



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería eléctrica**

# **Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria**

**Autor:**

**Fiel Calleja, Álvaro**

**Tutor:**

**Zorita Lamadrid, Ángel Luis  
Dep. Ingeniería Eléctrica**

**Valladolid, Noviembre 2016.**

# AGRADECIMIENTOS

*Este proyecto no habría sido posible sin la colaboración de algunas personas importantes.*

*Primeramente quisiera agradecer el apoyo y guiado por parte de mi tutor Ángel Zorita Lamadrid, puesto que sin él este proyecto no habría sido viable, sin olvidarme de Alfonso Teba, por la información brindada desde el departamento técnico de RENFE, también hacer mención del profesorado de asignaturas como Maquinas eléctricas y Electrónica de potencia las cuales me han servido de base para el entendimiento de los aspectos técnicos del mismo.*

*Agradecérselo por supuesto a mi familia la cual me ha dado el soporte y apoyo necesario para llegar a este punto, a Laura Herrero sin cuyo apoyo y comprensión el camino hubiese sido mucho mas escabroso y a mis compañeros de clase los cuales hicieron el día a día mas ameno.*

# INDICE

1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Descripción memoria	4
2. Circuito eléctrico en la tracción ferroviaria	5
2.1 Subestaciones	6
2.2 Sistemas de captación de corriente	
2.2.1 Tercer riel	9
2.2.2 Catenaria	12
2.3 Motores	14
2.4 Circuito retorno	16
3. Historia de los motores en el ferrocarril	19
4. Características de los motores actuales	23
4.1 Motor Síncrono Trifásico	
4.1.1 Principio de Funcionamiento	25
4.1.2 Métodos de arranque y control	26
4.1.3 Modelos que lo montan	31
4.2 Motor Asíncrono Trifásico	
4.2.1 Principios de Funcionamiento	39
4.2.2 Clasificación de los Motores Asíncronos Trifásicos	43
4.2.3 Control de Velocidad de un Motor Asínc Trif	48
4.2.4 Modelos que lo montan	55
4.3 Motor de Corriente Continua	
4.3.1 Principios de Funcionamiento	67
4.3.2 Control de Vel. de un Motor de Corriente Continua	77
4.3.3 Modelos que lo montan	81

5. Control de Potencia en Tracción Eléctrica Ferroviaria	
5.1 Introducción y repaso histórico	85
5.2 Convertidores estáticos y elementos fundamentales	89
5.3 Convertidor Continua / Continua	95
5.3.1 Control Reostático de Potencia	96
5.3.2 Control mediante Chopper	101
5.4 Convertidor Alterna / Alterna	
5.4.1 Transformadores	109
5.4.2 Control por Variador	115
5.5 Convertidor Alterna / Continua	
5.5.1 Rectificadores	119
5.6 Convertidor Continua / Alterna	
5.6.1 Ondulador Trifásico	125
5.7 Trenes Bitensión	135
5.8 Elementos Auxiliares	143
6. Características de modelos nuevos, especiales y en investigación	
6.1 RENFE Serie S - 730 (híbrido)	147
6.2 CAF Oaris (prototipo)	155
6.3 Talgo Avril	156
6.4 Tren Maglev	157
7. Conclusiones	167
8. Bibliografía	169



# 1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de fin de grado nos muestra la actual situación de la tracción eléctrica ferroviaria en cuanto a motores y sistemas de control se refiere, desde una perspectiva técnica bajo los conocimientos adquiridos en los estudios del grado en ingeniería eléctrica.

Apoyado por las materias relacionadas estudiadas a lo largo de la carrera, además de documentación relacionada con los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, vamos a elaborar un dossier técnico que acoja todas las tecnologías tanto presentes como de un futuro cercano.



## 1.1 ANTECEDENTES

Debido a la gran expansión y evolución que está sufriendo en nuestros días la industria de los ferrocarriles a nivel mundial, sobre todo en lo referido a la alta velocidad y puesto que España es una de las naciones que encabeza este medio de transporte, con más de 3100 km de esta tecnología puestos en servicio en la actualidad, lo cual nos sitúa como el primer país de Europa y el segundo del mundo (por detrás de China).

Haciendo que las empresas españolas estén ubicadas en lo alto del escalafón de la industria ferroviaria, con alto reconocimiento internacional, tanto en lo referido a la realización de infraestructuras como es el caso de ADIF, como en la construcción de material rodante como es el caso de las españolas TALGO y CAF. Estas tres empresas están siendo las encargadas de grandes obras en todo el mundo como puede ser las líneas de Alta Velocidad Meca – Medina (Arabia Saudí), Ankara – Estambul (Turquía), Los Ángeles – San Francisco (EE.UU.), además de colaboraciones con Marruecos, Colombia, Rusia, México... etc.

Vamos a realizar un estudio de los diferentes tipos de motores que montan los trenes en la actualidad, haciendo hincapié además en los distintos sistemas de regulación que monta cada tipo de motor, y de los sistemas auxiliares que proporcionan la electricidad requerida por otros aparatos necesarios en un tren, como son sistemas de seguridad, alumbrado interior, confort... etc.

Para ellos vamos a ver primeramente el circuito eléctrico de tracción, lo cual nos enseñara a grandes rasgos el recorrido que va a realizar la electricidad, después haremos un repaso histórico por los motores y las diferentes vertientes que se tomaron en un principio, para a continuación meternos de lleno en lo que realmente nos atañe de este trabajo que es ver las características de los motores actuales, veremos principalmente los motores síncronos, corriente continua y asíncronos puesto que son los que en la actualidad están más extendidos en la industria ferroviaria y finalmente veremos algún modelo de tren recién sacado a la luz, así como algún motor especial en pruebas.



## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo es el estudio y comparación de los distintos elementos empleados en cuanto a los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria de alta velocidad se refiere.

Se recopilará información de los actuales modelos de trenes de alta velocidad haciendo un dossier de los sistemas de captación y control utilizados, así como de la alimentación de los equipos auxiliares.

Estudiaremos desde los conocimientos adquiridos en la universidad los distintos motores que se emplean en la actualidad viendo su fundamento teórico y explicando su funcionamiento y los distintos subtipos que hay dentro de cada clase.

Estudiaremos además todo lo relacionado con la electrónica de potencia, parte fundamental e importantísima en la tracción eléctrica ferroviaria, estudiaremos los distintos tipos de convertidores estáticos, así como su integración dentro de la maquina motora del ferrocarril eléctrico.

Por ultimo emitiremos un veredicto acorde al estudio de los distintos motores empleados en la actualidad, viendo cuáles son sus principales características, además de ver cuál es el más extendido actualmente y por qué.



## **1.3 DESCRIPCIÓN MEMORIA**

En esta memoria veremos primeramente una introducción del circuito eléctrico ferroviario, este repaso nos dará conciencia del comportamiento de la energía eléctrica en el recorrido efectuado desde las líneas de alta tensión y nos ubicará a los motores dentro del circuito eléctrico.

Posteriormente haremos un breve repaso histórico de la tracción eléctrica ferroviaria, veremos cómo han ido evolucionando las distintas tecnologías y trenes a lo largo de la historia, para adentrarnos en lo fundamental del trabajo.

Veremos las características de los motores actuales, dividiéndolo en los tres grandes grupos de motores, motor síncrono trifásico, motor asíncrono trifásico y motor de corriente continua. Haremos un repaso por los principios fundamentales, funcionamiento y aplicación en los modelos en funcionamiento.

A continuación, veremos los distintos sistemas de adecuación y control de la energía eléctrica, veremos cómo se emplean unos u otros tipos de convertidores estáticos dependiendo de la naturaleza de la electricidad a la que se alimente la catenaria y dependiendo del tipo de motor que porte el tren, este punto lo dividiremos en convertidores continua / continua continua / alterna, alterna / continua y alterna / alterna.

Seguiremos con un punto donde veremos las últimas tecnologías, algunas de ellas ya en funcionamiento a modo de prototipo.

Para sacar por último una serie de conclusiones sobre las distintas tecnologías en funcionamiento, justificando el abandono de alguna de ellas y viendo cual de todas será la que más futuro se augura y por qué.





## 2. CIRCUITO ELÉCTRICO EN LA TRACCIÓN FERROVIARIA

En este capítulo vamos a ver todo lo relacionado con la parte eléctrica de tracción ajena al propio tren, para ser más claros, diremos que vamos a ver todos los elementos que hacen que la electricidad llegue hasta nuestro tren desde las líneas de donde capta la energía para hacerlo funcionar.

El circuito eléctrico en la tracción ferroviaria es el encargado de abastecer de energía al propio tren. Está compuesto por una serie de instalaciones necesarias para la adecuación de la electricidad y el correcto funcionamiento de los motores que monta el propio tren, así como hacer llegar la electricidad desde estas instalaciones hasta el tren en todo su recorrido.

Como bien sabemos, los ferrocarriles captan la energía desde líneas de alta tensión aprovechando las más cercanas al propio trazado de la vía del ferrocarril.

Mediante una serie de subestaciones de transformación que están presentes a lo largo del recorrido de la vía se transforma la electricidad, adecuándola a la tensión necesaria por los trenes que van a recorrer dicha línea y en algunos casos convirtiéndola a continua en la propia subestación rectificadora, inyectándola ya a la catenaria como corriente continua a la tensión deseada.

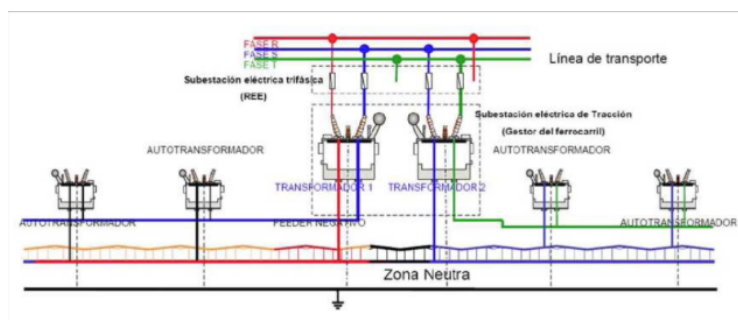


Fig. 2.1 Croquis eléctrico sistemas de tracción ferroviaria

Como podemos suponer de las líneas escritas anteriormente y veremos más adelante en detalle, cuando se diseña una red ferroviaria, debe de haber una conjunción de tecnologías entre el circuito eléctrico y los trenes que van a circular por esa vía.



En la actualidad existen trenes alimentados en corriente continua, pero montando motores de corriente alterna (Serie S - 447, Serie Civia) también es el caso de algunos trenes bi - tensión, como pueden ser algunos modelos de alta velocidad (Serie S - 121, Serie S - 130).

A continuación, veremos más en profundidad cada una de las partes que componen el circuito eléctrico.

## 2.1 SUBESTACIONES

Debido a la gran potencia demandada por los trenes para el desarrollo de su trabajo a través de sus motores, y para disminuir las pérdidas que podríamos tener en la catenaria, es obligatorio tratar con tensiones elevadas del orden de 1500 Vcc, 3000 Vcc, 25 kVca, lo cual hace que los ferrocarriles eléctricos obtengan su energía de las redes de alta tensión.

Para la adecuación de esa electricidad entre las líneas de alta tensión y la necesaria para inyectarla en la catenaria se emplean, dependiendo de la naturaleza de la corriente que se necesite en la línea, tanto transformadores para las líneas que se alimentan en corriente alterna, como transformadores - rectificadores para las líneas alimentadas en corriente continua, ambos tipos están ubicados en las distintas subestaciones que hay en las líneas de ferrocarril, además hay que tener en cuenta una serie de autotransformadores situados en tramos intermedios más cercanos entre sí que los anteriores a lo largo del recorrido.



Fig. 2.1.1 Subestación Tracción AVE

Estas subestaciones se intentan colocar lo más cercanas posible entre líneas de alta tensión y la línea férrea, como podemos ver en la Fig. 2.1.1.



La electricidad captada de una línea de alta tensión suele llegar por medio de una línea aérea hasta la subestación, sobre todo en las situadas fuera de los grandes núcleos urbanos y después de ser transformada y en el caso necesario rectificada, es inyectada en la catenaria.

Estas subestaciones suelen constar de 2 transformadores, alimentando ambos a dos partes distintas de la catenaria, creando entre medias una zona neutra.

Las zonas neutras son zonas que separan las zonas de influencia de los transformadores, tanto de la misma subestación, como de subestaciones distintas, tanto a la misma tensión como a tensiones distintas en el caso de trenes bi-tensión.

Estas zonas no son más que un tramo del recorrido sin tensión con el fin de evitar cortocircuitos, de una longitud variable, en el caso de alta velocidad es de 400m, aunque el tramo Madrid – Barcelona son tramos de 192m.

En el caso de la alimentación de corriente continua, no es necesario estas zonas neutras cuando se alimenta a la misma tensión, puesto que se hace una disposición de las subestaciones en paralelo (Fig. 2.1).



Fig. 2.1.2 Subestación Tracción Orense – Santiago



Las subestaciones presentan normalmente una configuración de barra simple (Fig. 2.1.3) lo cual nos permite operar perfectamente para el cometido diseñado reduciéndonos la inversión, aunque en el caso de querer alimentar varias líneas con una misma subestación de tracción, se necesitaran configuraciones más complejas (doble barra, anillo... etc.) todo depende de la continuidad de servicio que necesitemos aportar.

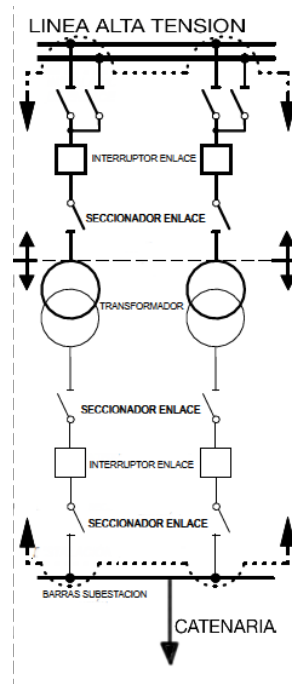


Fig. 2.1.3 Esquema Subestación Barra Simple

La subestación además de los transformadores contiene también todos los elementos de medida y seguridad necesarios para el correcto funcionamiento y operatividad.

Estas subestaciones no son solo reductoras de tensión, si no que en el caso de las catenarias alimentadas en CA, las subestaciones son también elevadoras de tensión, puesto que en el caso de los frenados y para mejorar la eficiencia energética del ferrocarril, se devuelve parte de la energía por la catenaria hacia el sistema de energía de la compañía eléctrica.

En el caso de las catenarias de CC como las subestaciones tienen rectificadores CA/CC compuestos en la gran mayoría por diodos, no se nos permite esta maniobra de inyectar energía desde la catenaria a la red de la compañía eléctrica.



## 2.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN DE LA CORRIENTE

En este punto vamos a ver los distintos modos que tiene el tren de recibir la energía que sale de las subestaciones.

En la actualidad hay 2 formas de recibir esa energía por medio del denominado coche motor (Mc), y que será la encargada de proporcionar el movimiento a través de los motores, además de hacer funcionar todos los elementos auxiliares tras pasar por una serie de elementos rectificadores, onduladores o transformadores.

### 2.2.1 TERCER RIEL

Este sistema fue el primero utilizado en la electrificación ferroviaria, aunque su uso actualmente ha quedado relegado a todo lo relacionado con el transporte metropolitano de cercanías y metro, no siendo aplicado en las largas distancias ni en la alta velocidad.



Fig. 2.2.1 Tercer riel en una estación

El tercer riel consiste en el uso de un conductor en forma de perfil de acero laminado (Fig. 2.2.1) paralelo a la vía en todo su recorrido, colocado sobre aisladores y el cual entra en contacto con el coche motor del tren a través de una zapata denominada frotador (Fig. 2.2.2) que lleva dicho vehículo, la cual roza permanentemente en el tercer riel cerrando el circuito eléctrico.



Fig. 2.2.2 Frotador del tercer riel

En la actualidad se cuenta con varios tipos de tercer riel (Fig. 2.2.3), dependiendo del grado de aislamiento que se necesite por seguridad, dependiendo del tipo de tercer riel que tengamos instalado, dependerá el tipo de frotador a utilizar.

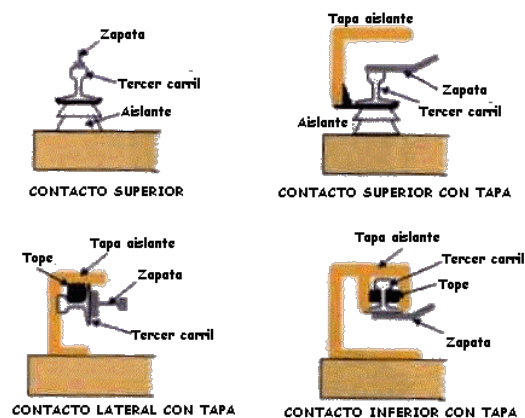


Fig. 2.2.3 Tipos de tercer riel

Este sistema de captación tiene una serie de ventajas lo cual hace que se siga teniendo en cuenta en la nueva construcción. Teniendo mucha aceptación en el transporte por metro, puesto que facilita mucho todo el tema de la infraestructura en cuanto al tema de la altura de los túneles por los que discurre dicho medio de transporte, además de la altura de las estaciones donde es muy difícil poder colocar catenaria, aunque más tarde veremos un tipo de catenaria que si se emplea.

Otra de las ventajas es la durabilidad, pudiendo pasar el tiempo sin experimentar deformaciones ni desgastes pronunciados, haciendo que su mantenimiento sea escaso y por lo tanto muy económico.



El montaje sencillo y su tendido a la vez que los rieles de tránsito, hace que la instalación de este tipo de sistemas sea muy económica.

La conductividad eléctrica del riel electrificado en un inicio (acero al manganeso) fue muy discutida, pero los nuevos modelos de aluminio hacen que este punto pase desapercibido hoy en día, además la rigidez hace que en todo momento haya contacto entre el frotador y el tercer riel, disminuyendo así mucho las pérdidas.

En su contra principalmente se encuentra la seguridad tanto de los trabajadores que se encuentren en las vías, como de los usuarios que podrían caer a ellas, puesto que el tercer riel al estar electrificado, cualquier contacto entre él y las vías o el suelo tendría como consecuencia una electrocución, aunque los recubrimientos protectores tanto de plástico como de madera, dificultan el contacto directo con el mismo.

Otro de los principales inconvenientes es la baja tensión de transmisión del tercer riel, el cual normalmente oscila en tensiones entre los 500V y los 800V en corriente continua, aunque en la actualidad existe alguna excepción con tensiones de 1500Vcc como es el caso del metro de Cantón (China). Lo que implica que se deben construir un elevado número de subestaciones a lo largo de todo el recorrido.

En lo respectivo al transporte en superficie, aquí es donde más puntos pierde este tipo de captación, puesto que tanto los cruces de vías como los pasos a nivel (Fig. 2.2.4) el tercer riel debe ser interrumpido, no siendo conveniente para largas distancias.



Fig. 2.2.4 Interrupción tercer riel por paso a nivel



## 2.2.2 CATENARIA

La catenaria son líneas aéreas de alimentación de las que el coche motor del tren capta la energía mediante el rozamiento de un elemento llamado pantógrafo (Fig. 2.2.5) este sistema de alimentación nos será mucho más familiar que el anterior, puesto que es el visible en las líneas ferroviarias de larga distancia y de alta velocidad.



Fig. 2.2.5 Pantógrafo

La catenaria consta principalmente de un hilo sustentador del cual cuelga el hilo de contacto mediante unos elementos intermedios encargados de tensar los hilos (Fig. 2.2.6) para favorecer en la medida de lo posible que el rozamiento del pantógrafo con el hilo de contacto que es el que contiene la energía necesaria para el funcionamiento del tren sea continuo, intentando disminuir al máximo las pérdidas.

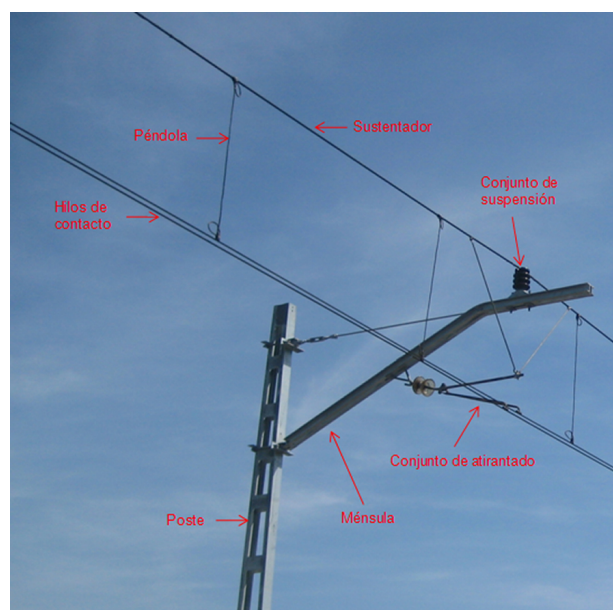


Fig. 2.2.6 Elementos de una catenaria





Las catenarias son alimentadas tanto en corriente continua como en corriente alterna, y esa tensión a la que se alimentan las catenarias suele ser superior a las de alimentación del tercer riel, esta elevada tensión hace posible el transporte por la catenaria de una elevada potencia la cual es la encargada de hacer que los trenes alcancen las elevadas velocidades y grandes aceleraciones.

Las principales ventajas del uso de las catenarias es que debido a la utilización de la corriente alterna, las subestaciones pueden distanciarse mucho más a lo largo del recorrido, tanto la inyección como la devolución de la electricidad desde las líneas de alta tensión a la catenaria es mucho más sencilla y posible puesto que solo es necesario un transformador.

La dificultad de un contacto con la catenaria por parte de las personas hace que sea el mejor método de utilización al aire libre, y en los trayectos férreos metropolitanos.

Existen 2 tipos de catenarias, además de la catenaria vista hasta ahora, existe un tipo de catenaria denominado catenaria rígida (Fig. 2.2.7) la cual se emplea en estaciones y en el paso de algunos túneles con poca altura. La peculiaridad que tiene esta catenaria es la de su posible utilización en sitios de poca altura efectiva, puesto que al ser rígida se adapta mejor a este entorno, además de que al ser rígida no sufriremos los tan problemáticos despegues del pantógrafo.



Fig. 2.2.7 Catenaria rígida metro Madrid

Una parte importantísima de estos sistemas de captación es el denominado circuito de retorno, que más adelante veremos y que es la parte encargada de cerrar el circuito eléctrico para el funcionamiento de nuestros trenes.



## 2.3 MOTORES

Los motores son la parte fundamental de este trabajo de los cuales ahora haremos una breve introducción sobre ellos, para mas adelante meternos en profundidad.

Los motores de los trenes son los encargados de convertir la energía eléctrica proveniente de las subestaciones de tracción en energía mecánica que hará que el tren se mueva.

Los motores junto con todos los elementos necesarios para su funcionamiento (rectificadores, interruptores, protecciones... etc.) van montados en el coche motor (Mc) que normalmente se ubican en la cabeza y cola del tren.

Los trenes disponen de 2 tipos de bogíes. Los bogíes remolque, los cuales no disponen de ningún tipo de motorización, aunque si de los sistemas de frenado correspondiente, su misión entre otras es la de sustentar al vagón. Los bogíes motores, son los que están provisto del motor junto con la correspondiente reductora para transmitir el par motor a las ruedas (Fig. 2.3.1)

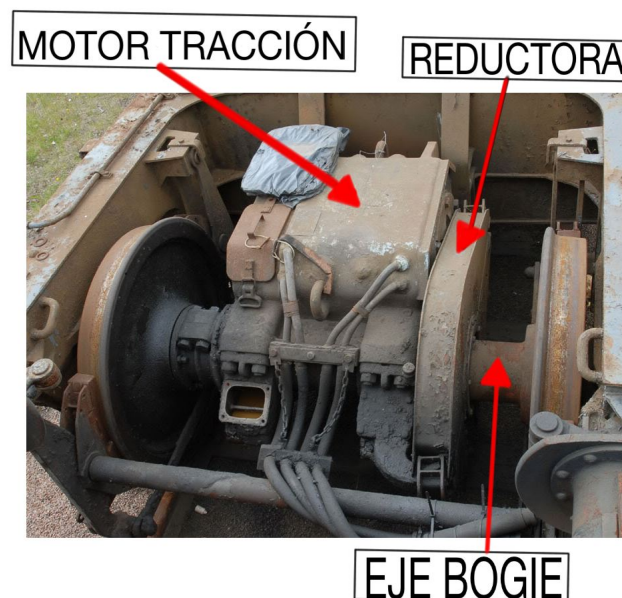


Fig. 2.3.1 Bogie motor

Estos motores pueden ser empleados tanto en los periodos de aceleración de los trenes, como en los periodos de frenado, bien para un frenado reostático donde la energía eléctrica generada por el motor es disipada en unas resistencias en forma de energía calorífica, o bien para el frenado regenerativo, en el cual la energía eléctrica generada por los motores es devuelta a la catenaria para que sea aprovechada por otros trenes que circulen en la misma línea, o bien devuelta a la red eléctrica del sistema nacional.

Con el sistema de frenado regenerativo conseguimos una reducción del consumo de electricidad del entorno del 13% según recientes estudios del ICAI.

La devolución de electricidad al sistema eléctrico solo será posible en el caso de catenarias alimentadas en corriente alterna, puesto que en corriente continua las morfologías de las subestaciones rectificadoras no nos permiten ondular esa corriente generada para volverla a corriente alterna.

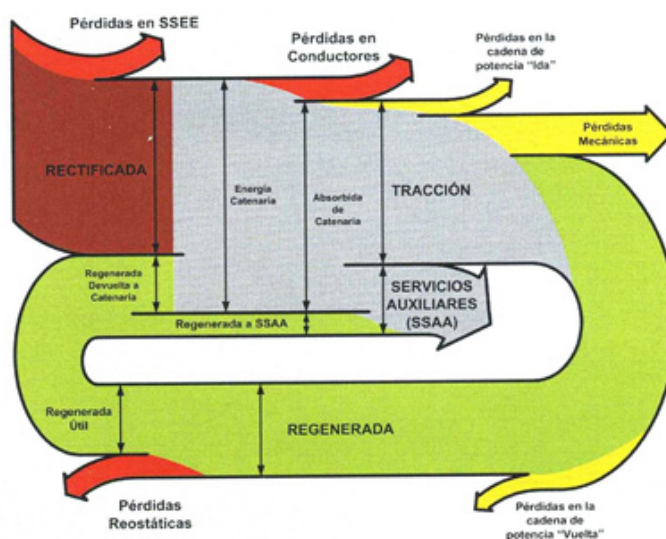


Fig. 2.3.2 Flujos de energía en la red ferroviaria en CC



## 2.4 CIRCUITO DE RETORNO

Como su propio nombre indica, el circuito de retorno es la parte que cierra el circuito eléctrico de tracción después de que la corriente pase por los motores del tren.

Con este circuito de retorno hay que tener especial cuidado, hay que realizar unos exhaustivos estudios de las tierras por las que discurre el trazado del ferrocarril, además de tener especial cuidado para que esta electricidad que circula por el retorno no nos interfiera en otro tipos de señales muy importantes para la seguridad del tránsito de los ferrocarriles, puesto que estas señales pueden tener interferencias en las señales electrónicas al ser estas últimas muy sensibles a perturbaciones eléctricas.

Para poder cerrar el circuito eléctrico, la electricidad una vez que ha salido de la subestación de transformación y ha pasado por la catenaria o tercer rail hasta los motores del tren en movimiento, necesitamos que esa electricidad vuelva a la subestación para poder hacer que el tren funcione, ese retorno de la electricidad es un proceso complicado.

Como parte del circuito de retorno tomaremos los cables de salida de los motores de tracción, estos cables unen los motores a las llantas del ferrocarril, para derivar la electricidad a los raíles de la vía mediante los cuales, en el caso de los trenes alimentados en corriente continua, la electricidad retornara a la subestación de tracción.

En el caso de los trenes alimentados en corriente alterna, hay que tener en cuenta los 2 tipos de alimentación de la catenaria que existen, puesto que en cada uno de ellos el retorno se realiza de una manera distinta.

En el caso de los sistemas 1x25kV (Fig. 2.4.1) el retorno se lleva a cabo por el mismo medio que los sistemas alimentados en corriente continua.

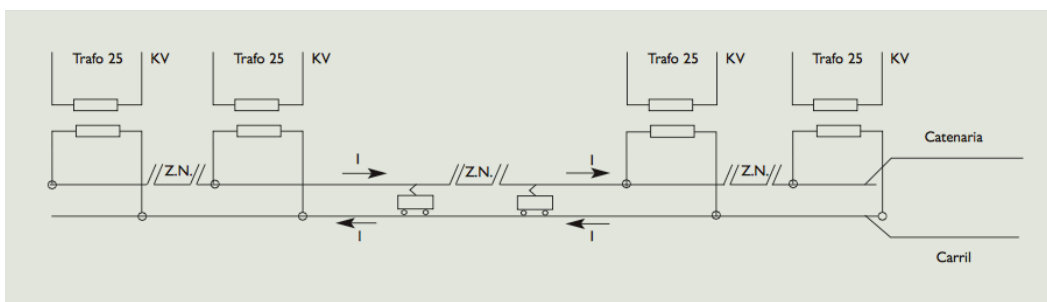


Fig. 2.4.1 Esquema alimentación sistema 1x25kV

En el caso del sistema de alimentación 2x25kV, el circuito de retorno es un poco más complejo, puesto que hay que tener en cuenta que los retornos a las subestaciones solo se hacen por los raíles de la vía, en el caso de que el tren este cercano a una de las subestaciones.

Cuando el tren se encuentra entre 2 subestaciones alejadas, el retorno se realiza mediante un conductor denominado cable de retorno, el cual discurre paralelo a la catenaria apoyado en la parte trasera de los postes metálicos de la misma (Fig. 2.4.2)



Fig. 2.4.2 Cable de retorno catenaria CA

Para este caso los transformadores son de 50kV y el retorno se hace por un feeder negativo o cable de retorno (Fig. 2.4.3)

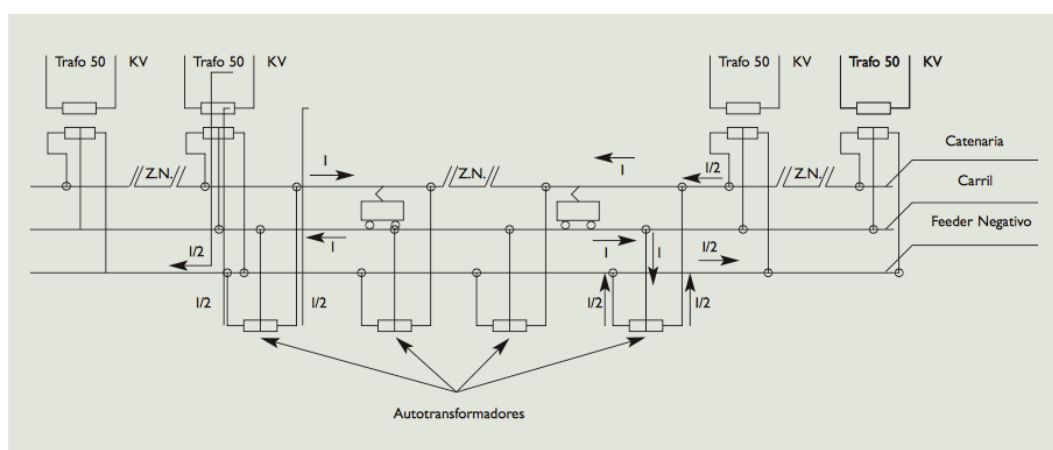


Fig. 2.4.3 Esquema alimentación sistema 2x25kV





### 3. HISTORIA DE LOS MOTORES EN EL FERROCARRIL

La andadura del ferrocarril eléctrico tuvo su inicio en un prototipo de tren diseñado por el escocés Robert Davison en 1837, en el cual la energía eléctrica necesaria por el motor eléctrico era obtenida de una serie de celdas galvánicas montadas sobre el propio tren, este prototipo se convirtió en una realidad en 1841 siendo una gran locomotora llamada Galvani, el sistema de alimentación no era ajeno al propio tren, lo cual hizo que este sistema no tuviese gran futuro puesto que la limitadísima capacidad y corriente suministrada por sus baterías, no hacía viable el proyecto y su paso por la historia paso casi inadvertido.

A partir de este momento, se empezaron a desarrollar locomotoras eléctricas con sistemas de tracción cuyos motores eléctricos estaban abastecidos por electricidad producida fuera de la propia locomotora, mediante el desarrollo de unos sistemas de captación de la energía eléctrica. Lo cual hace que la denominada guerra de corrientes entre el predominio de la corriente alterna o de la corriente continua, marcaba fuertemente el sistema de tracción que se desarrollaba a lo largo de la historia.

Lo que se podría denominar como primer tren eléctrico debido a que el anterior caso fue de escaso éxito, sería el diseñado por Werner Von Siemens en 1879 en Berlín, el cual estaba impulsado por un motor de 2,2kW y constaba de locomotora más 3 coches de pasajeros, dicho tren recorría un trayecto circular de 300m a una velocidad máxima de 13km/h. El sistema de alimentación eléctrico era mediante un tercer riel instalado en el centro de la vía el cual recibía la electricidad desde una estación compuesta por una dinamo que estaba al lado del recorrido.

En 1881 se inauguraba la primera línea de tranvía en Alemania diseñada por Werner von Siemens, y casi al mismo tiempo se empezaban en otras ciudades del mundo a utilizar este tipo de locomotoras para el transporte interurbano, como es el caso de Brighton (Gran Bretaña) 1883, Richmond (U.S.A) 1888.



Estos desarrollos aparecieron en gran parte por la aparición de túneles dentro de las grandes urbes y el transcurso de los medios de transporte por estrechas calles, lo cual imposibilitaba el uso de las locomotoras de vapor en los núcleos urbanos debido a sus grandes humaredas, haciendo por lo tanto inviable un desarrollo del transporte adecuado dentro de las propias ciudades.

Todos estos ferrocarriles se instauraron mediante la alimentación en corriente continua, puesto que en ese momento era la corriente que predominaba, aunque no siempre fue así, puesto que en los últimos compases del siglo XIX se inició la lucha entre corriente alterna y corriente continua.

En 1881 Edison fundador de General Electric apostaba por una corriente continua, desarrollada para los sistemas de alumbrado de las ciudades, aunque poco adecuada para responder a las características necesarias para el transporte, puesto que la tensión en aquel momento de la corriente continua eran 110V lo cual hacía que la transmisión a largas distancias fuese muy costosa y se produjesen grandes pérdidas.

En 1886 George Westinghouse fundador de Westinghouse Electric, un rico empresario, pero sin muchos conocimientos de la materia, contrato a Nikola Tesla el cual apostaba por otro tipo de corriente, la corriente alterna, para competir contra la General Electric de Edison.

La doctrina de Tesla apostaba por la corriente alterna basándose en que las pérdidas por calor en una línea eléctrica se basaban en la tensión de transmisión de la electricidad, por lo tanto, elevando la tensión eléctrica en una línea se tendrían menos pérdidas, algo que la corriente continua en aquella época tenía muy difícil, pero que la corriente alterna podía conseguir con un simple transformador eléctrico.

A partir de esta guerra de corrientes y como todos sabemos hoy en día la corriente alterna es la que tiene supremacía en los sistemas eléctricos mundiales.

De esta guerra derivó que en 1894 un ingeniero húngaro llamado Kalman Kando desarrollase los primeros motores en corriente alterna trifásicos de alto voltaje y los generadores necesarios para las locomotoras eléctricas.





La primera electrificación se produjo en 1895 en Baltimore (U.S.A) en un trecho de 6,4km de la línea que unía Baltimore con New York que requería de unos túneles para la ejecución del trayecto, por lo cual acoplaron 3 unidades eléctricas al tren de vapor, empleándolas únicamente en el paso de los túneles.

En Europa se comenzaron a emplear estos ferrocarriles en zonas de montaña, donde el empleo de carbón por su difícil orografía fuese complicado y donde la energía hidráulica fuese fácilmente obtenible, estando hoy en día por ejemplo el 100% de las líneas suizas electrificadas.

Los 106km de la línea Valtelina (Italia) en 1902, alimentados a 3kV y 15Hz fueron los primeros en conseguir que una línea entera estuviese electrificada en el mundo.

En la década de 1920, había una disputa entre los 3 tipos de sistemas de corrientes en la cual hubo multitud de ensayos para ver cuál de ellas se imponía al resto, los 3 sistemas tenían en común el sistema de alimentación aéreo, puesto que nos daba mucha mayor facilidad de transmisión en campo a través.

Uno de los sistemas constaba de tensiones de hasta 3000V en corriente continua, mientras que los otros 2 sistemas en disputa eran de corriente alterna, pero con la diferencia de que uno de ellos apostaba por la corriente alterna trifásica con tensiones entre 5 - 8kV con una frecuencia entre 15 - 50 Hz, mientras que la otra opción era corriente alterna monofásica con tensiones hasta 15kV y frecuencias de 15 - 25Hz.

Un avance importante fue la construcción en 1923 de la primera locomotora con un convertidor de fase incluido, lo cual conseguía alimentar un motor trifásico mediante una línea monofásica.

Inmersos ya en pleno siglo XX en Europa se iniciaba una gran evolución de las locomotoras eléctricas las cuales cada vez eran menos pesadas, ms potentes, y por lo tanto más rápidas, como es el caso de la locomotora francesa CC7107 que el 29 de marzo de 1955 alcanzo la velocidad de 331 km/h.



En España la primera línea electrificada está en disputa entre el tramo Gergal - Santa Fe (Almería) y el tramo Pamplona - Sangüesa ambos en 1911.

El desarrollo de los sistemas electrónicos de control permitió la reducción del tamaño de los motores pudiéndose establecer en los bogíes de los coches motores.

Aunque hubo una época en la cual la dieselización de las locomotoras dejó un poco de lado toda la evolución eléctrica, pero en la década de 1980 la aparición en escena de la alta velocidad revivió la electrificación de las líneas.

El shinkansen (Japón), TGV (Francia), Siemens (Alemania) y Talgo (España), fueron los grandes precursores de la alta velocidad y las empresas punteras en tecnología en la actualidad.



## 4. CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES ACTUALES

De aquí en adelante vamos a ver los motores que principalmente se emplean en los ferrocarriles de media y larga distancia en el mundo, centrándonos principalmente en lo relacionado a la alta velocidad, puesto que es el medio de transporte por el cual se está apostando para hacer una gran revolución en el transporte de pasajeros.

Vamos a agruparlos en 3 grupos, motores síncronos, asíncronos y de corriente continua, puesto que son los que actualmente se emplean en los ferrocarriles del mundo.

Primeramente veremos una breve descripción de cada uno de ellos, apuntando en que modelos actuales de la red ferroviaria española se emplean, para adentrarnos ya en materia con los fundamentos teóricos de cada uno de ellos, veremos además los distintos sistemas que se emplean para adecuar la corriente al tipo de motor para su funcionamiento, viendo los transformadores de los que se compone cada tren, veremos también todo lo relacionado con los sistemas de regulación de velocidad del tren, así como también veremos los aparatos utilizados para la alimentación de los servicios auxiliares del propio tren.



Tren Alta Velocidad en uno de los viajes





## 4.1 MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

El motor síncrono trifásico es un motor el cual tanto en el ámbito ferroviario como en el ámbito industrial tiene utilidades muy específicas, dado a que normalmente se emplea en acciones que siempre requieran de una velocidad fija de funcionamiento. En la actualidad prácticamente la totalidad de su utilización está destinada a su empleo como generador de energía eléctrica, dado que tiene muy buena estabilización de velocidad de funcionamiento y puesto que, en el caso de sufrir una variación de la velocidad del rotor, puede sufrir un desenganche natural y pararse, protegiéndonos así a las propias redes de transmisión.

Actualmente está en desuso en el ámbito de la tracción ferroviaria, aunque tuvo una gran importancia en los inicios de la alta velocidad española, sobre todo por ser el motor empleado en el primer modelo de AVE en España, este motor fue el empleado en la Serie S - 100 de RENFE que cubría la ruta Madrid - Sevilla en el año 1992 con motivo de la exposición mundial que tuvo lugar en la capital andaluza.

El motor montado en estos trenes era un motor síncrono trifásico autopilotado, la peculiaridad del autopilotado es que el propio motor dispone del regulador de frecuencia y la electrónica necesaria para controlarlo.

### 4.1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El motor síncrono trifásico, es un motor de corriente alterna en el cual la velocidad de rotación del eje es proporcional a la frecuencia de la corriente en su estator y el número de polos de los que disponga el motor.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

*f = frecuencia*

*p = pares de polos del motor*

*n = velocidad del motor*



Vamos a ver primeramente el motor síncrono trifásico tal cual, sin ningún tipo de electrónica de potencia, para hacernos una idea del funcionamiento del motor y después le aplicaremos la electrónica de potencia necesaria para que el motor funcione por sí solo (sin necesidad de motor de lanzamiento).

Si queremos hacer funcionar un motor síncrono trifásico, necesitaremos un sistema de arranque para poder ponerlo en funcionamiento en un principio, puesto que por sí solo no es posible por lo que veremos más adelante.

