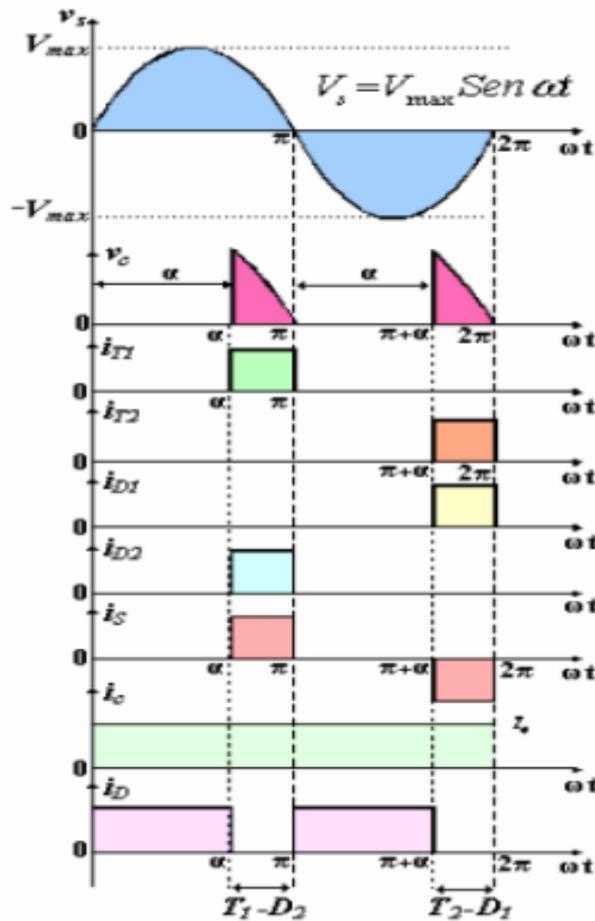


Figura 3.20 Representación de las formas de ondas en los distintos elementos del rectificador
(Fuente: [35])

En la figura anterior se representan las ondas dentro del rectificador anteriormente mostrado, como se puede observar la onda azul representa el voltaje a la salida del transformador. Se puede ver como la parte negativa de esta onda puede ser rectificada y convertida en positiva por los diferentes diodos presentes en el rectificador. Además, la onda de tensión, representada con la onda rosa, se obtiene al cortar la onda senoidal inicial con el retardo en el disparo de los tiristores.

Las gráficas verde, naranja, amarillo y azul representan el comportamiento de los diodos y tiristores en cada momento del funcionamiento del rectificador. La corriente de carga que

corresponde a la rectificación está representada mediante la onda azul claro de naturaleza continua. [35] [5]

En el caso de los trenes alimentados con corriente alterna por parte de la catenaria, estos rectificadores se incorporan en los convertidores CA/CA descritos en el apartado anterior. En el caso de los trenes de alta velocidad los transformadores adaptan la elevada tensión de la catenaria (25 kV y 50 Hz) a una tensión más fácil de utilizar por los diferentes elementos del sistema de tracción, normalmente se adapta a 1500 Vca para el rectificador y, en la otra toma del secundario, a 380 Vca para los elementos auxiliares.

Los puentes rectificadores se utilizan en trenes cuyos motores de corriente continua alimentados por una catenaria de corriente alterna mediante el uso de un transformador y en motores alimentados en corriente continua al pasar la corriente de la catenaria directamente al rectificador. El puente rectificador mixto puede actuar como un chopper en los trenes de alta velocidad alimentados a 3000 Vcc. Para ello, el rectificador inyecta la corriente obtenida directamente de la catenaria a la tensión necesaria en forma de corriente continua, mediante el control de la corriente por el disparo de los tiristores. [5]

3.6 CONVERTIDORES CONTINUA - ALTERNA

Los convertidores que transforman la corriente continua en corriente alterna son el último tipo de convertidor que se puede encontrar en los sistemas de tracción ferroviaria. Estos convertidores son conocidos comúnmente como onduladores trifásicos o inversores.

Las aplicaciones más comunes de los inversores son el uso en paneles solares, la utilización en fuentes de tensión ininterrumpidas y la variación de velocidad en motores eléctricos, entre otras muchas aplicaciones. En cuanto a los sistemas de tracción ferroviaria se utilizan para el accionamiento de motores de corriente alterna de velocidad variable y para el abastecimiento de los dispositivos de corriente alterna que funcionan mediante una batería. Esto permite controlar la potencia suministrada por los motores asíncronos trifásicos de los trenes y el funcionamiento de los dispositivos auxiliares de corriente alterna.[36]

3.6.1 ONDULADOR TRIFÁSICO

Los dispositivos electrónicos llamados onduladores o inversores son los encargados de transformar una tensión de entrada de corriente continua en una tensión similar de corriente alterna, regulando la tensión, la frecuencia o ambas. [36]

El principio de funcionamiento de los onduladores consiste en una serie de interruptores inversores monofásicos donde cada interruptor se puede conectar a un terminal de carga.[37]

Se pueden distinguir tres topologías o configuraciones en los inversores, con transformador de toma media (push-pull), de medio puente y de puente completo.

- Inversor Push-Pull: es una topología que utiliza dos interruptores y un transformador para obtener una onda cuadrada de corriente alterna. Ambos transistores conmutan a partir de unas señales de control complementarias. Con esta configuración no se puede obtener una amplitud de salida controlable y, además, la frecuencia de salida es variable y la tensión máxima que soportan los interruptores es el doble que la de alimentación.
- Inversor en medio puente: esta es la configuración más sencilla de un inversor. Está formada por dos alimentaciones de tensión de igual valor colocadas en serie y de dos interruptores controlados. Este tipo de inversor tiene unas características similares a las del inversor push-pull, sin embargo, las señales de control de los interruptores del inversor en medio puente no están referidas a un mismo punto mientras que en el inversor push-pull sí lo están.
- Inversor en puente completo: está compuesto por dos ramas formadas por cuatro interruptores agrupados. Esta topología, a diferencia de las anteriores, permite el control sobre la amplitud de salida y reducir el contenido armónico de salida.[38]

En los sistemas de tracción ferroviaria la configuración más utilizada es la del inversor de puente completo. Por ello, se va a explicar un poco su funcionamiento.

Los inversores de puente completo están compuestos por cuatro interruptores distribuidos en dos ramas, como se muestra en la figura 3.21, esta disposición permite eliminar las combinaciones que producen cortocircuitos o en las que la carga queda desconectada. La tensión de salida tiene tres valores posibles: $+V_e$, $-V_e$ y 0, lo que permite tener mayores posibilidades de control.[38]

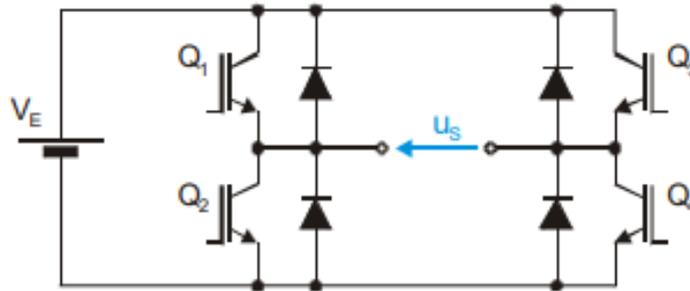


Figura 3.21 Esquema de un inversor de puente completo

(Fuente: [39])

Las estrategias de control más sencillas que pueden emplearse en un sistema de puente completo son:

- Control sin deslizamiento de fase: en esta estrategia se hace conmutar alternativamente los interruptores que se encuentran en la diagonal, es decir, en la mitad de un período Q_1 y Q_4 permanecen cerrados mientras que Q_2 y Q_3 permanecen abiertos. De esta manera se obtiene una señal cuadrada de amplitud V_e . [38]

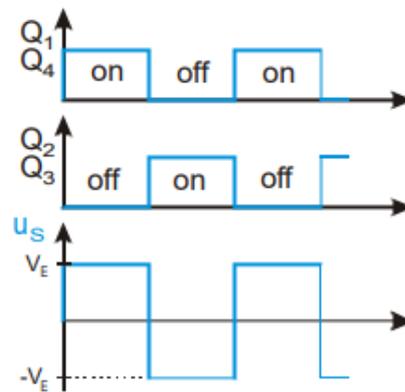


Figura 3.22 Formas de ondas mediante control sin deslizamiento de fase

(Fuente: [39])

Cuando el esfuerzo de tensión en los semiconductores es igual, esta estrategia obtiene el doble de amplitud de la tensión de salida. Esto permite duplicar la capacidad de manejar la potencia.

