



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Grado

TRACCIÓN ELÉCTRICA. ESTADO DEL ARTE

Alumno: Francisco Javier Vidal Flores

Tutor: Prof. D. Ignacio Jesús Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería eléctrica

Junio, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don Ignacio Jesús Pérez Guerrero, tutor del Trabajo Fin de Grado: Tracción Eléctrica. Estado del Arte, que presenta Francisco Javier Vidal Flores, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén

Jaén, Junio 2015

El Alumno:

Francisco Javier Vidal Flores

El Tutor:

Ignacio Jesús Pérez Guerrero

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia y a mis seres queridos todo su apoyo incondicional mostrado, su confianza y su enorme cariño a lo largo de estos años de estudio, ya que han sido un pilar fundamental para poder llegar ser quien soy como persona. Quiero añadir que gracias a los valores que me han inculcado sobre la responsabilidad, el trabajo y el esfuerzo he conseguido afrontar esta etapa académica con entusiasmo y una firme convicción acerca de lo que quiero ser el día de mañana.

En segundo lugar me gustaría agradecer a mis compañeros de piso y mis amigos todos los momentos que hemos compartido juntos a lo largo de estos años, como largos días de estudio, horas en clase, algún que otro trabajo en la biblioteca, y sobre todo, lo mejor, los momentos de diversión y de risas que nunca nos han faltado y que han hecho que estos años se pasasen volando.

En último lugar, y no por ello el menos importante, me gustaría agradecer al equipo docente que he tenido a lo largo de mi vida estudiantil, con especial mención al profesorado del ciclo superior en instalaciones electrotécnicas del instituto I.E.S. Murgi por servirme de referente a la hora de escoger e interesarme por esta profesión, y sobre todo, a mi tutor del trabajo fin de grado, y profesor de máquinas eléctricas y tracción eléctrica, don Ignacio Jesús Pérez Guerrero por haber realizado una excelente labor docente al saber transmitir sus conocimientos y su pasión por la ingeniería y la docencia.

CAPÍTULO 1: ÍNDICES

CAPÍTULO 1.- ÍNDICES

1.1.- Índice General

	<i>Página</i>
CAPÍTULO 1.- ÍNDICES	I
1.1.- Índice General	I
1.2.- Índice de Ilustraciones.....	VI
1.3.- Índice de Tablas	XII
CAPÍTULO 2.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.1.- Descripción del capítulo	2
2.2.- Motivación.....	2
2.3.- Objetivo del presente trabajo fin de grado	4
2.4.- Estructura del presente trabajo fin de grado.....	4
CAPÍTULO 3.- TERMINOLOGÍA.....	7
3.1.- Descripción del capítulo	9
3.2.- Conceptos Técnicos	9
3.2.1.- Agujas aéreas	9
3.2.2.- Aisladores de sección.....	9
3.2.3.- Alta tensión	9
3.2.4.- Ancho de vía	9
3.2.5.- Aparamenta eléctrica.....	9
3.2.6.- Aparatos de corte	9
3.2.7.- Apartadero	10
3.2.8.- Apeadero	10
3.2.9.- Balasto	10
3.2.10.- Baja tensión	10
3.2.11.- Cable de guarda	10
3.2.12.- Cable de tierra	10
3.2.13.- Cable de tierra de fibra óptica (OPGW)	10
3.2.14.- Cable de retorno	11
3.2.15.- Cantón.....	11
3.2.16.- Cargadero	11

3.2.17.- Carril o raíl	11
3.2.18.- Catenaria	11
3.2.19.- Ciclo de carga	11
3.2.20.- Corriente de puesta a tierra.....	12
3.2.21.- Corriente nominal o asignada	12
3.2.22.- Electrodo de tierra	12
3.2.23.- Estación	12
3.2.24.- Feeders.....	12
3.2.25.- Feeder de acompañamiento	12
3.2.26.- Feeder negativo.....	13
3.2.27.- Feeder Positivo o de Alimentación.....	13
3.2.28.- Feeder de retorno	13
3.2.29.- Hilo de contacto	13
3.2.30.- Instalación de tierra	13
3.2.31.- Interruptor automático	13
3.2.32.- Magnitudes asignadas.....	13
3.2.33.- Material rodante.....	14
3.2.34.- Media tensión.....	14
3.2.35.- Pantógrafo	14
3.2.36.- Péndola.....	14
3.2.37.- Redes de transporte de compañía.....	14
3.2.38.- Seccionador	14
3.2.39.- Sobrecarga de corta duración	15
3.2.40.- Sobrecarga de larga duración	15
3.2.41.- Subestación de tracción	15
3.2.42.- Superestructura	15
3.2.43.- Sustentador.....	15
3.2.44.- Transformador convertidor de tracción	15
3.2.45.- Transformador de tracción	15
3.2.46.- Traviesa	16
3.2.47.- Vano de una línea.....	16
3.3.- Colección Fotográfica.....	16
CAPÍTULO 4.- INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA.....	25
4.1.- Introducción	26