### **4.1.2 METODOS DE ARRANQUE Y CONTROL**

El principal método utilizado en un inicio, antes de la aparición en escena de la electrónica de potencia, era el de la maquina lanzadera, esta máquina no es más que un motor exterior que realiza el giro inicial del rotor del motor síncrono, el cual llevará nuestro motor a una velocidad próxima a la de sincronismo, momento en el cual se podrá enganchar el motor síncrono trifásico a la red, despojándolo de la maquina lanzadera, y quedando el motor síncrono en funcionamiento por sí solo.

La utilización de la maquina lanzadera en la puesta en marcha de un motor síncrono es de vital importancia, puesto que, sin ella, el motor síncrono no sería capaz de iniciar el giro del rotor. Esto es debido a que el motor síncrono trifásico consta de un estator inducido alimentado en corriente alterna trifásica y un rotor inductor el cual es alimentado en corriente continua mediante unas escobillas y unos anillos de frotación y siendo el que marca el número de polos de la máquina.

Al alimentarse el devanado del rotor con corriente continua, se produce un campo magnético fijo, enfrentándose con los campos magnéticos del estator. Los polos del rotor estarán sometidos a atracciones y repulsiones rápidas por parte de los polos del estator, pero no habrá movimiento de giro en todo caso solo un movimiento vibratorio, y el rotor estará bloqueado.

Cuando se le aplica la maquina lanzadera, llevando el motor a una velocidad muy cercana a la de sincronismo, hacemos que el rotor y estator enfrenten los polos opuestos realizándose una especie de enganche eléctrico, haciendo que el rotor ya pueda girar sin ayuda de la maquina lanzadera.



Esto que acabamos de explicar es lo que nos condiciona el uso de este tipo de motores, más aún en la tracción ferroviaria. Antes de la aparición de los motores autopilotados, como es el que monta la Serie S - 100 que mas adelante veremos, este tipo de motores tenía el peligro de sufrir un desenganche eléctrico, parándose el motor en plena utilización.

Cuando el motor estaba girando a velocidad nominal con el par motor nominal, si el par resistivo aumentaba considerablemente, por la llegada de una pendiente por ejemplo, se producía un efecto en el cual el par motor llega un momento en el que no puede hacer frente a esa demanda del par resistivo y comienza a producirse un deslizamiento entre los campos, el cual consiste en que el campo giratorio del estator y el del rotor no giraban en concordancia, por lo tanto se produce un desenganche eléctrico de ambos campos, parándose el motor.

Otro de los métodos de arranque empleados antes de la aparición de la electrónica de potencia era el denominado como arranque con devanados de amortiguamiento.

Este arranque consiste en que el rotor del motor síncrono tiene una modificación que se produce en el momento de su fabricación y tan solo consta en incrustar unas barras en el rotor cortocircuitando los bobinados del mismo, haciendo que el rotor ahora adopte una configuración de jaula de ardilla, asemejándose así al rotor de un motor asíncrono.

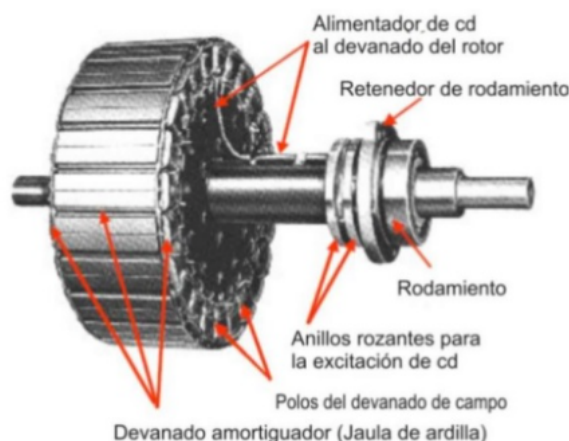


Fig. 4.1 Rotor motor síncrono con devanados de amortiguación



Otro de los métodos de arranque de estos motores es el denominado arranque automático, el cual para que quede más clara su explicación vamos a ver en este esquema y vamos a explicar su proceso paso a paso.

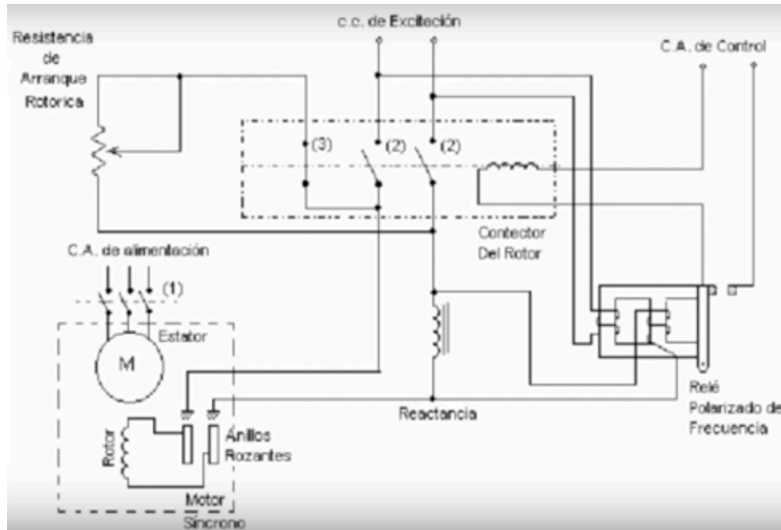


Fig. 4.2 Esquema arranque automático motor síncrono

Como vemos en el circuito disponemos de un relé polarizado de frecuencia, que es el que se va a encargar de hacernos la maniobra de arranque.

Primero se cierra el interruptor 1 que se encuentra alimentando el estator del motor, en el instante de arranque en el rotor tenemos la frecuencia de la red al igual que en el estator, pero el circuito del rotor alimenta una resistencia de arranque para que esta absorba la tensión elevada de las bobinas de los polos, apareciendo una diferencia de potencial en los bornes de la reactancia esta diferencia de potencial alimenta una bobina del relé polarizado, teniendo los contactos del mismo abiertos, el motor arranca como motor asíncrono debido a la jaula de ardilla del rotor, a medida que aumenta la velocidad la frecuencia del rotor disminuye por tanto haciendo que el potencial de la reactancia disminuya, hasta que esta diferencia de potencial no permite tener los contactos del relé abiertos.

Esto sucede a una velocidad muy próxima a la de sincronismo. Al cerrarse este contacto se alimenta el contactor del rotor cerrándose el interruptor 2 y quedando el motor alimentado en corriente continua.





Hasta ahora los métodos de arranque vistos solo nos permiten la maniobra de arranque del motor, pero la velocidad a la que girará el mismo será la velocidad marcada por la fórmula vista al inicio de este apartado que dependerá de la frecuencia de la red y del número de polos que tenga la máquina.

Con la aparición en escena de la electrónica de potencia, se permite realizar un cambio que hasta ese momento nos era desconocido, puesto que como hemos visto en la fórmula del inicio del punto, para la obtención de la velocidad de sincronismo solo podemos actuar en 2 parámetros, uno de ellos es el número de polos del que dispusiese la máquina, sobre el cual siempre se actuaba para hallar la velocidad de sincronismo, algo que no nos permitía maniobra una vez construido el motor. El otro parámetro sobre el que podemos actuar es sobre la frecuencia de la red, lo cual hasta ese momento era imposible. Pero a partir de ahora se nos permitía la modificación de esa frecuencia con la que alimentábamos el estator del motor, haciendo que se pudiese variar la velocidad del motor en pleno funcionamiento.

La modificación de la frecuencia aparte de para la regulación también nos permite el arranque del motor por lo tanto este es el último tipo de arranque que nos faltaba de ver de los que puede tener un motor síncrono trifásico.

Tenemos dos tipos de regulación de velocidad por variación de la frecuencia, la primera de ellas de la cual podemos ver el esquema a continuación es la denominada en lazo abierto.

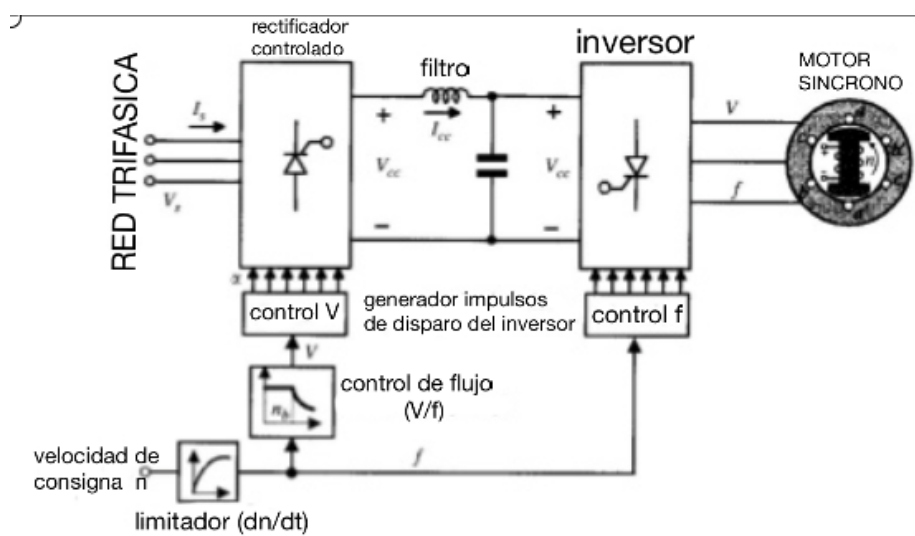


Fig. 4.3 Esquema control lazo abierto



Este es un esquema sencillo de aplicar, siendo el esquema de control similar al de los motores asíncronos. El control se realiza mediante un rectificador controlado, filtros, un inversor y un generador de pulsos de disparos de un inversor, el cual realiza la tarea de la regulación en si misma gestionando el tiempo entre los pulsos, haciendo que se modifique la frecuencia que le llega al motor.

Otro de los tipos de regulación de velocidad por variación de frecuencia es el realizado en lazo cerrado o autopilotado, este es el sistema que lleva la serie S – 100 de AVE, a continuación, veremos el esquema y su funcionamiento.

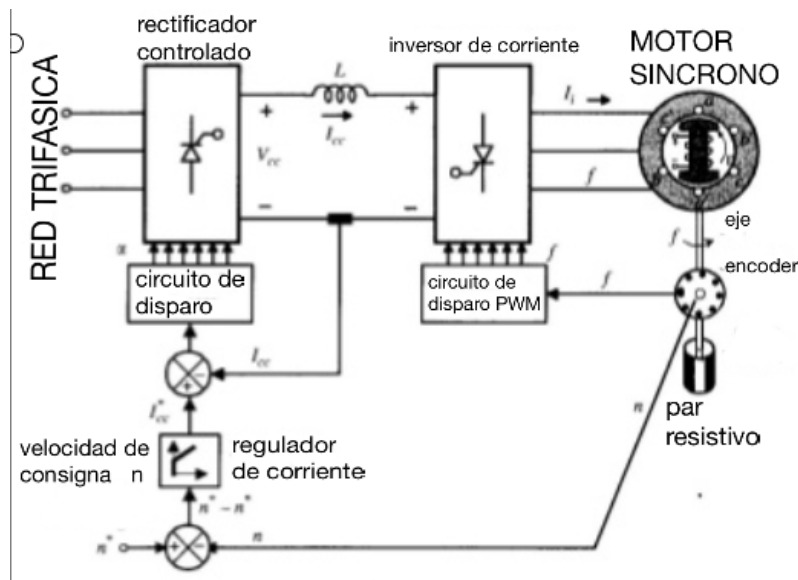


Fig. 4.4 Esquema control lazo cerrado

Para evitar la pérdida de sincronismo cuando el par resistivo es muy alto o hay variaciones muy bruscas se necesita un lazo cerrado para que el propio motor adapte la frecuencia a sus necesidades, puesto que la propia velocidad del rotor es la que regula la frecuencia del estator. De ahí que este sea el sistema empleado en el ferrocarril, puesto que en un momento dado nos podemos encontrar una pendiente habiendo un aumento brusco del par resistente.

Debemos tener un sensor que nos permita medir el movimiento del rotor (encoder) cuya información se utilizara para la corrección de frecuencia. La velocidad del rotor corrige automáticamente la frecuencia del estator.

Se dispone de 2 convertidores, uno al principio de la línea, que al igual que en el caso del lazo abierto es un rectificador controlado que alimenta un bus intermedio de corriente continua, al final del mismo se sitúa el inversor que convierte la corriente continua en alterna trifásica para su inyección en el estator del motor. El encoder que se coloca en el eje del motor, da una señal indicativa de la posición del rotor que se procesa en la lógica de control y se utiliza para generar los impulsos de disparo de los tiristores del inversor.

De este modo, cualquier variación en la velocidad del rotor debida a un cambio de carga, modificara inmediatamente la frecuencia de encendido de los tiristores y se ajustara la frecuencia de alimentación del estator al valor correcto para evitar la pérdida de sincronismo.

### 4.1.3 MODELOS QUE LO MONTAN

El motor síncrono trifásico como ya hemos mencionado más atrás, es el motor empleado por el primer tren de alta velocidad en España (Fig. 4.1.1), empleado para cubrir la ruta Madrid – Sevilla con motivo de la exposición internacional de 1992.



Fig. 4.1.1 Renfe Serie S – 100 línea Madrid – Sevilla año 1992



Los trenes Renfe Serie S – 100 comenzaron a circular en abril de 1992, son una evolución de los TGV – Atlantique franceses, con unas modificaciones para su adaptación a las necesidades españolas, sobre todo en cuando a disipación de las ondas de presión que se crean en el paso por túneles.

La composición mínima de este tren (Fig. 4.1.2) está compuesta por 2 cabezas tractoras, 2 remolques extremos y 6 remolques intermedios (Mc – Re – 6Ri – Re – Mc) pudiéndose acoplar en serie 2 trenes completos.

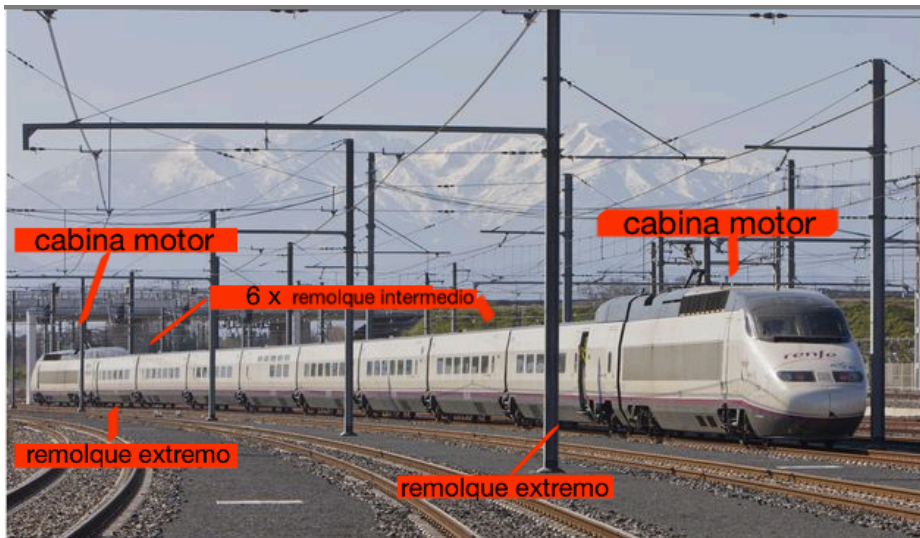


Fig. 4.1.2 Composición mínima Serie S – 100

Cada una de las cabezas tractoras dispone de todo el material eléctrico necesario, partiendo de los pantógrafos que captan la corriente de la catenaria, además de todos los elementos necesarios tanto para la tracción de los motores como los aparatos de regulación de los mismos. Cuenta también con todo lo necesario para el suministro a los elementos auxiliares, haciendo así que el resto de vagones del tren quede el espacio totalmente utilizable para los pasajeros.

En la Fig. 4.1.3 vamos a ver la disposición de toda la aparatura citada anteriormente y veremos además como cada cabina motor cuenta con 2 bloques motores idénticos para cada bogie, un bloque auxiliar, un bloque común, además de un transformador.

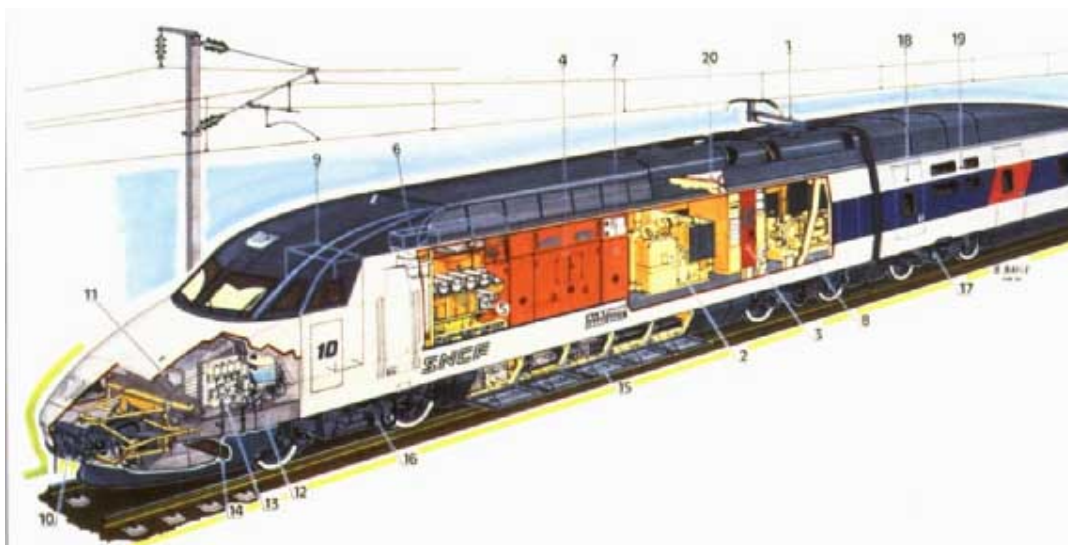


Fig. 4.1.3 Elementos de control y tracción eléctrica Serie S – 100

A continuación, vamos a citar cada uno de los elementos que se ven en la Fig. 4.1.3

- 1- Pantógrafo (en este modelo al ser el TGC – A original solo se ve uno)
- 2- Transformador principal
- 3- Interruptor principal y filtro de línea
- 4- Módulo de control del motor de tracción
- 5- Refrigeración para semiconductores
- 6- Resistencias de frenado
- 7- Fuentes de alimentación auxiliares
- 8- Compresor principal
- 9- Equipos informáticos y de seguridad
- 10- Acoplador automático
- 11- Zona de deformación frente a impactos
- 12- Estructura de alta resistencia
- 13- Control de frenado
- 14- Receptores de código situación del circuito
- 15- Cajas para equipos
- 16- Bogie de tracción
- 17- Bogie remolque
- 18- Compartimento de equipaje
- 19- Zona de pasajeros
- 20- Paneles de aleación ligera



La Serie S - 100 cuenta con un total de 8 motores síncronos trifásicos autopilotados de 1100 kW de potencia cada uno en régimen continuo lo que alimentados a 25 kVca nos proporcionarían una potencia total de 8800 kW, los cuales giran a 4000 revoluciones por minuto llevando al tren a alcanzar los 300 km/h permitidos en las vías españolas, aunque en la actualidad posee el record de velocidad de 574,8 km/h.

Como este tren en el caso del modelo español es bi-tensión tanto de 25 kv a 50 Hz como de 3000 Vcc, el conjunto de motores alimentados a 3000 Vcc proporcionarían una potencia de 5400 kW.

Como hemos visto en el punto 16 de la Fig. 4.1.3 los motores de tracción y sus reductoras de engranajes están fijados al bastidor de la cabeza tractora correspondiente, haciendo que cada uno de los dos bogies de la cabeza tractora tenga 2 motores (Fig. 4.1.4 - Fig. 4.1.5).



Fig. 4.1.4 Bogie motor TGV - A

### Architecture du bogie moteur

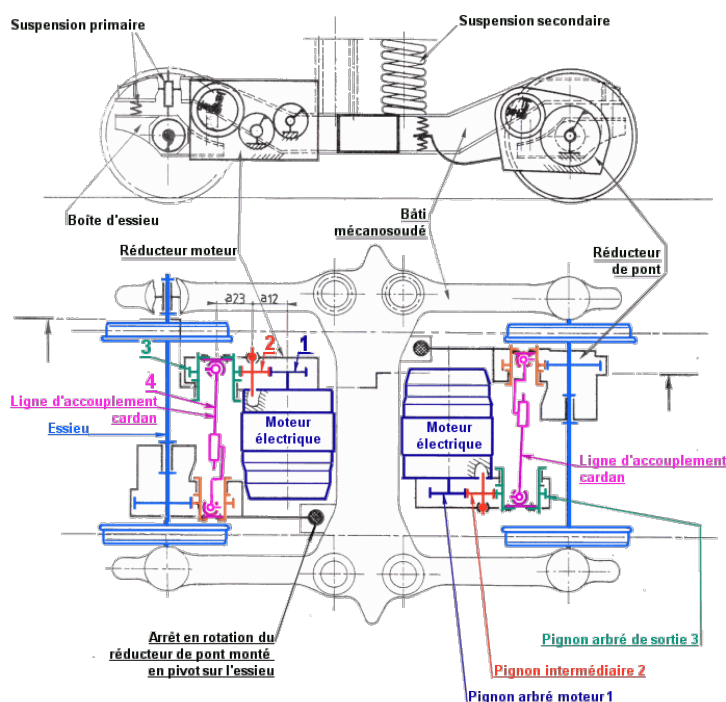


Fig. 4.1.5 Esquema partes bogie motor TGV – A

Como podemos apreciar en la Fig. 4.1.4 cada bogie tiene 2 motores dispuestos de manera paralela al eje al cual transmite la potencia, dando cada motor potencia a uno de los ejes del bogie mediante una reductora, estos motores se disponen en oposición para el mejor reparto del peso dentro del bogie, puesto que, si estuviesen dispuestos los 2 hacia el mismo lado, esa parte del bogie tendría mucho más peso que la contraria, haciendo que en las curvas esto fuese un gran problema.

Estos trenes tienen la particularidad como ya hemos visto anteriormente de ser bi-tensión, puesto que después de la remodelación llevada a cabo en el año 2009 se les incluyó esta característica, para que además de la línea Madrid – Sevilla, pudieran realizar la ruta del corredor del mediterráneo, pudiendo ser alimentados además de a la tensión inicial de 25kV 50Hz a la tensión de 3000 Vcc de la que dispone la red del mediterráneo.



Cada motor está asociado a un ondulator de corriente con tiristores, el estator de los motores incluye 3 arrollamientos montados en estrella desplazados  $120^\circ$  entre sí, alimentados mediante el conmutador estático u ondulator, constituido por 6 tiristores.

Para que el motor gire en el sentido deseado de deben alimentar los arrollamientos del estator con la corriente en el orden conveniente, para eso se deben alimentar los tiristores con un determinado orden, para que el campo giratorio sea el correcto, estas conexiones y desconexiones se denominan conmutación.

La conmutación se realiza mediante captadores magnéticos que identifican y transmiten la posición del rotor a la caja de mando de los tiristores, esta maniobra se emplea hasta llegar al 30% de la velocidad nominal del motor para evitar los golpes debidos a la interrupción de la alimentación, es la llamada conmutación asistida.

Una vez superado ese rango del 30% de la velocidad nominal, la propia inercia del motor al girar, hace que no se produzcan esos golpes por la conexión y desconexión, las fuerzas electromagnéticas transmitidas a la caja de mando permiten encender los tiristores en el momento oportuno, mientras que la extinción se vuelve natural, teniendo entonces una conmutación natural.

La regulación de tensión de los motores de tracción de cada bogie motor cuando estamos alimentando a 25 kV se realiza mediante 2 puentes rectificadores mixtos con tiristores y diodos, mientras que cuando el tren esta alimentado a 3000 Vcc la regulación se realiza mediante un chopper con tiristores GTO.

Para la captación de la corriente de la catenaria, cada cabeza tractora dispone de dos pantógrafos, uno para la alimentación a 25 kV y otro para su alimentación a 3000 Vcc.

La regulación de la fuerza de los motores de tracción se logra mediante la variación de la intensidad tanto en el estator como en el rotor del motor, ajustando los tiempos de desbloqueo de los elementos electrónicos de control.

La intensidad en el rotor, el cual esta alimentado a 500 Vcc como hemos visto en el apartado anterior de principio de funcionamiento, está regulada por un chopper de excitación y es proporcional a la intensidad que recorre el estator.





Para la alimentación de los equipos auxiliares eléctricos el transformador principal dispone de un arrollamiento secundario auxiliar, para ir a un puente rectificador en la alimentación a 25 kV, o en el caso de alimentación a 3000 Vcc, la alimentación se realiza a través de la catenaria directamente pasando por unos choppers auxiliares reductores que suministran la tensión en continua de 500 V.

Todos los equipos auxiliares de la rama están acoplados a 2 líneas de 500 Vcc por medio de una puerta de diodos, lo que permite su funcionamiento aun quedándose fuera una de las dos líneas.



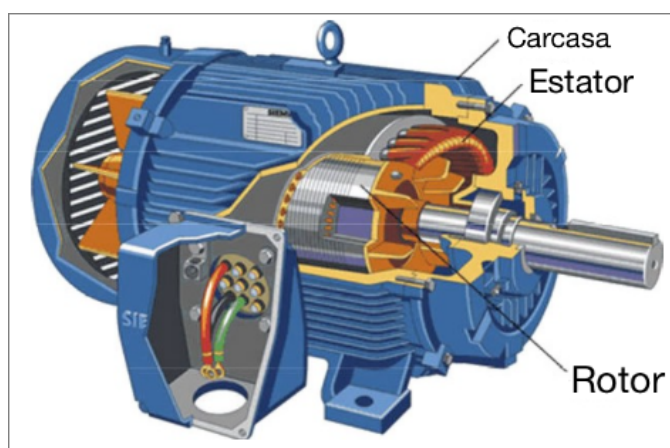


## 4.2 MOTOR ASINCRONO TRIFASICO

Otro de los motores empleados en la industria del ferrocarril a nivel tanto nacional como internacional es el motor asíncrono trifásico, mucho más extendido que el anterior que hemos visto, predominante hoy en día en los trazados de alta velocidad alimentados a 25kV 50 Hz, este motor es el predominante en todo tipo de tramos actuales, debido a las ventajas de potencia, mantenimiento y ligereza que presenta. Este motor hoy en día es empleado tanto en tramos alimentados en corriente alterna, como en tramos alimentados en corriente continua desbancando cada vez más al motor de corriente continua que veremos más adelante.

### 4.2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los motores asíncronos trifásicos son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. El campo inductor esta generado por corriente alterna. Generalmente, el inductor está en el estator y el inducido en el rotor.



Son motores que se caracterizan por que son mecánicamente sencillos de construir, lo cual los hace muy robustos y sencillos, apenas requieren mantenimiento, son baratos y en el caso de los motores trifásicos como son los que montan los trenes, no necesitan arrancadores (arrancan por si solos al conectarles a la red trifásica de alimentación) y no se ven sometidos a vibraciones por el efecto de la transformación de la energía eléctrica en mecánica, ya que la potencia instantánea absorbida por una carga trifásica es constante e igual a la potencia activa.



Estas son las principales ventajas que hacen que sea ampliamente utilizado hoy en día tanto en ferrocarril como en la industria en general.

Como inconveniente podemos mencionar que son motores con bajo par de arranque con una zona inestable de trabajo y cuyo control de velocidad en amplios rangos es complejo.

A continuación, vamos a ver el modo de funcionamiento de este tipo de motores eléctricos.

Para entender mejor el modo de funcionamiento del motor asíncrono trifásico vamos a hacer un pequeño símil.

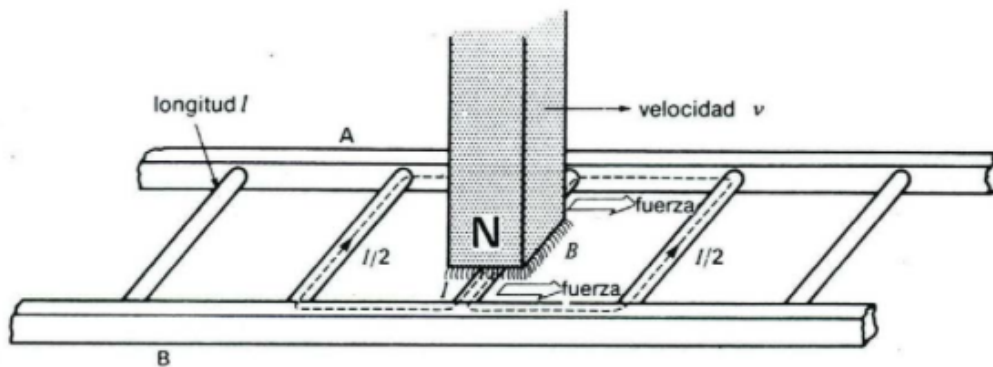


Fig. 4.2.1 Funcionamiento motor asíncrono

Supongamos que tenemos un imán moviéndose a lo largo de una escalerilla conductora como vemos en la Fig. 4.2.1. Este imán en su desplazamiento a velocidad  $v$  provoca una variación del flujo sobre los recintos cerrados que forman los peldaños de la escalerilla.

Esta variación de flujo genera una f.e.m. tal que:

$$e = - \frac{d\phi}{dt}$$

la cual a su vez hace que por dichos recintos circule una corriente  $i$ , la cual provoca la aparición de una fuerza sobre la escalerilla definida por la fórmula.

$$\vec{f} = i \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$$

que hace que la escalerilla se desplace en el mismo sentido que lo hace el imán.



A de tenerse en cuenta que la escalerilla nunca podrá desplazarse a la velocidad del imán lo denominaremos deslizamiento, por dos razones fundamentales.

La primera por existir unas pérdidas por rozamiento que se lo van a impedir y la segunda, que en el supuesto caso de que se desplazase a la misma velocidad que el imán, la variación de flujo sobre los recintos cerrados de la escalerilla sería nula, y por lo tanto la f.e.m inducida también sería nula al igual que la fuerza sobre la escalerilla.

Si se desea que la escalerilla se mueva en sentido contrario, solo debemos hacer que el imán se desplace en sentido contrario.

Una vez analizado este caso sencillo, vamos a analizar el motor asíncrono realmente.

Para seguir con el paralelismo del caso anterior, puesto que la escalerilla no es más que un rotor en jaula de ardilla el cual hemos estirado para hacer el símil. En este caso para conseguir el efecto que realiza el imán, un campo giratorio de amplitud y velocidad de giro constante, utilizaremos corrientes trifásicas equilibradas.

Como hemos mencionado anteriormente, el motor asíncrono trifásico no puede alcanzar por sí mismo la velocidad de sincronismo por lo tanto sufre un deslizamiento de la velocidad de giro del campo magnético del estator, con respecto a la velocidad del rotor.

Como podemos apreciar en la Fig. 4.2.2 en la cual vemos la evolución de las 3 corrientes en cada momento, vemos también la evolución de la corriente por cada polo del estator, y el punto verde que representa el movimiento del rotor, vemos que es menor que la velocidad de giro del campo magnético por el estator.

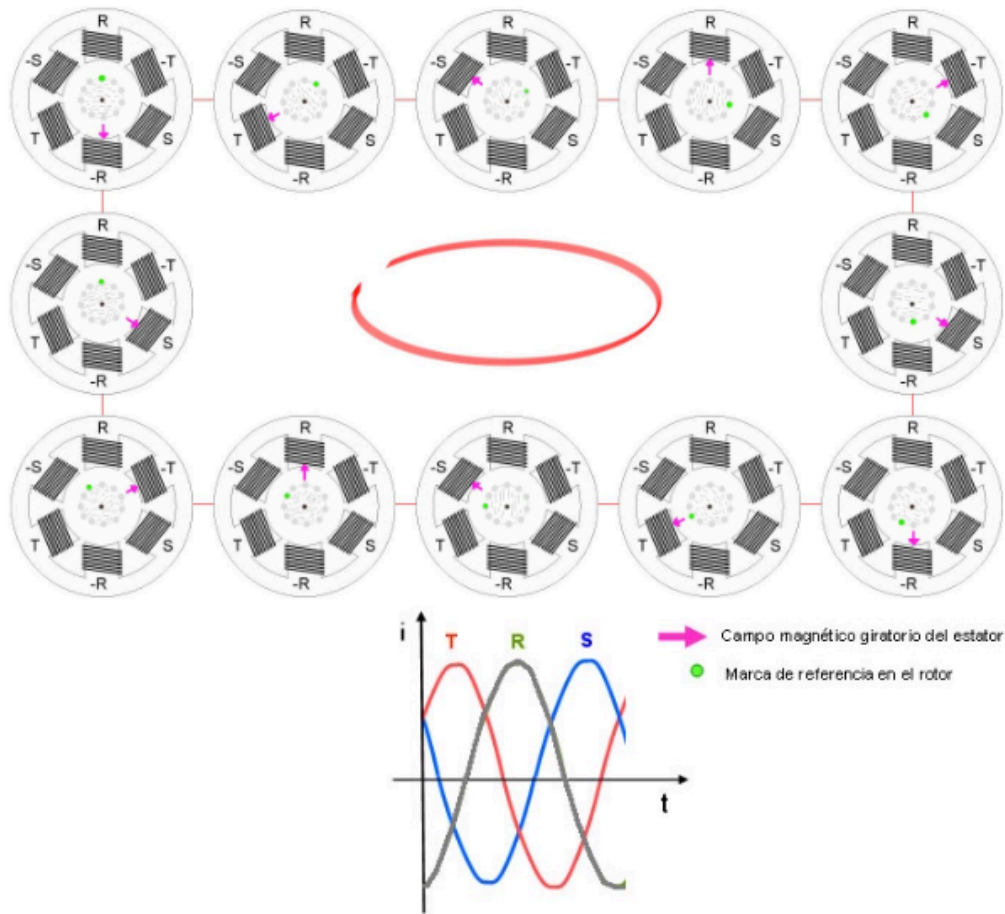


Fig. 4.2.2 Evolución de las corrientes y campos magnéticos

Es importante conocer el deslizamiento de un motor asíncrono puesto que al ser distintas las velocidades entre el campo magnético giratorio y el rotor, el voltaje inducido en el bobinado rotorico de un motor de inducción depende de la velocidad relativa del motor con relación a los campos magnéticos por eso vamos a ver como se calcula este deslizamiento.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \cdot 100 = \frac{n_s - n_m}{n_s} \cdot 100$$

donde:

$s$  = velocidad de deslizamiento en %

$\omega_s$  = velocidad angular de sincronismo en radianes por segundo

$\omega_m$  = velocidad angular del rotor en radianes por segundo

$n_s$  = velocidad angular de sincronismo en revoluciones por minuto

$n_m$  = velocidad angular del rotor en revoluciones por minuto



Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en términos de la velocidad de sincronismo y el deslizamiento mediante la siguiente fórmula.

$$n_m = n_e \cdot (1 - s)$$

en el motor asíncrono el deslizamiento suele ser de entorno a un 5%.

## 4.2.2 CLASIFICACION DE LOS MOTORES ASINCRONOS TRIFASICOS

Los motores asíncronos trifásicos se pueden clasificar atendiendo a varios criterios, como por ejemplo dependiendo del número de devanados en el estator, dependiendo del tipo de inducido. A continuación, veremos los distintos tipos dependiendo de la clasificación.

Según el número de devanados en el estator Fig. 4.2.3:



Fig. 4.2.3 Estator motor asíncrono trifásico

Monofásicos: tienen un solo devanado en el estator, se utilizan en aplicaciones tanto en el hogar como en la industria (bombas, ventiladores, lavadoras, electrodomésticos en general, pequeñas máquinas - herramientas...).



**Bifásicos:** tienen dos devanados en el estator. Estos devanados están desfasados entre si en el espacio  $\pi/(2P)$  siendo P el numero de pares de polos de la maquina asíncrona se suelen utilizar en aplicaciones de control de posición.

**Trifásicos:** tienen tres devanados en el estator. Estos devanados están desfasados entre si en el espacio  $2\pi/(3P)$  siendo P en numero de pares de polos de la maquina. Se suelen utilizar en aplicaciones industriales que requieren de mucha potencia como son maquinas - herramientas industriales (tornos, fresadoras) además en gruas, bombas, compresores, ventiladores industriales y por supuesto es el tipo de motor que emplean los ferrocarriles.

Vemos un pequeño esquema en la Fig. 4.2.4.

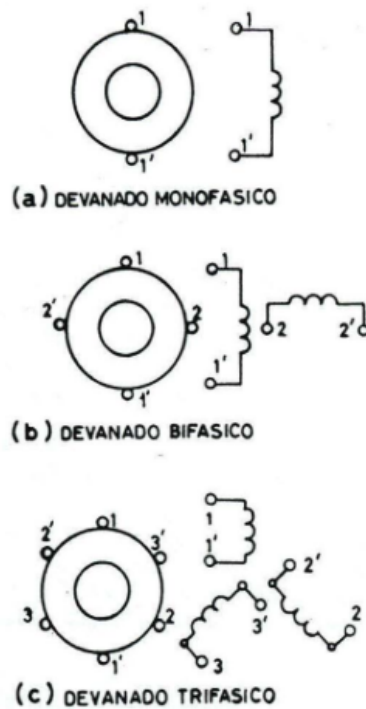


Fig. 4.2.4 Clasificación según el número de devanados en el estator.





Otra de las clasificaciones es según el tipo de inducido en este caso tendremos.



Fig. 4.2.5 Detalle rotor motor asíncrono trifásico

Rotor devanado: los devanados del rotor son similares a los del estator con el que está asociado. El número de fases del rotor no tiene por qué ser el mismo que el del estator, lo que si tiene que ser igual es el número de polos.

Los devanados del rotor están conectados a anillos colectores montados sobre el mismo eje Fig. 4.2.6 y Fig. 4.2.7.

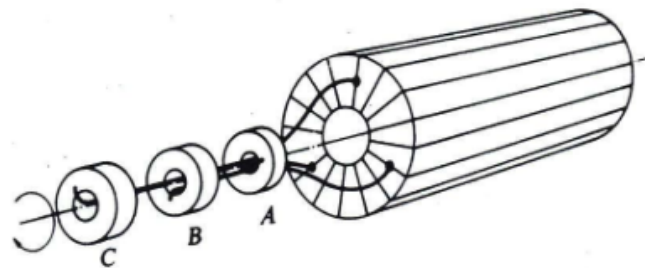


Fig. 4.2.6 Conexiones de los anillos colectores en el rotor bobinado



Fig. 4.2.7 Rotor bobinado con anillos colectores



Rotor en jula de ardilla: es el más utilizado. Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto, no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior Fig. 4.2.8 y Fig. 4.2.9.

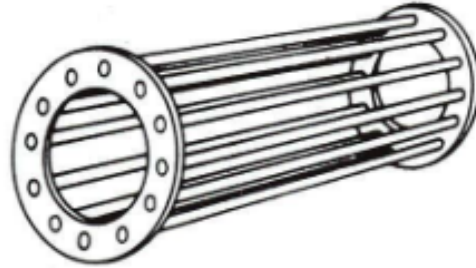


Fig. 4.2.8 Rotor en jaula de ardilla



Fig. 4.2.9 Rotor jaula de ardilla

Rotor en doble jaula de ardilla: el rotor de estos motores está constituido por dos jaulas, una externa de menor sección y material de alta resistividad y otra interna de sección mayor y material de baja resistividad. Ambas jaulas están separadas entre sí en cada ranura por medio de una delgada rendija que aumenta el flujo de dispersión en la jaula inferior. De este modo se consigue una jaula exterior de alta resistencia y baja reactancia y una jaula interior de baja resistencia y baja reactancia.

En el arranque (la reactancia domina sobre la resistencia pues  $f$  es grande) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula exterior (menor reactancia).

A la velocidad nominal (la resistencia predomina sobre la reactancia  $f$  es muy pequeña) la corriente fluye en su mayor parte por la jaula interior (menor resistencia).

Con todo esto se consigue que en el arranque la resistencia sea alta, lo que implica alto par de arranque y baja intensidad y a la velocidad nominal, como la resistencia es baja, se tiene buen rendimiento.

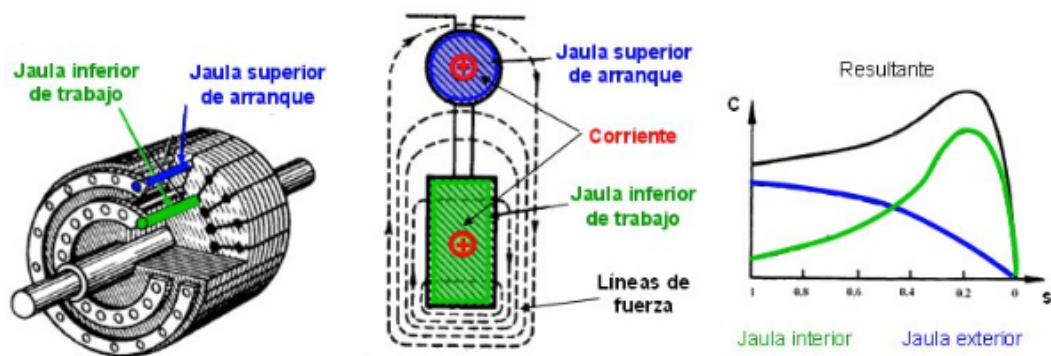


Fig. 4.2.10 Rotor de doble jaula de ardilla

Rotor de ranuras profundas: un efecto análogo al anterior se obtiene mediante un rotor de ranuras profundas, ocupadas por barras altas y profundas donde debido al efecto auto-inductivo y de Foucault, la corriente se distribuye de forma diferente en el arranque y en el funcionamiento de trabajo.