- Control con deslizamiento de fase: su funcionamiento consiste en modificar el ángulo de desfase con el que trabajan las ramas de un puente completo. De esta manera, permanecen cerrados los interruptores Q_1 y Q_3 o los interruptores Q_2 y Q_4 , obteniendo una tensión de salidas con intervalos a cero.[38]

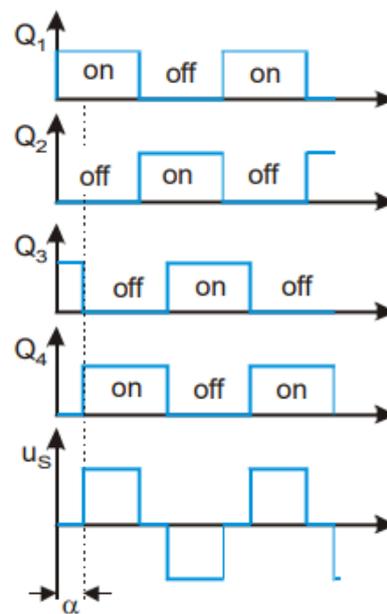


Figura 3.23 Formas de ondas mediante control con deslizamiento de fase

(Fuente: [39])

La amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida se puede modificar mediante el ángulo α . Además, el contenido armónico de la tensión de salida es menor debido a que la forma de onda obtenida es más próxima a una senoide.

El control por modulación del ancho de los pulsos, también conocido como PWM, permite, en algunos casos, mejorar el contenido de los armónicos a la salida del inversor. Esta modulación, muy necesaria, evita que los armónicos que se forman en los elementos de control de potencia de los sistemas de tracción ferroviaria puedan interferir gravemente con los sistemas de señalización y de seguridad de los trenes y las vías..[5] [40]

Estos inversores se utilizan como un componente del rectificador en los trenes alimentados por corriente continua desde la catenaria y en todos aquellos trenes que utilicen motores de corriente alterna con onduladores. Un ejemplo de estos trenes es la serie S-9000 que se utiliza en el metro de Barcelona.[5]



Figura 3.24 Modelo de tren S-9000

(Fuente: [41])

3.7 TRENES BITENSIÓN

En España se pueden encontrar líneas de alta velocidad electrificadas tanto a 25 kV y 50 Hz de corriente alterna como a 3000 V de corriente continua.

Esta coexistencia de las líneas provocó la necesidad de adquirir locomotoras que fuesen capaces de alimentarse en las líneas mencionadas. De esta manera, España se convirtió en una de las pioneras en la adquisición de modelos de alta velocidad capaces de circular en dos líneas distintas.

Los primeros trenes bitensión, en España, se adquirieron para cubrir el problema de la coexistencia de líneas de 1500 V y 3000 V de corriente continua que diferenciaba la electrificación de cada zona del país. En el año 1963, se adquirieron cuatro locomotoras de la serie 1000 fabricadas por la firma francesa Alstom. Posteriormente, gracias a los buenos resultados de la serie anterior, se compraron varias unidades de la serie 439 en el año 1967. [42]



Figura 3.25 Modelo de tren Serie 1000

(Fuente: [43])



Figura 3.26 Modelo de tren Serie 439

(Fuente: [44])

Actualmente, los trenes de alta velocidad bitensión que están en funcionamiento son las series S-100, S-120, S-121 y S-130, además de la serie híbrida S-730. [24]



Figura 3.27 Modelo de tren S-730

(Fuente: [24])

Los trenes de este tipo se componen fundamentalmente de cuatro motores de tracción totalmente suspendidos, los cuales transmiten su esfuerzo de tracción a los ejes mediante una transmisión elástica. Dichos motores pueden establecer conexiones entre ellos de dos maneras distintas: Serie y Serie-Paralelo bajo línea a 3000 V y Serie- Paralelo y Paralelo en las líneas de 1500 V, de esta forma se consiguen dos marchas de velocidad económica.

Como podemos ver en las figuras 3.28 y 3.29, en la combinación Serie-Paralelo a 1500 V se forman dos ramas en paralelo con dos motores en serie, alimentados cada uno a 730 V. Mientras que en la combinación Serie-Paralelo a 3000 V, los motores se encuentran conectados en serie funcionando, también, a 730 V.[45]

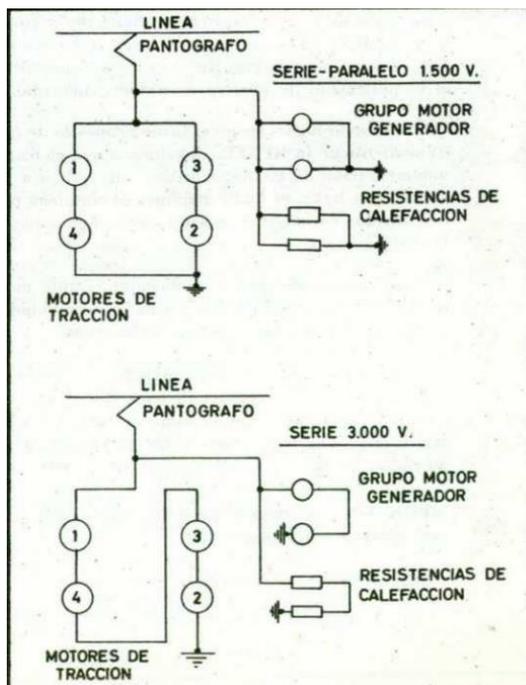


Figura 3.28 Esquema combinación Serie-Paralelo (1500V) y Serie (3000V)

(Fuente: [45])

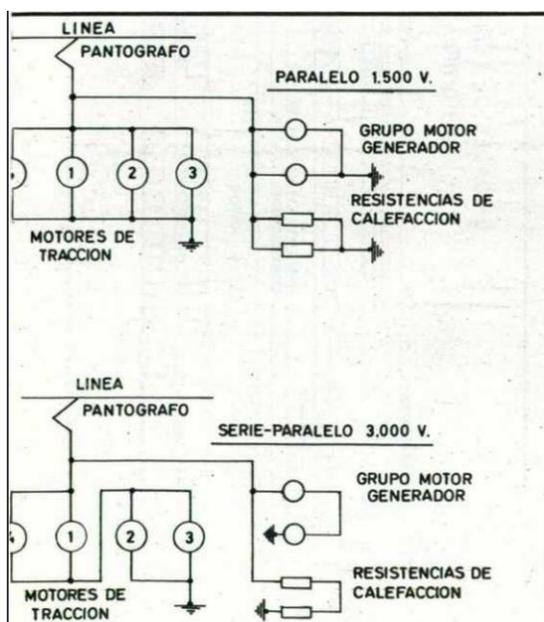


Figura 3.29 Esquema combinación Paralelo (1500V) y Serie-Paralelo (3000V)

(Fuente: [45])

La combinación Paralelo a 1500 V se constituye a partir de la conexión entre los cuatro motores en paralelo, los cuales funcionan a 1500 V. Los motores conectados mediante la combinación Serie-Paralelo a 3000 V funcionan a la misma tensión que los anteriores y se conectan dos motores en paralelo en cada rama.

Se puede conseguir hasta un total de cinco velocidades, tanto en las líneas de 1500 V como en las de 3000V, gracias a un shuntado que se realiza después de la primera combinación de los motores. Estos shuntados son del tipo de intercalación de resistencias en paralelo con los inductores y se ejecutan mediante el uso de contactores de levas. Los contactores de levas se utilizan también para realizar las transiciones entre los motores a través del sistema de puente.

El paso de 3000 V a 1500 V puede realizarse a voluntad por el maquinista o automáticamente sin tener que detener la unidad, efectuando la operación mediante un servomotor neumático.[45]

En los modelos de tracción eléctrica modernos que se utilizan en los sistemas de alta velocidad es más factible utilizar motores de corriente alterna trifásicos que los de corriente continua, debido a que los modelos actuales pueden ser alimentados tanto en continua como en alterna.

Actualmente, el responsable de la selección automática de la cuchilla selectora es el modelo de tensión. Esta cuchilla selectora es la encargada de determinar si la alimentación se realiza en corriente alterna o en corriente continua, provocando que la electricidad recorra un camino distinto para cada motor, mediante el cambio de posición de esta.

Al igual que en los trenes mono tensión, los motores que se utilizan en los trenes bitensión, alimentados por la catenaria en corriente continua o alterna, pueden ser motores síncronos o asíncronos trifásicos. [5]

Mediante la figura 3.30, se explicará el recorrido de la corriente alterna (línea azul) y de la corriente continua (línea naranja).