4.2.- Descripción general de la infraestructura ferroviaria	28
4.3.- Requisitos Técnicos Previos al Diseño de la Infraestructura	30
4.4.- Normativa Técnica que Rige al Sector Ferroviario	32
4.5.- Electrificación.....	39
4.5.1.- Valores Normalizados de la Tensión	40
4.5.2.- Valores Normalizados de la Frecuencia en Corriente Alterna.....	42
4.5.3.- Esquema General de la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria	42
4.5.4.- Topología de Conexión Entre Subestaciones.....	44
4.5.5.- Zonas Neutras	45
4.5.6.- Sistemas de Electrificación para la Alimentación de la Tracción Eléctrica.....	46
4.5.6.1.- Alimentación en Corriente Continua.....	47
4.5.6.2.- Alimentación en Corriente Alterna	48
4.6.- Componentes que Conforman la Red Eléctrica de Tracción	52
4.6.1.- Generación Eléctrica. Estaciones Generadoras	53
4.6.2.- Líneas de Transporte y Distribución de Energía Eléctrica	54
4.6.3.- Subestaciones de Tracción	55
4.6.3.1.- Configuraciones de las Subestaciones de Tracción	59
4.6.3.2.- Subestaciones de Tracción en Corriente Continua.....	66
4.6.3.3.- Subestaciones de Tracción en Corriente Alterna.....	81
4.6.3.4.- Subestación de Tracción Móvil.....	108
4.6.4.- Alimentación de la Tracción Eléctrica	113
4.6.4.1.- Alimentación por Contacto.....	114
4.6.4.2.- Alimentación sin Contacto	135
4.6.5.- Circuito de Retorno y Puesta a Tierra.....	140
CAPÍTULO 5.- MOTORES DE TRACCIÓN	146
5.1.- Introducción	147
5.2.- Clasificación de las Máquinas de Tracción.....	147
5.3.- Componentes de las Máquinas de Tracción	148
5.4.- Técnicas de Tracción	153
5.4.1.- Técnica Reostática	153
5.4.2.- Técnica Chopper	155
5.4.3.- Técnica Trifásica.....	157
5.4.4.- Técnica de la Levitación Magnética	160

5.5.- Normativa de Diseño de los Motores de Tracción para Aplicaciones Ferroviarias	164
5.6.- Motores de Tracción Comerciales y Material Rodante. Características Técnicas.....	165
5.6.1.- Motores de Tracción para Tranvías	166
5.6.2.- Motores de Tracción para Metros	167
5.6.3.- Motores de Tracción para Cercanías	169
5.6.4.- Motores de Tracción para Ferrocarriles	171
5.6.5.- Motores de Tracción para Trenes de Alta Velocidad.....	173
CAPÍTULO 6.- ELECTRÓNICA DE POTENCIA.....	177
6.1.- Introducción	178
6.2.- Rectificadores Trifásicos en la Tracción Ferroviaria.....	178
6.2.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda	178
6.2.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico	179
6.3.- Análisis de los Rectificadores Trifásicos.....	180
6.3.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda	181
6.3.1.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura	181
6.3.1.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva en Paralelo con una Carga Capacitiva	182
6.3.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico	183
6.3.2.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura	184
6.3.2.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva con un Condensador en Paralelo.....	186
6.4.- Rectificadores Comerciales en la Infraestructura	187
6.5.- Rectificadores Comerciales a Bordo de las Unidades de Tracción	189
CAPÍTULO 7.- SISTEMAS DE SEGURIDAD	194
7.1.- Introducción	195
7.2.- Sistemas de Seguridad y Control en la Tracción Ferroviaria	195
7.2.1.- Sistema ASFA.....	195
7.2.2.- Sistema ERTMS	198
7.2.3.- Sistema PZA / INDUSI.....	199
7.2.4.- Sistema CROCODILE	200
7.2.5.- Sistema EIDOS.....	200
CAPÍTULO 8.- NUEVOS DESARROLLOS.....	203
8.1.- Introducción	204