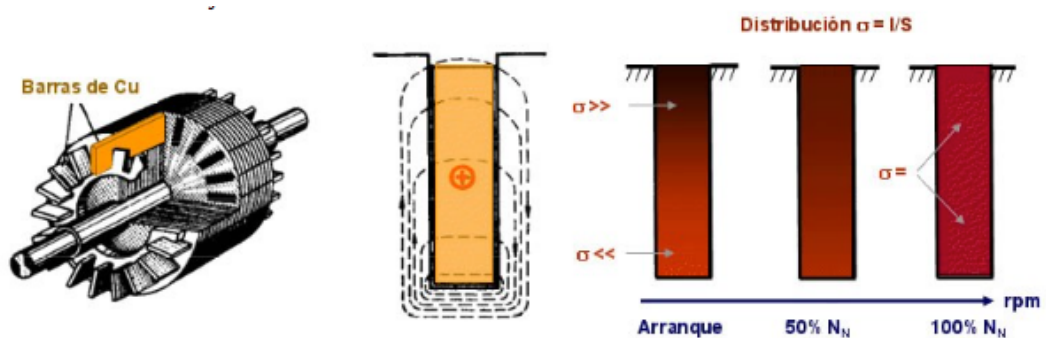


Fig. 4.2.11 Rotor de ranuras profundas

A continuación, vamos a ver una gráfica Fig. 4.2.12 con la comparación de la curva par – velocidad en los distintos rotores de jaula de ardilla anteriormente enunciados.

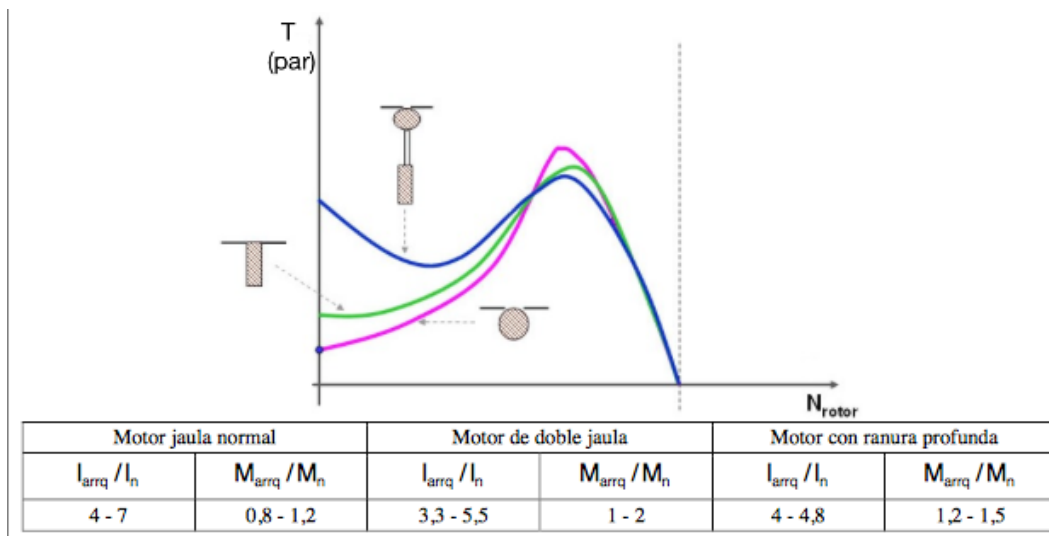


Fig. 4.2.12 Comparación curvas par velocidad de los distintos rotores en jaula de ardilla

### 4.2.3 Control de velocidad de un motor asíncrono trifásico

Hasta la llegada de los modernos controladores de estado sólido, los motores asíncronos trifásicos eran unas máquinas poco deseadas en las tareas para las cuales hacía falta un especial control de la velocidad de giro del motor, por eso como hemos visto anteriormente los motores síncronos eran los preferidos para esas tareas.

El rango típico del deslizamiento de un motor asíncrono trifásico está estipulado en máximo un 5% de la velocidad nominal del motor y la velocidad dentro de ese rango es difícil de estipular puesto que depende mucho del par resistivo que tenga que superar el motor, lo cual lo hace medianamente inestable para las tareas con una velocidad estricta.

Existen 3 técnicas para controlar la velocidad de un motor asíncrono trifásico la primera forma es actuando sobre el propio interior del motor, sobre la propia estructura constructiva. La segunda manera de controlar la velocidad, como pasaba en el caso del motor síncrono se puede actuar sobre la velocidad sincrónica del motor, bien cambiando la frecuencia de la red de alimentación del motor o bien cambiando el número de polos del motor, algo que explicaremos con más detalle a continuación. El tercer método de control de la velocidad es el control del deslizamiento del motor.



Para el control de la velocidad mediante el cambio de número de polos en el motor, existen dos métodos de realizarlo.

Método de los polos consecuentes: este método es antiguo, data de los últimos coletazos del siglo XIX entorno al 1897 y se basa en el hecho de que el número de polos en los devanados estáticos de un motor asíncrono se puede cambiar con facilidad en relación 2:1 con solo efectuar simples cambios en la conexión de las bobinas.

Al variar los polos, se produce un funcionamiento relativamente satisfactorio del motor, este método no es muy empleado puesto que se necesitan motores especiales los cuales son monofásicos o polifásicos de jaula de ardilla, denominados motores de inducción de velocidad múltiple.

Estos motores poseen devanados estáticos específicamente diseñados para la variación de polos mediante conmutación manual o automática, en que los diversos devanados estáticos primarios se conectan en combinación serie - paralelo pudiendo obtener velocidades sincrónicas dobladas o cuadruplicadas.

Como podemos ver en la Fig. 4.2.13 un motor asíncrono de 2 polos, cuando la conexión en una de las dos bobinas se invierte, los dos son polo norte y el flujo magnético retorna al estator en puntos intermedios entre las dos bobinas, los polos sur son llamados consecuentes y el devanado es ahora de 4 polos.

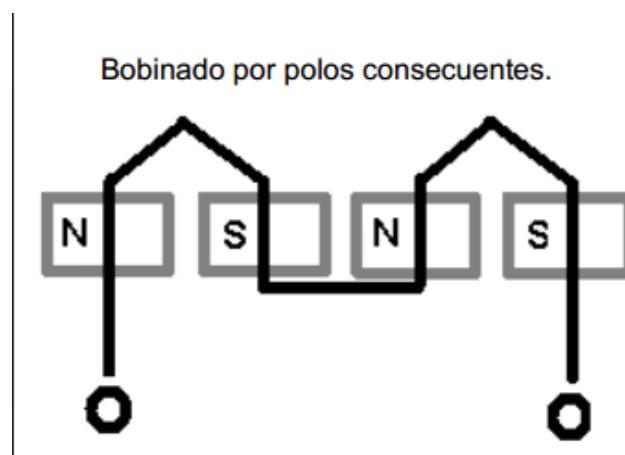


Fig. 4.2.13 Devanado de 2 a 4 polos mediante polos consecuentes



Este método no tiene mucha validez para el control de la velocidad en el caso de los trenes, puesto que solo pueden obtenerse velocidades relativamente fijas 600, 900, 1200, 1800 r.p.m y una variación entorno del 2 - 8% sobre esas velocidades fijadas desde vacío a plena carga, este sistema es útil para motores que trabajen en 2 o 4 velocidades fijas, como son motores de taladradoras, pulidoras... etc.

Este sistema tiene ciertas ventajas como son:

- Elevado rendimiento a cualquier ajuste de velocidad.
- Buen anclaje de la velocidad fijada.
- Simplicidad del control para la velocidad prefijada.
- Mantenimiento barato.
- Reguladores de velocidad auxiliares asociados baratos.

Aunque sus mayores inconvenientes son los siguientes.

- Se requiere de un motor especial, que posea los devanados necesarios y las terminales llevadas al exterior del estator para el intercambio de polos.
- No puede conseguirse un control gradual y continuo de la velocidad.

Control del deslizamiento del motor: Se puede conseguir aumentar y disminuir el deslizamiento de un motor asíncrono trifásico dentro de unos valores que nos permite una variación de la velocidad del mismo.

Esto se consigue mediante la inserción de una resistencia suplementaria en el rotor del motor, la cual produce un aumento del deslizamiento del mismo.

Este método tiene las siguientes ventajas:

- Variación de la velocidad por debajo de la velocidad síncrona del motor.
- Simplicidad de funcionamiento.
- Costes y mantenimiento bajo.

Pero por el contrario presenta un gran inconveniente como es el bajo rendimiento debido al aumento de las pérdidas por la inserción de la resistencia del rotor, como podemos ver en la Fig. 4.2.14, a mayor resistencia en el rotor del motor, obtenemos un mayor par inducido a muy bajas r.p.m, pero en cuanto aumentamos la velocidad perdemos par motor muy rápidamente, lo cual nos hace que el par resistivo no pueda ser muy grande, no sirviéndonos de mucho para el caso de los trenes.

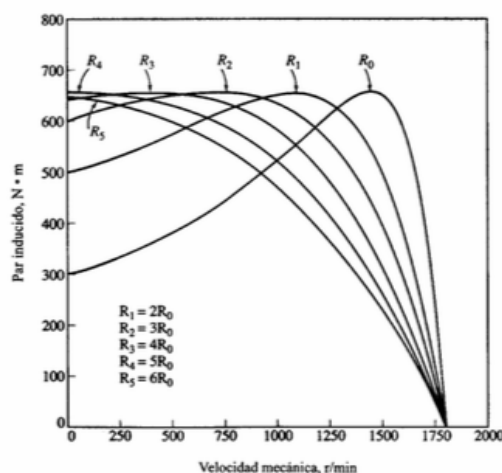


Fig. 4.2.14 Control de velocidad mediante variación de la resistencia del rotor

Existen otro método de control de la velocidad del motor asíncrono trifásico, esta vez vamos a ver los métodos en los que, en vez de actuar sobre la construcción del motor, se va a actuar sobre la línea de alimentación del motor asíncrono.

En este apartado tenemos 2 principales métodos de control, bien controlando el voltaje de la línea, o bien controlando la frecuencia de la línea.

Control del voltaje de la línea: el par motor del motor asíncrono bajo condiciones de arranque y de marcha varia con el cuadrado del voltaje aplicado al primario del estator. Para una carga determinada, reduciendo el voltaje de línea se reducirá el par con el cuadrado de la reducción del voltaje de la línea y la reducción del par producirá un incremento del deslizamiento.

Aunque reducir el voltaje de línea y el par como método para incrementar el deslizamiento servirá para controlar la velocidad en cierto grado para motores monofásicos, no resulta muy acertado para motores polifásicos, ya que el par máximo a la mitad del voltaje nominal es una cuarta parte del mismo a dicha tensión nominal.



Por lo tanto, no es posible obtener el par nominal, ni tan siquiera la mitad del mismo, porque la velocidad del motor disminuye rápidamente y este se pararía antes de desarrollar el par nominal.

Si una carga tiene una curva característica par – velocidad como la mostrada en la Fig. 4.2.15, la velocidad del motor puede ser controlada en un rango limitado, variando el voltaje de línea.

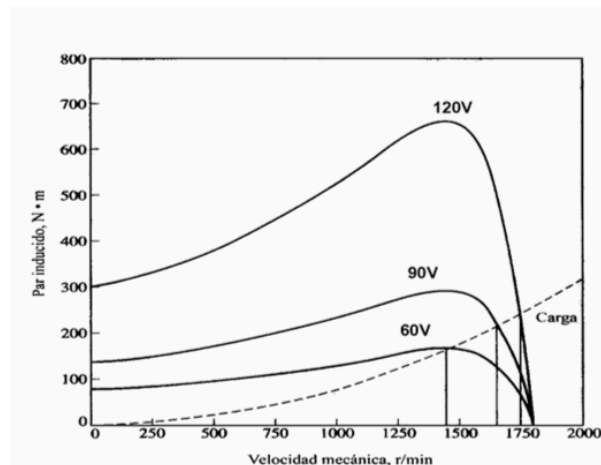


Fig. 4.2.15 Control de velocidad por relación del voltaje de línea

Con la llegada de la electrónica de potencia, se pudo empezar a controlar un parámetro más en cuanto a la naturaleza de la corriente alterna se refiere, con la electrónica de potencia se pudo empezar a controlar la frecuencia de la tensión, lo cual nos permitía modificarla a nuestro antojo.

Control de la frecuencia de línea: Este método ya lo hemos visto en el caso del motor síncrono trifásico, aunque al ser otro tipo de motor veremos unas diferencias en cuanto a su manera de aplicación.

Si se cambia la frecuencia eléctrica aplicada al estator de un motor asíncrono, la velocidad de rotación de sus campos magnéticos (velocidad sincrónica) cambiará en proporción directa al cambio de frecuencia eléctrica, y el punto de vacío sobre la curva característica par – velocidad cambiara con ella.

La velocidad sincrónica del motor en condiciones nominales se va a denominar como velocidad base.

Utilizando el control de frecuencia variable, es posible ajustar la velocidad del motor por encima o por debajo de la velocidad base, como se puede apreciar en la Fig. 4.2.16 en la cual la velocidad base es 1800 r.p.m.



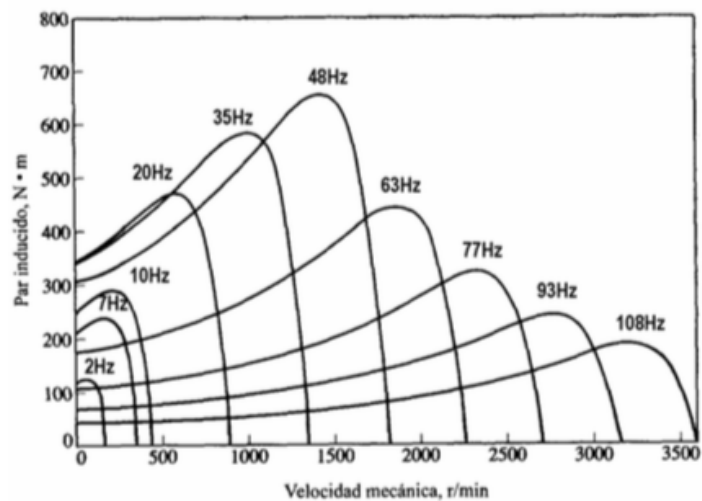


Fig. 4.2.16 Curvas características par - velocidad para distintas frecuencias

Por ultimo veremos un método de control de velocidad el cual nos combina los dos métodos anteriormente vistos.

Control de velocidad mediante relación voltaje - frecuencia: Cuando se opera a velocidades inferiores a la velocidad base del motor, es necesario reducir el voltaje aplicado a los terminales del estator para obtener una operación adecuada.

El voltaje aplicado a los terminales del estator deberá disminuir linealmente con la disminución de la frecuencia en el mismo. Si esto no se hace, se saturará el acero del núcleo del motor asíncrono y habrá excesivas corrientes de magnetización en la máquina.

Para entenderlo un poco mejor hay que recordar que el flujo en el núcleo de un motor de inducción se puede encontrar aplicando la ley de Faraday.

$v(t) = -N \frac{d\phi}{dt}$  si se aplica el voltaje  $v(t) = V_M \text{sen } \omega t$  al núcleo, el flujo resultante es:

$$\phi(t) = \frac{1}{N_p} \int v(t) dt = \frac{1}{N} \int V_M \text{sen } \omega t dt \rightarrow \phi(t) = -\frac{V_M}{\omega N_p} \text{cos } \omega t$$

Como bien podemos ver, la frecuencia eléctrica aparece en el denominador de esta expresión, entonces, si la frecuencia eléctrica aplicada al estator disminuye en un 10%, mientras que el voltaje aplicado al estator permanece constante, el flujo en el núcleo del motor se incrementara cerca del 10%, al igual que la corriente de magnetización.



Cuando el voltaje aplicado a un motor de inducción varia linealmente con la frecuencia por debajo de la velocidad base, el flujo en el motor permanece aproximadamente constante.

En la Fig. 4.2.17 se muestran una familia de curvas características par – velocidad del motor asíncrono para velocidades menores que la velocidad base, suponiendo que el voltaje del estator varia linealmente con la frecuencia.

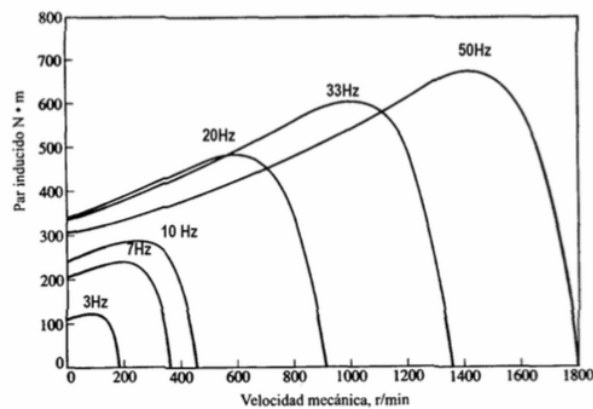


Fig. 4.2.17 curvas par – velocidad para velocidades inferiores a la velocidad base

Cuando la frecuencia aplicada al motor, excede la frecuencia nominal del motor, el voltaje del estator es mantenido constante en el valor nominal. Cuanto mayor sea la frecuencia eléctrica sobre la velocidad base, mayor será el denominador de la ecuación del flujo, puesto que el término del numerador se mantiene constante, por lo tanto, disminuyen el flujo resultante en la máquina y el par máximo de la misma Fig. 4.2.18.

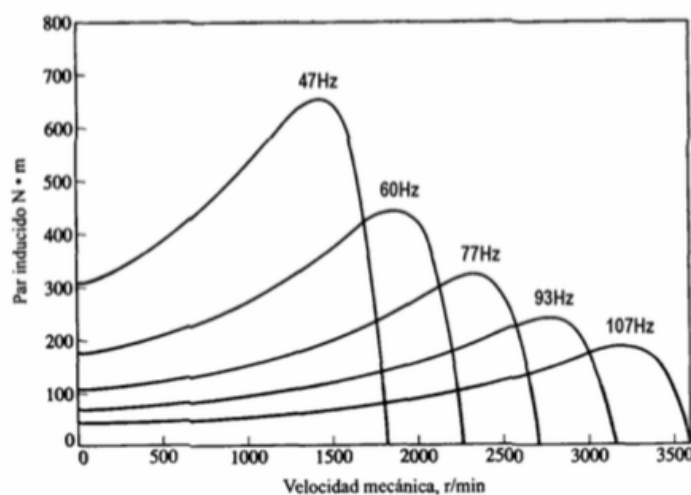


Fig. 4.2.18 curvas par – velocidad para velocidades superiores a la velocidad base



#### 4.2.4 MODELOS QUE LO MONTAN

El motor asíncrono trifásico es el motor de corriente alterna por excelencia, este motor es montado en multitud de modelos tanto en alta velocidad, como en el transporte a larga distancia o de cercanías.

Este motor se monta como veremos en este apartado, tanto en ferrocarriles alimentados en corriente alterna, como en líneas alimentadas en corriente continua.

Como en el caso de los motores síncronos, en el capítulo de elementos de electrónica de potencia, veremos más en profundidad los distintos aparatos y las distintas configuraciones que tiene cada modelo.

Vamos a nombrar alguno de los modelos más importantes tanto de alta velocidad como de velocidad convencional y tanto alimentados en corriente alterna como en corriente continua. Haciendo como en el caso de los motores síncronos hincapié en sistemas de transformación y regulación, además de los servicios auxiliares.

Los 4 modelos que vamos a ver va a ser el AVE SERIE S - 102, AVE SERIE S - 103, ALVIA SERIE S - 120 y por ultimo RENFE SERIE S -447. Los 2 primeros son trenes de alta velocidad alimentados a corriente alterna (como todos los AVE) pero con la diferencia de que uno emplea transistores y el otro tiristores para la regulación de la potencia, a continuación veremos el ALVIA, el cual monta motores asíncronos trifásicos, pero es un tren bi-tensión, puede ser alimentado tanto a 25kV - 50Hz como a 3000 Vcc, y por ultimo veremos un tren de cercanías, el RENFE SERIE S - 447, el cual es uno de los más extendidos y el cual portando motores asíncronos trifásicos es alimentado en corriente continua.



AVE SERIE S – 102: La serie S – 102 fue adquirida por RENFE en el año 2001, diseñadas y construidas por un consorcio formado por talgo y Bombardier. Estos trenes fueron adquiridos para cubrir la línea Madrid – Zaragoza – Lleida los cuales entraron en operación en el año 2005.

Esta serie, es en realidad un Talgo 350, de cuya derivación salió el denominado desde 2007 tren laboratorio Séneca Fig. 4.2.19, que emplea ADIF para la auscultación dinámica y geométrica de la vía y la catenaria, así como la comprobación y supervisión de los sistemas de señalización ASFA y ERTMS. También está preparado para la comprobación real de los fenómenos aerodinámicos producidos en los túneles al paso de los trenes de alta velocidad.



Fig. 4.2.19 Tren de pruebas ADIF

La Serie S – 102 está compuesta por 2 cabezas tractoras una a cada extremo del tren y 12 remolques intermedios como podemos apreciar en la Fig. 4.2.20, las cabezas tractoras tienen la forma característica de cabeza de pato, las cuales fueron diseñadas en un túnel de viento para disminuir las ondas de presión que se producen en la entrada y salida de un túnel y en el cruce de trenes a alta velocidad.



Fig. 4.2.20 Vista lateral AVE Serie S – 102

Las cajas están construidas con materiales ligeros y con un recubrimiento especial que reduce la resistencia al aire, haciendo que se reduzca hasta un 15 % el consumo energético.

Cada cabeza tractora tiene una potencia de 4000kW lo cual hace que el tren en su conjunto tiene una potencia nominal de 8000kW, con una tensión de alimentación de 25 kVca 50Hz, con un esfuerzo de arranque de 200 kN y una velocidad máxima de 330 km/h.



Fig. 4.2.21 AVE Serie S – 102



Cada cabeza tractora consta de 2 bogies con tracción independiente por cada eje, un equipo de tracción monotensión al ser solo alimentada a 25kV, con un convertidor por bogie dotado con tecnología compuesta por transistores IGBT la cual desarrollaremos más en profundidad en el tema de electrónica de potencia y 8 motores trifásicos asíncronos de 1MW de potencia, además de un pantógrafo para captación de la corriente desde la catenaria.

La sala de máquinas tiene una presión superior a la atmosférica, evitándose así la entrada de polvo del exterior lo que hace que se resientan todos los elementos mecánicos.

En las salas de máquinas tenemos también unos contadores de potencia los cuales nos indican la energía consumida y devuelta a la red por nuestro tren, puesto que este tren dispone de freno regenerativo, mediante el cual aprovechando la energía cinética que lleva el tren, la convertimos en energía eléctrica devolviéndola a la catenaria y siendo aprovechada, o bien por otro tren que este en fase de aceleración, o bien devuelta al sistema por las subestaciones.

Este sistema de frenado nos es muy útil para el paso por zonas neutras (zonas donde no tenemos alimentación de la catenaria) en las cuales el frenado regenerativo se empleará para alimentar los servicios auxiliares, alargando así la vida útil de estos aparatos.

Todos los equipos electrónicos deben estar refrigerados, puesto que alcanzan altas temperaturas cuando están en funcionamiento, y la ventilación natural no es suficiente, por eso los equipos electrónicos de la Serie S - 102 están refrigerados mediante agua, evitando así los líquidos contaminantes.

Tenemos 3 tipos de frenado, un freno neumático con 3 discos por eje, además del freno regenerativo que ya hemos comentado anteriormente de 4200 kW de potencia y un freno reostático de 3200 kW, el cual consta en la transformación de la energía cinética en eléctrica, la cual se convierte en energía calorífica disipándose en unas resistencias que llevan en el techo.



AVE SERIE S – 103: Fabricados por Siemens presentada en 2007 y basado en el ICE 3 que recorre la alta velocidad alemana, este tren autopropulsado tiene una gran particularidad con respecto al resto de los AVE, este modelo fue el primero en incorporar la tracción distribuida, se sitúa bajo los bastidores de la composición, por lo que prescinde de cabezas tractoras como tal, desde el punto de vista técnico, el tren se subdivide en 2 subtrenes idénticos, que cuentan con los mismos equipos.



Fig. 4.2.22 RENFE AVE Serie S – 103

Toda la estructura del tren es de aluminio, haciendo que su peso baje considerablemente en comparación con uno de características similares, haciendo que se rentabilice mejor la potencia de la que se dispone y reduciendo el consumo energético.

Como ya hemos nombrado el tren se compone de 2 semitrenes de 4 coches cada uno debido a la tracción distribuida, lo cual hace que todo el equipo eléctrico y electrónico se encuentre distribuido a lo largo del tren, con un 50% de los ejes motorizados, lo que favorece y posibilita unas condiciones de adherencia y aceleración mucho mejores que en otros modelos, al distribuir la masa homogéneamente por los ejes, se consigue que cada eje porte tan solo 15 Tm haciendo que su impacto en la vía sea mucho menor y consiguiendo por tanto una reducción de costes de mantenimiento.

La tracción distribuida nos permite circular con 8 coches, o tan solo con 4 (1 semitren), aunque la potencia del tren se reducirá a la mitad, se seguirá comportando igual puesto que consta de todos los elementos necesarios.



Cada motor de los que dispone la Serie S – 103 desarrolla una potencia de 550kW teniendo un total de 16 motores asíncronos trifásicos situados en los propios bastidores de los bogies de los coches 1, 3, 6 y 8. Colocados de forma paralela y en mitad del eje sobre el que actúan.

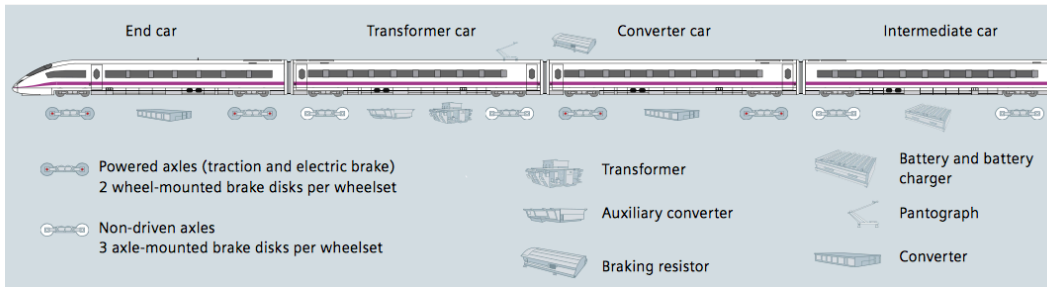


Fig. 4.2.23 Distribución elementos de potencia en RENFE Serie S – 103

El primero de los coches con cabina, incorpora 4 motores, uno en cada uno de los 2 ejes de los que se compone cada bogie, los cuales son alimentados de forma independiente por un único convertidor. En el segundo coche de la composición, ambos bogies son portadores, pero no son portadores normales, puesto que estos tienen la misión de llevar los transformadores y reactancias de entrada. El tercer coche es similar al primero, con los 4 ejes motorizados y con un único convertidor. El cuarto tren tiene todos ambos bogies portadores y bajo el bastidor lleva el resto de elementos auxiliares de un medio tren.

En los cuatro coches restantes del otro semitren se repite la misma configuración que en este.

Los convertidores de tracción de la Serie S – 103 son 4 situados en los coches motores, estos convertidores a diferencia del modelo visto anteriormente son de tecnología GTO la cual desarrollaremos mas en profundidad en el capítulo de electrónica de potencia.

Las unidades de tracción de la Serie S – 103 son totalmente independientes, por lo tanto, si se produce un fallo en alguna unidad esta se puede desconectar sin influir sobre el resto de la composición, haciendo posible el funcionamiento del tren con un 75% de la potencia total tanto de tracción como de frenado.



ALVIA SERIE S – 120: A principios del 2005 comenzó a circular en el tramo Madrid – Barcelona este Serie S – 120 construido por el consorcio formado por CAF – ALSTOM, este tren al ser denominado como alvia, tiene una serie de diferencias y particularidades con respecto a los vistos anteriormente, una de ellas es que posee bogies BRAVA (Bogie de Rodadura de Ancho Variable Autopropulsado) desarrollados por CAF, puesto que este tren puede circular tanto por vías de ancho internacional, como por vías de ancho ibérico, con las diferencias de alimentación que eso supone.



Fig. 4.2.24 ALVIA RENFE Serie S – 120

Ahí es donde recae la principal peculiaridad en este tren para lo que a nosotros nos interesa, puesto que al poder circular por 2 anchos de vía diferentes, también puede ser alimentado tanto a 25kV 50Hz, como a 3000 Vcc.

La composición mínima de este tren está formada por 4 coches pudiéndose acoplar 2 unidades mínimas simultaneas haciendo 8 coches.

La estructura del mismo es de aleación ligera de aluminio, cuenta con sistemas de absorción de energía y anti cabalgamiento para reducir las consecuencias de un choque frontal.

El revestimiento de las paredes y el techo es de resina fenólica lo cual hace que se ofrezca menor resistencia al aire consiguiéndose así un efecto más aerodinámico.



El bastidor del tren es de acero soldado, la caja se apoya sobre una traviesa de carga a la que se une de manera rígida y bajo la cual se monta la suspensión secundaria.

El tren, desde el punto de vista de elementos de tracción y equipos auxiliares, como pasaba con el modelo anterior, está construido como 2 semiunidades, cada una de ellas albergando todos los equipos necesarios tanto para la captación de la energía desde la catenaria, como para su transformación y transmisión de la energía necesaria para el funcionamiento del tren, haciendo así cada semiunidad totalmente autónoma desde la captación de la energía hasta la transmisión de la potencia a los motores, la generación de la corriente continua para los equipos de control y la generación de baja tensión para elementos auxiliares.

La tracción en este modelo como en el caso anterior es distribuida, por lo tanto, todos los coches de la composición poseen bogies motores, teniendo como ya hemos visto en el anterior modelo unas ventajas tanto en estabilidad como en potencia.

Cada uno de los coches posee 2 bogies con un único eje motor, lo que hace un total de 8 ejes motores y 8 ejes portadores en el conjunto del tren. El eje motor está accionado por un motor de tracción ALSTOM asíncrono de 6 polos autoventilado de 512kW de potencia pico en el eje, la cual transmite mediante una transmisión tipo cardan.

La particularidad de este tren es que es bi - tensión, lo cual hace que desarrolle una potencia de 4000kW alimentado a 25kV 50 Hz y en el caso de estar alimentado a 3000Vcc el tren desarrollara una potencia de 2500kW.

La unidad como hemos visto anteriormente cuenta con 8 motores, 2 por cada coche y cada pareja de motores es controlada por un equipo de tracción mediante un convertidor de tracción tipo IGBT, el cual asegura la tracción y el frenado eléctrico suministrando a cada motor la potencia necesaria en cada momento, contando además con 3 convertidores IGBT mas para los equipos auxiliares.

Cuando esta unidad está alimentada a 25kV se suministra por una manga una tensión de 1500V y 50Hz para la alimentación de los convertidores auxiliares de los coches.

El frenado eléctrico puede actuar aun no habiendo tensión en la catenaria, puesto que cada grupo de tracción posee unos reóstatos para la disipación de la energía generada.

RENFE SERIE S – 447: Aunque este modelo de tren no es empleado en alta velocidad, puesto que es un modelo de cercanías, es de mucha importancia puesto que fue el primer modelo en emplear motores de tracción asíncronos trifásicos alimentándose de una catenaria de corriente continua.



Fig. 4.2.25 RENFE SERIE S – 447

Este tren diseñado por CAF en el ámbito mecánico y de equipos auxiliares y por SIEMENS todo lo relacionado al equipo de potencia y control, fueron construidos por ADTRANZ lo que actualmente es un consorcio BOMBARDIER, CAF, SIEMENS. La gran novedad que presenta este modelo hace que la Serie S – 447 tenga unas significativas ventajas con respecto a la Serie S – 446 la cual es una analogía a la 447 en gran parte de la construcción del tren, pero con motores de corriente continua.

Como ventajas la 447 presenta una mayor aceleración, un incremento de la velocidad máxima de 100km/h pasó a 120 km/h teniendo la misma potencia de tracción en régimen continuo, una reducción del consumo energético en mas de un 12%, esta reducción se consigue mediante un mayor rendimiento de los motores y una mejor funcionalidad del freno de recuperación con tasas de hasta un 30%. Una importante reducción del peso de la parte eléctrica, menor peso de los bogies puesto que se emplean motores asíncronos con un menor peso que los de corriente continua, reducción de los costes de mantenimiento entorno a un 25%.



La estructura de la caja es auto portante de acero al cobre soldado. La estructura mínima del tren es de 3 coches, Mc – Ri – M. En el primer coche se ubica la cabina de conducción además de los armarios con la aparata de baja tensión, y en el coche remolque los armarios de control.

Cada coche motor lleva todo lo necesario para la tracción y servicios auxiliares, bajo el bastidor se encuentra el cofre principal, transformador y reactancia, convertidor estático para auxiliares, unidades condensadoras de climatización y paneles neumáticos. Mientras que en el techo del coche motor nos encontramos las resistencias de frenado reostático.

Por otra parte, en el coche remolque se sitúa el cofre de alta tensión, el cofre de compresores, los paneles neumáticos y el cofre de dotación. Además de los 2 pantógrafos y el pararrayos ubicado en el techo del mismo.

El equipo de potencia y control está constituido por dos circuitos de tracción y freno eléctrico, idénticos, pero de funcionamiento independiente, instalados cada uno de ellos en cada coche motor, excepto las partes comunes que se sitúan en el coche remolque.

El equipo de captación de corriente, común para los 2 equipos de potencia, está constituido por 2 pantógrafos, un disyuntor general, dos pararrayos y dos juegos de seccionadores. El equipo de potencia y control incorpora el uso de tiristores GTO.

Cada coche motor lleva cuatro motores asíncronos trifásicos de 320kW de potencia cada uno, haciendo un total de ocho motores y una potencia de 2400kW de potencia en ejes el tren completo, los cuales atacan cada uno de los ejes del coche motor por un acoplamiento elástico de doble engranaje.

Todo esto nos proporciona un esfuerzo tractor máximo de 230kN en la fase de arranque, proporcionándose 195kN de esfuerzo a la llanta.

Cada equipo de potencia está básicamente constituido por un chopper de entrada, formados a su vez por 2 chopper bifásicos de funcionamiento entrelazado desfasados 180°. Un circuito intermedio formado por un ondulator trifásico de tensión y frecuencia variable, un chopper de freno eléctrico reostático, que entra en funcionamiento cuando la catenaria no admite más energía.



4 grupos de transmisión y potencia constituidos cada uno de ellos por un motor asíncrono trifásico con una potencia de 320kW, un reductor de doble etapa y eje de salida hueco unido rígidamente y un acoplamiento que une la salida del reductor con el eje de las ruedas mediante un cardan.

Todos estos elementos serán vistos más en profundidad en el capítulo de electrónica de potencia como en los casos anteriores.

En cuanto a los equipos auxiliares de los que dispone el tren, el suministro de alumbrado, control de tracción, climatización, compresores y batería, se cuenta con dos convertidores estáticos a 2400Vcc y 125 KVA con salidas tanto de 380Vca y 72 Vcc y una batería níquel - cadmio de 72Vcc con 55 elementos y 190 A/h. En caso de que se averíe un convertidor el otro es capaz de alimentar al tren automáticamente con una reducción en alumbrado y en climatización del 50%.





## 4.3 MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA

A continuación, vamos a ver el último de los tres motores utilizados en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, el motor de corriente continua sigue siendo empleado en algunos modelos de cercanías y metro, pero siendo cada vez más desbancado por el motor asíncrono trifásico.

Este motor fue de los pioneros en el transporte por ferrocarril, puesto que antes de la existencia de la electrónica de potencia y dado que en los sistemas ferroviarios predominaba la alimentación en corriente continua, el motor tenía que ser acorde al sistema de alimentación de la red ferroviaria por la que el tren iba a transcurrir.

Hoy en día está cayendo en el desuso, puesto que, con la evolución de la electrónica, en una vía con corriente continua no tenemos ningún problema en transformarla en corriente alterna y poder aplicar así el motor asíncrono trifásico dado que presenta muchas más ventajas, en cuanto a potencia, tamaño y mantenimiento se refiere.

### 4.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de los motores eléctricos de corriente continua, se basa en la fuerza que se produce sobre un conductor eléctrico recorrido por una intensidad de corriente eléctrica en el seno de un campo magnético según la Ley de Lorentz definida por la siguiente fórmula.

$$F = B \cdot L \cdot I$$

En la cual, B es la inducción del campo magnético (Teslas), L es la longitud del conductor cortado por las líneas de campo magnético (metros), I es la intensidad que recorre al conductor (Amperios) y F es la fuerza que se produce sobre el conductor (Newtons).

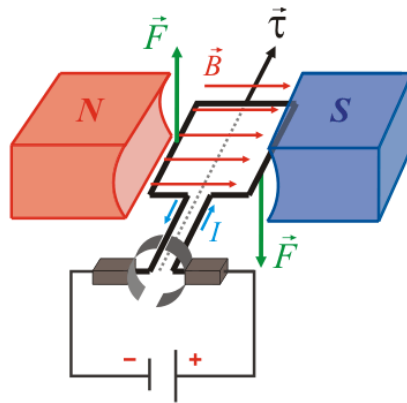


Fig. 4.3.1 Esquema de fuerzas sobre un conductor electrificado

Como acabamos de ver según la Ley de Lorentz, el conductor por el cual recorre la corriente eléctrica se convertirá en un electroimán en el cual se nos producirá una fuerza, similar a la fuerza de repulsión que ejercen los polos magnéticos de un imán cuando interactúan con los polos magnéticos de un electroimán que se encuentra montado en un eje.

El electroimán que estamos comentando sería lo que formaría el rotor de nuestro motor permitiéndole girar libremente entre los polos norte - sur situados en el estator del motor.

Cuando la corriente eléctrica circula por la bobina de nuestro rotor, el campo electromagnético que se genera interactúa con el campo magnético permanente del estator. Si los polos del estator y del rotor coinciden, se produce un rechazo y por lo tanto un par magnético lo cual hace que el rotor comience a girar, el sentido dependerá de la polaridad en la que los terminales del motor de corriente continua estén conectados a la fuente de corriente continua.

El campo magnético permanente del estator se puede conseguir de 2 formas fundamentalmente, una es mediante unos imanes permanentes, algo que solo se emplea en motores de pequeño tamaño y potencia. El segundo método es mediando unos arrollamientos entorno a un núcleo de acero, este es el método empleado en motores grandes, estos arrollamientos componen los polos principales del estator del motor, y en caso de los motores de una potencia elevada, estos polos principales, se alternan junto con otros polos auxiliares o de conmutación los cuales son macizos y cuya misión es evitar en la medida de lo posible el chisporroteo en el contacto entre las delgas y las escobillas en el colector.



Para poder llevar la corriente hasta el rotor y generar ese campo magnético, vamos a ver una parte fundamental del motor de corriente continua, esta parte es la denominada colector de delgas, la cual como veremos en la Fig. 4.3.2 se representa la vista frontal de un colector seccionado en dos partes, se hace sobre un ejemplo muy sencillo de motor de corriente continua para que se vea más fácilmente el funcionamiento. También se muestra el enrollado de la bobina del electroimán que gira a modo de rotor, diferenciada por un color diferente en cada una de las mitades. Una mitad esta en color rojo, mientras que la otra esta en color azul, identificados como 1 y 2, como se puede apreciar, uno de los terminales está conectado a la sección a del colector y el otro terminal a la sección b.

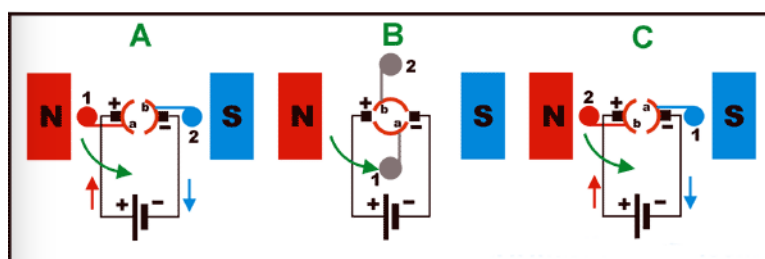


Fig. 4.3.2 Esquema de funcionamiento de motor corriente continua

En el motor de corriente continua el colector sirve para conmutar constantemente el sentido de circulación de la corriente eléctrica través del bobinado del rotor a la vez que avanza en su giro. De esta forma el polo norte del estator coincidirá siempre con el polo norte del rotor e igualmente pasará con los polos sur.

Tal como se puede apreciar en la figura A, la bobina del rotor se encuentra entre los polos norte (N) y sur (S) del estator. A su vez, el polo positivo (+) de la fuente de corriente continua se encuentra conectada siguiendo el sentido convencional de la corriente (del + al -), en la mitad a del colector a través de la escobilla identificada como +. De esta forma la mitad de la bobina de color rojo (1) se energiza positivamente para formar el polo norte, mientras que la otra mitad, de color azul, se energiza negativamente para formar el polo sur.

Como resultado, cuando en el rotor se forma polo norte, de inmediato el también polo norte del estator lo rechaza. Al mismo tiempo el polo sur que se forma en el polo opuesto, es rechazado por el otro polo sur del estator. Por lo tanto, se produce una fuerza de repulsión en ambos extremos del rotor.