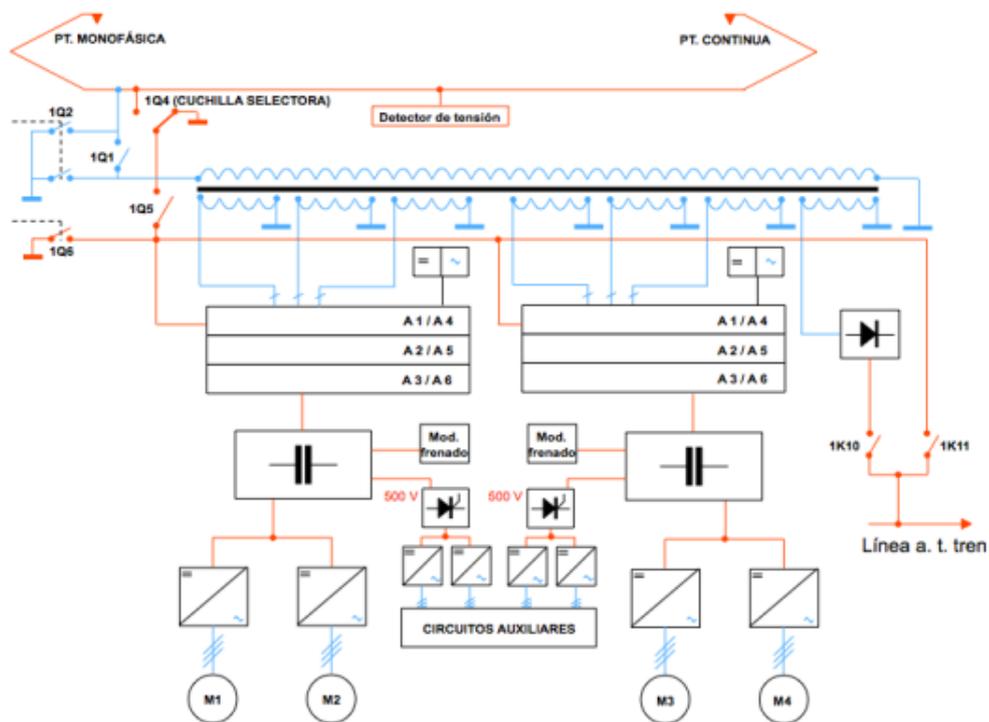


Figura 3.30 Esquema de un tren bitensión

(Fuente: [5])

Los trenes disponen de un pantógrafo para la captación de la energía en corriente alterna de la catenaria y de otro utilizado para corriente continua. Estos pantógrafos se suelen encontrar por encima del bogie motor más próximo a los remolques y en función del tipo de corriente que se esté utilizando se abren o se cierran los seccionadores, mediante el detector de selección.

Dependiendo de la apertura y el cierre de estos interruptores, la electricidad recorre un camino distinto por la máquina. Independientemente del tipo de alimentación, el último tramo es común para ambos recorridos.

Los componentes que se utilizan en los sistemas de tracción y control de los trenes bitensión son los mismos presentes en los trenes mono tensión, sin embargo, se diferencian en cómo se asocian entre ellos.

Cuando la electricidad pasa por el pantógrafo de la corriente alterna, se dirige a los transformadores para que la tensión de 25 kV se adecue a una más acorde a los motores.

Posteriormente, la corriente transformada se rectifica para lograr una corriente continua adecuada para poder seguir su curso.

En el caso de la corriente continua, es innecesario que esta pase por los transformadores y debido a que ya está en corriente continua tampoco necesita pasar por los rectificadores. Esto implica que la regulación de la corriente se lleva a cabo en los inversores.

La última etapa en el circuito de control es común debido a que en ambos casos llega una corriente continua hasta los onduladores. Una vez la corriente continua ha sido controlada por los onduladores, esta es inyectada en los motores a la tensión adecuada para la velocidad de giro y el par necesarios.[5]

3.8 ELEMENTOS AUXILIARES

Como se ha ido mencionando anteriormente, los sistemas de tracción ferroviaria están compuestos por unos sistemas electrónicos auxiliares que cumplen con diversas funciones. Entre estas funciones destacan los sistemas relacionados con la atención de los pasajeros, megafonía o climatización, los que están relacionados con la seguridad y el control de la apertura de puertas y los sistemas que se encargan del mantenimiento y autodiagnóstico del propio tren.

Se pueden encontrar elementos auxiliares alimentados con corriente continua a 24 V, 48 V y 72 V, como son los elementos que están relacionados con el control de potencia y los dispositivos de seguridad. Hay otros elementos auxiliares que están alimentados por 230 V y 400 V de corriente alterna, estos pueden ser algunos convertidores o los motores que se encargan de la refrigeración de los transformadores que trabajan a 60 Hz.

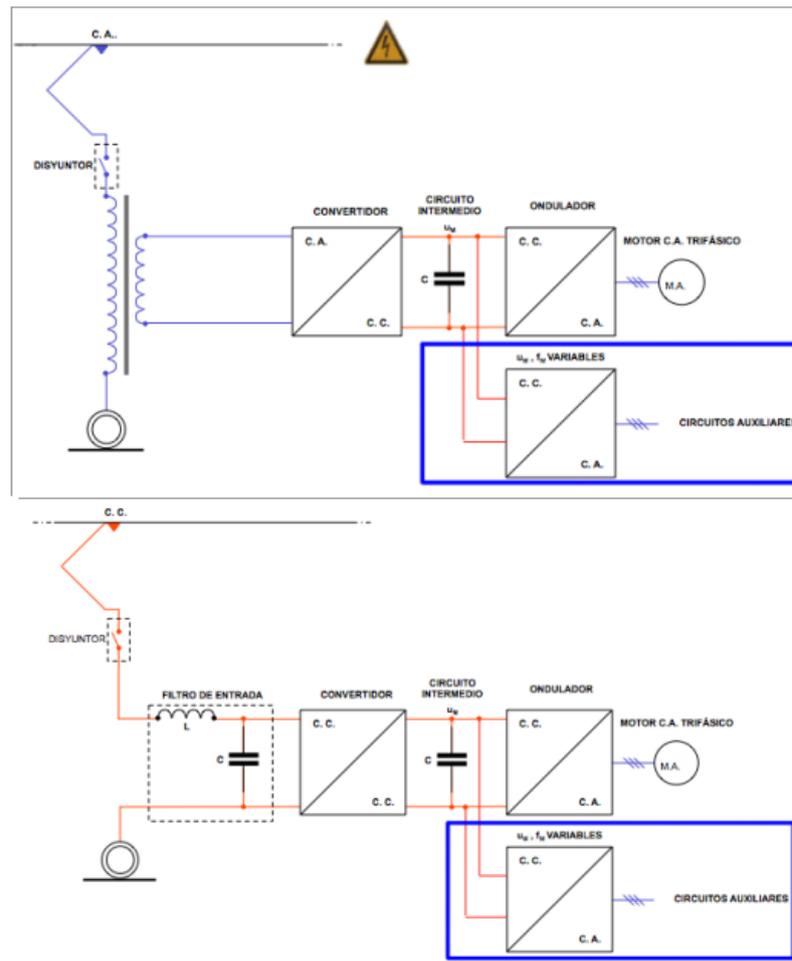


Figura 3.31 Esquema de alimentación de los elementos auxiliares
(Fuente: [5])

A continuación, se va a explicar cómo son alimentados estos elementos, ya sea mediante corriente continua o corriente alterna:

Con una alimentación en corriente continua se dispone de un cargador de baterías que se encarga de adaptar la energía del sistema de control para abastecer a la batería y al circuito que son los encargados de la alimentación de los elementos auxiliares.

El abastecimiento de energía de estos circuitos auxiliares puede realizarse por medio de la catenaria o mediante el aporte de energía de los frenos regenerativos. Así, se puede

mejorar la eficiencia energética al abastecer a los circuitos auxiliares, en vez de devolver la energía a la catenaria.

En el caso de los servicios auxiliares que se alimentan a una tensión de 72 V, la energía se suministra desde el convertidor estático principal.

En los servicios alimentados en corriente alterna se pueden encontrar, dependiendo del modelo de tren, dos maneras de realizar el abastecimiento de energía. Este se puede realizar mediante las salidas del transformador principal, siempre que la catenaria esté alimentada en corriente alterna, lo que nos aporta una tensión de 400 V y 50 Hz. En el caso de una catenaria de corriente continua, el abastecimiento de los elementos auxiliares se realizará por medio de un ondulator que nos proporcionará la tensión de 400V y 50 Hz que sea necesaria.[5]

4. Sistema de frenado

Los trenes y sus sistemas de tracción han evolucionado mucho con el paso de los años. Esta evolución ha provocado la aparición de diversos sistemas de frenado.

El freno es uno de los elementos más importantes para la recuperación energética y se utiliza para plantear nuevos modelos para el aprovechamiento energético.[46]

Las locomotoras actuales pueden estar equipadas por dos tipos de frenos distintos:

- El freno neumático o mecánico: son los frenos que inciden directamente sobre las ruedas. Funciona a cualquier velocidad como freno de emergencia, debido a que es el tipo de freno más simple. [46]

El freno directo es el tipo de freno neumático más sencillo y se utiliza en las locomotoras actuales a nivel local. Su funcionamiento consiste en la alimentación directa de los cilindros de freno de cada uno de los vagones mediante un conducto continuo de aire. Sin embargo, estos frenos tienen una estructura de frenado irregular que provoca una actuación lenta de los frenos en la parte final del tren. Además, como este freno no es automático, si se produce una rotura en la unión entre los vehículos se quedarían sin frenos.