8.2.- Proyectos de Eficiencia Energética.....	204
8.2.1.- FreeDRIVE: Circulación de Vehículos sin Catenaria.....	204
8.2.2.- EVODRIVE y Ferrolinera: Aprovechamiento de la Energía Cinética	205
8.3.- Proyecto de Investigación en Infraestructura y Máquinas de Tracción. HYPERLOOP: El Transporte del Futuro	207
8.4.- Nuevos Desarrollos en Infraestructura. FACTS en la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria	212
8.5.- Nuevos Interruptores Automáticos Extrarrápidos FKS II.....	215
8.6.- Tendencias en el Sector y Líneas de Investigación	216
CAPÍTULO 9.- BIBLIOGRAFÍA.....	223
9.1.- Normativa	224
9.2.- Libros	224
9.3.- Artículos	225
9.4.- Proyectos.....	226
9.5.- Direcciones de internet.....	226

1.2.- Índice de Ilustraciones

	<i>Página</i>
Ilustración 3.1.- Agujas aéreas.....	16
Ilustración 3.2.- Anchos de vías existentes en Europa.....	16
Ilustración 3.3.- Componentes de un disyuntor extrarrápido	17
Ilustración 3.4.- Apeadero	17
Ilustración 3.5.- Ubicación del balastro	18
Ilustración 3.6.- Descripción gráfica de un cantón.....	18
Ilustración 3.7.- Cargadero de mineral en Almería. Cable inglés.....	18
Ilustración 3.8.- Descripción esquemática de una catenaria.....	18
Ilustración 3.9.- Estación	19
Ilustración 3.10.- Material rodante. Ave serie 103	19
Ilustración 3.11.- Elementos que conforman la catenaria	20
Ilustración 3.12.- Pantógrafo	20
Ilustración 3.13.- Seccionador de alta tensión.....	21
Ilustración 3.14.- Subestación de tracción	21
Ilustración 3.15.- Transformador de tracción	22
Ilustración 3.16.- Superestructura ferroviaria.....	22
Ilustración 3.17.- Elementos en la vía.....	23
Ilustración 4.1.- Evolución de la electrificación ferroviaria española.....	28
Ilustración 4.2.- Infraestructura ferroviaria	29
Ilustración 4.3.- Esquema eléctrico general del sistema eléctrico de tracción	41
Ilustración 4.4.- Zonas neutras.....	46
Ilustración 4.5.- Esquema general del sistema de alimentación 1 x Vcc	48
Ilustración 4.6.- Esquema general del sistema de alimentación 1 x 25 kV.....	49
Ilustración 4.7.- Esquema general del sistema de alimentación 1 x 25 kV con conductor de retorno	50
Ilustración 4.8.- Esquema general del sistema de alimentación 2 x 25kV	51
Ilustración 4.9.- Zonas del sistema de alimentación 2 x 25 kV	52
Ilustración 4.10.- Apoyo con derivación abasteciendo una subestación de tracción ...	55
Ilustración 4.11.-Subestación de tracción fija	56
Ilustración 4.12.- Subestación de tracción móvil	56
Ilustración 4.13.- Modelo antiguo de una subestación de tracción móvil.....	56
Ilustración 4.14.- Configuración de las subestaciones	60
Ilustración 4.15.- Subestaciones de alimentación centralizada.....	62
Ilustración 4.16.- Subestaciones de alimentación con transformadores monofásicos. Conexión en V.....	63
Ilustración 4.17.- Subestaciones de alimentación con transformadores tipo Scott	64
Ilustración 4.18.- Subestaciones con alimentación 2 x 25 kV	65
Ilustración 4.19.- Subestaciones con alimentación 2 x 25 kV en cruces de vías	66
Ilustración 4.20.- Distribución de la corriente en el sistema de alimentación 2 x 25 kV	66
Ilustración 4.21.- Partes de una subestación de corriente continua	67
Ilustración 4.22.- Esquema eléctrico general de una subestación de tracción de corriente continua	68