Una vez que la bobina del rotor gira, y se pone en posición vertical (B), las escobillas dejan de hacer contacto con ambos segmentos del colector. En esa posición neutra la corriente que suministra la fuente deja de circular y la bobina se desenergiza, por lo que ambos extremos del electroimán del rotor, pierden momentáneamente sus polos magnéticos. Aunque debido a la fuerza de inercia que ya posee el rotor, esta posición se supera de inmediato y se pasa a ocupar la posición que vemos en C.

Ahora en C se puede ver que la mitad de las bobinas que antes tenía color azul con polaridad sur, pasa a ocupar la parte izquierda junto con la mitad b del colector al que se encuentra conectada. Esa parte de la bobina que ha girado, al ocupar ahora la posición opuesta, se convierte en el polo norte por lo que es rechazado de nuevo por el polo norte del estator. A continuación, el rotor al continuar girando y dar otra media vuelta, vuelve a pasar por la zona neutra B repitiéndose el mismo ciclo.

Esos cambios continuos en los polos del rotor que proporciona el colector, son los que permiten que se mantenga girando de forma ininterrumpida mientras siga energizado.

Para que quede claro el concepto sobre cómo se forman los distintos polos norte – sur dentro del propio bobinado del rotor, vamos a fijarnos en la Fig. 4.3.3, en la cual se muestra de forma esquemática y simplificada un rotor de una simple bobina con una sola espira, para diferenciar cada mitad, vemos que está pintado de azul y rojo. Teniendo en cuenta la regla de la mano izquierda, o del sacacorchos. Si seguimos el recorrido de la corriente eléctrica según las flechas negras, cuando en la mitad izquierda de la espira, de color rojo, se forma el polo norte, coincidiendo con la misma polaridad del campo magnético del estator, se produce una fuerza de rechazo y según la regla de la mano izquierda esa mitad de la espira se moverá hacia abajo, mientras que aplicando la misma regla, veremos que en la parte de la mitad derecha ocurrirá justamente lo opuesto.

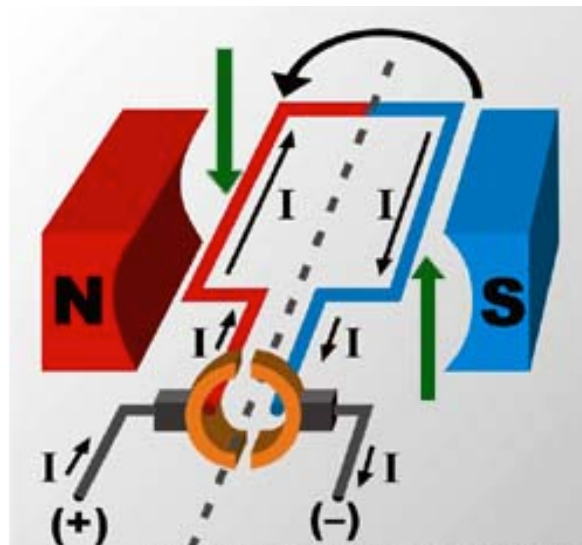


Fig. 4.3.3 Esquema simplificado del rotor

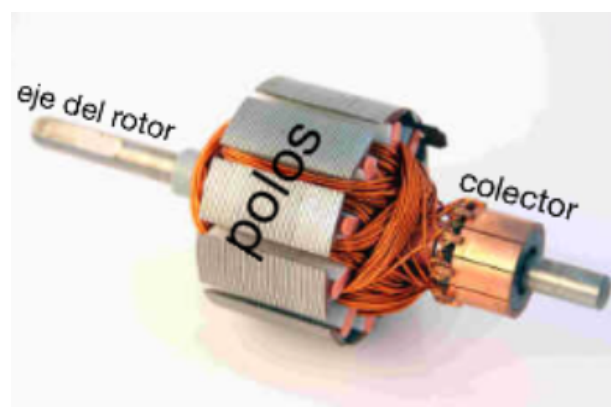


Fig. 4.3.4 Partes del rotor de un motor de corriente continua

Como estamos pudiendo apreciar, la función del colector Fig. 4.3.5. es parte fundamental en el funcionamiento de un motor de corriente continua, puesto que, su misión es permitir el cambio constante de polaridad de la corriente en la bobina del electroimán del rotor, para que sus polos conmuten constantemente. Es por esa razón, por la cual el mantenimiento del colector de delgas es la parte más importante dentro del motor de corriente continua, su limpieza y sustitución de las escobillas de grafito que van rozando es parte fundamental para el buen funcionamiento Fig. 4.3.5.

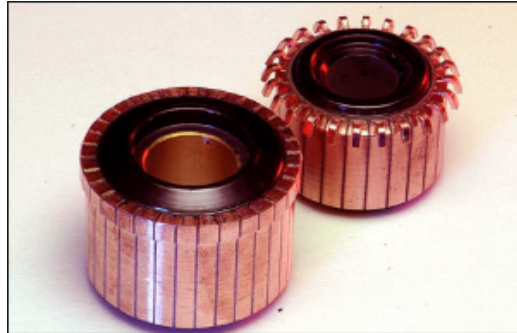


Fig. 4.3.5 Colectores de delgas

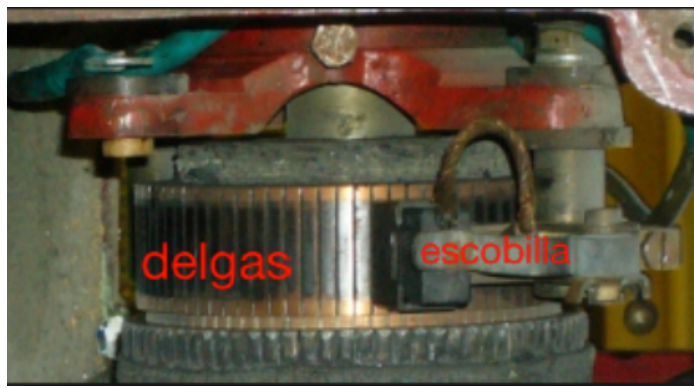


Fig. 4.3.6 Detalle del colector de delgas

A continuación, vamos a ver una parte muy importante del funcionamiento de los motores de corriente continua, es lo denominado fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m).

Cuando la bobina del rotor recibe alimentación de corriente continua, se genera un par de giro, de esta forma en el proceso de arranque del motor de corriente continua el rotor comienza a acelerarse hasta alcanzar las revoluciones nominales. Técnicamente en el proceso de funcionamiento del motor de corriente continua, la bobina del rotor en su movimiento giratorio corta las líneas del campo magnético generadas en el estator, lo que provoca que se induzca en el bobinado del rotor una fuerza electromotriz cuyo sentido según la ley de Lenz, se opone a la causa que la provocó, es decir se opone a la corriente del inducido y a la tensión de alimentación del motor. Esta fuerza electromotriz, es denominada fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) y produce el efecto de limitar la corriente del inducido (rotor).



Existe una fórmula matemática para explicar este fenómeno, la cual vamos a ver a continuación.

$$E = \phi \cdot n \cdot N \cdot \frac{P}{a} \cdot \frac{1}{60}$$

donde:

$E$  = fuerza contraelectromotriz (V)

$\phi$  = flujo por polo (Wb)

$n$  = número de conductores de la bobina inducida

$N$  = velocidad de giro del inducido (rpm)

$a$  = pares de polos del inducido

$P$  = pares de polos

Ahora bien, esta fórmula se puede reducir ya que los valores  $n$ ,  $p$  y  $a$  son valores constantes del motor de corriente continua.

$$E = K \cdot N \cdot \phi$$

Estas fórmulas nos explican que la fuerza contraelectromotriz es proporcional al flujo inductor y a las revoluciones por minuto del motor. Si el motor trabaja en vacío, el par motor del rotor, al no encontrar la resistencia de una carga, aumenta la velocidad del rotor, lo que da lugar a una mayor fuerza contraelectromotriz que limita la corriente absorbida por el motor.

Sin embargo, cuando el motor de corriente continua trabaja con una carga, a la vez que disminuye la velocidad también lo hace la f.c.e.m. y por consiguiente la intensidad absorbida por el motor de corriente continua aumenta. Así tenemos que la intensidad que necesita el motor de corriente continua, dependerá directamente del trabajo que tenga que realizar.

$$I_i = \frac{V_b - E - 2U_e}{r_i}$$

$I_i$  = Intensidad del inducido (A)

$V_b$  = Tensión del inducido (V)

$E$  = f.c.e.m. (V)

$U_e$  = Caída de tensión de las escobillas (V)

$r_i$  = resistencia del inducido



Ahora bien, en el momento del arranque del motor, la f.c.e.m. es nula, ya que el rotor está parado. La única intensidad que absorbe el motor será la caída de tensión de las escobillas y por la resistencia del bobinado del rotor. Así tenemos que la anterior formula se nos simplifica de la siguiente manera.

$$I_{arranque} = \frac{V_b - 2U_e}{r_i}$$

Así, en el momento del arranque del motor, la intensidad de arranque es muy elevada. Para limitar la intensidad de arranque en un motor de corriente continua se suelen colocar unas resistencias en serie con el rotor. A medida que el motor de corriente continua va aumentando la velocidad se va disminuyendo el valor de las resistencias.

Existen una serie de pérdidas importantes a tener en cuenta cuando un motor de corriente continua es alimentado, primeramente, tenemos unas perdidas debidas a la caída de tensión por los arrollamientos del propio motor debido a la resistencia interna de los mismos, además de una serie de fugas magnéticas a través de los materiales y del aire, pero una parte importantísima que ahora veremos más en profundidad.

Una de las pérdidas importantes a parte de las perdidas por rozamiento mecánico que se da en un motor de corriente continua y las ya antes mencionadas perdidas por la resistencia de los conductores de los arrollamientos y las perdidas por magnetización, son las que están influenciadas por el propio colector, puesto que al realizarse la conmutación de los polos a gran velocidad, se produce un chisporroteo entre las escobillas y cada una de las delgas del colector Fig. 4.3.7, produciéndose pérdidas importantes, además de sobretensiones que van dañando la zona progresivamente.

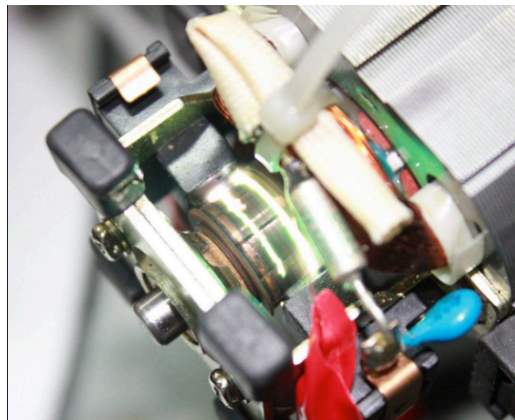


Fig. 4.3.7 Chispas entre escobillas y colector



Como ya hemos comentado anteriormente, para motores grandes el estator estará compuesto por unos polos principales bobinados. Para conectar los bobinados de la maquina existen 3 maneras las cuales vamos a ver a continuación.

Motor de excitación serie: En este motor (Fig. 4.3.8), el inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie, el voltaje aplicado es constante mientras que el campo de excitación aumenta con la carga, puesto que la corriente es la misma corriente de excitación. El flujo aumenta en proporción a la corriente de la armadura, como el flujo crece con la carga, la velocidad cae a medida que aumenta esa carga.

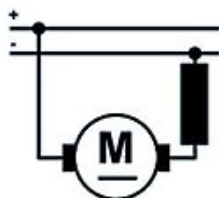


Fig. 4.3.8 Esquema motor excitación serie

Las principales características del motor serie es que sufre embalamiento cuando funciona en vacío, debido a que la velocidad de un motor de corriente continua aumenta al disminuir el flujo inductor y en el motor serie este disminuye al aumentar la velocidad, puesto que la intensidad en el inductor es la misma que en el inducido. La potencia es casi constante a cualquier velocidad. Las variaciones bruscas de la tensión de alimentación, apenas le afectan, ya que un aumento de tensión provoca un aumento de la intensidad, por lo tanto, del flujo y de la fuerza contraelectromotriz, estabilizándose la intensidad absorbida.

Motor de excitación en paralelo o shunt: En este motor (Fig. 4.3.9), el bobinado inductor principal está conectado en derivación (paralelo) con el circuito formado por los bobinados inducido e inductor auxiliar.

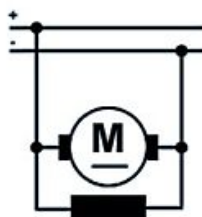


Fig. 4.3.9 Esquema motor Shunt



Las bobinas principales están constituidas por muchas espiras y con hilo de poca sección, lo que hace que la resistencia del bobinado inductor principal sea muy grande.

En el instante del arranque, el par motor que se desarrolla es menor que en el motor serie, al disminuir la intensidad absorbida, el régimen de giro apenas sufre variación. Es el tipo de motor de corriente continua cuya velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta de manera brusca. Este tipo de motor es adecuado para aplicaciones en donde se necesita velocidad constante a cualquier ajuste de control o en los casos en que es necesario un rango apreciable de velocidades. El motor en derivación se utiliza mayoritariamente en aplicaciones de velocidad constante.

Motor Compound o de excitación compuesta: Este motor Fig. 4.3.10, cuya excitación es originada por dos bobinados inductores independientes, uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados inducido, inductor serie e inductor auxiliar.

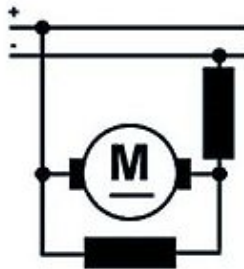


Fig. 4.3.10 Esquema motor excitación compuesta

Los motores compound tienen un campo serie sobre el tope del bobinado del campo shunt, este campo serie, el cual consiste en dar pocas vueltas de un conductor grueso, es conectado en serie con la armadura a la cual lleva la corriente.

El flujo del campo serie varía directamente a medida que la corriente de la armadura varía, y es directamente proporcional a la carga. El campo serie se conecta de manera tal que su flujo se añade al flujo del campo principal shunt. Los motores compound se conectan normalmente de esta manera y se denominan compound acumulativo.

Esto provee una característica de velocidad que no es tan dura o plana como la del motor shunt, ni tan suave como la de un motor serie. Un motor compound tiene un limitado rango de debilitamiento de campo, la debilitación del campo puede resultar en exceder la máxima velocidad segura del motor sin carga.





Los motores de corriente continua compound son algunas veces utilizados donde se requiera una respuesta estable de par constante para un rango de velocidades amplio.

El motor compound es un motor de excitación independiente con propiedades de motor serie. El motor da un par constante por medio del campo independiente al que se suma el campo serie con un valor de carga igual que el del inducido. Cuantos más amperios pasan por el inducido más campo serie se origina, siempre sin sobrepasar el valor nominal de consumo.

### **4.3.2 CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA**

Como todos los motores, los motores de corriente continua, en el momento del arranque, consumen una elevada intensidad de corriente hasta que se vence la inercia del motor en parado y comienza su giro como hemos explicado anteriormente. Los motores de corriente continua de pequeña potencia, pueden ser arrancados directamente puesto que el pico de intensidad que se genera no es excesivo, por lo que no presenta grandes problemas, no poniéndose en peligro ni a la maquina ni a la instalación eléctrica de la misma.

Pero para motores de una cierta potencia, como son los encargados de la tracción ferroviaria, es necesario el uso de elementos auxiliares que nos hacen la función de arrancadores, y que a su vez nos harán también la función de controladores de velocidad.

A continuación, vamos a ver las distintas maneras que hay tanto de arrancar un motor, como de controlar su velocidad.

Inicialmente el control de la velocidad de los motores de corriente continua en los ferrocarriles, era una cosa bastante sencilla, puesto que se empleaban este tipo de motores en líneas alimentadas ya en corriente continua, por lo que nos ahorrábamos la rectificación de la corriente, cosa que antes de la existencia de la electrónica de potencia no era nada sencillo. Estos motores eran empleados sin la existencia de la electrónica de potencia, puesto que, para el control de los motores de corriente continua, basta con variar el voltaje en los bornes del motor.



Un motor de corriente continua se consigue controlar mediante la variación del voltaje y corriente de la siguiente manera.

Ajustando el voltaje y por lo tanto la corriente que aplicamos al devanado generador del campo magnético (estator), puesto que, al aumentar la intensidad del campo magnético, la fuerza contra-electromotriz es mayor por lo tanto el motor acelera como se puede ver en la siguiente formula.

$$N = \frac{V_b - r_i \cdot I_i}{K \cdot \phi}$$

$N$  = Velocidad de giro del inducido (rpm)

$\phi$  = flujo por polo (Wb)

$V_b$  = tensión aplicada al inducido

$r_i$  = Resistencia del inducido

$I_i$  = intensidad del inducido

$K$  = Constante del motor

Otra de las opciones esta en actuar sobre los polos del rotor (inducido), lo cual normalmente es lo que se suele hacer, puesto que el control sobre el rotor permite más libertad de manejo.

Ajustando el voltaje y por lo tanto la corriente aplicada a los polos del rotor, cuanto mayor sea el voltaje de los polos del inducido mayor será la velocidad de giro y cuanto mayor sea la velocidad de giro, mayor fuerza contraelectromotriz existirá.

Hemos hablado de velocidades, pero una característica más importante que la velocidad, es la del par, el motor necesita generar un par motor, capaz de vencer el par resistivo que se le presenta en el eje del rotor.

Cuando un motor de corriente continua, funciona en un régimen estacionario y se le aplica un mayor par resistivo en el rotor, la velocidad del motor tiende a disminuir, por el esfuerzo que debe realizar, para evitar este fenómeno, el par motor debe aumentar para igualar ese par resistivo que se le ha presentado y esto se consigue aumentando la fuerza electromotriz, eso se consigue mediante el aumento de la intensidad que circula por el rotor del motor de corriente continua, por lo tanto el motor necesitara mayor corriente eléctrica para funcionar.



Este aumento de la corriente no puede ser infinita por supuesto, esto debe estar limitado por la potencia, corriente, tensión nominal del motor. Puesto que, si se superasen estos valores, se pondría en riesgo la integridad del motor.

Como hemos mencionado anteriormente, el control de estos motores antes de la existencia de la electrónica de potencia era muy fácil, aunque muy poco eficiente y no muy cómoda para el tema del transporte de pasajeros como pasaba en la Serie R - 448. Debido a que el control que se empleaba, era un control reostático que consistía en lo siguiente.

Control Reostático de velocidad: Existen 2 tipos de control reostático, el control de la tensión en los bornes del estator de la máquina, y el control por variación del flujo de campo, lo que se llama reóstato de regulación de campo.

El control reostático, es una manera muy simple, puesto que se compone de una serie de resistencias exteriores puestas en serie con el circuito de alimentación del motor siendo accionadas mediante una serie de levas, contactores, interruptores, etc... lo que se hace es ir introduciendo o quitando del circuito unas u otras resistencias.

El fundamento que tiene este tipo de control es el siguiente, la velocidad del motor puede ser controlada variando la corriente en los devanados de campo del estator. Cuando la cantidad de corriente que fluye a través de los devanados del estator se incrementa, también lo hace la resistencia de campo, entonces el motor se ralentiza debido a que una mayor cantidad de campo opuesto es generada en el devanado inducido. Cuando la corriente del estator disminuye, el motor se acelera por que la fuerza electromotriz se reduce. Esto se puede hacer tanto en los motores serie y derivación.

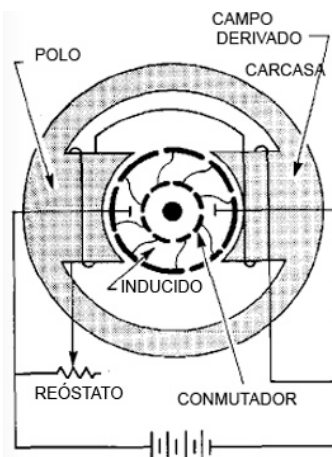


Fig. 4.3.11 Control reostático en un motor en derivación



En el motor en derivación (Fig. 4.3.11), la velocidad está controlada por un reóstato en serie con el devanado de campo. La velocidad depende de la cantidad de corriente que fluye a través del reóstato para los devanados del estator. Para aumentar la velocidad del motor, la resistencia en el reóstato se aumenta, lo que disminuye la corriente de campo. Como resultado de ello, hay una disminución en la fuerza del campo magnético y de la fuerza contraelectromotriz. Esto aumenta momentáneamente la corriente de inducido y el par, el motor acelerará automáticamente hasta que la f.c.e.m. aumente y haga que la corriente de inducido disminuya a su valor anterior. Cuando esto ocurre, el motor funcionará a una velocidad fija más alta que antes.

Para disminuir la velocidad del motor, la resistencia del reóstato se disminuye. Mas corriente circula a través de los devanados de campo y aumenta la fuerza del campo por lo tanto la f.c.e.m. aumenta momentáneamente y disminuye la corriente del inducido. Como resultado, el par disminuye y el motor se frena hasta que la f.c.e.m disminuya a si valor anterior, para así el motor funcionar a una velocidad más baja que la de antes.

En el motor serie (Fig. 4.3.12), el reóstato de control de velocidad está conectado ya sea en paralelo o en serie con la excitación del motor, o en paralelo con el inducido del motor. Cuando el reóstato está configurado para su máxima resistencia, la velocidad del motor se incrementa en la conexión en paralelo del inducido por una disminución de la corriente. Cuando la resistencia del reóstato es máxima en la conexión serie, la velocidad del motor se reduce por una reducción de la tensión a través del motor. Para el funcionamiento a velocidad superior a la normal, el reóstato esta en paralelo con el campo de serie.

Parte del campo serie se desvía y el motor se acelera.

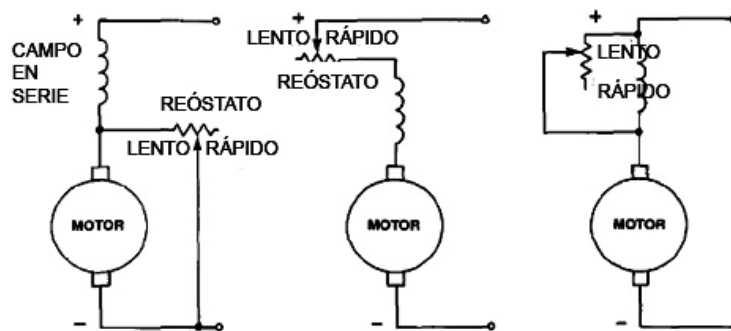


Fig. 4.3.12 Control de velocidad reostatico en un motor serie



Una vez que apareció la electrónica de potencia todos estos métodos de control de motores de corriente continua fueron quedando en el olvido, puesto que mediante la electrónica de potencia conseguimos mayor control de la velocidad, un control más lineal de la velocidad, ahorro energético, puesto que todo el sistema de reóstatos nos generan que la energía eléctrica se convierta en energía calorífica en unas resistencias variables, lo cual es electricidad que estamos perdiendo.

Con la aparición de la electrónica de potencia, empezamos a emplear unas herramientas para controlar la velocidad, el par y el suministro de potencia de los motores mediante unos componentes electrónicos de manera rápida, precisa, sencilla.

Variadores de velocidad: vamos a ver una sencilla descripción de los elementos de potencia que regulan la velocidad en los motores de corriente continua. En los inicios de la electrónica de potencia, como las líneas que alimentaban a los motores de corriente continua en los ferrocarriles estaban en corriente continua, comenzaron a emplearse unos elementos denominados chopper, los cuales eran montados en la Serie S - 446 que en el siguiente tema veremos mejor.

Pero también existen líneas alimentadas en corriente alterna, por las cuales circulan trenes que equipan motores de corriente continua, para estos casos los variadores de velocidad se encargan además de hacer la rectificación de la corriente y estos variadores se basan en tiristores y transistores, los cuales vamos a explicar junto con el chopper en profundidad en el siguiente capítulo.

### **4.3.3 MODELOS QUE LO MONTAN**

Este tipo de motor aunque en los inicios como ya hemos visto en el repaso histórico hecho anteriormente fue un gran precursor de la utilización de la corriente eléctrica en los sistemas de tracción del ferrocarril, la verdad es que debido a la desventaja en cuanto a tamaño, peso y mantenimiento que presenta con respecto a sus competidores, hace que en la actualidad no sea empleado en los modelos de alta velocidad, ni tampoco en modelos de larga distancia, que son los que fundamentalmente nos ocupan este trabajo.



Su utilización hoy en día se relega tanto a algunos modelos antiguos aun en tránsito de cercanías como de metro, esto es debido a que presenta una gran aceleración lo cual en trayectos con multitud de paradas cada pocos kilómetros e incluso cada cientos de metros, sea un método idóneo para el tránsito de arranque parada.

Es por eso que, aunque no esté presente actualmente en los modelos que principalmente nos ocupan este trabajo, vamos a describir uno de los modelos más conocidos por todos, que opera en la red de cercanías de Madrid, es la Serie S - 446, la cual vamos a ver a continuación sus características básicas.

RENFE SERIE S - 446: La serie S - 446 construida por el consorcio formado por CAF, CENEMESA, MACOSA, M.T.M y MELCO presenta una estructura de las cajas autoportante formada por perfiles laminados y chapas de acero y cobre, sobre la cual van montados los testeros diseñados para absorber energía en caso de un choque frontal.

Cada unidad está compuesta por dos coches motores con cabina (Mc) idénticos y un remolque intermedio (Ri) entre ambos Fig. 4.3.13



Fig. 4.3.13 Composición mínima Serie S - 446



Bajo el bastidor de los coches motores se encuentran los elementos principales de tracción como son el cofre del chopper, reactancias, convertidor estático y el cofre del inversor. Mientras que en bajo el bastidor del remolque intermedio están los elementos de protección y auxiliares como son, los disyuntores, seccionadores, el compresor, el secador, los paneles neumáticos y la unidad de climatización. En el techo de cada coche motor se sitúan las resistencias de frenado, los pararrayos y el pantógrafo.

Cada uno de los coches dispone de 2 bogies con 2 ejes, el bogie motor tiene montados 2 motores de tracción suspendidos uno proporcionando potencia a cada uno de los ejes del bogie, mediante un acoplamiento elástico y reductora.

Todos los ejes están provistos de tacogeneradores los cuales, explicados a grandes rasgos diremos que es un generador eléctrico el cual te da un voltaje de salida proporcional a la velocidad de rotación del eje del motor, formando parte de la realimentación del control de tracción.

El equipo de potencia y control está constituido por dos circuitos de tracción y freno eléctrico, idénticos, pero de funcionamiento independiente, instalados cada uno de ellos en cada coche motor, excepto las partes comunes las cuales están situadas en el remolque intermedio.

El equipo de captación de corriente, común para los dos equipos de potencia, está constituido por dos pantógrafos ubicados en el techo del remolque intermedio, los cuales captan la corriente eléctrica de la catenaria a 3000 Vcc, seguido de un disyuntor general y dos disyuntores de freno eléctrico, dos pararrayos y dos juegos de seccionadores.

El equipo de tracción el cual se sitúa en cada uno de los coches motores de los que dispone la unidad, tiene tecnología chopper, la cual veremos en el siguiente tema, pero diremos que cada coche motor consta básicamente de un chopper principal, constituido a su vez por 2 choppers bifásicos de tipo shuntado continuo de campo (AVF) de funcionamiento entrelazado y desfasados 180°. Esto chopper bifásicos trabajan con frecuencias de 300 Hz, que en arranque son de 75, 150 y 300 Hz.

Consta también de un chopper de freno eléctrico reostático de 600 Hz el cual trabaja cuando la línea de la catenaria no admite más energía.



Cada coche motor tiene cuatro motores de tracción de corriente continua alimentados a 1500Vcc, con una potencia nominal de 300kW cada uno haciendo así que todos los ejes del coche motor sean ejes motores, haciendo por lo tanto que la unidad completa tenga 8 motores de corriente continua los cuales proporcionan al tren una potencia nominal de 2400kW.

En cuanto a los equipos auxiliares. Para el suministro de alumbrado, control de tracción, climatización y batería, esta unidad cuenta con dos convertidores estáticos de 85 KVa cuya entrada se hace a 3000Vcc y salida doble de 380 Vca y 72 Vcc.





## **5. CONTROL DE POTENCIA TRACCION ELECTRICA FERROVIARIA**

La revolución en los sistemas de control de velocidad de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria se consiguió acorde evolucionaba la electrónica de potencia, la cual nos fue facilitando todo lo relacionado con la transformación y regulación de la tensión y corriente en los propios elementos rodantes. Anteriormente a esta revolución los sistemas de regulación y control eran unos sistemas con muy poco rendimiento que malgastaban muchísima energía eléctrica, además de que nos limitaba mucho puesto que cada tren tenía que montar los motores acordes a las catenarias de las vías por las que iba a transitar, algo que con la aparición de la electrónica de potencia se mejoró considerablemente, pudiendo además optar por el mejor motor acorde al servicio a prestar por cada tren, independientemente del tipo de catenaria que lo alimentase.

### **5.1 INTRODUCCION Y REPASO HISTORICO**

La electrónica de potencia es una de las ramas de la ingeniería eléctrica en la cual se combina la energía eléctrica, la electrónica y el control. La electrónica de potencia se emplea para controlar potencias muy elevadas con respecto a lo que la rama de la ingeniería electrónica se refiere. La electrónica de potencia nos permite adaptar y transformar la energía eléctrica proveniente de las catenarias, para alimentar controladamente los motores de los trenes transformando la energía eléctrica de continua a alterna o viceversa, controlar la velocidad y el funcionamiento de los mismos mediante el empleo de dispositivos electrónicos.

La mayor flexibilidad y controlabilidad de los dispositivos electrónicos semiconductores hacen que se apliquen para resolver procesos cada vez más complejos.



Un equipo electrónico de potencia consta fundamentalmente de dos partes como veremos en la Fig. 5.1.1.

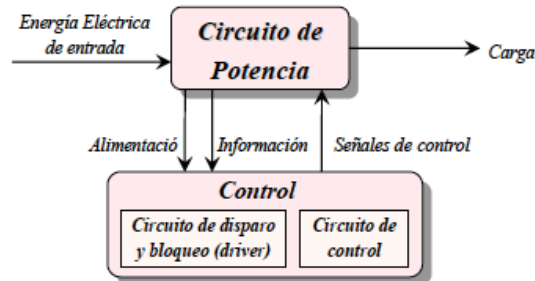


Fig. 5.1.1. Diagrama de bloques de un sistema de potencia

En un sistema electrónico de potencia tendremos un circuito de potencia compuesto de semiconductores de potencia (la naturaleza dependerá del grado de control que queramos) y elementos pasivos, que conectan la fuente primaria de alimentación, (en nuestro caso la catenaria), con la carga (motores del tren).

Un circuito de control que procesa la información proporcionada por el circuito de potencia y genera las señales de excitación que determinan el estado de los semiconductores, controlados con una fase y secuencia conveniente.

En la electrónica de potencia, el objetivo principal es conseguir un elevado rendimiento en la transformación de la energía. Para ello se utilizan dispositivos semiconductores como los que veremos a continuación los cuales trabajan en conmutación a modo de interruptores. Los semiconductores, trabajando en conmutación deben cumplir las siguientes características.

Tener 2 estados claramente definidos, uno de alta impedancia (bloqueo), en el cual no dejara pasar la corriente eléctrica, y otro de baja impedancia (conducción) estado en el cual se permite el paso de la corriente eléctrica.

Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con reducida potencia de control.

Ser capaces de aguantar las altas tensiones cuando están bloqueados y elevadas intensidades, con pequeñas caídas de tensión entre sus extremos cuando están en conducción, puesto que las tensiones tanto en las catenarias como las tensiones de utilización de los motores de los trenes eléctricos son de un valor muy elevado.



Por ultimo algo fundamental en los elementos electrónicos de potencia es la rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

Vamos pues a ver un pequeño repaso histórico por la evolución de la electrónica de potencia, que nos ayudará a entender mejor aún el tipo de motores y el tipo de trenes que se empleaban en los distintos periodos del siglo XIX y XX.

La electrónica de potencia comenzó su andadura en el año 1900, con la introducción del rectificador de arco de mercurio Fig. 5.1.1



Fig. 5.1.1 Rectificador de vapor de mercurio

Después aparecieron gradualmente otros tipos de rectificadores como el rectificador de tanque metálico. Estos fueron aplicados en el control de la energía hasta la década de los 50. En 1948 se inicia la revolución de la electrónica con la invención del transistor de silicio lo cual como vemos en la Fig. 5.1.2 permitió una gran reducción de tamaño.



Fig. 5.1.2 Comparación de tamaño de transistor vs válvula



Después de este descubrimiento, otro de los grandes saltos en cuanto a la electrónica se refiere fue el transistor de disparo pnpn, lo cual se definió como tiristor o rectificador controlado de silicio (SCR), el cual, en 1958 paso a ser ya de ámbito comercial mediante la comercialización del mismo por General Electric Company, este momento fue el principio de la nueva era de la electrónica de potencia.

Todos estos inventos que se iban sucediendo en la historia, tienen mucho que ver con la guerra de corrientes que hemos visto en el repaso de historia de la tracción eléctrica ferroviaria.

A continuación, vamos a meternos ya en materia con el análisis de los distintos elementos de electrónica de potencia que han sido empleados en los modelos que hemos ido viendo durante todo el trabajo.



## 5.2 CONVERTIDORES ESTATICOS Y ELEMENTOS FUNDAMENTALES

Los sistemas que transforman la energía suelen denominarse convertidores estáticos de energía, o simplemente convertidores de energía. El adjetivo estático se debe a que se trata de circuitos que utilizan semiconductores para realizar la conversión, los cuales son elementos inmóviles. En los primeros años de la electrónica de potencia la conversión de la energía se realizaba esencialmente mediante máquinas giratorias, algo muy voluminoso y pesado como para aplicarlo en la tracción eléctrica ferroviaria.

Un convertidor estático de energía es un circuito electrónico constituido por un conjunto de elementos estáticos formando una red que constituye un equipo de conexión y transmisión entre la catenaria y los motores.

Los convertidores estáticos de energía tienen muy poca disipación de energía en forma de calor además de unas reducidas dimensiones, lo cual los hace idóneos en la aplicación de la tracción eléctrica ferroviaria.

Puesto que no son elementos ideales, se producen unas pérdidas en la transformación, aunque una de las virtudes de los convertidores estáticos de energía es el elevado rendimiento que presentan en esta transformación, para ello los dispositivos empleados trabajaran como interruptores en conmutación (cerrados y abiertos) y se emplearan bobinas, condensadores y transformadores como elementos auxiliares.

Existen varios tipos de convertidor dependiendo de las formas de energía de la entrada y la salida como veremos en el esquema Fig. 5.2.1

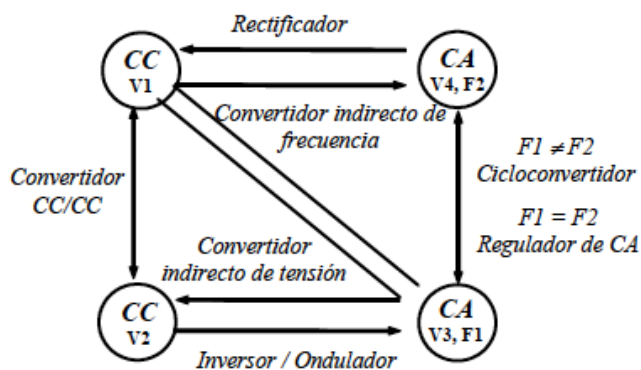


Fig. 5.2.1. Tipos de convertidores estáticos de energía



Como podemos ver, existen rectificadores no controlados, los cuales transforman la corriente alterna de tensión constante en corriente continua de tensión constante, mediante el uso de diodos, si se sustituyen esos diodos por tiristores, se consigue controlar esta transformación sacando una corriente continua de tensión variable. Este método es el utilizado en la tracción eléctrica ferroviaria como veremos a continuación.

**Reguladores de corriente alterna:** Transforman la corriente alterna de tensión constante en corriente alterna de tensión variable y de la misma frecuencia. Estos son empleados en los trenes cuya catenaria está alimentada en corriente alterna, justo a la entrada de la maquinaria.

**Cicloconvertidores:** Estos convertidores directos alterna/alterna permiten variar la frecuencia siendo siempre la frecuencia de salida inferior a la frecuencia de entrada.

**Ondulador o inversor:** transforma la corriente continua en corriente alterna de tensión y frecuencia fija o variable, estos convertidores estáticos están también muy presentes en los ferrocarriles, puesto que son los encargados de ondular la corriente continua que sale de los elementos de control para inyectarla en los motores de tracción de los trenes equipados con motores de corriente alterna (en el caso de alta velocidad asíncronos todos ellos), y además de ondular también la corriente continua para el abastecimiento de los elementos auxiliares que necesitan de corriente alterna.

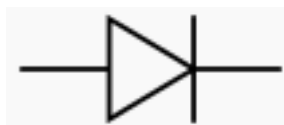
Por último, el convertidor continua/continua o chopper, el cual transforma corriente continua de tensión constante en corriente continua de tensión fija o variable, estos elementos los veremos a continuación, puesto que son los reguladores por excelencia de los trenes con motores de corriente continua alimentados por catenarias de corriente continua.

Para una buena comprensión de los convertidores estáticos de potencia y su comportamiento en los trenes, es necesario primeramente hacer un repaso por los distintos dispositivos de conmutación que forman estos convertidores estáticos, así pues, haremos a continuación un breve repaso de cada uno de ellos en orden cronológico de utilización en los distintos convertidores.



Primeramente, vamos a ver un elemento presente en los convertidores estáticos pero que no nos da la posibilidad de controlarlo, no podemos mandarle disparar cuando nosotros queremos.

Diodos semiconductores: Un diodo es un componente electrónico de dos terminales que permite el paso de corriente eléctrica a través de él en solo un sentido.

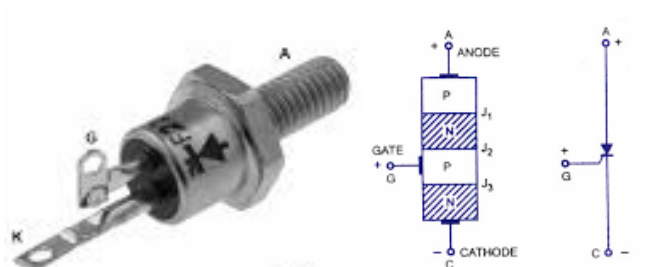


Simbolo diodo semiconductor

A continuación, veremos los distintos dispositivos los cuales ya sí que nos permitan el control del disparo y en algunos casos el de la extinción para controlar a nuestro placer la tensión y corriente, comenzaremos por el tiristor (SCR) que podía encenderse por puerta, pero cuyo apagado en circuitos de corriente continua no se podía producir de forma natural y requerían circuitos de potencia con tiristores auxiliares para su apagado.

Tiristores: Un tiristor es un conmutador biestable (el equivalente electrónico de los interruptores mecánicos), es capaz de dejar pasar la corriente plenamente o bloquearla por completo. La particularidad del tiristor es que puede pasar rápidamente a encendido al recibir un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control (puerta), pero solo puede ser apagado con la interrupción de la fuente de tensión, bien abriendo el circuito, o bien, haciendo pasar una corriente en sentido inverso por el dispositivo.

Su tensión ánodo - cátodo en conducción es muy bajo y en consecuencia tiene unas pérdidas muy bajas en conducción.



Tiristor SCR junto con su símbolo y constitución interna



Uno de los problemas que presenta es a la hora de aplicarlo a circuitos en corriente continua, puesto que es necesario el uso de tiristores auxiliares para devolverlo al estado de bloqueo, estos circuitos son muy complejos con una cantidad de elementos elevada y en consecuencia con una baja fiabilidad, aunque tienen muy buen rendimiento. Otro de los problemas es que las frecuencias de conmutación son relativamente bajas, por lo que nos genera bastantes armónicos obligándonos a instalar filtros para evitarlos.

Posteriormente a estos aparecen los GTO (Gate Turn Off Thyristor) o tiristores apagables por puerta, que no precisan de complejos circuitos de apagado con tiristores auxiliares, pero que sus circuitos de control de puerta siguen siendo circuitos de potencia, donde se deben inyectar o extraer corrientes de hasta el 20% de la corriente nominal del GTO para su apagado, además de requerir circuitos de ayuda a la conmutación, se construyeron convertidores con GTO donde se incorporaban circuitos de ayuda a la conmutación asimétricos que reconducían la energía almacenada en estos durante el proceso de apagado de un GTO hacia el siguiente GTO en su proceso de encendido llegando a tener un rendimiento del 99,5%.

Estos convertidores basados en GTO, son equipos con una fiabilidad mucho mayor que la de los primeros a tiristores y mucho mayor rendimiento, aunque siguen teniendo baja frecuencia de conmutación y grandes armónicos.

Es entonces cuando aparecen los transistores los cuales, aunque tienen menor rendimiento por las mayores pérdidas cuando están en conducción, tiene la virtud de conmutar a altas frecuencias, este es capaz de conmutar a varios kHz mientras que los anteriores lo hacían a frecuencias de 200 – 300 Hz.

Transistores: Es un dispositivo electrónico semiconductor que generalmente se aplica como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia como los que nos atañen. Utilizado para entregar una señal de salida en respuesta a una señal de entrada por la puerta.

Cumple funciones tanto de amplificador como de oscilar, conmutador o rectificador.





El transistor consta de un sustrato (normalmente silicio), y tres partes dopadas artificialmente. El transistor es un dispositivo controlado por corriente y del que se obtiene corriente amplificada.