Los vagones de los trenes de mercancías van equipados con un freno indirecto, los cuales son frenos automáticos de tipo neumático que conectan todos los vagones mediante una tubería de freno automático (TFA). Además, se pueden accionar desde una posición para todo el tren y en caso de corte el tren al completo se detendrá automáticamente.[47]



Figura 4.1 Freno neumático

(Fuente: [48])

- El freno eléctrico: son aquellos frenos basados en la reversibilidad de los motores eléctricos. Estos pueden funcionar como receptores, absorbiendo la corriente eléctrica, o como generadores, absorbiendo la energía mecánica del tren durante el frenado.

Existen varios tipos de frenos eléctricos, entre los que destacan el freno reostático y el freno regenerativo. Los frenos reostáticos transforman la energía mecánica en energía eléctrica que es disipada en forma de calor en las resistencias y en muchos de los casos se utiliza en combinación junto al freno regenerativo.[49]

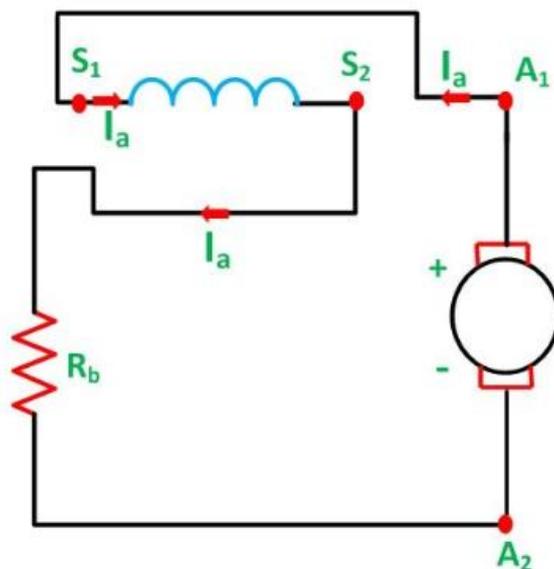


Figura 4.2 Esquema de frenado reostático
(Fuente: [50])

Hoy en día, todos los modelos que componen la flota de trenes en España incluyen un freno de tipo neumático, normalmente de aire comprimido, y un freno de tipo eléctrico, ya sea regenerativo o reostático. Un ejemplo de ello son las series de trenes de mercancías S-251 y S-253.[24]



Figura 4.3 Modelo de tren S-251
(Fuente: [24])



Figura 4.4 Modelo de tren S-253

(Fuente: [24])

A continuación, se va a explicar más a fondo que son los frenos regenerativos y su funcionamiento.

4.1 FRENO REGENERATIVO

Los frenos regenerativos son un tipo de freno eléctrico que se basan en la propiedad de reversibilidad de los motores eléctricos para generar energía eléctrica durante la frenada. Para que este sistema de frenado reduzca la velocidad del tren y transforme parte de la energía cinética en energía eléctrica, el motor que funcionaba como generador del movimiento debe convertirse en un generador de corriente.[46]

El funcionamiento de los frenos regenerativos se basa en el principio de que los motores eléctricos pueden ser utilizados como generadores. Si durante el frenado se reconecta el motor de la tracción eléctrica como generador, la alimentación se convierte en suministradores de energía. Esta energía se conduce hacia una carga en la que se produce el efecto frenado.[51]

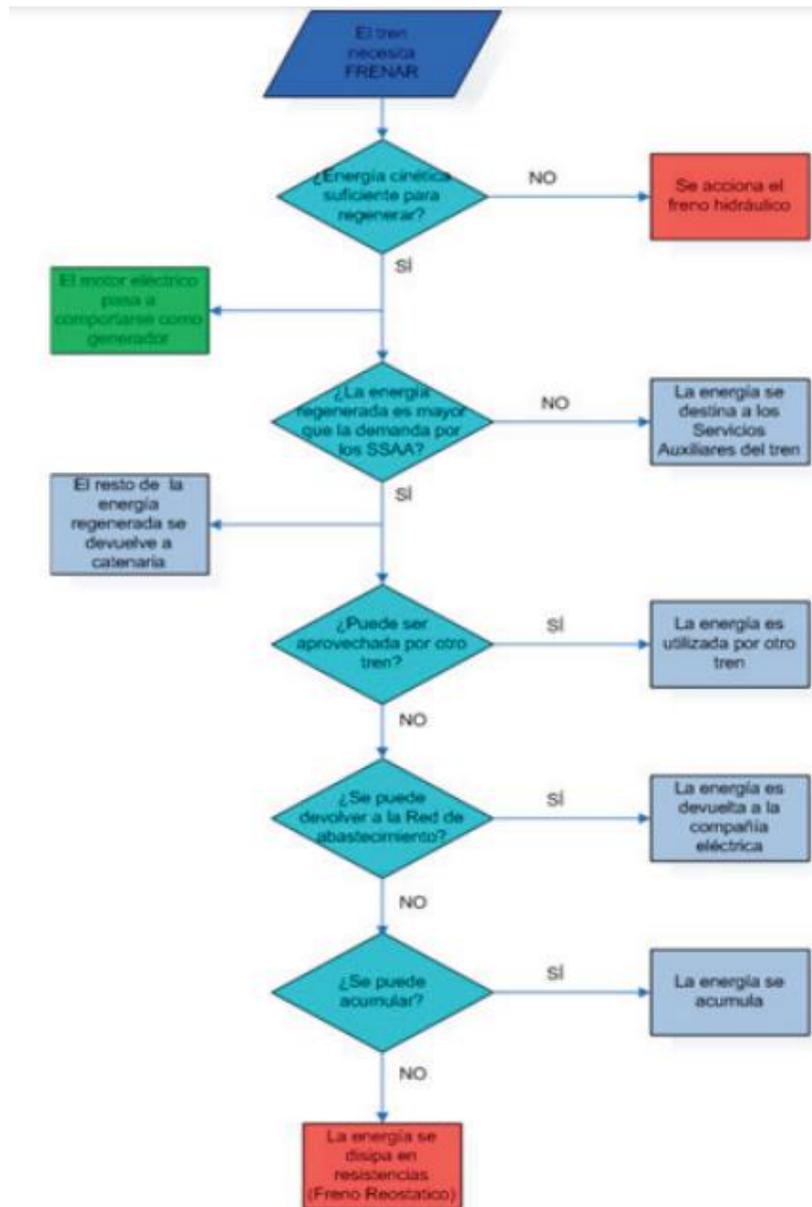


Figura 4.5 Diagrama de flujo de un freno regenerativo

(Fuente: [51])

Normalmente, es más adecuado reconducir la energía generada a la catenaria que almacenarla, debido a que las pérdidas en la catenaria suelen ser menores que el rendimiento de los distintos procesos derivados de la acumulación de energía.

A la hora de devolver la energía a la catenaria es necesario contar con una infraestructura adecuada para registrar y cuantificar la energía devuelta y unos equipos capaces de

devolver la energía a la Red eléctrica. Además, en el caso de que la compañía eléctrica no pueda asumir la energía que se devuelve es recomendable disponer elementos capaces de almacenar dicha energía como, por ejemplo, los acumuladores, las baterías o los reóstatos.

[51]

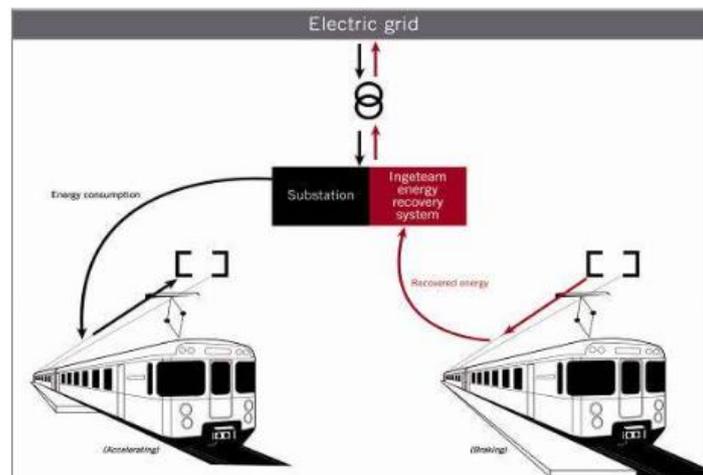


Figura 4.6 Esquema de devolución de energía a la catenaria
(Fuente: [52])

Este tipo de frenado proporciona las siguientes ventajas:

- La ausencia del calentamiento de las zapatas con las ruedas ocasiona una menor degradación de las ruedas, durante las diferentes situaciones de frenado.
- Presenta una mejora en la conducción del tren y en el confort de los pasajeros, ya que no produce ruidos ni vibraciones.
- Su característica fundamental es el ahorro energético producido por su capacidad de generar energía.[46]

Esta serie de ventajas provoca que el freno regenerativo sea considerado de mayor eficiencia que los demás, a pesar de ser inoperativo en velocidades por debajo de los 5 Km/h. Por esta razón, los trenes con frenos regenerativos suelen estar complementados con frenos neumáticos o mecánicos.[46]

Hoy en día, en España, la mayoría de los trenes pertenecientes a la flota de RENFE utilizan frenos regenerativos, ya sean combinados con frenos neumáticos, con frenos reostáticos o con ambos. Un ejemplo de estos trenes son la serie S-114 y los Avlo para la alta velocidad, la serie S-121 en los trenes de ancho variable, la serie 447 de cercanías y la serie de mercancías S-253.[24]



Figura 4.7 Modelo de tren S-114

(Fuente: [24])



Figura 4.8 Modelo de tren Avlo

(Fuente: [24])



Figura 4.9 Modelo de tren S-121
(Fuente: [24])



Figura 4.10 Modelo de cercanías 447
(Fuente: [24])

5. Modelos de trenes nuevos y en desarrollo

En este capítulo se van a explicar distintos modelos de trenes, actualmente en funcionamiento o en desarrollo, a nivel nacional e internacional. Estos modelos nuevos incluyen trenes híbridos o algunos modelos en desarrollo que funcionan mediante levitación magnética o con nuevas fuentes de energía como el hidrógeno.

5.1 TREN HÍBRIDO (SERIE S-730)

El primer modelo híbrido de la compañía española Renfe fue la serie S-730. Este modelo combina la tecnología de tracción tanto diésel como eléctrica, lo que permite extender las ventajas de las líneas de alta velocidad de las líneas electrificadas, a 25 kV y 50 Hz en corriente alterna y 3000 V en corriente continua, a los tramos sin electrificar que forman parte de la red ferroviaria española. [24]

La idea de estos trenes surgió ante la posibilidad de convertir algunos de los trenes Alvia 100% eléctricos en unidades híbridas, alimentadas por la catenaria en los tramos en los que esta existiese o por unos potentes motores diésel. Finalmente, estos trenes modificados, también conocidos como serie S-730, se estrenaron en el año 2012 en la línea Madrid-Galicia. [53]



Figura 5.1 Tren híbrido (serie S-730)

(Fuente: [24])

La composición de esta serie está formada por dos cabezas tractoras, dos furgones extremos con los generadores diésel y nueve coches de pasajeros con cafetería. En cuanto a las características técnicas, este modelo cuenta con dos motores diésel que cada uno de ellos entrega una potencia de 2248 Cv. [54] [5]

Dependiendo del tipo de alimentación a la que funcionen y del ancho de vía por el que circulen, estos trenes pueden alcanzar distintas velocidades. En vías de ancho internacional (1435 mm) pueden alcanzar hasta 250 km/h, mientras que en vías con el ancho ibérico (1668 mm) alcanzan velocidades de hasta 200 km/h, siendo alimentadas por la catenaria, y hasta 180 km/h cuando se alimentan mediante los motores diésel. [5] [55]

En la serie S-730, todos los dispositivos diésel que se necesitan para el funcionamiento del tren se encuentran instalados en un coche, el cual hace que este modelo se perfectamente identificable con respecto al resto de las series de Renfe.

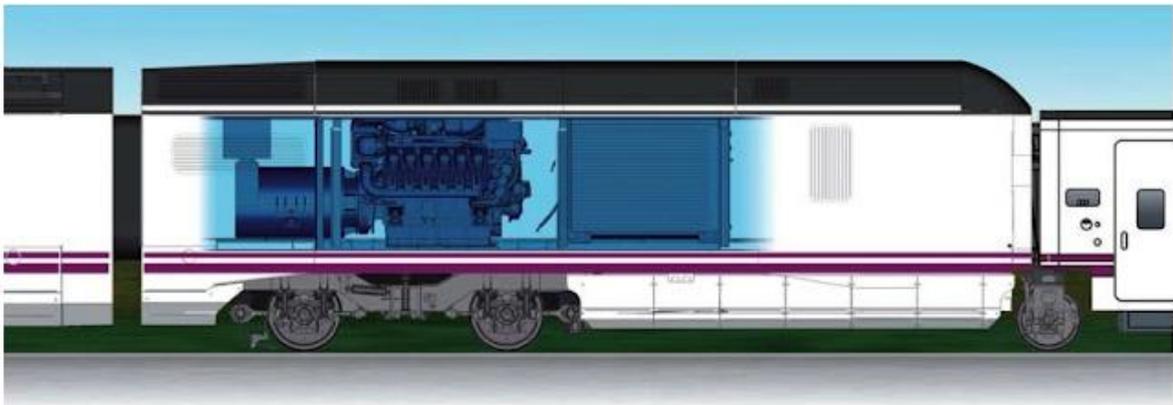


Figura 5.2 Coche extremo técnico del equipo diésel

(Fuente: [56])

A continuación, se va a explicar cada uno de los modos de funcionamiento de la serie S-730.

En tracción eléctrica, se pone en funcionamiento el pantógrafo ubicado en la matriz de la cola, de los dos que dispone la composición. Dicho pantógrafo capta la electricidad y la conduce al separador y al disyuntor. La electricidad saliente del disyuntor se conduce al

convertidor de tracción para alimentar los motores de la cola y, a través de la línea del techo, al contactor para alimentar los motores de tracción de la motriz de la cabeza. [55]

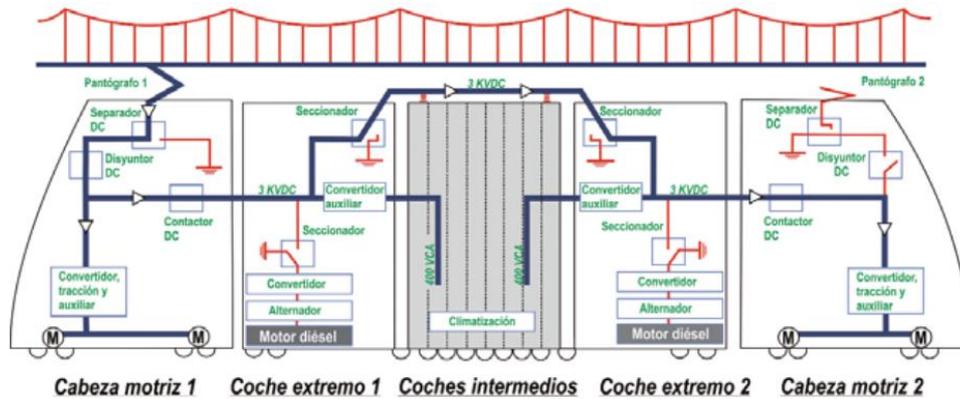


Figura 5.3 Funcionamiento con tracción eléctrica (serie S-730)

(Fuente: [55])

Durante el funcionamiento en tracción diésel, la electricidad se genera en los furgones extremos donde se sitúan los dos motores diésel. Estos motores, mediante el uso de alternadores y convertidores, generan los 3000 V de corriente continua necesarios para alimentar los motores de tracción que se encuentran en los bogies de las cabezas motrices. [55]

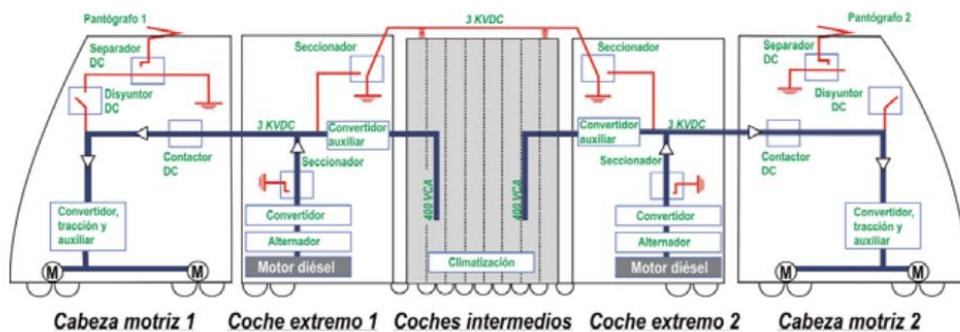


Figura 5.4 Funcionamiento en tracción diésel (serie S-730)

(Fuente: [55])

5.2 CAF OARIS

El Oaris es un tren de alta velocidad de CAF en fase de homologación cuyo prototipo forma parte de la flota de trenes de Renfe como la serie S-105. Actualmente, en España hay algunas unidades siendo probadas en distintas vías de alta velocidad, mientras que a nivel internacional este modelo opera con limitaciones en algunas líneas como, por ejemplo, en la línea que une Oslo con el aeropuerto de la ciudad. [5] [57]

Las unidades de este modelo son trenes interoperables para velocidades de 320 km/h y cuyos sistemas son alimentados a 1500 V y 3000 V en corriente continua y 15000 V y 25000 V en alterna. Los trenes Oaris tienen la particularidad de que, variando las potencias de tracción, pueden tener una composición de cuatro, seis u ocho coches. La de cuatro coches proporciona 5280 kW, la de seis 7920 kW y 10560 kW son proporcionados por la de ocho coches. Además, existen versiones de ancho ibérico e internacional con la posibilidad de equipar bogies de ancho variable.