Ilustración 4.23.- Ejemplo de S/E 66/15 kV de intemperie. Alzado de la línea, embarrado y transformadores	70
Ilustración 4.24.- Planta de un edificio de corriente continua.....	76
Ilustración 4.25.- Alzado del pórtico de feeders.....	79
Ilustración 4.26.- Perfil del pórtico de feeders	80
Ilustración 4.27.- Pórtico de feeders	80
Ilustración 4.28.- Alzado del parque intemperie de alta tensión de una subestación de tracción de corriente alterna.....	82
Ilustración 4.29.- Seccionador de entrada de línea	84
Ilustración 4.30.- Transformador de tensión de medida	86
Ilustración 4.31.- Sección del transformador de tensión de medida	86
Ilustración 4.32.- Transformador de intensidad de medida	88
Ilustración 4.33.- Sección del transformador de intensidad de medida	88
Ilustración 4.34.- Interruptor automático de protección de línea y del transformador de potencia	91
Ilustración 4.35.- Autoválvulas de protección del transformador.....	93
Ilustración 4.36.- Contador de sobretensiones de las autoválvulas de protección del transformador	94
Ilustración 4.37.- Sección y partes del transformador de tracción de una subestaciones en corriente alterna	98
Ilustración 4.38.-Transformador de tracción dispuesto en una subestación de tracción en corriente alterna. Fabricante: ALKARGO.....	98
Ilustración 4.39.- Transformadores de tracción de servicios auxiliares para subestaciones de tracción en corriente alterna	100
Ilustración 4.40.- Pórtico de catenaria y feeders para subestaciones de tracción en corriente alterna.....	106
Ilustración 4.41.- Envolvente de la subestación de tracción móvil	109
Ilustración 4.42.- Compartimentos de una subestación móvil.....	110
Ilustración 4.43.- Alzado de una subestación móvil	110
Ilustración 4.44.- Compartimento de rectificador y transformadores de una subestación de tracción móvil	111
Ilustración 4.45.- Compartimento de seccionamiento, protección y medida de la subestación de tracción móvil	111
Ilustración 4.46.- Compartimento de feeders de una subestación de tracción móvil .	112
Ilustración 4.47.- Detalle del disyuntor extrarápido extraíble de las celdas de los feeders.....	112
Ilustración 4.48.- Compartimento de las baterías de una subestación de tracción móvil.....	113
Ilustración 4.49.- Disposición de las tomas del tercer carril	115
Ilustración 4.50.- Conjunto perfil – hilo de contacto del sistema de alimentación con catenaria rígida	117
Ilustración 4.51.- Brida de toma de corriente.....	118
Ilustración 4.52.- Brida de puesta a tierra	118
Ilustración 4.53.- Punto fijo.....	119
Ilustración 4.54.- Seccionamientos	119
Ilustración 4.55.- Soporte de tipo barra.....	119
Ilustración 4.56.- Aisladores	120
Ilustración 4.57.- Barras de transición	121