Transistores IGBT

El control es simple y la fiabilidad de los convertidores con esta tecnología es mucho mayor, precisamente por la simplicidad y la ausencia de una gran cantidad de circuitos y dispositivos que se necesitan en los casos anteriores, sus rendimientos están entorno al 98,5%.

Hoy en día, no se puede afirmar que los transistores IGBT tengan los mejores rendimientos con respecto a los tiristores SCR o GTO, pero su simplicidad y la posibilidad de conmutar a mayores frecuencias lo hace muy atractivo para las aplicaciones de tracción eléctrica ferroviaria, dado que ofrece una mayor fiabilidad, y se pueden hacer que las maquinas con las que opera tengan muchas menos pérdidas.

Un convertidor puede tener mejores rendimientos si conmuta menos veces por segundo, pero genera ondas con muchos armónicos por lo cual, aunque su rendimiento sea muy bueno, hace que aumenten las pérdidas en los motores y transformadores.

En consecuencia, en el caso de los convertidores, se debe realizar un diseño conjunto en el que se seleccionen los componentes, motor, transformador y convertidor con una determinada frecuencia de conmutación impuesta por el control y sus algoritmos de optimización de los factores de potencia que determine una cadena de tracción óptima desde el punto de vista energético y de fiabilidad.

Una vez vistos los dispositivos fundamentales que nos vamos a encontrar en cuanto a la electrónica de potencia de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, vamos pues a ir enumerando los distintos tipos de convertidores vistos anteriormente los cuales nos permiten poner en funcionamiento y en control nuestros trenes de alta velocidad y convencionales.





## 5.3 CONVERTIDOR CONTINUA / CONTINUA

Estos convertidores están muy presentes en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, tanto para el control de los equipos de tracción, como para la alimentación de los equipos auxiliares.

Estos convertidores están presentes en todos los trenes que circulen por vías cuya catenaria este alimentada en corriente continua, como es el caso de los trenes de alta velocidad que circulan por líneas de 3000Vcc, aunque en la mayoría de los trenes hoy en día estos convertidores estáticos continua/continua están seguidos de un ondulator puesto que la inmensa mayoría de los motores hoy en la tracción eléctrica ferroviaria son asíncronos trifásicos.

Pero aún quedan en circulación en España algunas unidades alimentadas en corriente continua cuyos motores de tracción son también de corriente continua como son los RENFE Serie S - 446, para lo cual en este caso el equipo de control se basará únicamente en una serie de filtros para evitar las perturbaciones electromagnéticas que se crean y un convertidor de estas características.

Esto que estamos contando, dicho de esta manera resulta un poco extraño, hablar de un convertidor continua/continua como sistema de control de la potencia y como sistema de convertidor para los elementos auxiliares de los ferrocarriles, pero si a esto le ponemos un nombre más comúnmente conocido como es el Chopper, todo empieza a resultarnos más familiar.

Antes de hablar del chopper veremos un método de control de potencia empleado anteriormente al chopper, el cual hoy día está solo en uso en unas pocas unidades de la Serie S - 442 y Serie S - 470 como control de los motores de tracción, pero que está muy presente en el frenado de los trenes de alta velocidad y convencionales. Este método es el denominado control reostático de velocidad.



### 5.3.1 CONTROL REOSTATICO DE POTENCIA

Este sistema de regulación de velocidad aun estando en desuso en la actualidad, todavía se sigue empleando en la red ferroviaria española en dos modelos, algo anticuados pero que aún están en funcionamiento como son la Serie R – 448 (Fig. 5.3.1a) y la Serie R – 470 (Fig. 5.3.1b), ambos empleados en distancias cortas y que van equipados con motores de corriente continua.



Fig. 5.3.1a Serie R – 448



Fig. 5.3.1b Serie R – 470

En el control de velocidad reostatico entran en juego una serie de resistencias instaladas en el techo de los coches motores de los trenes, o bien una resistencia variable, las cuales van introduciéndose o quitándose del circuito de alimentación acorde a las necesidades que tengamos en cada momento de par y velocidad (Fig. 5.3.2).

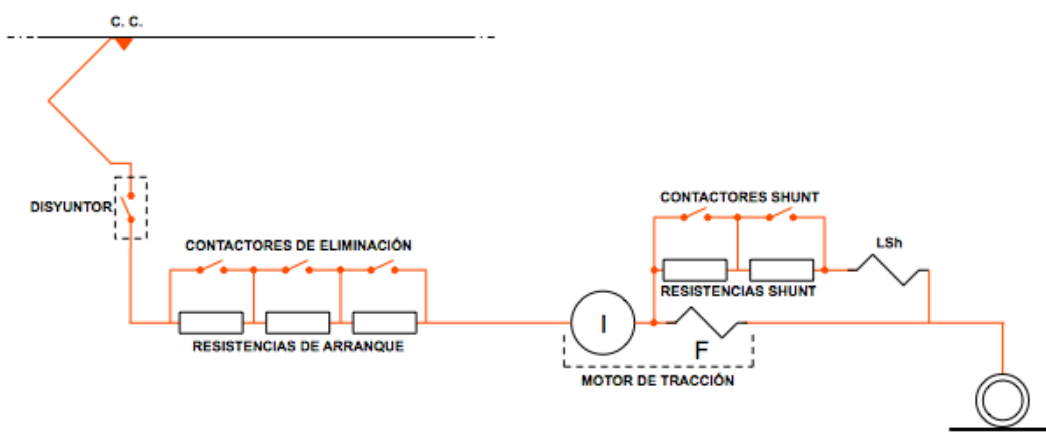


Fig. 5.3.2 Esquema control reostatico de potencia



Existen 3 tipos de control reostático, el control mediante un reóstato en serie con el inducido del motor, el control mediante un reóstato en el devanado inductor bien serie o paralelo para modificar el flujo magnético de excitación y por último es el sistema mediante la modificación de red que alimenta al motor con un reóstato de arranque conectado en serie con el inducido y empleando un convertidor electrónico de potencia.

Esta última opción es la más idónea, puesto que en las otras dos formas de control en el momento del arranque la corriente es muy elevada pudiendo producir un calentamiento excesivo haciéndonos saltar las protecciones del motor. Además, esta opción es la que menos pérdidas nos produce, la que mejor nos ajusta la velocidad y nos garantiza la viabilidad y la seguridad de la maniobra.

En el caso de la Serie R – 448 y la Serie R – 470, las resistencias conectadas con el inductor del motor de corriente continua y accionadas mediante unos contactores de levas que controlaba manualmente el maquinista hacían que fuese posible el arranque y la regulación de la velocidad, este sistema no era muy cómodo puesto que en la conexión y desconexión de las resistencias de control reostático, puesto que se notaban tirones y frenazos bruscos ante el aumento o pérdida de potencia de los motores.

Vamos a proceder a una breve explicación, puesto que el sistema no tiene demasiada complejidad.

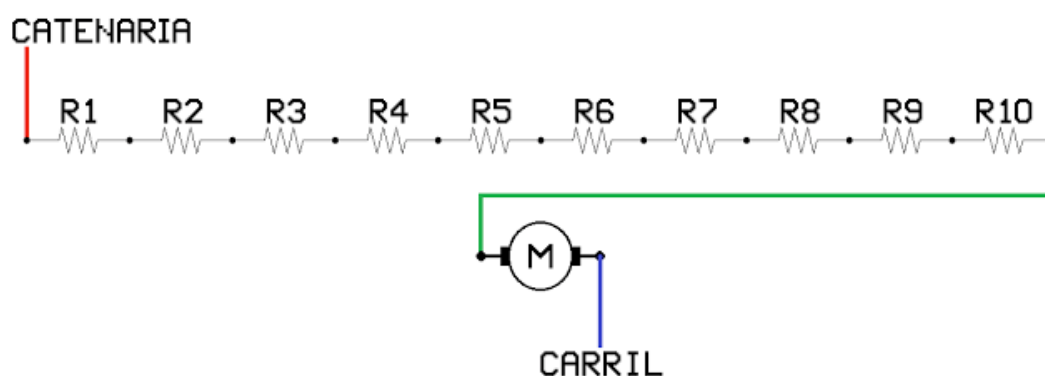


Fig. 5.3.3 Esquema simple del control reostático del motor



Los motores de estos trenes R – 448 y R – 470 como ya hemos mencionado son motores de corriente continua los cuales se alimentan de la catenaria a 3000Vcc. Como ya hemos visto en el capítulo 4, para variar la velocidad de un motor de corriente continua debemos de actuar sobre la tensión en el inducido, o sobre el campo del inductor, lo cual se consigue básicamente de la misma manera, que es mediante un divisor de tensión, para hacer que nos llegue más o menos tensión a nuestro motor controladamente. Pues, ahora bien, como ya hemos comentado los motores de los trenes no se alimentan a la misma tensión de la que está alimentada la catenaria, puesto que esto haría peligroso tan siquiera pasar al lado de ellos, pero para explicar el funcionamiento vamos a pasar esto por alto un momento.

Como vemos en el esquema de la Fig. 5.3.3 tenemos 10 resistencias interpuestas entre la catenaria y el motor del tren, todas conectadas en serie una tras otra, una de las bornas del motor estará conectada fija al carril de la vía haciendo de negativo de nuestro motor, mientras que la otra de las bornas de nuestro motor de corriente continua será la que se pueda ir desplazando para irse conectando entre las resistencias.

Esto evidentemente no pasa físicamente, esto se realiza mediante los contactores de levas anteriormente citados,

Como ya hemos dicho imaginemos que la catenaria está alimentada a 3000Vcc y tenemos 10 resistencias en las cuales la tensión cae una décima parte en cada una de ellas, entonces veamos. En el momento de estar parado, nuestro tren tendrá esa borna móvil desconectada por lo tanto en circuito abierto, y al motor no le llegará corriente. En el momento que el maquinista quiera emprender la marcha, la borna móvil se conectara después de la resistencia 10 (R10), haciendo que al motor se alimente a una tensión de 300 Vcc lo cual nos hará que el motor del tren gire por ejemplo a 100 r.p.m., cuando el maquinista quiera aumentar la marcha, lo único que deberá de hacer es ir accionando el contactor de levas para que se vayan eliminando resistencias del circuito cortocircuitándolas, así llegará más tensión al motor de corriente continua de nuestro tren y la velocidad aumentara Fig. 5.3.4

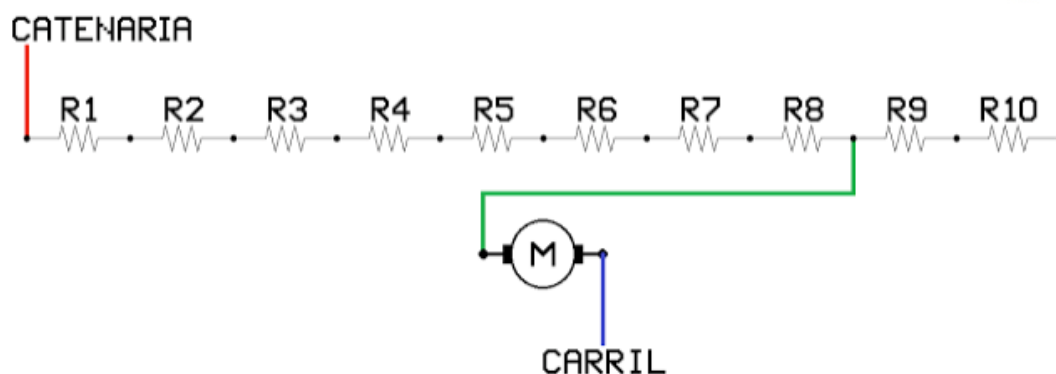


Fig. 5.3.4 Esquema maniobra control reostático motor corriente continua

Esta operación se repetirá hasta que el motor alcance la máxima potencia que será cuando todas las resistencias del control reostático estén cortocircuitadas y el motor se alimenta a su tensión nominal desarrollando su velocidad nominal.

Este sistema está completamente en desuso hoy en día puesto que tiene como principal pega que las resistencias se calientan con el paso de la corriente a través de ellas, lo cual hace que tengamos unas grandes pérdidas en forma de calor, además de tener que poner unos grandes ventiladores que nos ayuden a disipar todo ese calor generado para que no se quemara la máquina.

Hoy en día lo que, si está en uso y empleándose en la totalidad de trenes tanto de alta velocidad como convencionales es el denominado frenado reostático, lo cual viene a ser una adaptación de este sistema de control, pero para el frenado de los trenes.

Este sistema es empleado en todo tipo de motores reversibles, los motores reversibles son aquellos motores que se pueden comportar también como generadores de corriente y que se emplean para el frenado de los trenes.

Este sistema consta básicamente en la conversión del motor en generador eléctrico para realizar el denominado frenado regenerativo, el cual nos permite devolver parte de la energía consumida por el tren en los momentos de aceleración, durante el frenado del mismo.



Cuando el frenado regenerativo no puede ser empleado, por ejemplo, porque la catenaria no admita más potencia en sí misma, entra en funcionamiento el frenado reostático, en el cual, el motor convertido en generador de corriente disipa la potencia eléctrica generada en una serie de resistencias que se tienen en el techo de la máquina en forma de energía calorífica, este método de frenado se emplea cuando no hay otra manera, puesto que es energía desperdiciada o no aprovechada. Estas resistencias del techo del tren se irán cortocircuitando o introduciendo de manera que se necesite más o menos potencias de frenado para nuestro tren.

Después de este repaso por el control reostático, que como hemos dicho anteriormente fue antecesor a la electrónica de potencia, pero que hemos querido hacer mención puesto que era el método de regulación por excelencia antes de la aparición de la electrónica de potencia para los trenes con motores de corriente continua.

Vamos ahora pues, a ver la evolución de este sistema de regulación. Con el uso ya de la electrónica de potencia, se comienzan a introducir sistemas que nos permiten un mejor aprovechamiento de la energía eléctrica, a continuación veremos otro sistema convertidor estático de corriente continua como es el chopper, el cual no se monta en los trenes dependiendo del tipo de motor que lleven cada modelo, sino que es empleado muy extendidamente en los sistemas ferroviarios cuya catenaria está en corriente continua, independientemente de los motores que porte el tren.



## 5.3.2 CONTROL MEDIANTE CHOPPER

El chopper (Fig. 5.3.5) o troceador (como se traduciría en castellano), es un equipo de regulación de potencia que se encarga de transformar la corriente continua captada de la catenaria, en una corriente continua variable a voluntad.



Fig. 5.3.5. Cofre del Chopper principal de la Serie Civia

La regulación de la potencia se obtiene recortando o troceando la tensión mediante impulsos de una duración variable, con lo que la tensión puede adquirir valores desde cero, hasta una conducción plena.

En el medio ferroviario, se refiere a chopper, como a un circuito electrónico usado como control o regulador tanto de motores de corriente continúa actuando por si solo (Fig. 5.3.6), como de motores de corriente alterna si esta seguido de un ondulator (Fig. 5.3.7), pero es empleado siempre para trenes alimentados en corriente continua por parte de la catenaria.

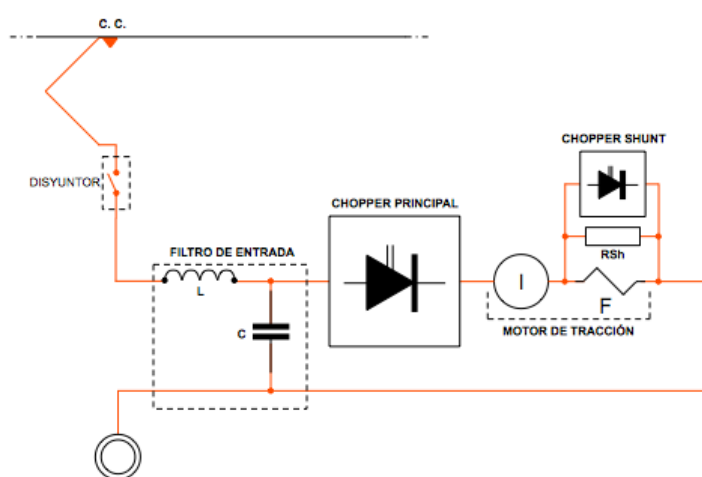


Fig. 5.3.6 Esquema control motores de corriente continua

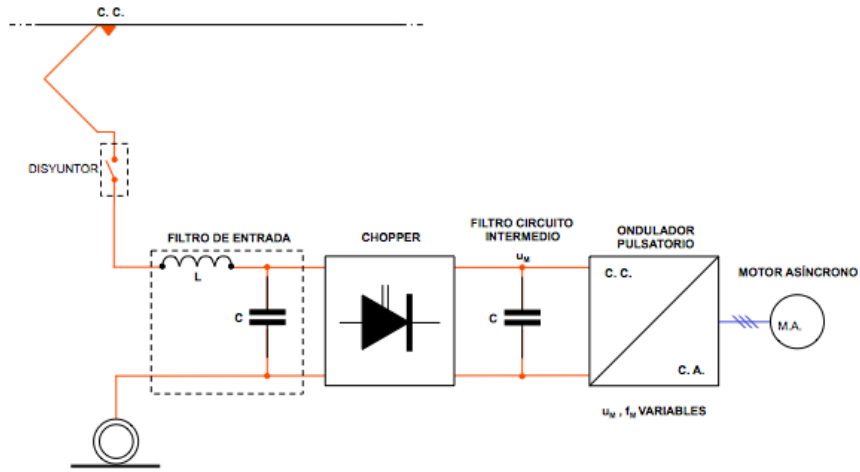


Fig. 5.3.7 Esquema control motores asíncronos trifásicos

Además, forma parte fundamental en el frenado eléctrico (con recuperación de potencia inyectada en la línea) en sustitución de los métodos electromecánicos.

La ventaja principal de la utilización del chopper respecto al método tradicional y anteriormente visto como control reostático, es un considerable ahorro de energía, ya que solo se toma de la catenaria la energía necesaria en cada momento, evitando las pérdidas en el circuito de potencia al no utilizar resistencias en el arranque. Asimismo, esto se traduce en arrancadas y paradas más suaves ya que no existen los escalones rígidos del sistema tradicional, eliminando el desgaste de elementos móviles como los contactores, lo que implica una mayor fiabilidad y un menor mantenimiento.

En la actualidad el chopper funciona por medio de diodos, tiristores GTO, transistores IGBT que ofrecen un mejor control y rendimiento los cuales son gestionados por microprocesadores.

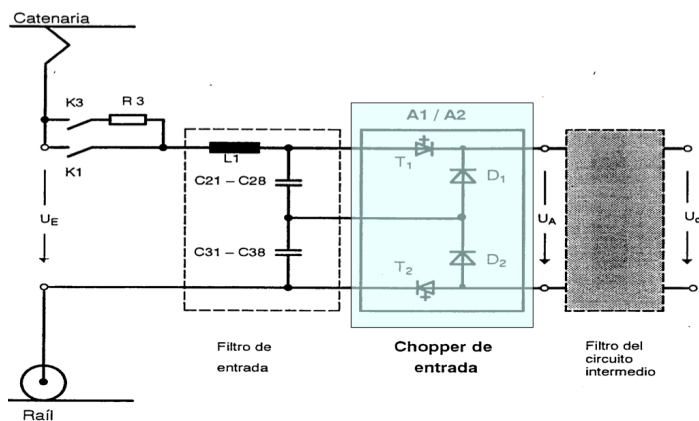


Fig. 5.3.7 Esquema chopper entrada GTO serie



Uno de los primeros automotores en emplear la tecnología chopper fue el modelo comentado en el capítulo anterior, la Serie S - 446 de RENFE, aunque hoy en día los choppers son empleados también en alta velocidad y en trenes bitensión.

Hemos mencionado anteriormente que los choppers están contruidos con transistores IGBT y tiristores GTO, los cuales vamos a describir a continuación.



Fig. 5.3.8 Tiristor GTO empleado en choppers

Un tiristor GTO es un dispositivo de electrónica de potencia el cual presenta 3 terminales. Ánodo (A), cátodo (K) y puerta (G). El tiristor GTO puede ser encendido por un solo pulso de corriente positiva en el terminal gate (G) o puerta, al igual que el tiristor normal, pero la particularidad que presenta es que puede ser apagado al aplicar un pulso de corriente negativa en el mismo terminal. Ambos estados, tanto encendido como apagado son controlados por la corriente que le llega al terminal gate.

Una vez explicado que es un chopper, visto su principio de funcionamiento, una vez vistos los elementos fundamentales que componen un chopper, su comportamiento y en que situaciones y tipos de alimentación podemos emplearlos, vamos a explicar cómo es el funcionamiento de un chopper en lo que a control de la velocidad de un tren eléctrico se refiere, es decir, ahora vamos a ver cómo actúa un chopper montado en un tren de tracción eléctrica para conseguir acelerar o frenar dicho tren, para ello vamos a imaginarnos que la catenaria que alimenta a nuestro tren es una catenaria de 3000Vcc y primeramente vamos a imaginar que nuestro tren monta motores de corriente continua para simplificar la explicación.



El funcionamiento, fácilmente explicado sería el siguiente, el chopper lo que nos hace es mediante el “troceado” de la señal en corriente continua de entrada al mismo por medio del control de los disparos de los tiristores internos del propio chopper, nos crea una nueva señal, en este caso también en corriente continua, a la salida del mismo pero de menor tensión (Fig. 5.3.9), el valor de esa tensión de salida es lo que se va a controlar mediante las ordenes de apertura y cierre de los tiristores y transistores interiores del propio chopper, así pues.

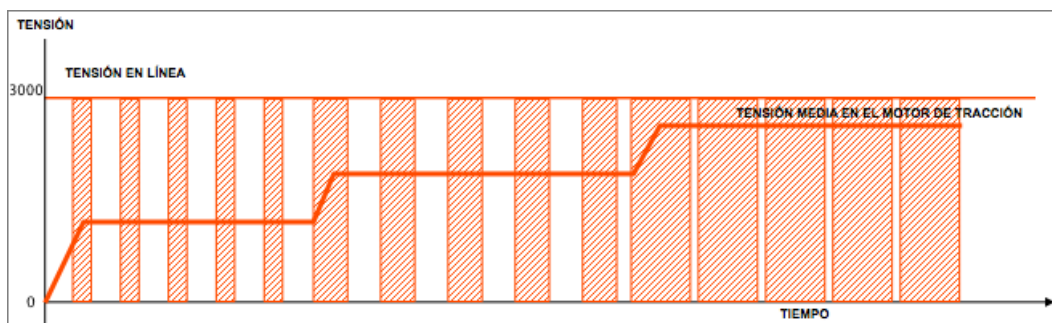


Fig. 5.3.9 Esquema funcionamiento chopper

Tenemos una tensión continua de 3000Vcc en la catenaria que alimenta nuestro tren, si queremos que nuestro tren funcione al 100% de la potencia nominal, se dejara pasar la tensión de la catenaria a los motores directamente, así los motores recibirán los 3000Vcc que serán su tensión nominal para girar a la velocidad nominal. Pero si queremos por ejemplo que nuestros motores funcionen a un tanto por ciento de la potencia nominal, debemos hacerle llegar el equivalente de tensión a esa potencia que queremos que desarrollen, para esto el chopper lo que nos hace es dividir la corriente continua que recibe de la catenaria en periodos muy pequeños (corriente de alta frecuencia), y la ondula en forma cuadrada como vemos en la Fig. 5.3.9 en los rectángulos rayados, cortando en cada pulso el tiempo correspondiente para que la resultante de la tensión sea la necesaria para inyectar en los motores como vemos en la línea continua.

Cuando queremos acelerar el motor desde cero, como está representado en la Fig. 5.3.9, en un inicio el chopper no dejara pasar tensión a los motores permaneciendo parado nuestro tren, en el momento en el que el chopper empieza a conmutar, lo que hace inicialmente es conducir un periodo pequeño de tiempo y permanecer en bloqueo más tiempo, en este momento el tren empezara a acelerar, cuanto más tiempo este conduciendo el chopper en cada periodo, mayor tensión llegara a los motores del tren, y por lo tanto más rápido girará, hasta llegar al momento en el cual conduce durante todo el periodo teniendo entonces la velocidad máxima.



Ahora que ya sabemos cómo se comporta el tren mediante el control del chopper, vamos a ver cuáles son las operaciones internas que hace el chopper para conseguir esta regulación.

A continuación, vamos a ver la circuitería interior de un chopper GTO serie (Fig. 5.3.10) como podemos apreciar, anteriormente al chopper tenemos condensadores los cuales nos hacen la función de filtrado de perturbaciones electromagnéticas que se crean en los transitorios de las maniobras de apertura y cierre de los tiristores.

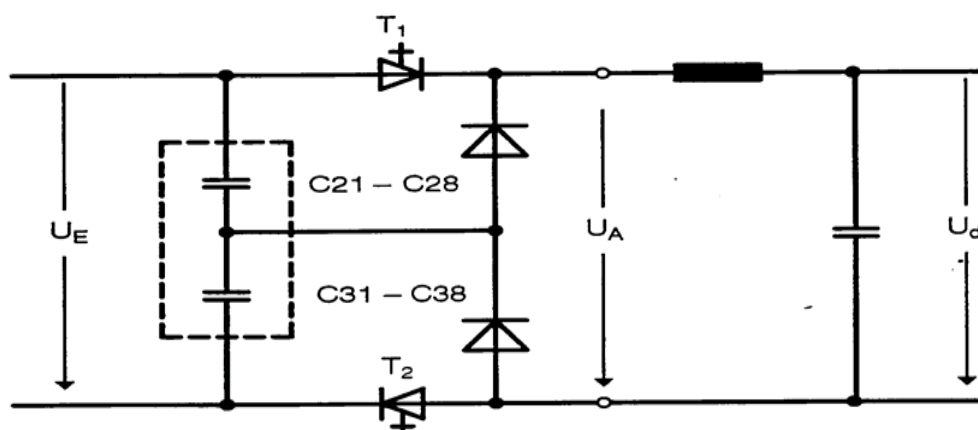


Fig. 5.3.10 Esquema interior chopper

Veamos ahora pues, como se comportan los distintos tiristores en cuanto a su disparo mediante la Fig. 5.3.11 veremos el recorrido de la corriente, y la tensión resultante a la salida del chopper con respecto a la entrada, como podemos apreciar en 1, si no se efectúa el disparo de ninguno de los tiristores, la tensión a la salida del chopper será 0. En 2 podemos apreciar que para que la tensión a la salida del chopper sea la misma que a la entrada, se deberá efectuar el disparo de ambos tiristores simultáneamente para dejar el paso libre a la corriente, el efecto sería el mismo que cortocircuitar el chopper, para ser más claros, como si no existiese.

Tanto en 3 como en 4 podemos ver el recorrido dependiendo del disparo del tiristor T1 o T2, mediante los cual conseguimos que a la salida haya la mitad de tensión que a la entrada del chopper.

Esto no significa que solo se puedan conseguir a la salida las tensiones 0,  $\frac{1}{2}$ , 1, en parte sí, pero en realidad mediante un mayor o menor número de disparos en el tiempo podemos conseguir aumentar o disminuir esa tensión de salida como hemos visto anteriormente.

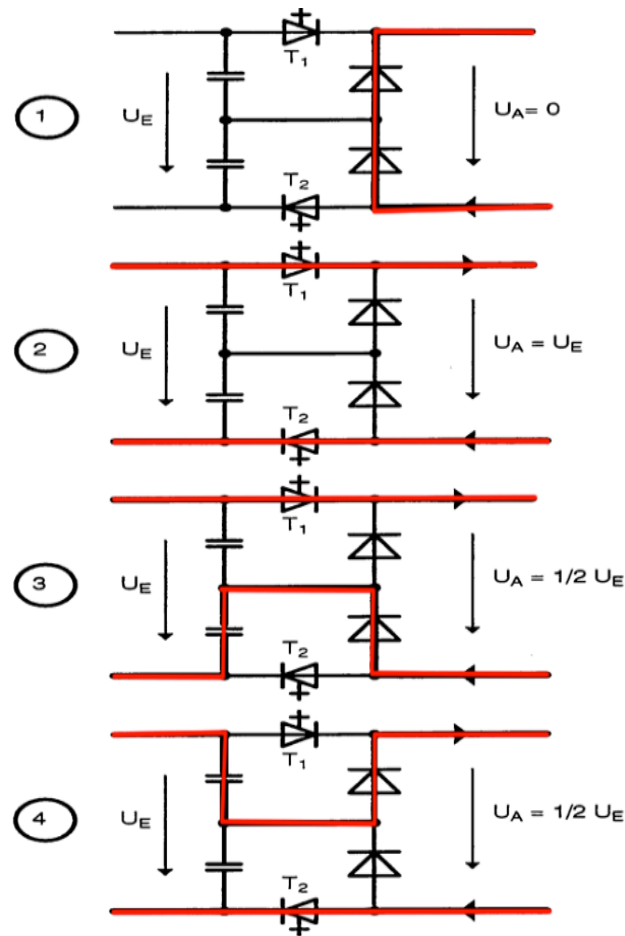


Fig. 5.3.11 Disparo de los tiristores

La Fig. 5.3.12 nos muestra la secuencia de disparos que tendrá lugar para obtener tensiones de salida menores a 0,5 la tensión de entrada. La línea roja representa la tensión de salida del chopper mediante cada una de las 4 maniobras vistas anteriormente, mientras que  $U_d$  será la tensión media de salida del chopper, la tensión que llegaría a los motores.

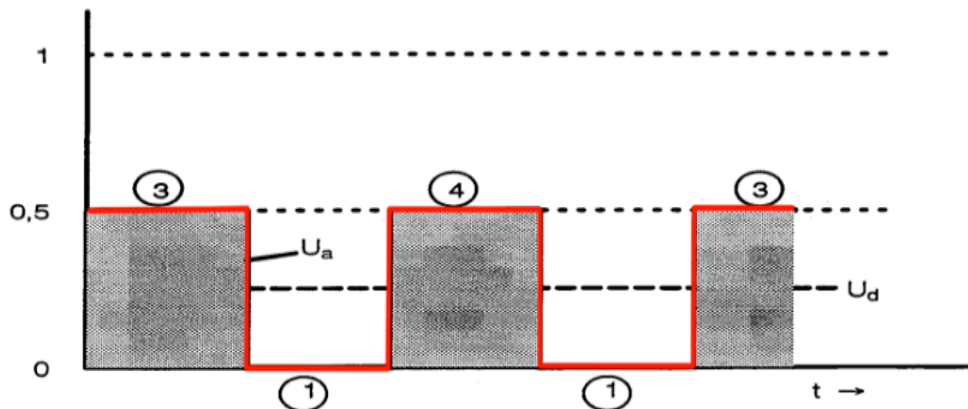


Fig. 5.3.12 Secuencia para conseguir tensiones de salida menores a 0,5 la tensión de entrada



La Fig. 5.3.13 nos muestra la secuencia de disparos como en el caso anterior, pero en esta ocasión para obtener tensiones de salida del chopper mayores a 0,5 veces la tensión de entrada del mismo, como podemos apreciar en esta ocasión la maniobra 1 del caso anterior, se sustituye por la maniobra 2 de este caso para poder llegar al 100% de la tensión de entrada y así poder obtener la potencia nominal en los motores.

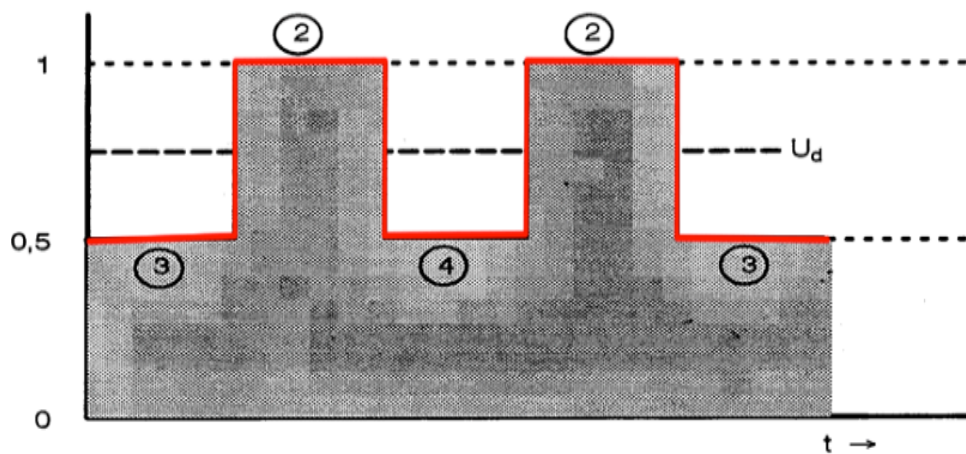


Fig. 5.3.13 Secuencia para conseguir tensiones de salida mayores a 0,5 la tensión de entrada







## **5.4 CONVERTIDOR ALTERNA / ALTERNA**

Otra de las transformaciones de energía que se dan en el mundo de la tracción eléctrica ferroviaria es la de corriente alterna / corriente alterna (ca/ca).

Esta transformación está muy presente en las líneas de alta velocidad, en las cuales la alimentación desde la catenaria se hace en corriente alterna a 25kV y 50 Hz. Por eso a la entrada de la máquina, después del pantógrafo y los correspondientes disyuntores y seccionadores para aislar la máquina de la catenaria, está el transformador principal.

La función de este transformador es la de adaptarnos la elevada tensión de la catenaria que entra en la máquina, a una tensión más baja para poder operar con ella en el resto de elementos de control de potencia y auxiliares.

Veamos entonces más en profundidad estos transformadores de los que estamos hablando.

### **5.4.1 TRANSFORMADORES**

Los transformadores son elementos más bien eléctricos que electrónicos, los cuales están encargados no tanto del control de la potencia como de la adecuación de la tensión y la intensidad para su utilización en el circuito de potencia y auxiliar de la máquina locomotora.

El transformador es un dispositivo que nos permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna (muy importante este matiz por lo que veremos a continuación), manteniendo la potencia. La potencia de entrada en un transformador ideal sin pérdidas, es la misma que la potencia de salida del mismo, evidentemente en un transformador real, no tendremos la misma potencia a la entrada y a la salida por las pérdidas asociadas al propio transformador .



El transformador está constituido por dos bobinas de material conductor arrolladas sobre un núcleo ferromagnético aisladas entre si eléctricamente, los arrollamientos de las bobinas se denominan primario y secundario dependiendo si es la bobina de entrada o de salida del transformador.

Los modelos de trenes de alta velocidad provistos de transformadores serán todos aquellos que se alimenten de la catenaria en corriente alterna, como son las Series S - 100, S - 102, S - 103, siendo estas de alta velocidad AVE. Después en el caso de los ALVIA S - 120, S - 130. Y por último los AVANT S - 104, S - 114 y S - 121.

Estando situado un transformador principal a la entrada de corriente desde la catenaria a la máquina, justo después del disyuntor del pantógrafo. Vamos a ver un pequeño esquema de cómo estaría dispuesto un transformador dentro de un tren el cual se alimenta por supuesto en corriente alterna, pero cuyos motores son también de corriente alterna que sería el caso más completo y además el más usual en la tracción eléctrica ferroviaria (Fig. 5.4.1).

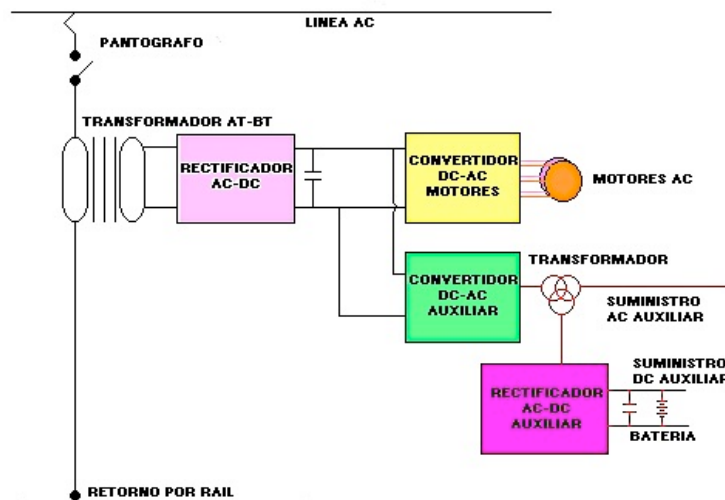


Fig. 5.4.1 Esquema potencia y control tren alta velocidad

Estos modelos mencionados anteriormente están alimentados a 25kV y 50 Hz por las catenarias de alta velocidad, aunque algunos de estos modelos son trenes denominados bi-tensión, debido a que además de ser alimentados en corriente alterna a 25kV, pueden también alimentarse a 3000Vcc, una posibilidad que les abre las puertas al tránsito por diferentes líneas de alta velocidad, y que veremos más adelante como es la estructura de potencia de estos trenes.



Volvamos a la corriente alterna, puesto que es la que nos acontece ahora para la explicación de los transformadores, puesto que por todos es sabido que los transformadores tan solo pueden ser empleados en corriente alterna por su principio de funcionamiento y no siendo posible su utilización en corriente continua.

El principio de funcionamiento de los transformadores reside en el fenómeno de la inducción electromagnética, la cual tiene su explicación matemática en las ecuaciones de Maxwell.

La corriente eléctrica que atraviesa el bobinado primario o inductor de un transformador eléctrico produce la inducción de un flujo magnético en el núcleo de material ferromagnético sobre el que está envuelto la bobina, según la ley de Faraday, si dicho flujo magnético es variable (lo cual solo se consigue teniendo una corriente alterna), aparece una fuerza electromotriz en el devanado secundario o inducido. De este modo el circuito primario y secundario quedan acoplados mediante un campo magnético, aunque están aislados galvánicamente. La tensión inducida en el devanado secundario, con respecto a la tensión recibida en el primario, depende directamente de la relación entre el número de espiras del devanado primario y del secundario, lo cual se denomina relación de transformación.

La corriente a la salida del transformador principal continúa estando como corriente alterna, y como podemos observar en la Fig. 5.4.1 esta corriente alterna va a ser rectificadas y convertida a corriente continua para el control de potencia, para después volver a ser pasada por unos onduladores para el abastecimiento de los equipos auxiliares, y para el caso de que los motores del tren sean de corriente alterna.

Los transformadores de los trenes de alta velocidad tienen una construcción un poco especial en cuanto a la naturaleza de los materiales, puesto que son de las partes más pesadas del tren, por eso su construcción se comenzó a basar en láminas de aluminio y de acero aleado con cobalto en lugar de los núcleos de hierro e hilos de cobre típicos en otros transformadores, estos materiales de construcción hicieron posible reducir el peso de los transformadores principales de los trenes con respecto a uno convencional de calle de 11 a 7,5 toneladas de peso.



Para conseguir esta reducción de peso y de tamaño, importantísima en el caso de los trenes, puesto que cada kilo y cada centímetro cuenta y mucho al ser masa y volumen que hay que transportar, en los transformadores de última generación como los equipados por el ICE3 o el VELARO (RENFE Serie S - 103), los devanados secundarios de estos transformadores actuarán también como inductancias de línea de los convertidores eléctricos cuando el tren funcione conectado a la catenaria de corriente continua. Este módulo transformador de 5220kVA de potencia, junto con su equipo de refrigeración tienen una masa de tan solo 7700kg.



Fig. 5.4.2 Transformado de tracción ABB para el Velaro D

La cubierta del transformado se ha realizado en aluminio, lo cual le da ligereza, la integración del depósito de expansión (para el refrigerante) en la unidad contribuye también a reducir el peso. El sistema de refrigeración utiliza motores de 60Hz en lugar de los habituales de 50Hz, lo que permite reducir el peso sin sacrificar rendimiento de refrigeración. Por otra parte, se han incluido filtros de condensadores para reducir los armónicos resultantes, algo que en las aplicaciones ferroviarias es de vital importancia, puesto que los armónicos resultantes de la transformación pueden interferir en los sistemas de señalización.

El transformador de tracción de última generación del Velaro D (Fig. 5.4.2) forma junto con el sistema de refrigeración un conjunto plug and play muy útil para la instalación y mantenimiento. Un concepto totalmente nuevo en los trenes de Siemens que solían emplear fuentes de alimentación distintas para el transformador y para las bombas de refrigerante. De este modo, la unidad del Velaro D, no exige degasificación o recambio de refrigerante, lo que le permite funcionar durante periodos más largos con las mínimas operaciones de mantenimiento.



A continuación, vamos a ver el futuro de los transformadores, esto es en lo último que está trabajando la empresa francesa JST-TRANSFORMERS para un nuevo modelo de alta velocidad diseñado por el gigante asiático Hyundai.