Estos trenes tienen las características ideales para operar atravesando las fronteras entre países, debido a que pueden circular por los tres tipos de anchos de vías (1435, 4520 y 16668 mm), por las cuatro electrificaciones diferentes y a través de los múltiples sistemas de señalización presentes en Europa. [58]

Cada bogie motor incluye dos motores de tracción asíncronos, cuya potencia unitaria es de 660 kW y que permiten al tren circular a velocidades de hasta 350km/h. [58] [5]



Figura 5.5 Tren Oaris (Fuente: [57])

5.3 TALGO AVRIL

El Avril es el nuevo modelo de tren de muy alta velocidad y capacidad, desarrollado por la empresa Talgo. Este tren se ha creado como una plataforma flexible, adaptable a las tres versiones de ancho fijo, mencionadas anteriormente, y de ancho variable. Además, dispone de tres tensiones de alimentación eléctrica (25 kV y 50 Hz en alterna, 3 kV y 1,5 kV en continua), diésel-eléctrico o dual, con la posibilidad de variar el ancho del gálibo y de alterar el número de coches sin variar los servicios del tren. [59]

Este tren alcanza una velocidad máxima de 363 km/h, a pesar de que ha sido homologado solo para velocidades de 330 km/h.



Figura 5.6 Talgo Avril de Renfe

(Fuente: [60])

Para este modelo de tren Talgo desarrolló su propio sistema de tracción. En este sistema, los equipos de tracción están colocados en la parte baja de los coches extremos, dejando un espacio destinado a los viajeros. Así, la tracción se concentra en un mismo sitio y los pasajeros son distribuidos a lo largo del tren.

Esta plataforma cuenta con una solución modular que permite que algunos coches, desde el punto de vista de la tracción, sean modulares. Esto permite aumentar o disminuir el número de coches del tren en función de la potencia requerida.[61]

5.4 TREN MAGLEV

El tren maglev es un sistema de transporte en el que, mediante el uso de una gran cantidad de imanes para la sustentación y la propulsión con la levitación magnética, se puede suspender, guiar y propulsar los vehículos.

Este tipo de tecnología permite que los trenes se han más suaves y silenciosos y que alcancen velocidades muy superiores a las que puede alcanzar un tren convencional. Los trenes de levitación magnética pueden alcanzar velocidades de 6440 km/h cuando son operados en un túnel de vacío y el récord de velocidad de este tren, operado en condiciones normales, lo posee un *shinkansen* (tren bala) japonés que alcanzó una velocidad de 603 km/h. [62]



Figura 5.7 Transrapid. Tren maglev alemán

(Fuente: [63])

La levitación de un tren maglev se obtiene mediante unos campos magnéticos, interaccionando entre ellos, que producen fuerzas de atracción o de repulsión. El tipo de fuerzas que se generan depende de si se utiliza un sistema de suspensión electromagnética (EMS) o un sistema de suspensión electrodinámica (EDS). A continuación, se va a explicar un poco cada uno de ellos.

En el caso del EMS, se sitúa por encima de la parte inferior del tren una guía de material ferromagnético sin magnetismo permanente. Al poner en funcionamiento a los imanes situados encima del vehículo, se genera una fuerza de atracción que, al moverse los electroimanes, permiten el movimiento del tren a lo largo del carril guía. [64]

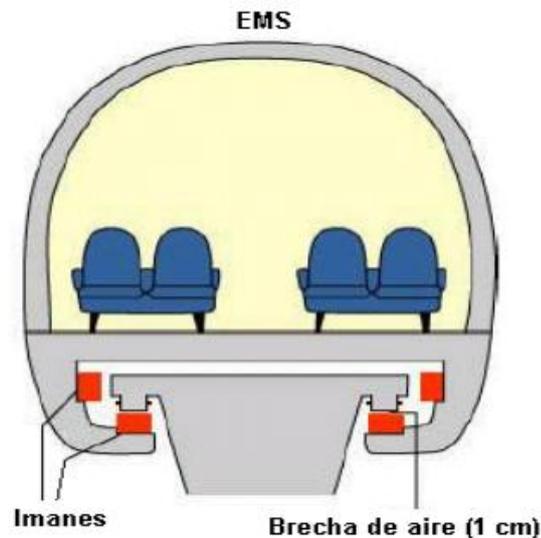


Figura 5.8 Esquema del sistema EMS

(Fuente: [64])

Los trenes que utilizan esta suspensión no necesitan imanes superconductores, por lo que no necesitan complicados sistemas de refrigeración. Pero, estos trenes son inestables y pueden aparecer vibraciones que ocasionen una ligera desviación a lo largo de la configuración del tren, lo cual, provocaría un desastre.

Mientras que la levitación EDS se encuentra basada en la propiedad de los superconductores de repeler todos los campos magnéticos. De esta manera, la suspensión consistirá en que el superconductor repelerá el campo magnético, elevando así el tren.

El material superconductor se coloca en los laterales de la parte inferior del tren. De esta manera, al moverse el tren mediante unas ruedas neumáticas se inducirá una corriente en las bobinas que se sitúan encima del carril guía. Al aumentar la velocidad del tren, el campo magnético generado en las bobinas producirá una fuerza de levitación mayor que será capaz de hacer que el tren se eleve. [64]

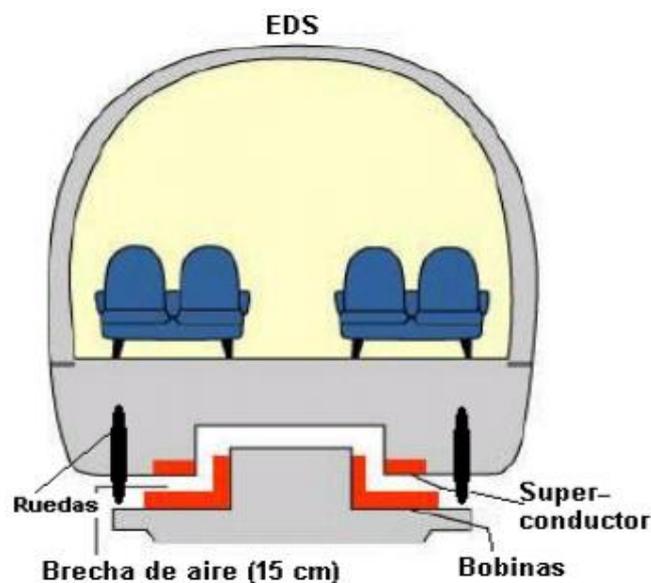


Figura 5.9 Esquema del sistema EDS

(Fuente: [64])

Este sistema permite la realización de guías con menor precisión y las protege de las pequeñas deformaciones que se puedan producir. Además, un tren con suspensión EDS se adapta a las curvas, de manera que las perturbaciones no se sienten en el interior del vehículo. Sin embargo, estos trenes necesitan de sistemas de aislamiento complejos para proteger a los pasajeros de los campos electromagnéticos que se generan en el interior del vehículo.

A parte del sistema de levitación magnética, los trenes maglev requieren un sistema de guía lateral que impide el roce entre el vehículo y el carril guía y un sistema de propulsión, formado por un conjunto de estatores y rotores interaccionando entre ellos. [64]

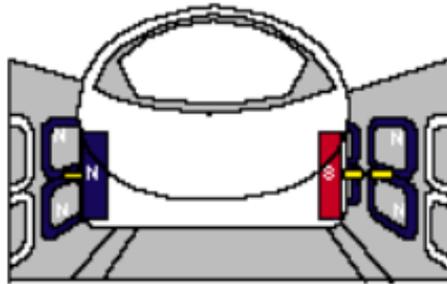


Figura 5.10 Sistema de guía lateral
(Fuente: [64])

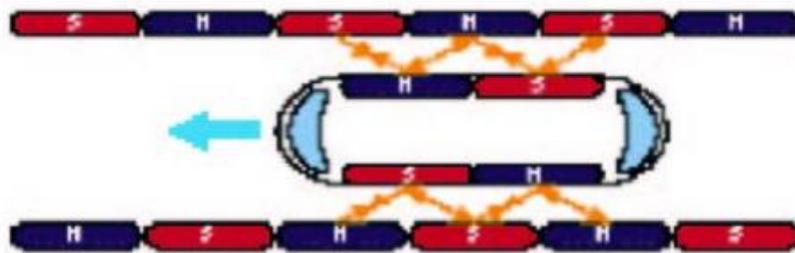


Figura 5.11 Sistema de propulsión
(Fuente: [64])

5.5 TREN DE HIDRÓGENO

Los trenes de hidrógeno son un modelo de tren eléctrico que se está desarrollando actualmente y que se mueven con la energía que obtienen de las pilas de combustible. En el interior de estas pilas se produce una reacción química en las que se combinan hidrógeno

con oxígeno, dando como resultado electricidad y agua. El hidrógeno que se utiliza en estas pilas suele ser renovable, es decir, que se ha producido sin emitir CO₂.