Ilustración 4.58.- Catenaria rígida	121
Ilustración 4.59.- Catenaria rígida con aguja aérea en un túnel	121
Ilustración 4.60.- Esquema del sistema de alimentación a través de línea aérea de contacto	122
Ilustración 4.61.- Catenaria tipo CA – 160	123
Ilustración 4.62.-Catenaria tipo CA – 220	123
Ilustración 4.63.- Catenaria de ADIF tipo CA – 160	124
Ilustración 4.64.- Catenaria tranviaria	124
Ilustración 4.65.- Catenaria sencilla	125
Ilustración 4.66.- Catenaria compuesta y tipo malla.....	125
Ilustración 4.67.- Catenaria inclinada.....	126
Ilustración 4.68.- Catenaria sin regulación.....	126
Ilustración 4.69.- Catenaria con compensación.....	127
Ilustración 4.70.- Hilo conductor. Dimensiones normalizadas según la norma UNE – EN 50149	128
Ilustración 4.71.- Péndola no equipotencial	129
Ilustración 4.72.- Péndola equipotencial	129
Ilustración 4.73.- Estructuras portantes	131
Ilustración 4.74.- Detalle del seccionador	131
Ilustración 4.75.- Pórticos	131
Ilustración 4.76.- Modelo de catenaria CA – 160.....	133
Ilustración 4.77.- Modelo de catenaria CA – 220.....	133
Ilustración 4.78.- Unidad de tracción con baterías a bordo.....	135
Ilustración 4.79.- Funcionamiento del sistema de alimentación con baterías a bordo de la unidad de tracción	136
Ilustración 4.80.- Tramo electrificado	136
Ilustración 4.81.- Tramo no electrificado	137
Ilustración 4.82.- Sistema Aliss	139
Ilustración 4.83.- Sistema Stream	139
Ilustración 4.84.- Esquema de la función del carril como circuito de retorno.....	140
Ilustración 4.85.- Sección transversal del perfil del carril	141
Ilustración 4.86.- Sección transversal de los carriles más utilizados en la infraestructura ferroviaria	141
Ilustración 4.87.- Proceso de fabricación de los carriles	141
Ilustración 4.88.- Proceso de laminación del carril	142
Ilustración 4.89.- Circuito eléctrico del circuito de retorno y la puesta a tierra en los sistemas de corriente alterna	144
Ilustración 4.90.- Circuito eléctrico del circuito de retorno y la puesta a tierra en los sistemas de corriente continua	144
Ilustración 5.1.- Esquema eléctrico general de una unidad de tracción	148
Ilustración 5.2.- Esquema eléctrico y componentes de una unidad de tracción.....	148
Ilustración 5.3.- Pantógrafo	149
Ilustración 5.4.- Pararrayos a bordo de la unidad de tracción.....	150
Ilustración 5.5.- Disyuntor a bordo de la unidad de tracción	150
Ilustración 5.6.- Seccionadores a bordo de la unidad de tracción	151
Ilustración 5.7.- Filtro de red a bordo de la unidad de tracción	151
Ilustración 5.8.- Resistencia de frenado a bordo de la unidad de tracción.	152

Ilustración 5.9.- Motor eléctrico de tracción ferroviaria a bordo de la unidad de tracción	152
Ilustración 5.10.- Motor de tracción eléctrica ferroviaria de corriente continua	153
Ilustración 5.11.- Esquema del arranque de la unidad de tracción en la técnica reostática	154
Ilustración 5.12.- Esquema de la marcha de la unidad de tracción en la técnica reostática	154
Ilustración 5.13.- Esquema eléctrico de la técnica con choppers	155
Ilustración 5.14.- Esquema eléctrico de un chopper	156
Ilustración 5.15.- Esquema eléctrico general de una unidad de tracción basada en el control a través de choppers	156
Ilustración 5.16.- Diagrama de bloques de la técnica de regulación trifásica con alimentación en corriente continua	158
Ilustración 5.17.- Esquema eléctrico general de la regulación trifásica con onduladores de corriente.....	158
Ilustración 5.18.- Leyenda del esquema eléctrico general de la regulación trifásica con onduladores de corriente.....	159
Ilustración 5.19.- Diagrama de bloques de la técnica de regulación trifásica con alimentación en corriente alterna	160
Ilustración 5.20.- Suspensión electromagnética (EMS).....	161
Ilustración 5.21.- Sección del sistema de suspensión electromagnética (EMS)	161
Ilustración 5.22.- Motor lineal utilizado en la tracción de los trenes maglev	161
Ilustración 5.23.- Diagrama de los fenómenos de atracción y repulsión originados entre el material móvil y la vía.....	162
Ilustración 5.24.- Forma de la vía en el sistema de suspensión electromagnética	163
Ilustración 5.25.- Bobinas superconductoras alojadas en los laterales del material móvil para la tracción en el sistema de suspensión electrodinámica (EDS).....	163
Ilustración 5.26.- Propulsión en el sistema de suspensión electrodinámica (EDS)....	164
Ilustración 5.27.- Motor de tracción eléctrica ferroviaria del fabricante ABB	165
Ilustración 5.28.- Motor de tracción ferroviaria 4 HGA 1433 del fabricante ALSTOM	166
Ilustración 5.29.- Motor de tracción ferroviaria 6 LMS 1052 del fabricante ALSTOM	167
Ilustración 5.30.- Motor de tracción ferroviaria 4 LCA 1640 del fabricante ALSTOM .	167
Ilustración 5.31.- Motor de tracción ferroviaria 4 ELA 2848 C del fabricante ALSTOM	168
Ilustración 5.32.- Motor de tracción ferroviaria 4 ECA 1836 C del fabricante ALSTOM	169
Ilustración 5.33.- Motor de tracción ferroviaria 4 FXA 2854 del fabricante ALSTOM .	170
Ilustración 5.34.- Motor de tracción ferroviaria 6 FJA 3257 A del fabricante ALSTOM	171
Ilustración 5.35.- Motor de tracción ferroviaria 12 LCS 3550 C del fabricante ALSTOM	172
Ilustración 5.36.- Motor de tracción ferroviaria 6 FRA 4567 D del fabricante ALSTOM	173
Ilustración 5.37.- Motor de tracción ferroviaria 4 FXA 4553 del fabricante ALSTOM .	174
Ilustración 6.1.- Esquema del rectificador trifásico de doble onda con tres pares de puentes de diodos	179
Ilustración 6.2.- Esquema del rectificador de doble onda con seis pares de puentes de diodos	180