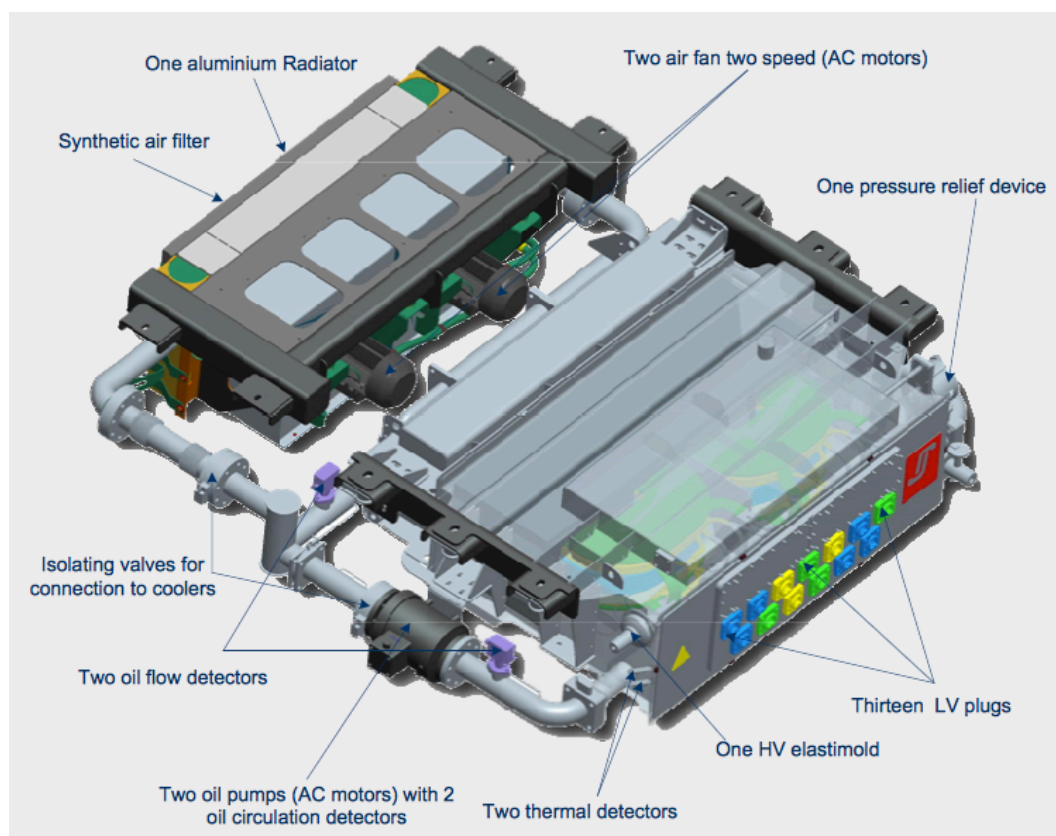


Fig. 5.4.3 Transformador JST-TRANSFORMERS

Este transformador como principal ventaja tiene el uso de tecnología acorazada, lo cual permite un diseño compacto que permite una mejor adaptación dimensional, una masa reducida, puesto que si hasta ahora estábamos hablando de un record en ligereza con el peso de 7700kg del Velaro D, en este caso estaríamos hablando de un peso con refrigerante incluido de menos de 4000 kg, casi la mitad de peso que el anterior debido en gran parte al uso como refrigerante de Ester, lo cual nos proporciona una resistencia natural elevada en caso de cortocircuitos, un enfriamiento uniforme de todo el transformador y un desacoplado perfecto entre los devanados secundarios.

A continuación, dejamos la hoja de características principales de este transformador.



- Frequency : 60 Hz
- Type of cooling : KDAF
- Standard : CEI 60130

	Winding					
	Primary	Secondary				Tertiary
Connection	1U-1V	2U1-2V1	2U2-2V2	2U3-2V3	2U4-2V4	3U1-3U2 3V1-3V2
Capacity (KVA)	4,350	975	975	975	975	450
No load Voltage (V)	25,000	1,400	1,400	1,400	1,400	380
Rated current (A)	174	696	696	696	696	1,184

- Total weight with oil : < 4000 kg
- Thermal class : H
- Type of oil : ESTER
- Design under patent

Fig. 5.4.4 Hoja características transformador JST-TRANSFORMERS

Como podemos ver en esta hoja de características (Fig. 5.4.4), los transformadores empleados en los sistemas de tracción eléctrica cuentan con 2 rangos de transformación, lo cual significa que una de las salidas del secundario es a una tensión de entorno a 1500V, los cuales se emplearan para el abastecimiento de energía de los motores después de las correspondientes operaciones de rectificado etc.... y luego disponemos de un terciario cuya salida suele ser a 380V la cual se emplea para el abastecimiento energético de los sistemas auxiliares que porta el tren, como son sistema de iluminación, sistemas de confort (aire acondicionado, calefacción...) y sistemas de control, esto últimos todo lo referido a la monitorización que funciona a 12V en corriente continua serán abastecidos mediante unas baterías.



## 5.4.2 CONTROL POR VARIADOR

Como hemos visto, en el caso del transformador la corriente no sufre modificación alguna que nos permita controlar los motores, simplemente lo que hemos conseguido es bajar la tensión de la catenaria a unos valores actos para proceder al control en otros elementos que porta el tren.

Ahora veremos un tipo de convertidor alterna / alterna el cual, sí que nos permite el control de la tensión de salida, este es el denominado control por variador, el cual nos permitirá controlar los motores de corriente alterna de nuestros trenes mediante la variación de la frecuencia de la tensión de corriente alterna de la catenaria.

Este control por variación es empleado en el control de los motores asíncronos trifásicos, y aunque interiormente se componga básicamente de un rectificador seguido de un ondulator (Fig. 5.4.6), lo albergaremos en este punto puesto que tanto la entrada como la salida del mismo está efectuada en corriente alterna.

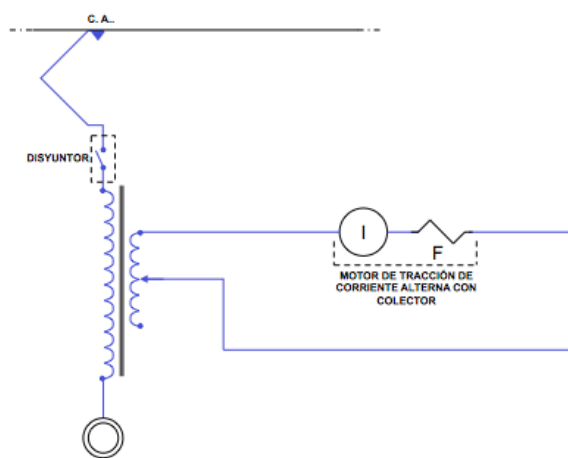


Fig. 5.4.5 Esquema equipo control por variador

Aunque en la Fig. 5.4.5 donde vemos el esquema del equipo de control por variador, podamos confundirlo con un transformador sin más, a continuación veremos como el variador de frecuencia consigue adaptar el valor de la tensión de salida del variador mediante el control de la frecuencia del mismo, mientras que en el caso del transformador lo que ocurría es que mediante una relación de transformación debido al número de espiras tanto de los arrollamientos primarios como secundarios, la tensión de salida era un múltiplo exacto y fijo de la tensión de entrada del mismo.



Un variador de frecuencia es un sistema electrónico para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de su frecuencia de alimentación suministrada al motor. Los variadores de frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable.

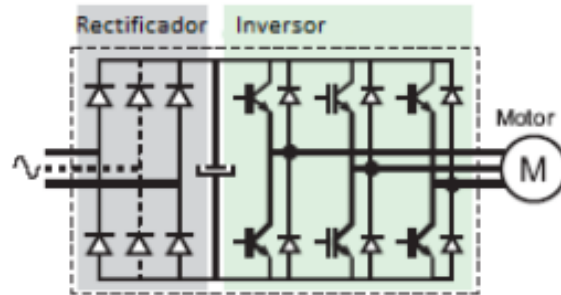


Fig. 5.4.6 Diagrama de bloques de un variador de frecuencia

Estos dispositivos entregan voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto, toma la alimentación eléctrica desde la catenaria la cual tiene una tensión y una frecuencia fija, la transforma en corriente continua y luego la transforma otra vez en voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un inversor.

En la Fig. 5.4.7 vamos a ver la comparación de la tensión en el secundario del transformador a 50Hz (onda azul), con respecto a la tensión en la salida del variador a una frecuencia de  $16 + \frac{1}{4}$  (onda naranja).

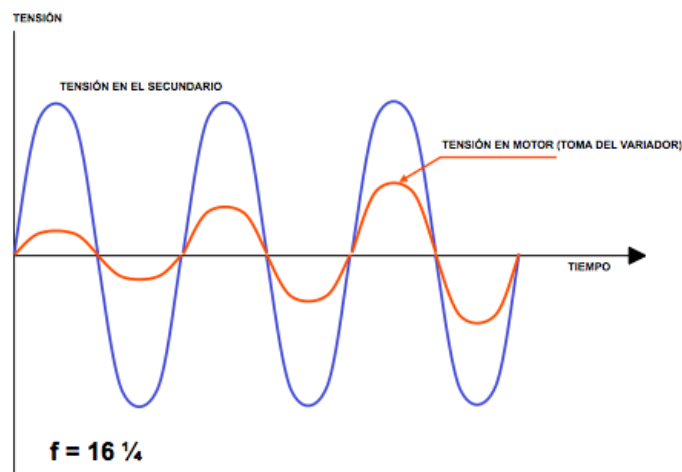


Fig. 5.4.7 Comparación frecuencia 50Hz vs  $16 + \frac{1}{4}$





La forma de onda del voltaje de salida en estricto rigor, no es una senoide perfecta, puesto que entregan una señal de pulso modulada a partir de una frecuencia de conmutación alta. Los equipos actuales, donde podemos encontrar frecuencias de conmutación muy altas del orden de 50kHz los contenidos de armónicos serán bastante bajos, por lo tanto, agregando filtros pasivos cumplen las normativas.

Otra de las características principales de los variadores a parte de la del control de velocidad, es la de permitirnos una aceleración controlada en todo momento mediante una rampa de aceleración lineal o curva, la cual nos permite elegir tanto el tiempo de aceleración adecuado a cada momento.

La velocidad del motor se controlará de la siguiente manera, la velocidad del motor se define mediante un valor de entrada, bien tensión o bien corriente llamada consigna o referencia. El valor de la consigna se compara permanentemente con la señal de alimentación, la cual es proporcional a la velocidad del motor. Esta señal la generará un generador tacometrico o un generador de impulsos situado en un extremo del eje motor, si se detecta una desviación como consecuencia de una variación de velocidad por un aumento del par resistivo (una pendiente), las magnitudes aplicadas al motor, tensión y/o frecuencia se corrigen automáticamente para volver a llevar la velocidad a su valor inicial.

Los equipos que se fabrican en la actualidad además de esta función, nos proporcionan funciones auxiliares como la de protección de los motores tanto térmicas, como protección contra cortocircuitos, sobretensiones, desequilibrios de fases, etc....





## **5.5 CONVERTIDOR ALTERNA / CONTINUA**

Otro de los convertidores que se dan en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y los cuales van acompañando a los anteriormente vistos son los convertidores de corriente alterna / corriente continua, también llamados rectificadores.

Estos rectificadores están presentes siempre que la alimentación se haga en corriente alterna como ya hemos visto en el caso de los variadores de frecuencia, puesto que nos es más fácil controlar la potencia suministrada a los motores de tracción mediante el control en corriente continua de la electricidad, aunque después tengamos que ondularla otra vez en el caso de que los motores de tracción que monte nuestro tren sean de corriente alterna como son los síncronos y asíncronos trifásicos, los cuales son los más extendidos en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria por sus múltiples ventajas.

### **5.5.1 RECTIFICADORES**

Siguiendo con la alimentación en corriente alterna por parte de la catenaria, otro de los elementos que nos encontramos, casi siempre en complemento del transformador principal como hemos visto anteriormente en el esquema de la Fig. 5.1.1 es el rectificador de corriente.

Un rectificador es un subsistema electrónico cuya misión es la de convertir la tensión alterna cuyo valor medio es nulo en otra tensión unidireccional cuyo valor medio sea no nulo. A la hora de llevar a cabo la rectificación, se han de utilizar elementos electrónicos que permitan el paso de la corriente en solo un sentido, permaneciendo bloqueados cuando se le aplique una tensión de polaridad inapropiada. Para ello, el componente más adecuado y utilizado es el diodo semiconductor, empleado fundamentalmente en los rectificadores no controlados.

Existen puentes rectificadores semicontrolados en los cuales se alternan diodos con tiristores, y en el caso de los puentes rectificadores totalmente controlados se sustituyen todos los diodos por tiristores para controlar perfectamente los disparos.



En el caso de la tracción eléctrica ferroviaria los rectificadores extendidos son los puentes rectificadores semicontrolados (Fig. 5.5.1) los cuales están compuestos por diodos semiconductores y tiristores, los cuales nos regularan la tensión de salida mediante el control de sus disparos.

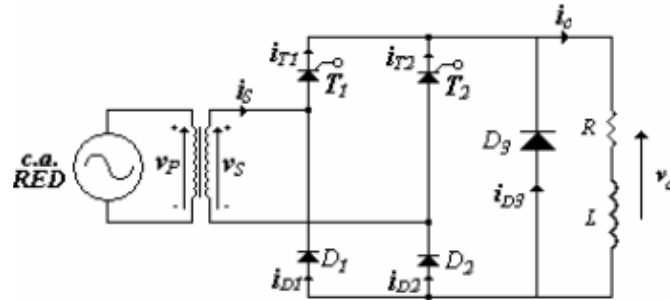


Fig. 5.5.1 Esquema puente rectificador mixto

A continuación, vamos a explicar cómo sería el funcionamiento de este puente rectificador mixto, el cual podría estar equipado en cualquiera de los modelos de alta velocidad que se alimentan en corriente alterna de la catenaria.

Durante el semiciclo positivo el tiristor T1 está polarizado en directa pudiendo dejar pasar la corriente a través de él, cuando  $\omega t = \alpha$ , se producirá el disparo de T1 dejando pasar la corriente a través de él y de D2, en el intervalo  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ , será el tiempo de conducción de estos 2 elementos. Cuando  $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ , en el secundario habrá una tensión negativa, provocando el bloqueo de T1 y que este y D2 dejen de conducir, provocando la entrada en conducción del diodo volante D3, que se encargará de transferir la corriente a la carga. En el semiciclo negativo tendremos a T2 en directo y su conducción comenzará para  $\omega t = \pi + \alpha$  hasta  $\omega t = 2\pi$ , conduciendo también D2.

A continuación, vamos a representar las formas de onda obtenidas con este tipo de rectificador Fig. 5.5.2.

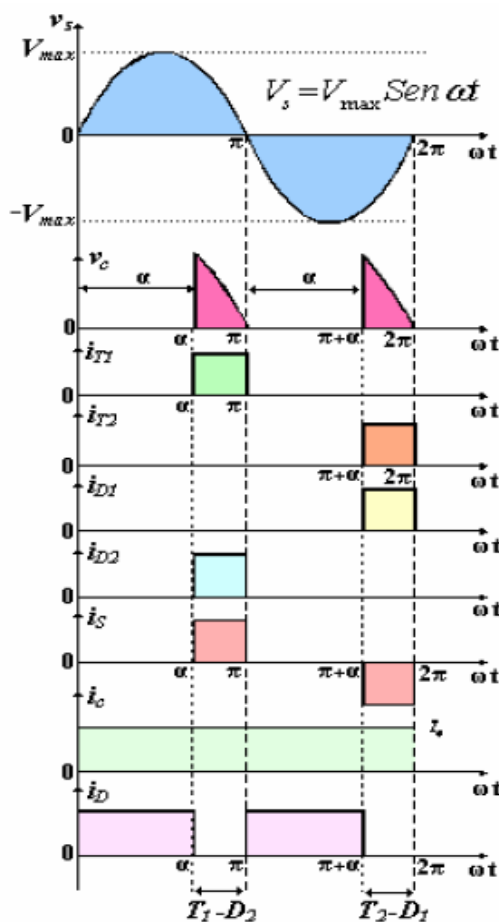


Fig. 5.5.2 Representación tensión y corriente en los distintos elementos del rectificador

En la representación anterior tenemos una secuencia del comportamiento de las ondas en el interior del rectificador de la Fig. 5.5.1 en la cual vemos la onda de la tensión a la salida del transformador (onda azul), como es una onda senoidal perfecta, la cual mediante los diodos de los que se dispone en el rectificador, conseguimos rectificar la parte negativa de la onda convirtiéndola en positiva, y mediante el retraso en el disparo de los tiristores ( $\alpha$ ) conseguimos cortar la onda senoidal inicial quedándonos la onda de tensión como podemos apreciar en la gráfica rosa.

Para conseguir esa tensión en la carga, en nuestro caso en los motores, tenemos que fijarnos en los periodos de conducción de las 4 graficas siguientes (verde, naranja, amarilla, azul) en las cuales vemos la corriente que pasa por cada uno de los diodos y tiristores en cada momento.

La corriente en la carga correspondiente a la rectificación sería la que vemos en color verde claro, de naturaleza continua.



En el caso de los trenes los cuales circulan por vías cuya catenaria se alimenta en corriente alterna, estos rectificadores estarán incluidos en los convertidores alterna / alterna vistos en el punto anterior, en los cuales el transformador visto en el punto 5.4.1, lo que nos hace es adaptar la tensión elevada de la catenaria, en el caso de los trenes de alta velocidad 25kV 50Hz, a una tensión más fácil de emplear en el interior de nuestra maquinaria, normalmente 1500Vca para la rectificación y suelen tener otra toma del secundario donde se nos proporcionan 380Vca para los elementos auxiliares.

Estos puentes rectificadores tienen mucha presencia también en los trenes los cuales monten motores de corriente continua, bien alimentados por la catenaria en corriente alterna mediante el paso por transformador (Fig. 5.5.3), o bien alimentados en corriente continua pasando directamente de la catenaria al puente rectificador. En el caso de los trenes de alta velocidad alimentados a 3000Vcc, este puente rectificador mixto se comportará como si fuese un chopper, recibiendo la corriente continua directamente de la catenaria, y mediante su control por el disparo de los tiristores será inyectada a la tensión necesaria en forma de corriente continua.

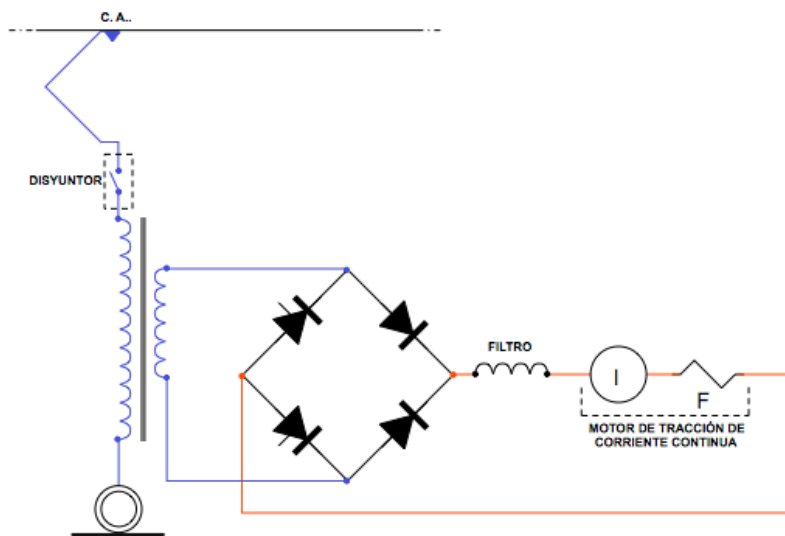


Fig. 5.5.3 Equipo de control por variación del ángulo de encendido de los tiristores

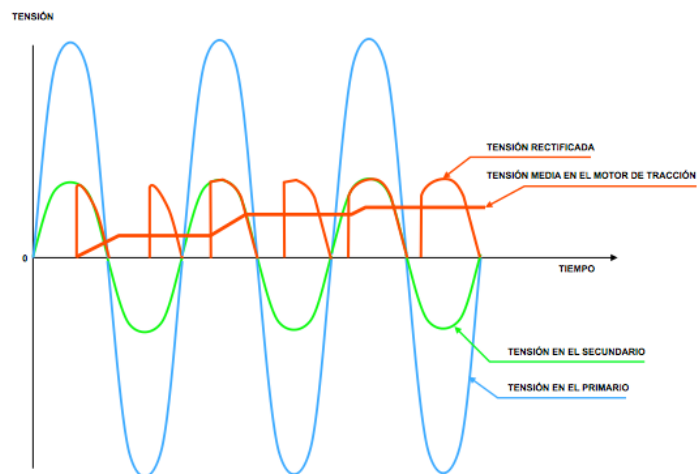


Fig. 5.5.4 Control por variación del ángulo de encendido de los tiristores

En este caso (Fig. 5.5.4) veremos la rectificación desde la entrada de la tensión desde la catenaria (onda azul), podemos comprobar como en el paso por el transformador lo único que se hace es la disminución de la amplitud de la onda de tensión del secundario (onda verde), para mediante el paso por el puente rectificador convertirlo en una tensión rectificada (onda naranja), y mediante cuyo control de disparo de los tiristores, conseguimos que esta onda rectificada sea de mayor o menor duración consiguiendo así una tensión media que alimenta al motor en corriente continua (línea naranja).







## **5.6 CONVERTIDOR CONTINUA / ALTERNA**

Este va a ser el último de los convertidores que nos vamos a encontrar en la tracción eléctrica ferroviaria, aunque es un convertidor corriente continua / corriente alterna, es más comúnmente conocido como inversores u onduladores trifásicos.

Las aplicaciones típicas de los inversores de potencia suelen ser, sistemas de alimentación ininterrumpida, accionamientos de motores de corriente alterna de velocidad ajustable, abastecimiento de los dispositivos de corriente alterna que funcionen a partir de una batería. Estos 2 últimos casos, son los que nos atañen en cuanto al control de la potencia de los motores asíncronos trifásicos de nuestro tren, y de los elementos auxiliares que funcionen en corriente alterna.

El ondulator nos sonará del punto 5.4.2 donde hemos visto como los variadores de frecuencia estaban compuestos de un rectificador alterna / continua, seguidos de un ondulator continua / alterna para poder tener la salida del variador en corriente alterna.

### **5.6.1 ONDULADOR TRIFASICO**

Los onduladores o inversores son convertidores estáticos de energía que convierten la corriente continua en corriente alterna, con la posibilidad de alimentar una carga en alterna, regulando la tensión, la frecuencia o bien ambas. Más exactamente, los inversores transfieren potencia desde una fuente de continua a una carga de alterna.

En nuestro caso todos aquellos trenes cuyos motores sean en corriente alterna, asíncronos trifásicos, portaran onduladores, o bien como elemento individual en el caso de los trenes alimentados por corriente continua desde la catenaria, en los cuales la regulación de potencia se efectúa por medio de un chopper, o bien formando parte del convertidor alterna / alterna visto anteriormente, que como ya hemos explicado estaba formado por un rectificador seguido de un inversor.

Suelen distinguirse tres configuraciones o topologías de inversores, con transformador de toma media (push – pull), con batería de toma media (medio puente) y configuración en puente completo.



Corresponden a las tres formas más razonables de realizar la función de inversión de tensión o corriente suministrada por la fuente de continua con los medios disponibles hoy día en electrónica de potencia.

En el caso de la tracción eléctrica ferroviaria el tipo empleado es el inversor en puente completo el cual está formado por interruptores de potencia totalmente controlados como son los transistores MOSFET o IGBT.

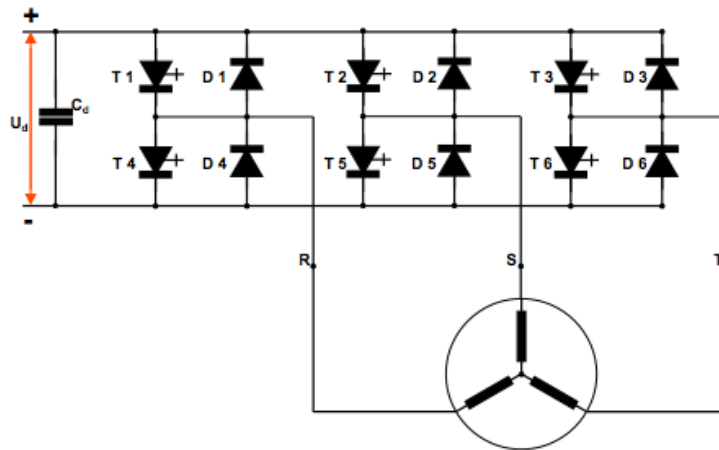
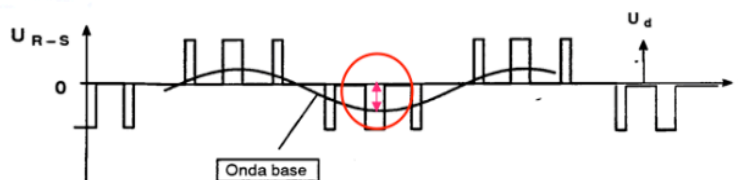
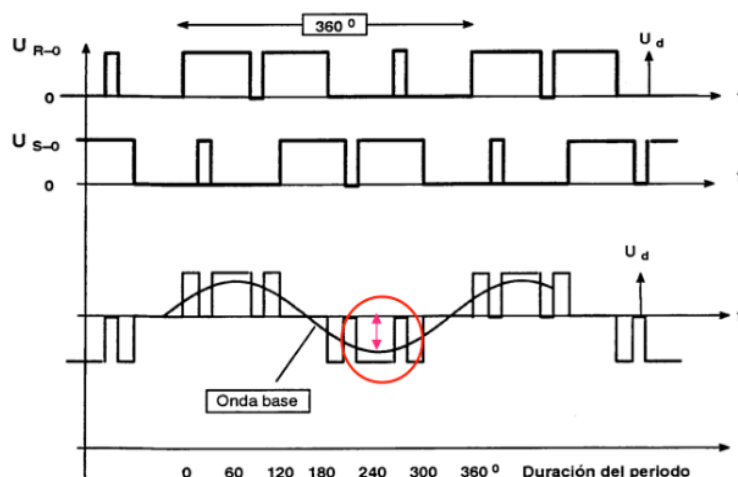


Fig. 5.6.1 Ondulador pulsatorio trifásico

Como podemos ver en la figura anterior, el ondulator trifásico esta compuesto por la asociación de lo que serían tres onduladores monofásicos, y está basado en el control por modulación de anchura de pulsos PWM.

El ondulator o inversor es capaz de controlar la tensión de salida del mismo, mediante el control de la anchura de los impulsos y la cantidad de los mismo en un periodo de tiempo conseguimos variar la altura (amplitud) de la onda base, como vemos a continuación.



5.6.2 Control de la tensión mediante la anchura y numero de pulsos

El control por modulación de anchura de pulsos o PWM se emplea en los casos en los que se quiere mejorar el contenido de armónicos en la salida del inversor, algo muy necesario en los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria puesto que los armónicos creados en los elementos de control de potencia pueden interferir gravemente en los sistemas de señalización y seguridad del tren y la vía.

Para explicar este sistema vamos a hacerlo sobre un ondulador monofásico como el de la Fig. 5.6.3.

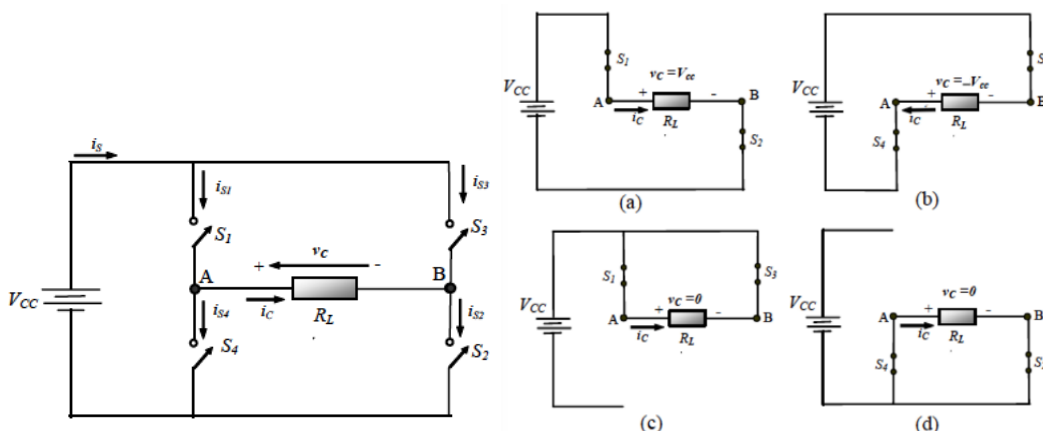


Fig. 5.6.3 inversor monofásico de puente completo y sus posibles contactos



Como podemos apreciar en la figura anterior, mediante la apertura y cierre de los distintos interruptores controlados (transistores, tiristores...), podemos obtener distintas tensiones a la salida del ondulator, así pues, si cerramos S1 y S2 (a), la tensión en la salida será la misma que en la fuente de continua, si cerramos S3 y S4 (b) la tensión a la salida será  $-V_{cc}$ , y en los casos de cerrar S1 y S3 o S2 y S4, (c) y (d) a la salida se tendrá tensión 0.

La idea de este sistema es comparar una tensión de referencia senoidal de baja frecuencia (que sea imagen de la tensión de salida buscada) con una señal triangular simétrica de alta frecuencia cuya frecuencia determine la frecuencia de conmutación. La frecuencia de onda triangular (llamada portadora) debe ser, como mínimo 20 veces superior a la máxima frecuencia de la onda de referencia, para que se obtenga una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después de efectuar el filtraje. La señal resultante de dicha comparación nos generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia.

En la Fig. 5.6.4 vamos a ver la representación gráfica de la generación de una señal PWM y en la Fig. 5.6.5 una ampliación de la misma en un cuarto de senoide.

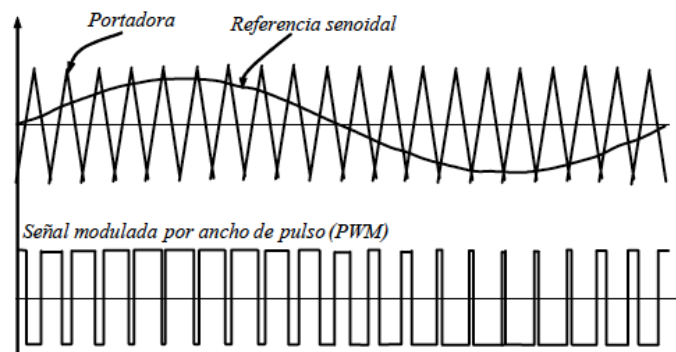


Fig. 5.6.4 Representación gráfica de la generación de una señal PWM

A partir de la señal PWM se generan los pulsos de apertura y cierre de los interruptores. Por ejemplo, si la señal PWM tiene un valor alto, se cierran los interruptores S1 y S2 (Fig. 5.6.3). en caso contrario se cierran los interruptores S3 y S4. Por tanto, la tensión de salida, que es aplicada a la carga, está formada por una sucesión de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión de alimentación en continua y de duración variable. El contenido de armónicos de la tensión de salida se desplaza hacia las frecuencias elevadas y es más fácil de filtrar.

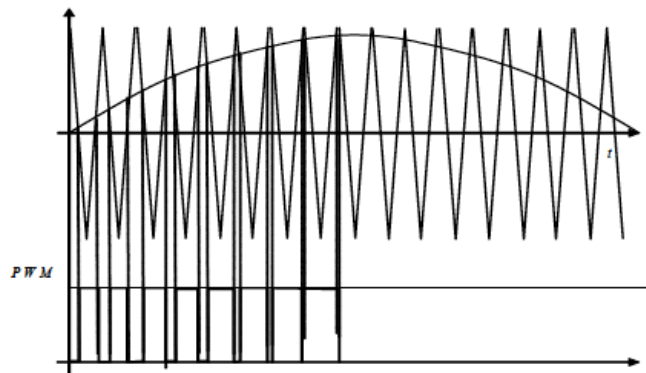
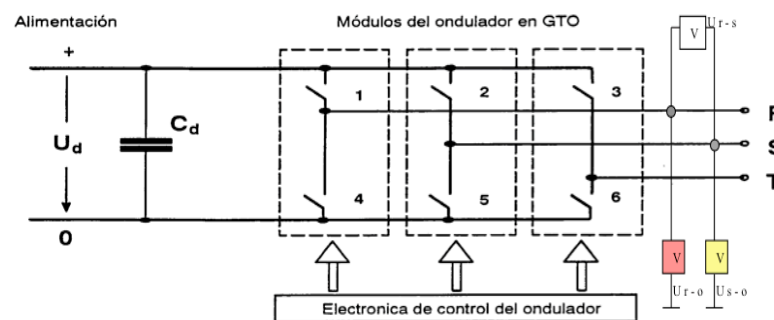


Fig. 5.6.5 Generación de una señal PWM en un cuarto de senoide completa

Una vez explicado esto, vamos a ver como es un ondulator pulsatorio trifásico como los aplicados en los trenes de alta velocidad, mediante la Fig. 5.6.6 vamos a ver como se construye la onda senoidal a partir de las ondas cuadradas que nos genera el ondulator.



**Formación de la tensión a la salida del convertidor: ejemplo de las fases R y S :**

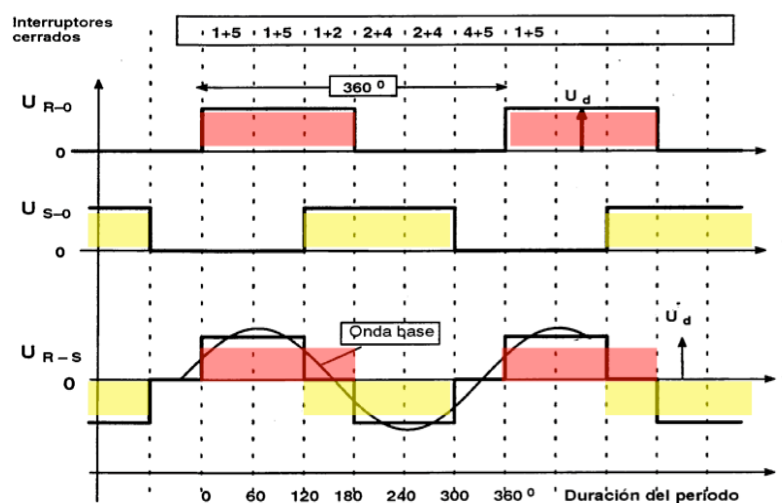


Fig. 5.6.6 Formación de la tensión de salida del convertidor para las fases R y S



Vamos a explicar paso a paso como se completa el primer ciclo de la onda senoidal para las fases R y S mediante el disparo de los distintos tiristores.

Cuando se produce el disparo de los tiristores T1 y T5, el voltímetro conectado entre la fase R y neutro, queda con tensión mientras que el voltímetro de la fase S estaría a tensión 0 (masa), como podemos ver la primera grafica es la que representa la tensión en la fase R, mientras que la segunda es la que representa la tensión en la fase S, cuando se produce el disparo de los tiristores T1 y T2, tendremos tensión en ambas fases R y S, mientras que cuando se produzcan los disparos de los tiristores T2 y T4 quedará en tensión la fase S mientras que la fase R tendrá tensión 0 (masa).

En la tercera grafica podemos ver la diferencia de tensión entre ambas fases, si R y S tienen tensión 0, evidentemente la resultante tendrá tensión 0, cuando la fase R tiene tensión y la S tiene 0, la resultante será tensión positiva, cuando tanto R como S tengan tensión, la diferencia entre ambas será 0, y por ultimo cuando la tensión en R sea 0 y en S tengamos tensión, la tensión resultante será negativa.

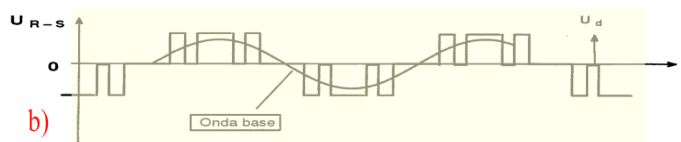
Así pues, podemos ver cómo se van formando los distintos pulsos positivos y negativos para después mediante el filtrado de la misma se obtendrá la señal senoidal resultante.

El ondulator PWM tiene 3 zonas distintas de trabajo (Fig. 5.6.7).

**Pulsación libre (asíncrona):**



**Pulsación n (p. ej.  $\rightarrow$  pulsación triple, n = 3):**



**Pulsación a la frecuencia base (de bloque completo):**

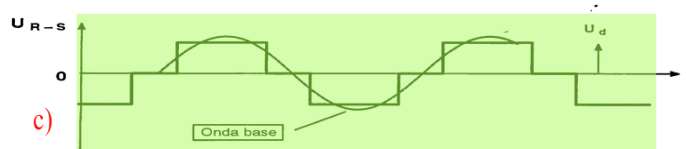


Fig. 5.6.7 Zonas de trabajo ondulator pulsatorio



La zona primera es la denominada pulsación libre (zona azul), con frecuencias del motor pequeñas, el ondulator trabaja en la llamada zona de pulsación libre.

El mando electrónico del ondulator conmuta los tiristores GTO de cada módulo de fase con la máxima frecuencia de pulsación. La frecuencia de pulsación no está sincronizada con la frecuencia del motor (salida del ondulator), la tensión del motor se compone de muchos bloques estrechos.

Al aumentar la frecuencia del motor, disminuye el número de conmutaciones dentro de un periodo de la frecuencia del ondulator y con ello el número de bloques de tensión. De esta forma aumenta el valor de la tensión del motor en relación con la frecuencia del motor.

En este procedimiento no se aplica la modulación por anchura de pulsos PWM, por lo que todos los bloques de tensión son iguales de anchos.

La siguiente zona de trabajo es la denominada zona de pulsación  $n$  (zona amarilla), en el caso de la imagen  $n=3$  (pulsación triple), a partir de un valor definido de frecuencia del motor, se produce el cambio de la zona de pulsación libre a la llamada zona de pulsación  $n$ .

La frecuencia de conmutación esta sincronizada con la frecuencia del motor y mantiene con ella una relación concreta ( $n$  veces superior, con  $n=3, 5, \dots$ ). Para posibilitar continuamente la adaptación de la tensión a la frecuencia del motor, se aplica, dentro de cada proceso de pulsación, el procedimiento de modulación por anchura de impulsos.

En una imagen de osciloscopio de la tensión del motor podríamos hacer las siguientes observaciones. Mismo número de bloques de tensión en cada media onda, el cual equivale al procedimiento de pulsación activo en ese momento (3 ondas = pulsación triple). La anchura de los bloques de tensión varia con la frecuencia del motor.

Si la frecuencia de conmutación necesaria sobrepasa el limite ( $f_{max}$ ), se cambia a un proceso de pulsación con menor frecuencia de conmutación.

Pulsación a frecuencia base es la tercera y última zona de trabajo del ondulator pulsatorio (zona verde), la menor frecuencia de conmutación se da en la llamada zona de pulsación a frecuencia base.



En este caso la frecuencia de conmutación equivale a la frecuencia del motor (frecuencia de salida del ondulator). En este procedimiento cada media onda está formada por un bloque completo de tensión. No es posible variar la tensión del motor. Un aumento de la frecuencia del motor por encima de la frecuencia nominal conduce obligatoriamente al servicio de campo debilitado de la maquina asíncrona (magnetización reducida proporciona un par del motor reducido).

El último paso para la ondulación de una corriente continua, sería el paso por el filtrado de salida de la tensión obtenida a la salida del inversor, dicho filtro se compone como vemos en la Fig. 5.6.8, de una impedancia serie y otra paralelo compuesta por condensadores y bobinas.

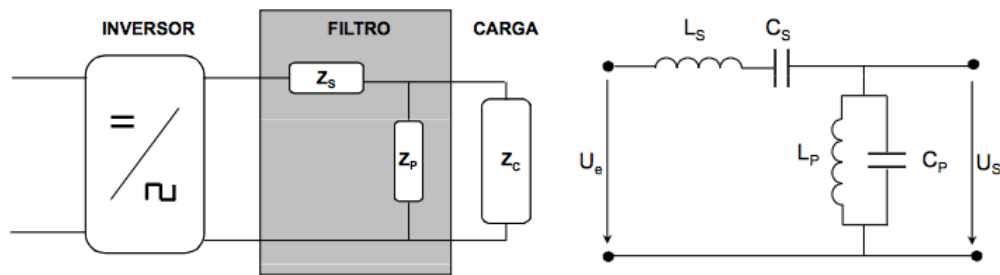


Fig. 5.6.8 Filtro de salida del ondulator en L generalizada

El objetivo del filtrado es ofrecer a la carga, en nuestro caso a los motores de tracción únicamente el primer armónico de la tensión que ha sintetizado el inversor, prescindiendo de los armónicos de orden superior que esta tensión lleva asociados. Por poner un ejemplo, en un motor de inducción, la componente fundamental de la forma de onda produce el par útil mientras que los armónicos se traducen en pérdidas y por tanto en un calentamiento extra, haciéndonos así perder mucho rendimiento.

Nos interesa que  $Z_s$  (Fig. 5.6.8) sea muy baja para el armónico fundamental, y muy alta para los demás, al contrario de los que ocurre con  $Z_p$  la cual debe ser muy elevada para el armónico fundamental y muy baja para el resto de los armónicos.

Esto lo conseguimos mediante ramas resonantes sintonizadas a la frecuencia del armónico fundamental y, en el caso de que tras el filtro en L todavía queramos eliminar algún armónico en particular, por ejemplo, el 3º, sintonizaremos una rama resonante L3, C3 (Fig. 5.6.9) a esta frecuencia triple de la fundamental.



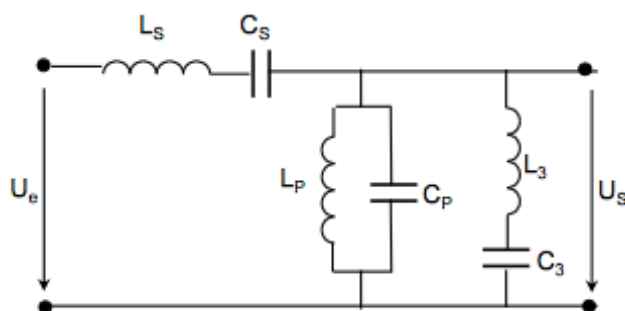


Fig. 5.6.9 Filtrado de armónicos en particular

Algunas cargas también tienen un efecto de filtrado por sí mismas, por ejemplo, vamos a observar como un motor de inducción, que como carga tiene un carácter altamente inductivo, filtra la corriente que absorbe, cuando le alimentamos con una tensión PWM (Fig. 5.6.10).