Estos trenes se están desarrollando en toda Europa con la esperanza de poder sustituir a los trenes conducidos por diésel que se utilizan para circular por el 40% de los 80000 km de los raíles ferroviarios que están sin electrificar. En el 2018, empezó a circular en Alemania el primer tren de pasajeros propulsado por pila de hidrógeno del mundo. [65]

En España, las empresas Talgo y Repsol están colaborando para desarrollar un modelo de tren dual de hidrógeno. El Vittal One se basa en la plataforma Talgo Vittal de Cercanías y Media Distancia, con la incorporación de la tracción mediante hidrogeno que se produce con energías 100% renovables. [66]



Figura 5.12 Talgo Vittal-One

(Fuente: [66])

En el caso del tren de hidrógeno, para su funcionamiento se incorporan unos depósitos de hidrógeno. Este hidrógeno es introducido en la pila de combustible, donde reacciona con el oxígeno del aire para generar la energía que se acumula en las baterías y vapor de agua, como único residuo del tren. [67]

El Vittal-One se espera que cuando termine su fase de pruebas, empiece a circular por las vías españolas para la próxima primavera. Si esto se cumple podremos verlo circular a unas velocidades máximas de 220 km/h en el modo eléctrico y 140 km/h en el modo hidrógeno.

[68]

6. Conclusiones

Tras realizar el estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones que resumen la información recabada.

Para empezar, el análisis del control de potencia de los sistemas de tracción ferroviaria se ha realizado desde el punto de vista de los elementos electrónicos que lo conforman, actualmente y en un futuro no muy lejano, y del funcionamiento de cada uno de ellos. De esta forma hemos podido comprobar la influencia de la evolución de los semiconductores en estos sistemas de control.

En el caso de los sistemas de control utilizados en la tracción ferroviaria, estos están compuestos por varios tipos de convertidores de potencia que transforman y regulan la energía que necesitan cada uno de los dispositivos presentes en las locomotoras, no solo los elementos de control. Estos convertidores, ya sean transformadores, rectificadores, choppers o inversores, están formados por una serie de dispositivos semiconductores que han ido mejorando las condiciones de uso de los convertidores según estos han ido evolucionando.

El funcionamiento de cada uno de los elementos de control es diferente, debido a que, cada uno de ellos realiza una función distinta en los sistemas de tracción ferroviaria. Cada uno de los diferentes convertidores de potencia se encargan de adecuar la energía que proviene de la catenaria para cada uno de los diferentes elementos que trabajan en la locomotora, ya sean, los motores, los elementos auxiliares o, incluso, a otros convertidores.

Además, se han estudiado los distintos sistemas de frenado que se utilizan en los trenes eléctricos. Este estudio se ha centrado en los frenos regenerativos modernos y en cómo son capaces de devolver la energía liberada en el proceso del frenado a la catenaria.

A partir de toda la información recopilada sobre la tracción ferroviaria, se investigó sobre los distintos prototipos de trenes que se están desarrollando actualmente. Estos prototipos consisten en diferentes trenes con nuevas formas de alimentar a los motores, ya sean con sistemas de alimentación innovadores o bien híbridos. Otros de los prototipos estarían

enfocados a la adaptación de los trenes a los distintos anchos de vías existentes. Con estos prototipos se quiere lograr que los trenes puedan circular por cualquier vía, independientemente del ancho de esta o de si está electrificada y cómo lo está.

Como se ha podido concluir con la realización de este estudio, en un futuro se podrían seguir realizando investigaciones sobre como seguir mejorando los sistemas de tracción ferroviaria y sus elementos para mejorar la eficiencia de las locomotoras. De tal forma que puedan reducir su impacto ambiental con un consumo cada vez más eficiente, así como ser más accesibles desde cualquier parte del mundo.

Otras posibles líneas de investigación se centrarían en la transformación digital del sistema ferroviario. El objeto de esta investigación radicaría en un aumento de la automatización del sistema, así como la transición a entornos en la nube.

7. Referencias

- [1] R. Albisser, «La evolución de los trenes», 21 de febrero de 2018. <https://la.network/la-evolucion-los-trenes/>
- [2] «Historia del tren: inventor y evolución». <https://curiosfera-historia.com/historia-del-tren/>
- [3] «Electrónica de Potencia», *Prodel*. <https://www.prodel.es/subareas/electronica-de-potencia/>
- [4] «Tema 1: Introducción a los Sistemas de Potencia». 2006 de 2005. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/emaset/descargas/IEP1-0506.PDF>
- [5] Á. Fiel Calleja, «Análisis de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria». [En línea]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/22181>
- [6] «Convertidores estáticos de energía», *Electrónica L.I.M.* <https://sites.google.com/site/electronicalimiraf/modulos/modulo-5/convertidores-estaticos-de-energia>
- [7] «Tema 3: Rectificación no Controlada». 2007 de 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/temas/IEP3-0607.pdf>
- [8] G. Huerta, «Convertidores de Electrónica de Potencia», *siticed.com.mx*, 3 de abril de 2020. <https://siticed.com.mx/2020/04/03/convertidores-de-electronica-de-potencia/>
- [9] «Tema 6: Rectificadores Controlados». 2007 de 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/IEP6-0607.pdf>
- [10] «Tema 8: Reguladores e interruptores estáticos de alterna». 2008 de 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/IEP8-0708.pdf>
- [11] F. González, «Reguladores AC-AC», *Telergia*, 30 de agosto de 2010. <https://telergia.blogs.com/telergia/2010/08/reguladores-ac-ac.html>
- [12] «Tema 9: Cicloconvertidores». 2007 de 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/IEP%2009-10/IEP9-0607.pdf>
- [13] «Tema 11: Inversores». 2007 de 2006. [En línea]. Disponible en: https://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP11_0607.pdf

- [14] «Tema 10: Reguladores e interruptores estáticos de continua». 2007 de 2006. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/IEP10-0607.pdf>
- [15] A. Emiro Díez, «Simulación del sistema de tracción del metro de medellín». Universidad Pontificia Bolivariana, diciembre de 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/272169843_SIMULACION_DEL_SISTEMA_DE_TRACCION_DEL_METRO_DE_MEDELLIN
- [16] «¿Qué es un diodo?», *Fluke*. [https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/que-es-un-diodo#:~:text=Un%20diodo%20es%20un%20dispositivo,corriente%20continua%20\(C\)%20pulsante.](https://www.fluke.com/es-es/informacion/blog/electrica/que-es-un-diodo#:~:text=Un%20diodo%20es%20un%20dispositivo,corriente%20continua%20(C)%20pulsante.)
- [17] «Diodos semiconductores», *Electrónica Fácil*. <https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Diodos-Semiconductores.html>
- [18] «Tiristor», *ingeniatic*. <https://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/632-tiristor.html>
- [19] «Elementos de potencia utilizados en los convertidores de frecuencia», *Mecánica Moderna*. <https://mecmod.com/elementos-de-potencia-utilizados-en-los-convertidores-de-frecuencia/>
- [20] «Tiristor GTO», *frwiki.wiki*. https://es.frwiki.wiki/wiki/Thyristor_GTO
- [21] E. Equipo editorial, «Transistor», *concepto*, 5 de agosto de 2021. <https://concepto.de/transistor/>
- [22] «Elementos de potencia utilizados en los convertidores de frecuencia», *Mecánica Moderna*. <https://mecmod.com/elementos-de-potencia-utilizados-en-los-convertidores-de-frecuencia/>
- [23] M. Camara, «Convertidores DC-DC para el sector ferroviario», *diario electronico hoy*, 14 de febrero de 2019. <https://www.diarioelectronico hoy.com/convertidores-dc-dc-para-el-sector-ferroviario/>
- [24] «Flota de trenes», *Renfe*. <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes>
- [25] «Control Reostático de Potencia», *1Library*. <https://1library.co/article/control-reostatico-de-potencia-convertidor-continua-continua.wye6721q>

- [26] «¿Cómo funcionan los trenes?», 7 de febrero de 2013. <http://comofuncionanlostrenes.blogspot.com/2013/02/como-funciona-una-locomotora-electrica.html>
- [27] «Chopper», *Ferropedia*. <https://ferrocarriles.fandom.com/wiki/Chopper>
- [28] «Una breve introducción a los circuitos chopper». <https://es.jf-paredes.pt/brief-introduction-chopper-circuits>
- [29] «Convertidores CA/CA directos». [En línea]. Disponible en: [http://web.archive.org/web/20130715195639/http://tec.upc.es/el/TEMA-6%20EP%20\(v1\).pdf](http://web.archive.org/web/20130715195639/http://tec.upc.es/el/TEMA-6%20EP%20(v1).pdf)
- [30] «Qué es un transformador eléctrico y cómo funciona», *Eenergie-Shop*. <https://www.eenergie-shop.es/blog/transformador-electrico-que-es-como-funciona/>
- [31] *JST Transformers*. <https://www.jst-transformers.eu/upload/1507732905tfo-6.jpg>
- [32] «Qué es y qué hace un Variador de Frecuencia», *aula 21*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-variador-de-frecuencia/>
- [33] «Curso básico de variadores de velocidad. Principio de funcionamiento y aplicaciones fundamentales». [En línea]. Disponible en: <https://slidetodoc.com/curso-basico-de-variadores-de-velocidad-principio-de/>
- [34] «Cómo pasar de corriente alterna a corriente continua y viceversa», *Quetzal ingeniería*, 10 de noviembre de 2021. <https://www.quetzalingeneria.es/como-pasar-corriente-alterna-corriente-continua/#:~:text=Un%20rectificador%20es%20el%20elemento,el%C3%A9ctrica%20o%20m%C3%A1s%20continua%20posible.>
- [35] J. D. Aguilar Peña y M. Olid Moreno, «Electrónica de potencia». Politécnica Superior. Universidad de Jaén. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/jaguilarpena/docs/electronica_potencia1_2
- [36] O. Planas, «¿Qué es un inversor de corriente?», *Energía Solar*, 8 de abril de 2016. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/convertidores-corriente>
- [37] «Qué es un inversor trifásico: funcionamiento y sus aplicaciones». <https://es.jf-paredes.pt/what-is-three-phase-inverter>

- [38] «Convertidores CC-CA: Inversores de onda cuadrada». [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/descargas/INVERSORES%20SQW.pdf>
- [39] «Convertidores CC-CA: Inversores de onda cuadrada». [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/~emaset/iep00/descargas/INVERSORES%20SQW.pdf>
- [40] «c.- Inversores», *Espacios virtuales UJA*. https://dv.ujaen.es/goto_docencia_lm_43601.html
- [41] «Llega el primer tren de la serie 9000 de TMB al Triangle Ferroviari», *Autobusero KNY*, 13 de noviembre de 2019. <https://autobuserokny.blogspot.com/2019/11/llega-el-primer-tren-de-la-serie-9000-al-Triangle-Ferroviari.html>
- [42] M. Iturralde, «Joyas de Delicias: “la ochomilnovecientas”», *Treneando*, 25 de abril de 2020. <https://treneando.com/tag/bitension/>
- [43] «Dos coches serie 1000 para la muestra de Madrid», *Treneando*, 13 de junio de 2019. <https://treneando.com/tag/serie-1000/>
- [44] Á. Rivera, «Las tracciones térmica y eléctrica en RENFE (LXVII R): Unidades bitensión para cercanías... y media distancia (RENFE 901 a 932/439-001 a 439-032)», *Trenes y tiempos*, 10 de octubre de 2018. http://trenesytiempos.blogspot.com/2018/10/las-tracciones-termica-y-electrica-en_10.html
- [45] R. Lapresta Calvo, «Las nuevas unidades de tren eléctricas bitensión serie 900». [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/10184_pdf_02.pdf
- [46] E. Maestre Silo, «Optimización energética ferroviaria de frenado». [En línea]. Disponible en: https://www.edubcn.cat/rcs_gene/treballs_recerca/2012-2013-07-2-TR.pdf
- [47] S. Granda Torres, «Sistema de prueba de freno en estaciones de clasificación de vagones de mercancías». [En línea]. Disponible en: https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/VLT06_03-Sergio%20Granda.pdf
- [48] «Freno neumático», *Wikipedia*, 15 de noviembre de 2021. https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_neum%C3%A1tico
- [49] P. Bolufer, «El frenado regenerativo ferroviario», *Metalmecánica*. <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/127199-El-frenado-regenerativo-ferroviario.html>

- [50] «Frenado dinámico o frenado reostático del motor de corriente continua», *Illustrationprize*. <https://illustrationprize.com/es/139-dynamic-braking-or-rheostatic-braking-of-dc-motor.html>
- [51] D. López Durán, «Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes». Universidad Pontificia de Comillas. [En línea]. Disponible en: https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/VLT03_06.Diego_L%C3%B3pez.pdf
- [52] A. Ugarte, «Recuperación de la energía excedente en el frenado eléctrico en trenes alimentados con catenaria de corriente continua». 15 de septiembre de 2010. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/83620312-Recuperacion-de-la-energia-excedente-en-el-frenado-electrico-en-trenes-alimentados-con-catenaria-de-corriente-continua.html>
- [53] J. Ortega Figueiral, «El S-730, un tren de transición joven y caro», *Vanity Fair*, 25 de julio de 2013. <https://www.revistavanityfair.es/poder/articulos/el-s-730-un-tren-de-transicion-joven-y-carro/17868>
- [54] R. Calvo Casas, «Usos de hidrógeno en tracción ferroviaria. Caso práctico sobre trenes de ancho variable». UPM, junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/67601/1/TFG_RAUL_CALVO_CASAS.pdf
- [55] «Serie 730, el tren dual Talgo todo terreno». Vía Libre, junio de 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/7578_730.pdf
- [56] Y. Ortiz, «La série 730 de Renfe», *Tren Galicia*, 29 de enero de 2017. <http://tregalicia.blogspot.com/2017/01/la-serie-730-de-renfe.html>
- [57] «Oaris de CAF». Vía Libre, diciembre de 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/19304_VL602_Oaris_CAF.pdf
- [58] «El tren Oaris en su fase final de pruebas». Vía Libre, febrero de 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/13948_OARIS.pdf
- [59] «El Avril de Talgo, listo para sus pruebas en vía». Vía Libre, diciembre de 2013. [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/11787_pdf_14.pdf
- [60] I. González, «Radiografía del Talgo Avril: el AVE todoterreno y de muy alta velocidad», *El Español*, 29 de marzo de 2021.

- https://www.elespanol.com/omicron/tecnologia/20210329/radiografia-talgo-avril-ave-todoterreno-alta-velocidad/568943902_0.html
- [61] «Avril: Tren de alta velocidad y gran capacidad de Talgo». Vía Libre, septiembre de 2010. [En línea]. Disponible en: https://www.vialibre-ffe.com/pdf/9379_avril.pdf
- [62] «¿Cómo funciona el tren de levitación magnética?», *Blog Truecalia*, 3 de diciembre de 2013. <https://www.truecalia.com/blog/funciona-tren-levitacion-magnetica/>
- [63] fuente al pie, «Alemania: Se presenta en Munich el tren experimental de suspensión magnética», *Rieles*, 11 de octubre de 2016. <https://www.rieles.com/front/alemania-se-presenta-en-munich-el-tren-experimental-de-suspension-magnetica-transrapid/>
- [64] G. Perren, «Estudio de las aplicaciones prácticas de la levitación magnética (Trenes maglev)». 2003. [En línea]. Disponible en: <https://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/MagLev.pdf>
- [65] J. Arreo, «El tren de hidrógeno: el transporte del futuro con cero emisiones», *La Vanguardia*, 29 de abril de 2022. <https://www.lavanguardia.com/natural/20220429/8228148/tren-hidrogeno-transporte-futuro-cero-emisiones-espana-brl.html>
- [66] «Talgo comienza las pruebas dinámicas del primer tren dual de hidrógeno de España», *Talgo*, 31 de mayo de 2022. <https://www.talgo.com/es/-/talgo-comienza-las-pruebas-din%C3%A1micas-del-primer-tren-dual-de-hidr%C3%B3geno-de-espa%C3%B1a>
- [67] E. Omedes, «Así es “Talgo Vittal-One”: el tren de hidrógeno renovable que puede estar listo para 2023 y sustituir a los diésel», *20 minutos*, 31 de mayo de 2022. <https://www.20minutos.es/noticia/4480797/0/talgo-tren-hidrogeno-renovable-sustituir-diesel/>
- [68] M. Caballero, «Vittal-One: El primer tren híbrido de hidrógeno». [En línea]. Disponible en: https://www.ptferroviaria.es/Docs/Jornadas/AsambleaPTFE2020/ManuelCaballero_PresentacionTALGOHidrogeno_PTFE2020.pdf