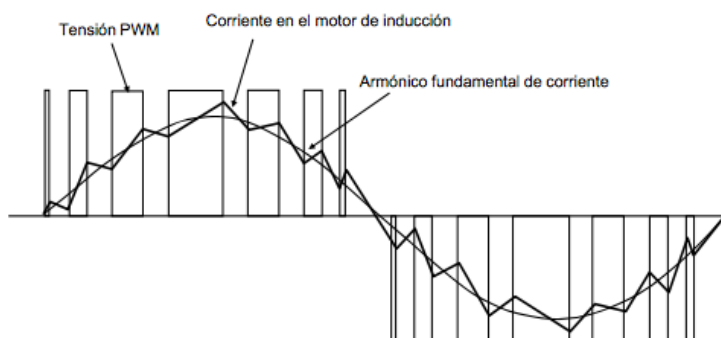


Fig. 5.6.10 Filtrado de los armónicos mediante el propio motor de inducción

A continuación, vamos a ver cómo sería un módulo ondulator de un tren, en esta ocasión es de la serie S - 9000 del metro de Barcelona, como vemos en la Fig. 5.6.12 un ondulator contiene más cosas como elementos de medida y protección para el buen funcionamiento del mismo.

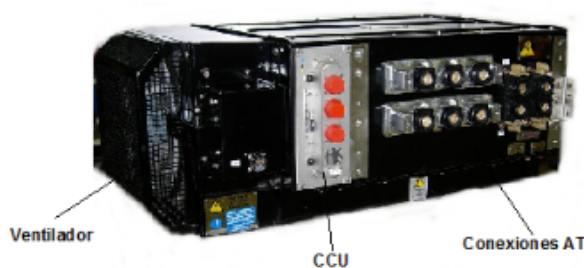


Fig. 5.6.11 Conjunto ondulator de tracción OCU



El ondulator de tracci3n OCU se trata de un m3dulo de 275kg de masa que tiene como funciones principales proporcionar una tensi3n alterna para alimentar a los motores de tracci3n as3ncronos que porta este modelo del metro de Barcelona, as3 como la de convertir la corriente alterna procedente de los motores en el proceso de frenado en corriente continua para que esta pueda ser consumida por otro tren pr3ximo a 3l, o disipada en las resistencias reostaticas del mismo.

Adem3s de las funciones principales, tambi3n realiza otras funciones que ser3n utilizadas como se3ales de control del propio equipo para su funcionamiento normal como son el filtrado/desacoplamiento, encendido/vigilancia, medici3n de corriente y de tensi3n, vigilancia de la temperatura y ventilaci3n del aparato. El caj3n CCU conforma la electr3nica de mando del ondulator de todas las funciones citadas anteriormente.

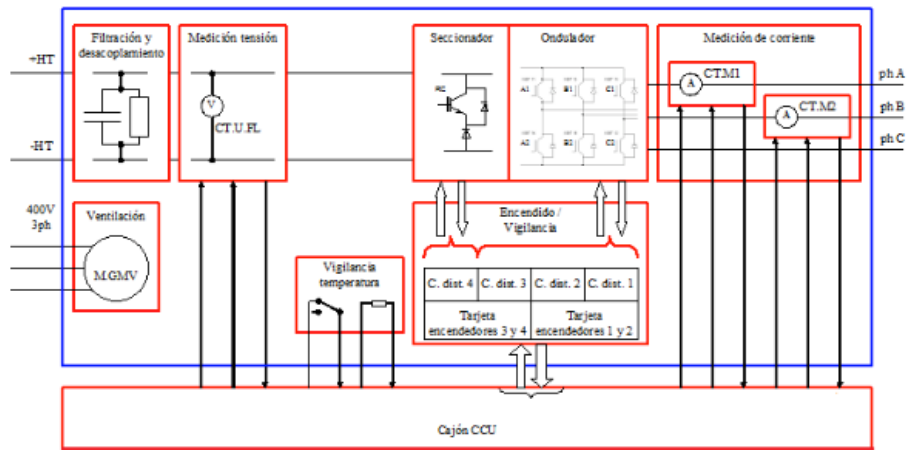


Fig. 5.6.12 Constituci3n interna del ondulator



## 5.7 TRENES BITENSIÓN

En España como ya hemos venido viendo durante todo el trabajo existen líneas de alta velocidad electrificadas tanto en corriente alterna a 25kV y 50Hz como en corriente continua a 3000V.

España fue una de las pioneras en la adquisición de modelos de alta velocidad con posibilidad de alimentarse de las dos líneas antes descritas, lo cual permite el intercambio de trenes entre los distintos trayectos, o como en el caso de España, nos permite cubrir trayectos con dos tipos distintos de alimentación de la catenaria.

Los trenes de alta velocidad bitensión en funcionamiento actualmente son las Series S - 100 de AVE, las Series S - 120 y S - 130 además de la Serie S - 730 híbrido las cuales componen los ALVIA y la Serie S - 121 de AVANT.

Como ya hemos ido describiendo a lo largo del trabajo los motores que montan las distintas series son todos de corriente alterna como la Serie S - 100 la cual monta motores síncronos trifásicos, así como las unidades S - 120, S - 130, S - 730 y S - 121 las cuales montan motores asíncronos trifásicos.

Aunque nos vamos a centrar en los modelos de alta velocidad actualmente en uso en la red ferroviaria española, cabe destacar uno de los primeros modelos de tren bitensión de nuestro país, el cual tuvo relación en su nacimiento con el cambio de electrificación de las vías de 1500Vcc a 3000Vcc, las 4 unidades de la Serie 10000 adquiridas en 1963 fueron las pioneras en nuestro país, las cuales fueron construidas en Francia por ALSTOM, debido a los buenos resultados que se obtuvieron, se adquirieron 32 unidades de la Serie 439 en 1967.

El circuito principal de estos trenes está constituido fundamentalmente por cuatro motores de corriente continua de tracción de 1100kW y 1500Vcc nominales cada uno de ellos. Estos motores pueden acoplarse conjuntamente entre sí de dos formas distintas para conseguir dos marchas de velocidad económica llamadas de serie y serie - paralelo bajo línea de 3000Vcc y serie - paralelo y paralelo en la de 1500Vcc.



Como podemos ver en las Fig. 5.7.1 y 5.7.2, donde se representan de manera esquemática y simplificada los circuitos de alta tensión, en la combinación serie - paralelo a 1500Vcc se formarán dos ramas en paralelo de dos motores en serie y cada motor queda sometido a una tensión de 750Vcc. Bajo 3000Vcc los cuatro motores acoplados en serie funcionan también a 750Vcc.

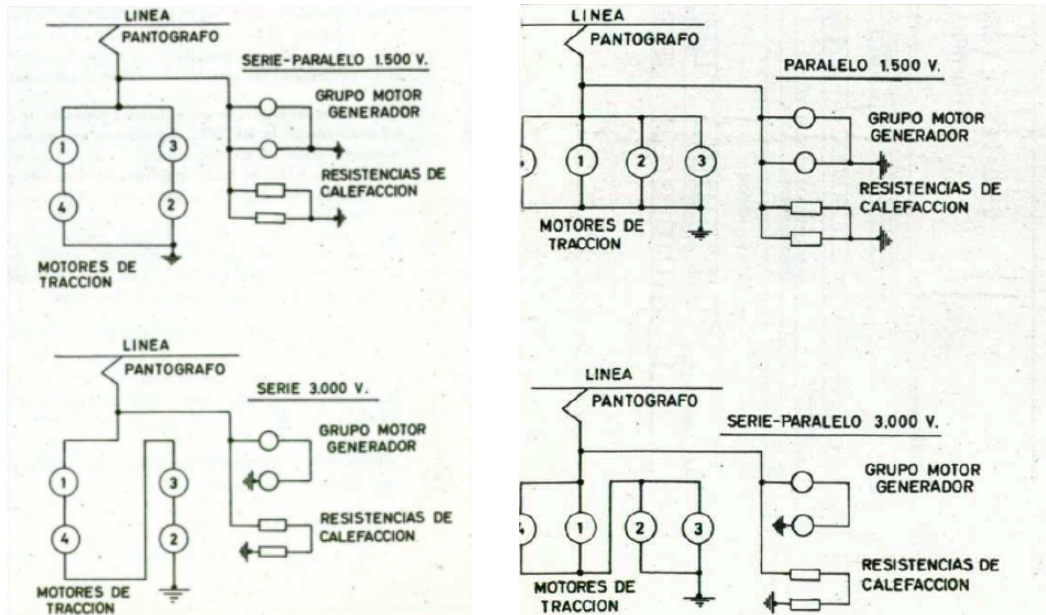


Fig. 5.7.1 - 5.7.2 Esquema distintos tipos de conexión motores Serie 900

La combinación paralelo bajo 1500Vcc, se forma conectando los cuatro motores en paralelo y trabajando, por tanto, cada uno de ellos a 1500Vcc, idéntica tensión de funcionamiento se tiene por motor a 3000Vcc, pues serie - paralelo lo que se forman son dos ramas en serie de dos motores en paralelo cada rama, como vemos en las figuras adjuntas.

Mediante el shuntado que puede hacerse después de la primera combinación de motores pueden conseguirse tres velocidades económicas y dos más después de la segunda combinación, por lo que se dispone de un total de cinco velocidades de tracción tanto en 1500 como en 3000Vcc.

Estos shuntados, del tipo de intercalación de resistencias en paralelo con los inductores, se efectúan mediante contactores de levás. También son de levás los contactores que hacen las transiciones o cambios de acoplamiento entre los motores mediante el sistema de puente, manteniendo durante ellas la totalidad del esfuerzo de tracción.



El paso de 3000Vcc a 1500Vcc y viceversa se realiza a voluntad del maquinista, sin necesidad de parar la unidad, efectuando la operación un conmutador accionado por un servomotor neumático.

Este primer modelo de tren bitensión montaba motores de corriente continua, puesto que como ya hemos visto el tren bitensión conmutaba entre catenarias alimentadas ambas en corriente continua. Para los casos que vamos a ver a continuación centrados en los modelos de alta velocidad, al poder ser alimentados tanto por corriente alterna como corriente continua, es más factible montar motores de corriente alterna trifásicos que los de corriente continua del caso anterior.

En el caso de los modelos de tracción eléctrica ferroviaria de hoy en día, evidentemente el cambio de tipo de alimentación y demás de maniobras, todo es mucho más moderno y tecnológico que este caso anteriormente descrito, puesto que hoy en día los trenes de alta velocidad disponen de un módulo identificador de la naturaleza y tensión de la catenaria Fig. 5.7.3. para la elección del camino que debe realizar la electricidad a través de los elementos.

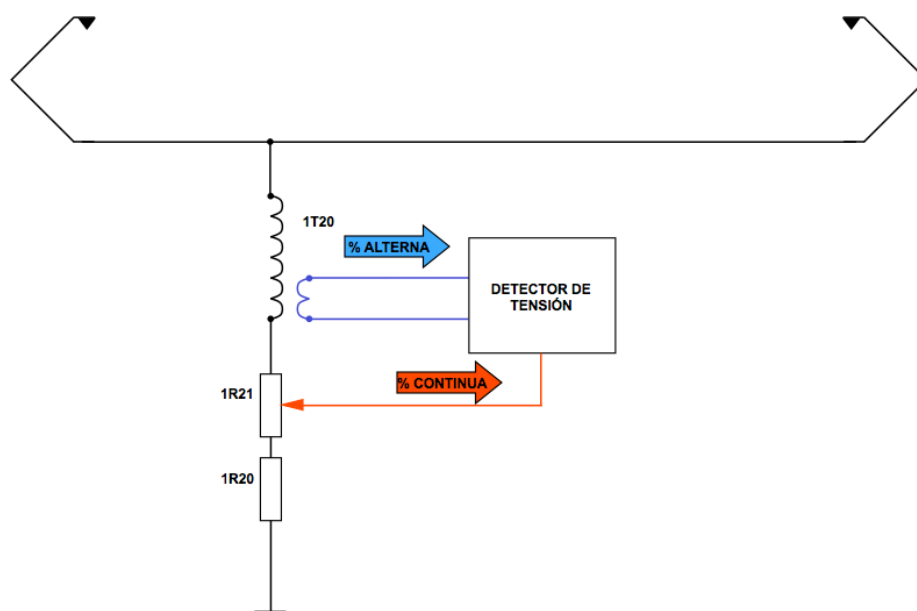


Fig. 5.7.3 Modulo detección de tensión



El módulo de tensión será el encargado de determinar automáticamente la posición de la cuchilla selectora bien para la alimentación en corriente continua o bien para la alimentación en corriente alterna, lo cual hará que la electricidad recorra uno u otro camino hacia los motores Fig. 5.7.4.

Los motores en un tren bitensión son los mismo que su homologos monotensión, lo cual quiere decir que dará igual la alimentación de la catenaria puesto que tanto en alterna como en continua los motores seguirán siendo en el caso de la alta velocidad síncronos en el caso de la Serie S - 100 o asíncronos trifásicos en el resto de las vistas anteriormente.

A continuación, vamos a ver a grandes rasgos el camino seguido por la corriente, tanto si es corriente alterna (línea azul) como si es corriente continua (línea naranja).

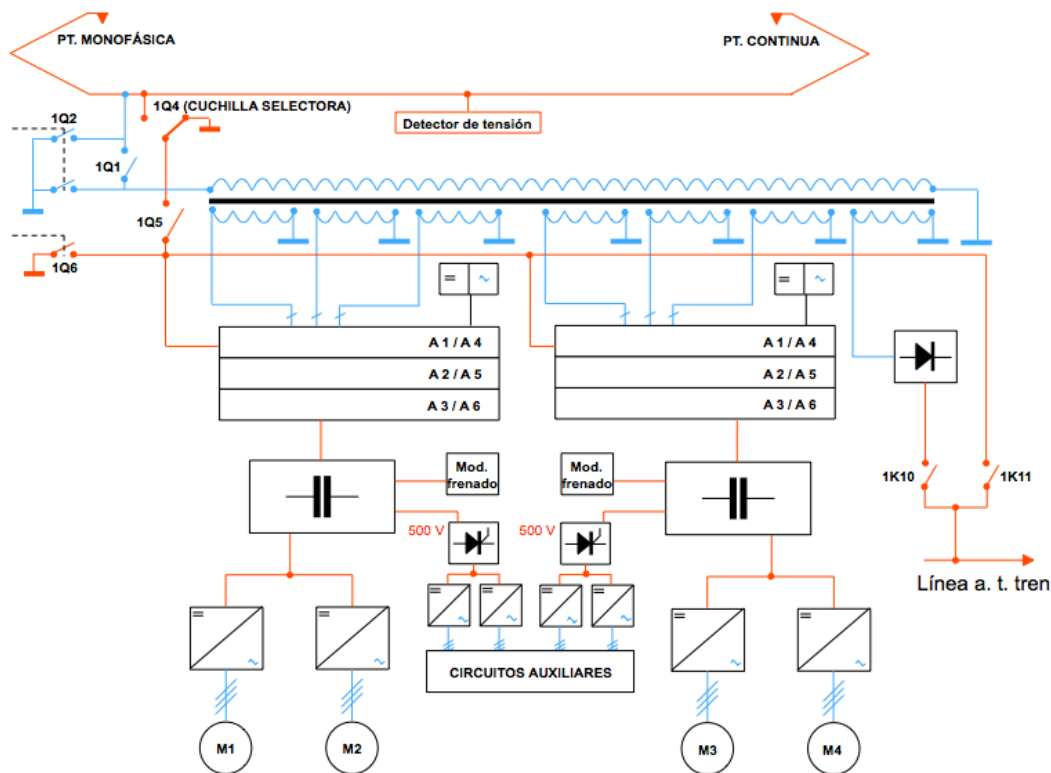


Fig. 5.7.4 Esquema de un tren bitensión

Como podemos apreciar en el esquema, nuestro tren tendrá dos pantógrafos uno para la captación de la energía por parte de la catenaria en corriente alterna y otro para su captación en corriente continua, mediante el detector de selección, mandaremos la apertura o cierre de los seccionadores 1Q4 y 1Q1 dependiendo de la naturaleza de la corriente que pase por la catenaria.



De la apertura y cierre del interruptor 1Q1 o 1Q4 dependerá el camino a recorrer por la electricidad en el interior de la máquina, aunque el último tramo será casi común para ambos recorridos, a continuación, en la Fig. 5.7.5 veremos el esquema de tracción y control completo de un tren de alta velocidad.

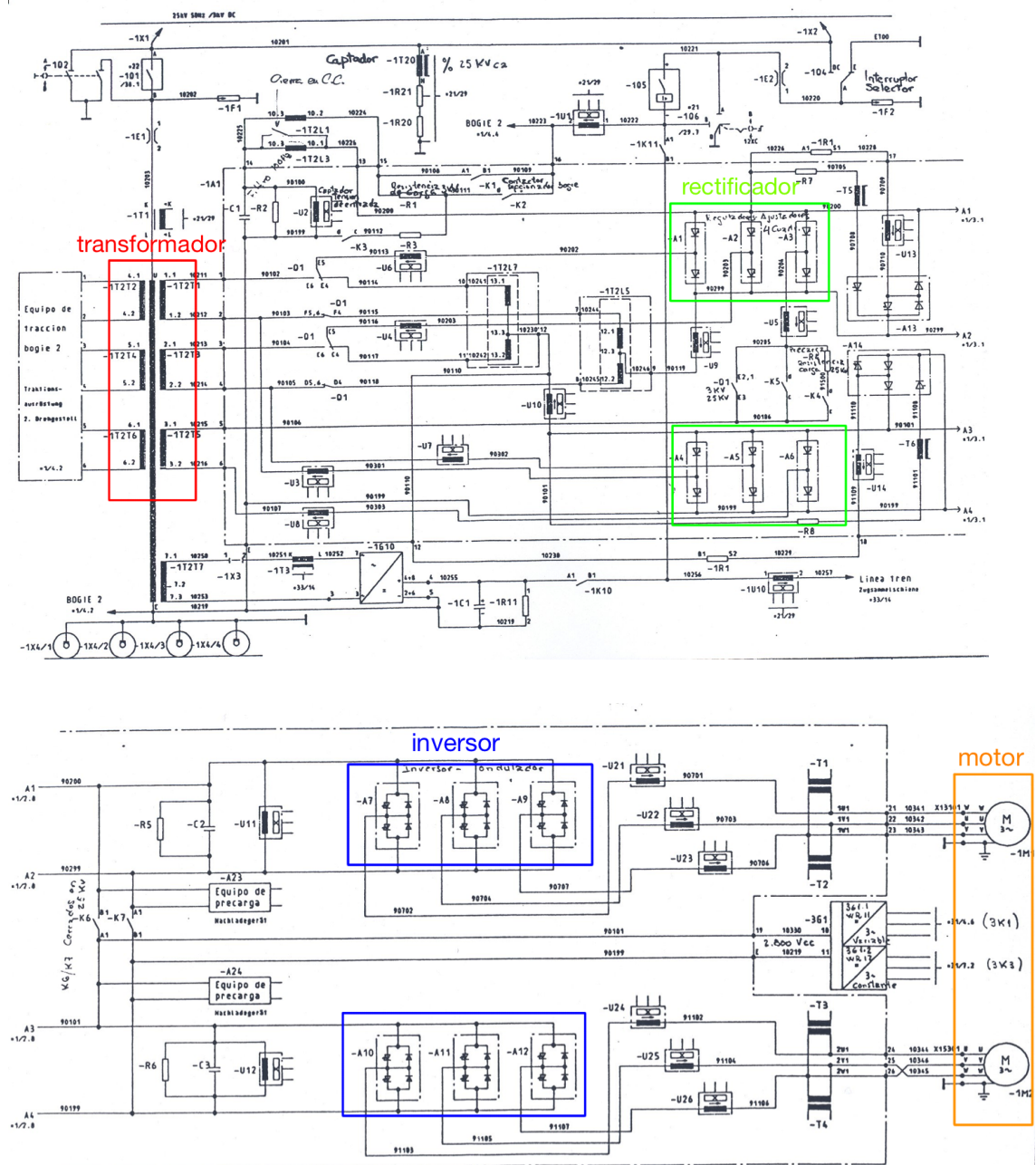


Fig. 5.7.5 Esquemas de tracción y control tren bitensión alta velocidad



Como podemos apreciar en los esquemas anteriores, todos los elementos que aparecen ya han sido vistos durante el trabajo, por eso no vamos a proceder a su explicación, la particularidad que radica en estos modelos bitensión no son los componentes, pero si la asociación de los componentes entre sí.

El primer paso que se realiza es por parte del detector de tensión (circulo verde Fig. 5.7.6), el cual nos dará la orden de abrir o cerrar uno u otro seccionador para llevar un recorrido u otro.

Vamos a ver en la Fig. 5.7.6 el recorrido que tendría la electricidad en el caso de estar alimentado a 25kV y 50Hz, hasta después del paso de los rectificadores.

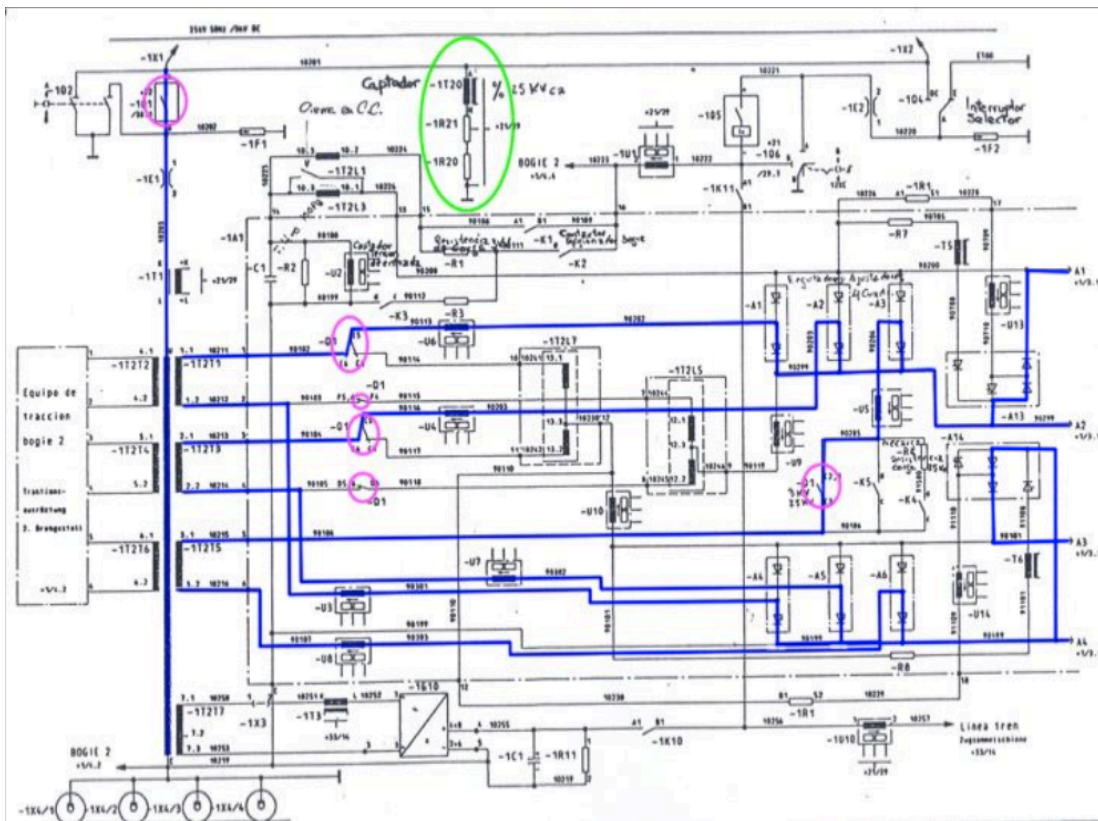


Fig. 5.7.6 Esquema control alimentación corriente alterna

Una vez la electricidad entra por el pantógrafo de corriente alterna, atraviesa los transformadores para adecuar la tensión de 25kV a la tensión más acorde a los motores de nuestro tren los cuales suelen ser de 1500V, tras el paso de la corriente por los transformadores, pasaremos por los reguladores -rectificadores para conseguir la corriente en continua acta para seguir su curso como hemos visto en temas anteriores.



En el caso de la alimentación en corriente continua (Fig. 5.7.7), vamos a ver como el detector de tensión, nos cerrará el seccionador del otro pantógrafo haciéndonos cambiar parte del recorrido de la electricidad.

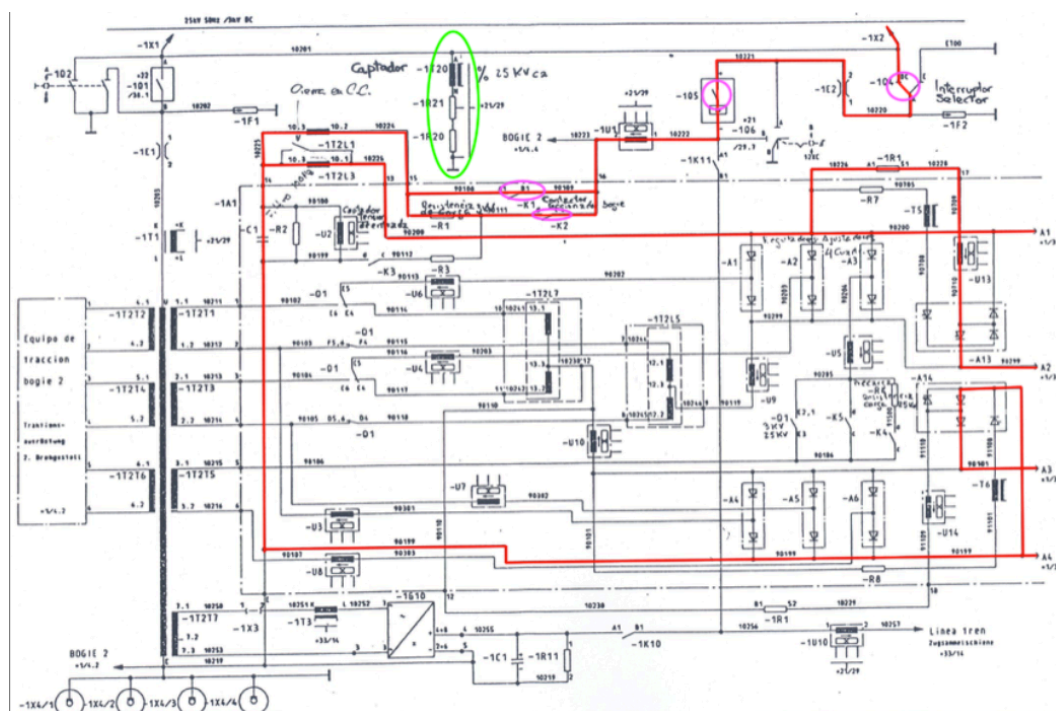


Fig. 5.7.7 Esquema control alimentación corriente continua

Como podemos ver en este caso evidentemente nos ahorramos el paso tanto por transformador como por rectificadores, puesto que como ya hemos visto en temas anteriores, la corriente continua no puede pasarse por un transformador de corriente alterna, y puesto que ya la tenemos en corriente continua, no tiene sentido pasarlo por los rectificadores, por lo tanto, la regulación se hará en la siguiente fase, el inversor.

La última fase del circuito de control y potencia es común para ambas corrientes puesto que llegados a este punto en ambos casos tendremos corriente continua (Fig. 5.7.8).

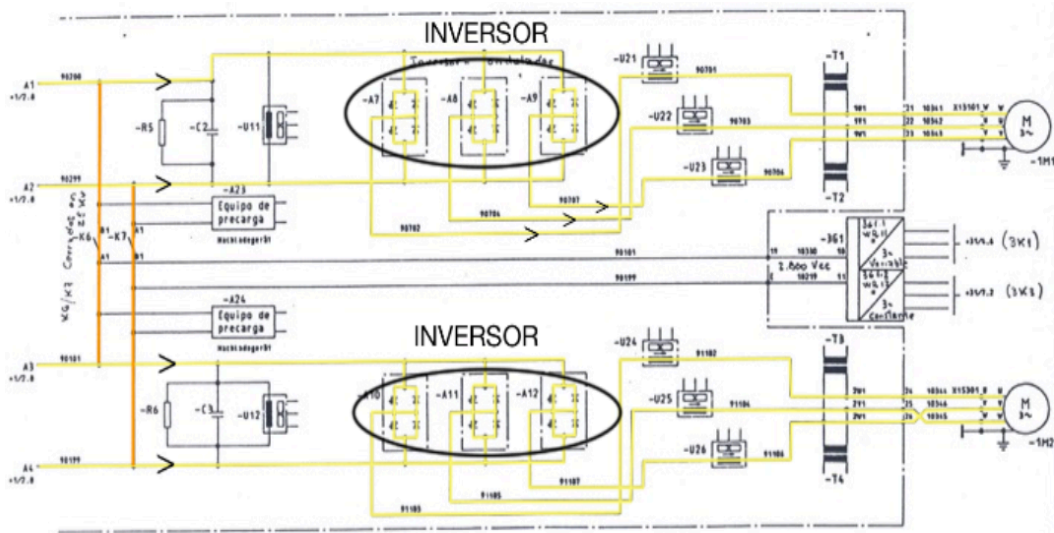


Fig. 5.7.8 Tramos final esquema control y potencia bitensión

La corriente continua pasa por los onduladores los cuales como hemos visto ya, también nos sirve para controlar la tensión, después del paso por los onduladores, la corriente de salida, ya en alterna es inyectada en los motores síncronos o asíncronos trifásicos a la tensión correcta para la velocidad de giro y par necesario.

## 5.8 ELEMENTOS AUXILIARES

Hasta ahora hemos estado haciendo referencias constantes a la alimentación de los elementos auxiliares puesto que tiene mucha relación con el control de potencia, pero es en este apartado donde vamos a verlo más en profundidad, separando los distintos elementos auxiliares dependiendo de la tensión y naturaleza de la corriente a la que se alimentan.

Como elementos auxiliares vamos a tener algunos alimentados en corriente continua a 24V, 48V y 72V, como son los elementos de seguridad y relacionados con el control de la potencia. También tenemos elementos auxiliares alimentados en corriente alterna a 230V y 400V como pueden ser algunos de los convertidores, o motores encargados de la refrigeración de los transformadores, los cuales hemos visto que son de 60Hz, para poder disminuir el tamaño y peso para la misma potencia. Además de los equipos de climatización y servicios de conexión para los viajeros.

En la Fig. 5.8.1 vamos a ver a grandes rasgos como estarán alimentados los circuitos de servicios auxiliares tanto en líneas alimentadas en corriente alterna por parte de la catenaria, como en las líneas alimentadas en corriente continua.

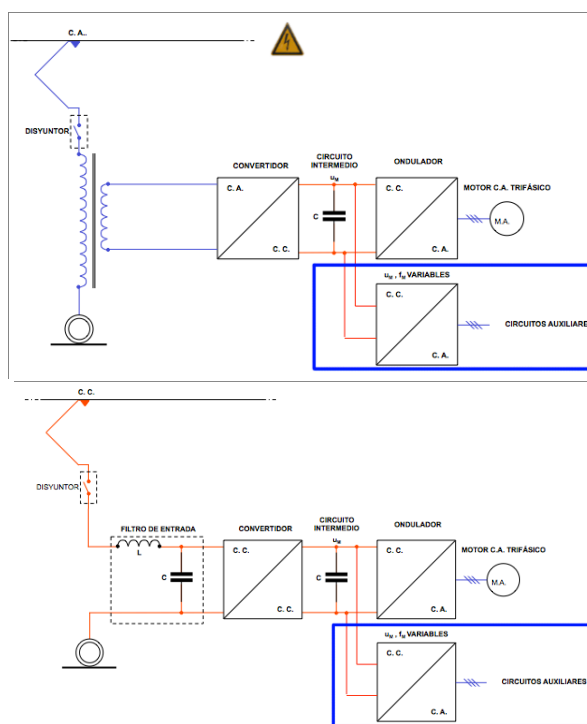


Fig. 5.8.1 Esquema alimentación servicios auxiliares



La alimentación de los servicios auxiliares se hace en parte de ellos en corriente continua como podemos ver en el siguiente esquema (Fig. 5.8.2), para alimentar los distintos dispositivos.

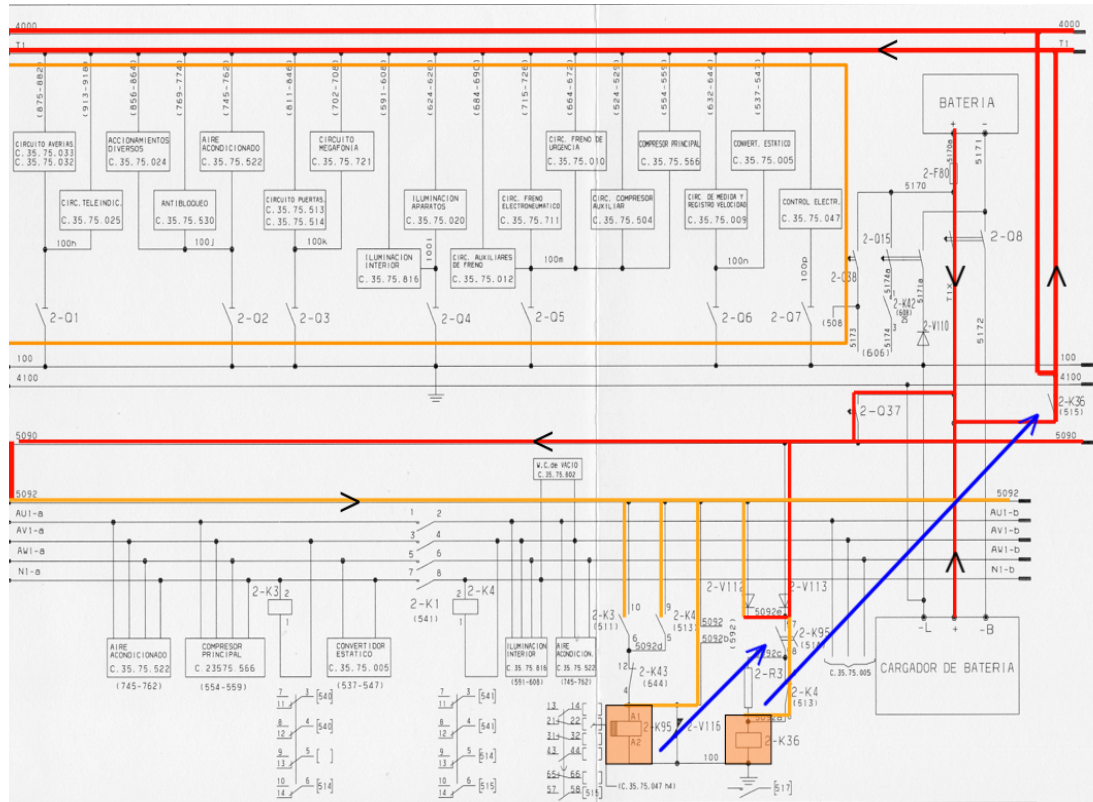


Fig. 5.8.2 Esquema alimentación sistemas auxiliares en continua

Como podemos apreciar disponemos de un cargador de baterías el cual capta la energía directamente del circuito de control y tracción ya en corriente continua, para abastecer tanto al circuito de control como a la batería encargados de la alimentación de los servicios auxiliares en continua.

Esta energía proveniente del circuito de tracción y control, puede venir desde la catenaria, o en los momentos de frenado regenerativo del propio tren, aparte de inyectar energía otra vez a la catenaria, se puede aprovechar también para abastecer estos sistemas auxiliares, aumentando al máximo la eficiencia energética.

Otros de los servicios auxiliares como ya hemos visto más atrás del trabajo se alimentan a una tensión de 72Vcc, en este caso la alimentación se realiza directamente desde el convertidor estático principal, el cual tiene múltiples salidas como ya hemos estado viendo, y a parte de la salida empleada para el circuito de control de la tracción, dispone de otra salida en la cual la tensión de salida es de 72V para estos servicios auxiliares.



Una vez vistos los elementos alimentados en corriente continua, vamos a ver ahora el esquema de los servicios auxiliares alimentados en corriente alterna.

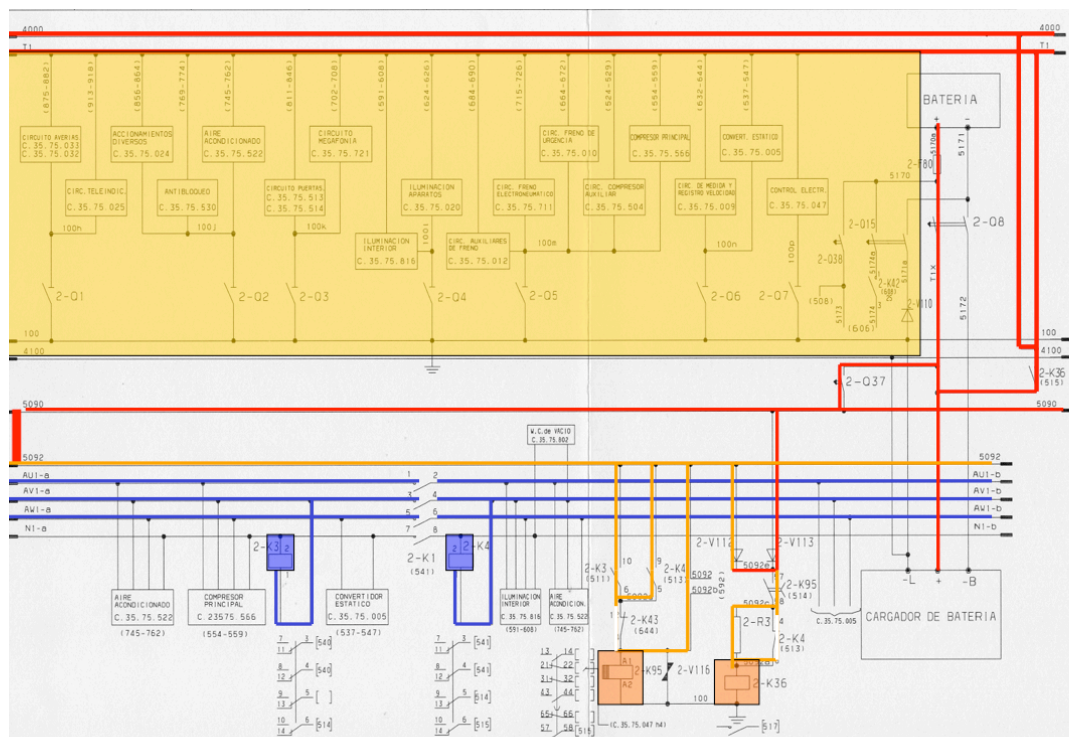


Fig. 5.8.3 Esquema alimentación servicios auxiliares alterna

Como podemos comprobar en este esquema, para la alimentación del relé 2-K95 nos hace falta que el relé 2-K3 este alimentado, por lo tanto, aunque estamos viendo la alimentación en corriente continua y en corriente alterna por separado, esto es únicamente para que nos quede más claro el concepto, pero no porque la alimentación de estos componentes se realice únicamente en una naturaleza, o en la otra, puesto que se alimentan simultáneamente ambos circuitos.

En el caso de los servicios auxiliares alimentados en corriente alterna, como pueden ser por ejemplo los enchufes disponibles para la carga de los dispositivos móviles por parte del usuario, disponemos dependiendo del tipo de tren al que hagamos referencia de dos maneras de realizar el abastecimiento, bien mediante una de las salidas del transformador principal a 400V y 50Hz en el caso de que la catenaria este en corriente alterna, o bien por medio de una salida de un convertidor estático de tipo ondulator, en el caso de que la catenaria sea de corriente continua, el cual nos proporcionará la tensión de 400V y 50Hz necesaria.





## 6. CARACTERISTICAS DE MODELOS NUEVOS, ESPECIALES Y EN INVESTIGACION

A continuación, vamos a ver algunos modelos “especiales” actualmente en funcionamiento tanto a nivel nacional como internacional, como pueden ser algún modelo híbrido o tritensión, y además veremos algunos modelos aun en investigación como puede ser el tren de levitación magnética o el nuevo tren de alta velocidad OARIS diseñado por CAF, etc....

### 6.1 RENFE SERIE S – 730 (híbrido)

La Serie S – 730 de RENFE, es un modelo híbrido el cual surge de la adaptación de la Serie S – 130. Este modelo tiene la particularidad de poder circular por vías electrificadas en corriente alterna a 25kV y 50 Hz, por vías electrificadas en corriente continua a 3000Vcc y además por líneas sin electrificar gracias a sus dos motores de alimentación diésel. Diseñado especialmente para cubrir los tramos Madrid – Galicia. En los cuales circula por tramos de alta velocidad que ya se están operando, tanto a 25kV en alterna como a 3000Vcc y por tramos pendientes de electrificar mediante sus motores diésel.



Fig. 6.1.1 RENFE Serie S – 730



Esta serie presta servicio, por ejemplo, en la línea Madrid – Medina del Campo por el trazado de alta velocidad a 25kV y 50 Hz, para después continuar por un trazado sin electrificar mediante el uso de los motores diésel Medina del Campo – Ourense, evitando el cambio de máquina, para seguir Ourense – Santiago de Compostela por un tramo de alta velocidad a 25kV y 50Hz, evitando un segundo cambio de máquina. Además de realizar conexiones posteriores a 3000Vcc como son las de A Coruña, Pontevedra y Vigo.

En cuanto al sistema de tracción mediante las alimentaciones por parte de la catenaria tanto en alterna como en continua, no vamos a hacer hincapié en ello, puesto que tanto en el punto 4.2 mediante el estudio de los motores asíncronos trifásicos y en el punto 5.7 con el estudio de los trenes bitensión, ya hemos visto todas las características y los elementos necesarios para ello.

Donde sí que vamos a recalcar nuestro estudio es en la parte en la cual el tren este se esa abasteciendo tanto de potencia para el movimiento, como de tensión para el uso de los servicios auxiliares mediante el uso de los motores diésel que equipa la Serie S – 730.

En la siguiente tabla vamos a ver las principales características de esta Serie S – 730.





CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL S 730	
Fabricante	Talgo-Bombardier
Número de unidades	15
Ancho de vía	1.688 mm/1.435 mm
Tracción	eléctrica/diésel-eléctrica
Longitud total	185 metros
Longitud cabeza matriz	20 metros
Anchura máxima	2,96 metros
Altura	4 metros
Peso	361 toneladas
Velocidad máxima	250 km/h (ancho UIC), 220 km/h (ancho ibérico)
Aceleración máx. en curva	1,2 m/s <sup>2</sup>
Tensión	25 kV, 50 Hz ca/3 kV cc
Potencia instalada	4.800 kW ca/4.000 kW cc/2.400 kW diésel
Motores	8 asíncronos/2 motores diésel
Bogies	Bo-Bo
Ejes tractores	8
Peso máximo por eje	18 t
Frenado neumático	Dos discos por eje
Frenado eléctrico	De recuperación (2.400 kW) y reostático (2.000 kW)
Cambio de ancho	Sistema Talgo RD
Sistemas de seguridad	ASFA digital, STM de LZB, Ertms
Composición	Cabeza matriz (2), coche extremo técnico (2), coches (9)
Piñones	265-289
MOTOR DIÉSEL	
Modelo	12v 4.000r 431
Potencia	1.800 kW (2.248 Cv) a 1.800 rpm
Consumo	190 g/kWh
Cilindrada unitaria	4,77 litros
Cilindrada	57,23 litros
Peso	6.600 kg

Fig. 6.1.2 Características técnicas RENFE Serie S – 730

Como podemos ver en las características técnicas, contamos con 2 motores diésel de 12 cilindros en V con una cilindrada de 57230cc que entregan una potencia de 2248Cv cada uno de los motores.

Cabe destacar las velocidades a las cuales puede circular este modelo, puesto que difieren un poco dependiendo de la alimentación a la que funcione, por ejemplo, mientras que en vías de ancho internacional puede alcanzar velocidades de hasta 250km/h exactamente igual que su homólogo de la Serie S – 130 en vías de ancho ibérico solo alcanza velocidades de 200km/h (20km/h menos que el 130), mientras que con el funcionamiento mediante los equipos diésel solo podrá alcanzar velocidades máximas de 180km/h, esta pequeña diferencia de velocidades es debido en parte a un aumento de 49Tm en el peso del tren (361Tm Serie S – 730 frente a 312Tm Serie S – 130).

Para hacernos una idea de la dimensión de los motores diésel que equipa este modelo, vamos a ver la Fig. 6.1.3 en la cual vemos desmontado uno de los motores diésel junto al alternador, y el radiador de refrigeración de dicho motor.



Fig. 6.1.3 Motor – alternador y radiadores de refrigeración RENFE Serie S – 730

Estos dos elementos vistos en la Fig. 6.1.3 están albergados en un coche intermedio el cual es el encargado de transportar todo el conjunto diésel compuesto por grupo electrógeno, accionado por el motor diésel de 1800kW (2248Cv) de potencia, torres de refrigeración, depósitos de combustible de 2000L de capacidad, junto con la aparamenta indispensable.

Una de las maneras de reconocer un RENFE Serie S – 730 aparte de ser por verlo en vías sin electrificación, es por el reconocimiento del coche donde van instalados todos los dispositivos diésel necesarios para su funcionamiento.

En la siguiente imagen (Fig. 6.1.4) podemos ver el coche extremo técnico de equipos diésel



Fig. 6.1.4 Coche extremo portante del equipo diésel

Los trenes de la Serie S – 730 están constituidos por dos cabezas motrices, dos furgones extremos y 9 coches intermedios para viajeros.

A continuación, vamos a repasar el funcionamiento mediante electricidad que ya hemos visto a lo largo del trabajo, pero el cual no está de más hacerle un repaso brevemente, y veremos en más profundidad el funcionamiento mediante los motores diésel.

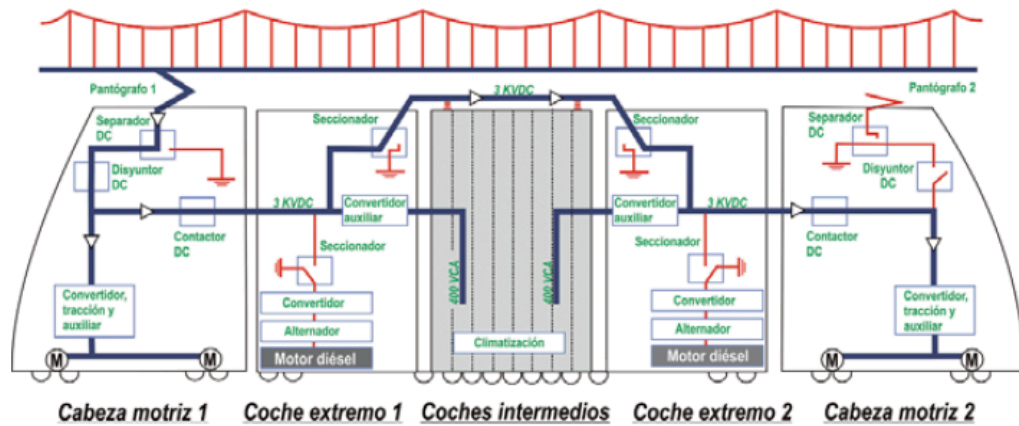


Fig. 6.1.5 Funcionamiento S – 730 con tracción eléctrica en corriente continua

En tracción eléctrica como ya hemos venido viendo a lo largo del trabajo tanto los pantógrafos, el convertidor de tracción, el disyuntor como el separador están instalados en las cabezas motrices, como ya sabemos cada cabeza motriz cuenta con 2 pantógrafos, uno para la alimentación en corriente continua, y otro para la alimentación en corriente alterna, empleando uno u otro dependiendo de la naturaleza de la electricidad que alimenta la catenaria.

La electricidad, la cual es captada por el pantógrafo correspondiente de la cabeza motriz de cola (normalmente), pasa a través del separador y del disyuntor, para después distribuirse una parte al convertidor de tracción y auxiliar el cual posteriormente alimenta tanto a los motores de la cabeza motriz de cola, como a los servicios auxiliares de cola, mientras que otra parte se dirige tanto a los coches intermedios, para mediante el convertidor auxiliar, alimentar a los sistemas de climatización, alumbrado, etc.... como hacia el coche extremo de cabeza a través de la línea de techo, pasando posteriormente por el contactor y llegando a los motores de tracción de la motriz de cabeza.

En cuanto al funcionamiento mediante la alimentación por los motores diésel veamos la Fig. 6.1.6 para la explicación.

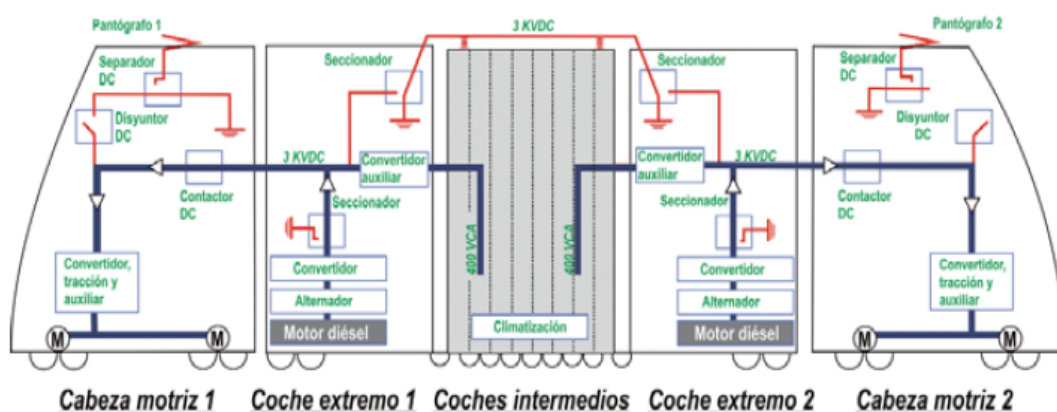


Fig. 6.1.6 Funcionamiento S – 730 tracción mediante equipos diésel

En el caso del funcionamiento mediante la tracción en diésel, la generación de electricidad se realiza gracias a dos motores diésel que están situados en los furgones extremos. Ambos motores diésel, funcionando como si del motor de un coche se tratase, están acoplados a unos alternadores los cuales conseguimos accionarlos mediante el giro del eje cigüeñal del motor diésel, para generar electricidad en corriente alterna esta energía generada en corriente alterna, se pasará por unos convertidores estáticos alterna / continua los cuales nos rectificaran la electricidad generada para dejárnosla a 3000Vcc, esta electricidad en corriente continua será conducida a los convertidores de tracción, donde serán regulados acorde a las exigencias de potencia por parte del tren en cada momento, para después inyectarla en la alimentación de los motores de tracción que están en los bogies de las cabezas motrices.

Cabe destacar que parte de la energía que sale del convertidor alterna / continua, se emplea para la alimentación de los sistemas auxiliares (aire acondicionado, iluminación...) la cual se realiza con el grupo generador, a diferencia del caso de tracción eléctrica que se alimentarían desde la catenaria.

Esto provoca que se produzca una pérdida de potencia en llanta, debido que una parte de la potencia generada por el grupo generador se emplea para la alimentación de los motores de tracción mientras que otra parte se destina a la alimentación de los sistemas auxiliares.

Cada cabeza motriz tiene cuatro motores asíncronos trifásicos como en el caso de la Serie S – 130, los cuales desarrollan una potencia nominal circulando con tensión de 25kV en alterna de 4800kW, siendo de tan solo 4000kW cuando se alimenta a 3000Vcc, y en el caso de la tracción mediante



los motores diésel, la potencia será de 3600kW que tras la derivación de los sistemas auxiliares se quedará en 2400kW de potencia en llanta por lo anteriormente descrito.

Cabe señalar también que la resistencia al avance en el caso del funcionamiento en tracción diésel es ligeramente superior que en el caso de la tracción eléctrica puesto que existe una mayor entrada de aire en los motores diésel para la refrigeración de los mismos.

## 6.2 CAF OARIS (PROTOTIPO)

El CAF OARIS (Fig. 6.2.1) es un “prototipo” de automotor eléctrico de alta velocidad en el que se lleva trabajando desde el año 2009 y el cual será la nueva serie RENFE S – 105, de momento solo hay una unidad disponible en España la cual entró en funcionamiento en el año 2011 por las vías de alta velocidad a la espera de incorporar las 11 unidades restantes. Aunque a nivel internacional este modelo está en operación con limitaciones en alguna línea como por ejemplo la línea airport express la cual conecta la ciudad de Oslo con el aeropuerto circulando con tan solo 4 coches y a una velocidad máxima de 275km/h.



Fig. 6.2.1 CAF Oaris

Las unidades Oaris tienen multitud de posibles variantes, pudiéndose formar composiciones de 4, 6 y 8 coches proporcionando potencias de tracción de 5280 kW la de 4 coches, 7920 kW la de 6 y 10560 kW la de 10 coches, este modelo tiene la disponibilidad de configurarse en 4 tensiones distintas como son las de 1,5 y 3 kV en corriente continua y en el caso de corriente alterna de 15 y 25 kV, pudiéndose conformar en multitension, con posibilidad de cambio de anchos de vía de 1435 mm, 1520 mm y 1668 mm.

Estas características nos proporcionan un modelo perfecto para la operabilidad y adaptación de cada red ferroviaria adaptándose al proyecto AVI (Alta Velocidad Interoperable) el cual nos permitirá la operatividad dentro de los países europeos sin necesidad de cambio de tren en las fronteras.



Cada coche dispone de un bogie motor y otro remolque, cada bogie motor alberga dos motores asíncronos trifásicos de 660 kW cada uno de ellos lo cual le permite circular a velocidades de hasta 350 km/h.

En el caso del prototipo que circula por las vías españolas, disponemos de un tren de 4 coches de composición, con una potencia de 5280 kW, los pantógrafos alimentan a dos transformadores, alimentando cada uno de ellos a 4 inversores vvvf (variadores de frecuencia) de tracción, de los cuales cuelgan dos motores en cada uno de ellos, este prototipo recibe de la catenaria una alimentación de 25kVca.

## 6.3 TALGO AVRIL

El talgo AVRIL (Fig. 6.3.1) es una plataforma de trenes de alta versatilidad y muy alta velocidad (380km/h) desarrollada por la empresa TALGO. Es muy similar a lo que hemos visto en el caso de la compañía CAF pero en TALGO.



Fig. 6.3.1 Talgo AVRIL G3

Esta plataforma de trenes consta de 2 modelos, el primer prototipo, el G3 ya está homologado desde el 13 de mayo del 2016 recibiendo el certificado definitivo el 29 de julio del mismo año, este primer modelo de la serie AVRIL es un modelo bitensión 1,5 kVcc / 25 kVca con características muy semejantes al TALGO T-350, se diferencia fundamentalmente en la velocidad máxima siendo de 380 km/h en lugar de los 350 km/h del T-350, y en unas cajas más anchas y un aumento de la capacidad de pasajeros, mejoras en la aerodinámica lo cual permite mayor eficiencia energética. En el caso del siguiente modelo, el G4 (Fig. 6.3.2) el cual está aún en fase de desarrollo, la





principal característica es la motorización de los 3 bogies de los que dispone en cada extremo mientras que los bogies intermedios son todos remolcados.

57% de las ruedas sean motorizadas, mayor que el 50% conseguido hasta ahora, la versión 25kV y 50 Hz sería capaz de desarrollar una potencia de 12000 kW, pudiendo tener también la opción de motorización híbrida incluyendo un motor diésel.

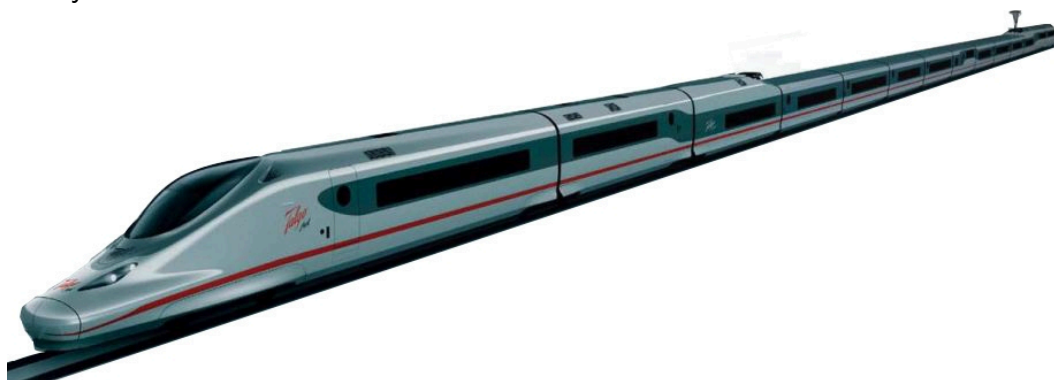


Fig. 6.3.2 Talgo AVRIL G4

## 6.4 TREN MAGLEV

El maglev es un tren cuya tecnología empleada se basa en la levitación magnética, gracias a esta tecnología se consigue la suspensión, guiado y propulsión del propio tren consiguiéndose levantar del suelo flotando literalmente encima de las vías.

El empleo de un gran número de imanes formados por distintos óxidos de cobre, los cuales permite la suspensión y propulsión del tren a base de la levitación magnética. Este método de transporte tiene la ventaja de ser más rápido, silencioso y cómodo que los sistemas de transporte público sobre ruedas convencionales.

Ahora vamos a ver más en profundidad cómo será el funcionamiento de esta tecnología de la cual tenemos que decir que el mínimo de la energía se emplea en levantar el propio tren del suelo, algo que en un principio nos haría pensar que sería lo más costoso, pero donde realmente se emplea mucha energía es en el vencimiento de la fuerza de rozamiento con el aire como pasa en los trenes convencionales.



El principio de levitación magnética de un tren maglev se consigue mediante la interacción de campos magnéticos que dan lugar a fuerzas de atracción o repulsión dependiendo del diseño del vehículo, es decir, dependiendo si el tren utiliza un sistema EMS (electromagnetic suspension) o EDS (electrodynamic suspension).

La principal diferencia entre ambos sistemas reside en que en el primero la levitación del tren es producida por la atracción entre las bobinas colocadas en el vehículo y la vía, y en el segundo se consigue la levitación gracias a fuerzas de repulsión entre estas.

En el caso del EMS (Fig. 6.4.1), la parte inferior del tren queda por debajo de una guía de material ferromagnético, que no posee magnetismo permanente.

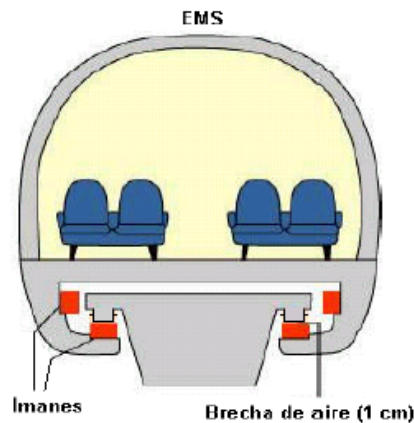


Fig. 6.4.1 Suspensión EMS

Cuando se ponen en marcha los electroimanes situados sobre el vehículo, se genera una fuerza de atracción. Ya que el carril no puede moverse, son los electroimanes los que se mueven en dirección a este elevando con ellos el tren completo.

Sensores dispuestos en el tren se encargan de regular la corriente circulante en las bobinas, como resultado, el tren circulara a una distancia de aproximadamente 1 cm del carril guía.

Unos electroimanes encargados de la guía lateral del vehículo serán colocados en los laterales del tren de manera que quede garantizado su centrado en la vía.



Uno de estos modelos es el denominado Shanghái maglev (Fig. 6.4.2), el cual constituye la primera línea comercial de alta velocidad mediante la tecnología de levitación magnética estando en operación desde el 2004, completa una distancia total de 30 km entre la estación de metro de Longyang Road y el aeropuerto internacional de Pundong con una velocidad media de 240 km/h, pero teniendo una velocidad punta de 431 km/h.



Fig. 6.4.2 Shanghái Maglev

La principal ventaja de las suspensiones EMS es que usan electroimanes en vez de complicados imanes superconductores que exige la suspensión EDS. Por no necesitar imanes superconductores, no son necesarios complicados y costosos sistemas de refrigeración. Aunque el consumo actual del EMS es inferior al del EDS, se espera que con el avance de las investigaciones en superconductividad los consumos de las suspensiones EDS bajen considerablemente.

Aun así los trenes de suspensión EMS sufren ciertas limitaciones, la principal es su inestabilidad. Cuando la distancia entre la guía y los electroimanes disminuye, la fuerza de atracción crece y aunque la corriente eléctrica circulante en los electroimanes puede ser regulada inmediatamente existe el peligro de que aparezcan vibraciones o de que el tren toque la guía.

Otra de las limitaciones de este diseño es la enorme precisión necesaria en su construcción, lo cual encarece su producción. Una pequeña desviación de unos milímetros a lo largo de la estructura del tren puede ser fatal.

En el caso de la levitación EDS, la cual se basa en la propiedad de ciertos materiales de rechazar cualquier campo magnético que intente penetrar en ellos. Esta propiedad se da en superconductores y es llamada efecto meissner.



La suspensión EDS consiste en que el superconductor rechazará las líneas de campo magnético de manera que no pasen por su interior, lo que provocará la elevación del tren.

En diversos prototipos basados en la suspensión EDS, se ubica un material superconductor a los lados de la parte inferior del vehículo (Fig. 6.4.3).

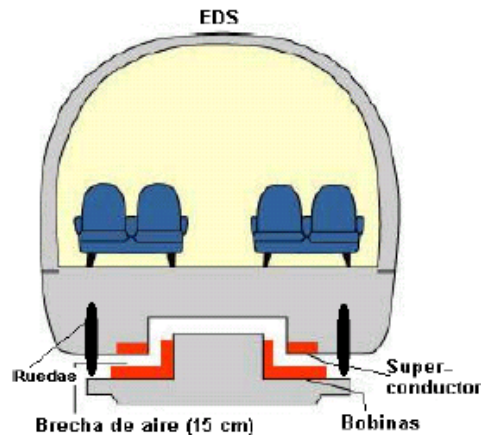


Fig. 6.4.3 Esquema de la suspensión EDS

Este pasa a unos centímetros de un conjunto de bobinas situadas sobre el carril guía. Al moverse el vehículo a lo largo del carril se inducirá una corriente en las bobinas de este, las cuales actuarán entonces como electroimanes. Al interactuar con los superconductores montados en el tren, se producirá la levitación.

Debido a esto la fuerza de levitación será cero cuando el vehículo se encuentre parado, para esto el tren tiene incorporadas unas ruedas neumáticas.

Estas ruedas son empleadas de la siguiente manera, como la fuerza de levitación aumenta con la velocidad, cuando la velocidad alcanzada por el tren es la suficiente para que este se eleve, las ruedas quedan entonces en el aire y por lo tanto inutilizadas.

De la misma manera cuando la velocidad empieza a disminuir, lo que hace que disminuya la fuerza repulsiva, el tren empieza a descender hasta que las ruedas del tren se apoyan sobre la vía.



Este sistema permite una elevación de hasta 15cm, lo cual supera por mucho al sistema EMS. Esto permite hacer las guías mucho menos precisas para este tipo de tren y los protege de las pequeñas deformaciones que puedan ocurrir en el trazado.

Una peculiaridad de los trenes con EDS, es que el propio tren se amolda a las curvas compensando la aceleración lateral inclinándose, de manera que ninguna perturbación es sentida dentro del vehículo.

Una desventaja de este sistema es que la utilización directa de superconductores provoca grandes campos magnéticos dentro del vehículo, por lo que se deben de utilizar complejos sistemas de aislamiento de la radiación magnética para proteger a los pasajeros. Esto se contrasta con el sistema EMS en el cual los flujos magnéticos se concentran en la brecha entre tren y guía, no afectando a los pasajeros.

El modelo comercial que hoy en día se encuentra a punto de estar operativo es el denominado tren bala japonés maglev (Fig. 6.4.4), el cual tiene el actual record de velocidad en los 603 km/h aunque cuando empiece su explotación comercial la velocidad punta será de 500 km/h.



Fig. 6.4.4 Tren Maglev japonés

Hasta ahora hemos visto como levita un tren maglev, pero este tipo de trenes necesitan también un sistema de guiado lateral que asegure que el vehículo no roce el carril guía como consecuencia de las perturbaciones externas que pueda sufrir el propio tren.



En la suspensión EMS, se instalan unos imanes en los laterales del tren, los cuales, a diferencia de los ubicados para permitir al tren levitar y moverse, solamente actuarán cuando este se desplace lateralmente, ejerciendo fuerzas de atracción del lado que más se aleje de la vía.

En el sistema EDS, son los superconductores y las bobinas de levitación los encargados del guiado lateral del tren. Las bobinas de levitación están conectadas por debajo del carril guía formando un lazo.

Así cuando el vehículo se desplaza lateralmente, una corriente eléctrica es inducida en el lazo, lo que da como resultado una fuerza repulsiva del lado más cercano a las bobinas de levitación, obligando al vehículo a centrarse.

Si el tren por alguna causa se hundiese en el carril – guía este respondería con un aumento de la fuerza repulsiva, lo cual equilibraría este acercamiento, en contraste con el sistema EMS en el cual la fuerza atractiva aumenta si el vehículo se acerca a la guía.

Vamos ahora a ver el sistema de propulsión de un tren maglev, el cual es propulsado por un motor lineal, cuyo funcionamiento deriva de un motor eléctrico convencional donde el estator es abierto y alargado a lo largo del carril – guía en ambos lados, como se ve en la figura 6.4.5.

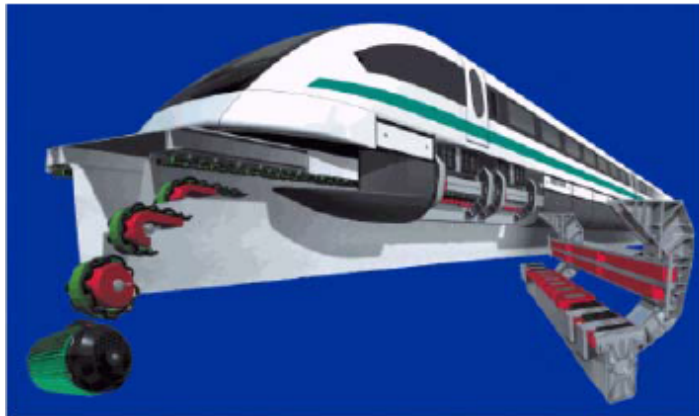


Fig. 6.4.5 motor lineal en tren maglev

La propulsión, tanto de los modelos EDS como los EMS, se produce gracias a la utilización de un motor lineal síncrono.

Este sistema de propulsión utiliza como estator un circuito de bobinas sobre la vía, por el cual circula una corriente alterna trifásica controlada. El rotor está compuesto por los electroimanes del tren, en el caso de un EMS, o las bobinas superconductoras en el caso del EDS.



El campo magnético que crea la corriente alterna del estator interactúa con el rotor, creando una sucesión de polos norte y sur que empujan y tiran del vehículo hacia delante (Fig. 6.4.6).

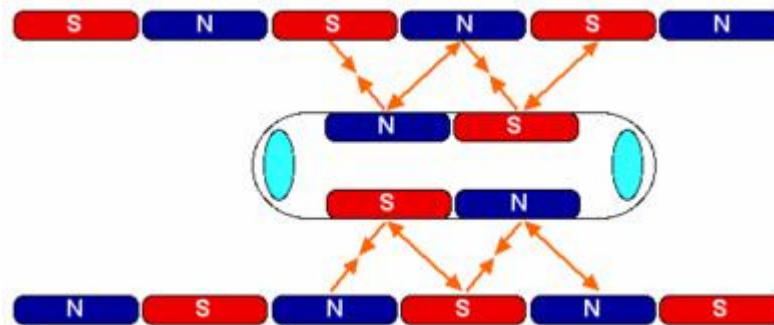


Fig. 6.4.6 Esquema de propulsión de un tren maglev

Este campo magnético viajara junto al tren a través del carril – guía, permitiéndole a este acelerar. Así, el rotor viajara a la misma velocidad que el campo magnético.

La regulación de la velocidad del tren se logra, bien regulando la frecuencia de la onda magnética (variando la frecuencia de la corriente alterna), o bien variando el número de espiras por unidad de longitud en el estator y el rotor.

Una característica importante de este sistema es que la energía que mueve al tren no la provee el mismo tren, sino que esta es provista por las vías. Esto permite evitar un malgasto de energía fraccionando la vía en secciones, de manera que cada una tenga su alimentación, de esta manera solamente estarán activos aquellos tramos de la vía por los que en ese momento este transitando el tren (Fig. 6.4.7).

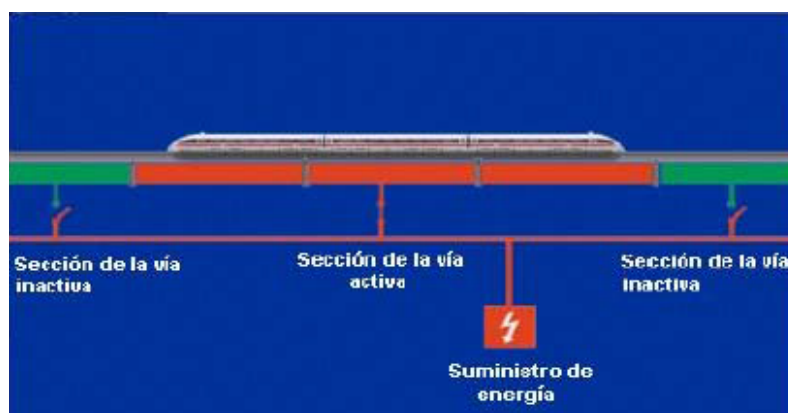


Fig. 6.4.7 Suministro de energía a la vía



Una peculiaridad de los trenes maglev, es que, gracias a su sistema de propulsión, son capaces de circular por desniveles de hasta 10°, en contraste con los trenes convencionales que solo pueden afrontar desniveles de 4°.

Vamos entonces a ver un pequeño cuadro resumen (Fig. 6.4.8), el cual trata del tren de súper alta velocidad japonés puesto que es uno de los proyectos más ambiciosos a nivel mundial y el cual está a punto de consolidarse.

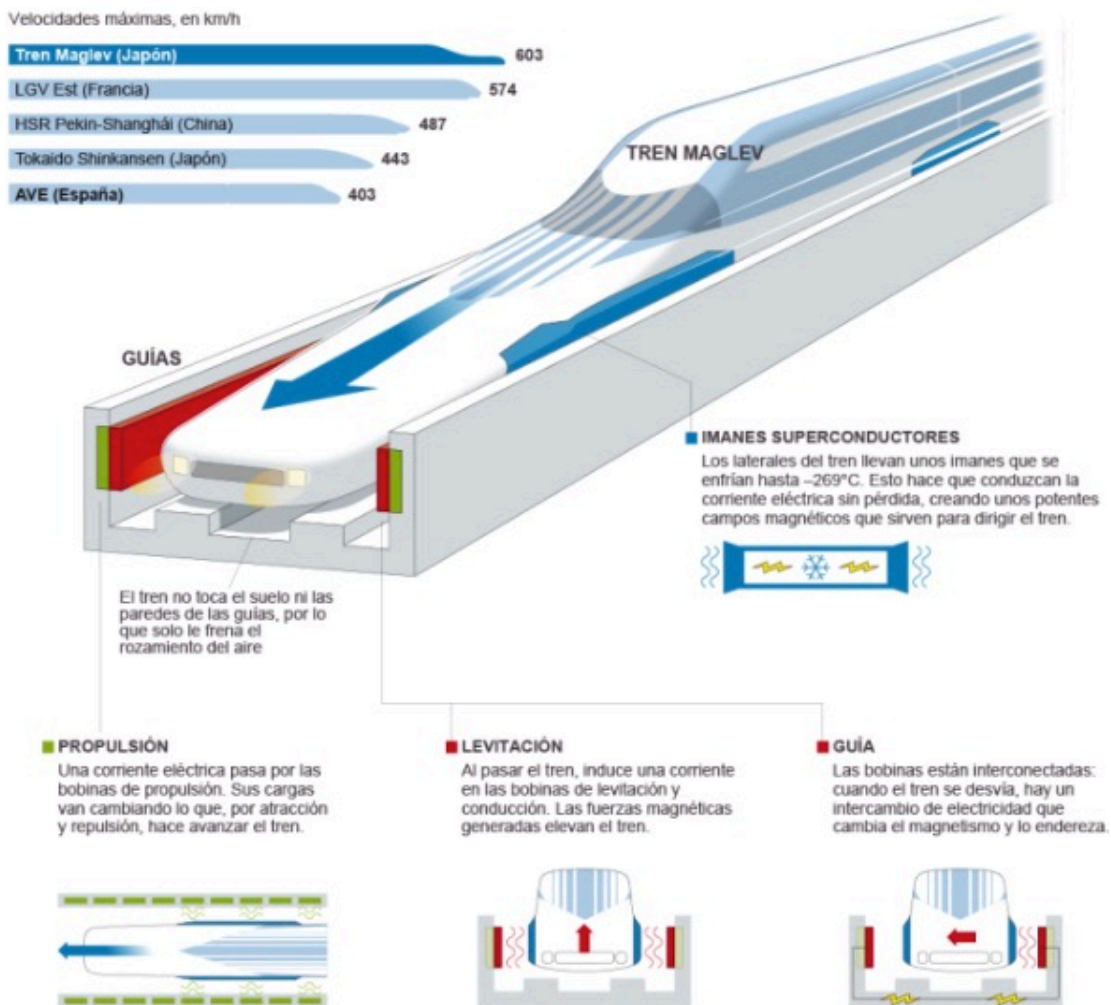


Fig. 6.4.8 Esquema funcionamiento tren Maglev japonés

Como podemos apreciar en la imagen anterior, todo el esfuerzo tanto de levitación como de propulsión y guiado reside en unos imanes superconductores compuestos de distintos óxidos de cobre que están albergados en el lateral del tren, estos imanes se enfrían hasta los  $-269^{\circ}\text{C}$  para que no haya pérdidas en la conducción a través de estos superconductores, para ello estos imanes van bañados en nitrógeno líquido que hace las veces de enfriador.





El último avance en investigación en este sentido es un estudio presentado por el doctor Richard Post del Lawrence Livermore National Laboratory, el cual desarrolló un sistema maglev que evita los fallos de los sistemas EMS y EDS explicados anteriormente mediante lo que se denominó la Indutrack.

La Indutrack es un sistema EDS que en vez de utilizar materiales superconductores, emplea imanes permanentes. Antes que el doctor Post idease esto, se creía que los imanes permanentes proveerían una fuerza de levitación demasiado pequeña como para ser útil en un tren maglev.

La solución encontrada por el doctor Post fue emplear una distribución especial de poderosos imanes permanentes, conocida como una ordenación Halbach, para crear una fuerza de levitación lo suficientemente poderosa para hacer funcionar un maglev. En esta ordenación, barras magnéticas con grandes campos son dispuestas de manera que el campo magnético de cada barra esté orientado en un ángulo correcto con la barra adyacente. La combinación de las líneas de campo magnético de esta ordenación resulta en un poderoso campo debajo de esta y prácticamente ningún campo arriba (Fig. 6.4.9).

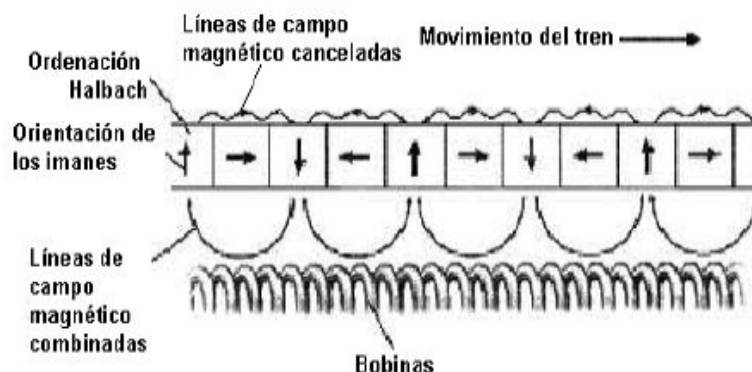


Fig. 6.4.9 Ordenación Halbach

Como en el sistema EDS, la levitación es generada por las fuerzas repulsivas entre el campo magnético de los imanes en la ordenación Halbach y el campo magnético inducido en la vía conductora por el movimiento de los imanes ya que estos ocupan el lugar de los superconductores en el sistema EDS. La vía Indutrack contendría dos filas de bobinas que actuarían como rieles. Cada uno de estos rieles estaría rodeado por dos ordenaciones Halbach de imanes ubicada debajo del vehículo, una posicionada directamente sobre el riel y la otra a lo largo del lado interior del mismo.



Los imanes sobre las bobinas proveerían de levitación al vehículo, mientras que los imanes a los lados de las bobinas se encargarían del guiado lateral.

Como en el sistema EDS, esta levitación sería muy estable, ya que las fuerzas de repulsión aumentan exponencialmente al disminuir la distancia entre el vehículo y la guía. La Inductrack posee una considerable ventaja en eficiencia, respecto a otros sistemas. Como resultado de utilizar imanes permanentes, la levitación en un tren Inductrack es independiente de cualquier fuente de energía, en contraste con los complejos electroimanes en el sistema EMS o los costosos equipos criogénicos en el EDS. Por lo tanto, los trenes Inductrack solo requerirían energía para la propulsión y las únicas pérdidas serían las ocasionadas por la fricción con el aire y las ocasionadas por la resistencia eléctrica en las bobinas de los circuitos de levitación.



## 7. CONCLUSIONES

Una vez vistos y estudiados en profundidad los distintos motores montados en los trenes de alta velocidad tanto en la actualidad como los que se emplearan en un futuro no muy lejano puesto que ya son prototipos, podemos apreciar.

Hay presente una evidente evolución de las prestaciones de los motores empleados en tracción eléctrica ferroviaria, gracias fundamentalmente a la evolución de la electrónica de potencia a través de los años.

Como hemos venido viendo durante todo el trabajo, los motores empleados en los trenes tienen que tener unas características comunes especiales con respecto a los motores empleados en el ámbito industrial, además de que cada modelo debe poseer unas características particulares las cuales hacen que, dependiendo de la utilización del modelo de tren, dispondrá de uno u otro modelo de motor.

Los requerimientos exigidos hoy en día los motores de tracción eléctrica ferroviaria se pueden resumir en los siguientes puntos.

→ Los motores empleados en los trenes deben de tener el poder de un control continuo de la velocidad en ambos sentidos de giro, deben tener un buen rendimiento y un alto factor de potencia, para minimizar al máximo las pérdidas energéticas y las perturbaciones generadas sobre las líneas de transmisión. Una característica muy importante relacionado con esto anterior es la necesidad de la reversibilidad del motor, esto significa la posibilidad de poder trabajar tanto como de motor como de generador para devolver la energía de frenado a la catenaria y disminuir tanto como sea posible el consumo energético.

→ Los motores empleados en los ferrocarriles, por la situación en la que están instalados (en los ejes de los trenes), deben poseer una robustez mecánica para soportar las vibraciones, suciedad, cambios de temperatura, humedad, etc.... además de esta robustez mecánica se necesita también una robustez eléctrica para poder hacer frente a las sobrecargas, transitorios, etc....



→ Uno de los factores más importantes es la relación peso/potencia puesto que los motores tienen que ser transportados y un mayor peso o volumen dificulta en gran medida la viabilidad de un proyecto

→ Por último, los motores de los ferrocarriles deben poseer un elevado par de arranque sin consumir una corriente excesiva, deben soportar variaciones de la carga continuas, además de tener un amplio campo de regulación de velocidad.

Por todas estas series de características necesarias para la tracción eléctrica ferroviaria, podemos apreciar como en la actualidad el motor asíncrono trifásico es el preferido para montar en los modelos actuales, puesto que presenta una serie de ventajas con respecto al de corriente continua como pueden ser un mantenimiento más sencillo, mejor rendimiento, control de velocidad preciso y la ausencia de un sistema de conmutación específico

Dentro de los motores asíncronos trifásicos, los motores de imanes permanentes son los que mejor relación peso/potencia tienen, de ahí que desde el 2004 sea una de las apuestas en cuanto a alta velocidad se refiere, gran parte de esa buena relación, reside en la ausencia de pérdidas del rotor puesto que el devanado del rotor se sustituye por unos imanes permanentes lo cual hace que no necesitemos escobillas ni anillos rozantes ni colectores de delgas que nos producen pérdidas.

Por todos estos motivos las empresas punteras en lo que a la construcción de vehículos de alta velocidad se refiere, se decantan para sus modelos por la utilización de motores asíncronos trifásicos de imanes permanentes, tanto para la circulación de trenes por vías de corriente alterna como de corriente continua.

En cuanto a los prototipos y tecnologías futuras la industria está apostando por el motor lineal, puesto que nos permite un ahorro energético importante, además de unas mayores velocidades y aceleraciones.



## 8. BIBLIOGRAFIA

Sistemas de alimentación para tracción eléctrica interoperables – Tomás Vega

Tracción eléctrica en alta velocidad ferroviaria – Roberto Faure Benito

Alta velocidad en el ferrocarril – Andrés López Pita

Infraestructuras ferroviarias – Andrés López Pita

Explotación de líneas ferroviarias – Andrés López Pita

Maquinas eléctricas – Jesús Fraile Mora (5ª Edición)

Formación ingenieros de mantenimiento – RENFE

[http://www.renfe.com/viajeros/nuestros\\_trenes](http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes) (20 - Diciembre - 2015)

<http://www.adif.es> (12 - Noviembre - 2015)

<http://www.caf.net> (04 - Febrero - 2016)

<http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services>  
(04 - Febrero - 2016)

<http://www.talgo.com> (04 - Febrero - 2016)

<http://www.alstom.com> (04 - Febrero - 2016)

<http://www.siemens.com/mobility> (04 - Febrero - 2016)

<http://www.trenvista.net> (24 - Febrero - 2016)

<http://www.schneider-electric.es/es> (27 - Octubre - 2015)

Revista ABB 04/2009

Revista Vía libre Junio 2010

Revista Entrelíneas Marzo 2008

Anuario del Ferrocarril 2008 (RENFE)

JST Transformateurs

Power Electronics. Converters, Applications and Desing - N. Mohan  
(2ª edición)

Electrónica de Potencia – Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones – Muhammad H. Rashid)