Ilustración 6.3.- Esquema en OrCAD Pspice para la primera simulación. Rectificador trifásico de doble onda.....	181
Ilustración 6.4.- Gráfica de tensión en la carga frente al de los generadores.....	182
Ilustración 6.5.- Esquema del circuito de la segunda simulación. Rectificador trifásico de doble onda	182
Ilustración 6.6.- Gráfica de tensión en bornes de la carga y tensión de los generadores.....	183
Ilustración 6.7.- Esquema del circuito de la primera simulación. Rectificador trifásico dodecafásico	184
Ilustración 6.8.- Gráfica de la tensión de los generadores en estrella y de la tensión en bornes de la carga.....	185
Ilustración 6.9.- Gráfica de la tensión de los generadores en triángulo y de la tensión en bornes de la carga.....	185
Ilustración 6.10.- Esquema del circuito de la segunda simulación. Rectificador trifásico dodecafásico	186
Ilustración 6.11.- Gráfica de la tensión de los generadores en estrella y de la tensión en bornes de la carga.....	186
Ilustración 6.12.- Rectificador para subestaciones de tracción de corriente continua de Sécheron.....	188
Ilustración 6.13.- Esquemas eléctricos de los diferentes modelos de rectificadores del fabricante Sécheron	189
Ilustración 6.14.- Disposición de los rectificadores en las unidades de tracción	190
Ilustración 6.15.- Circuito eléctrico de un cofre rectificador del fabricante CAF	191
Ilustración 6.16.- Convertidor de tracción eléctrica a 25 kV para la alta velocidad	192
Ilustración 6.17.- Convertidor de tracción eléctrica para tranvías y metros	192
Ilustración 6.18.- Convertidores de tracción a 1500 V para metros y trenes regionales	192
Ilustración 6.19.- Convertidor de tracción a 3000 V para metros y trenes regionales	192
Ilustración 7.1.- Disposición de las balizas en el sistema ASFA.....	196
Ilustración 7.2.- Disposición de las balizas del tren en el sistema ASFA.....	196
Ilustración 7.3.- Esquema general de actuación del sistema ASFA	197
Ilustración 7.4.- Esquema general de actuación del sistema ASFA	197
Ilustración 7.5.- Barra ondulada del sistema CROCODILE.....	200
Ilustración 7.6.- Colector de escobillas del sistema CROCODILE	200
Ilustración 7.7.- Esquema general del sistema EIDOS	201
Ilustración 8.1.- Principio de funcionamiento de la tecnología FreeDRIVE	205
Ilustración 8.2.- Etapa de carga en el proyecto de las Ferrolineras.....	206
Ilustración 8.3.- Etapa de descarga en el proyecto de las Ferrolineras	206
Ilustración 8.4.- Esquema general del funcionamiento del proyecto de las Ferrolineras.....	207
Ilustración 8.5.- Trazada ferroviario desde San Francisco a los Ángeles. Hyperloop	207
Ilustración 8.6.- Diseño de las cápsulas en el sistema Hyperloop	208
Ilustración 8.7.- Elementos a bordo de la cápsula del sistema Hyperloop	209
Ilustración 8.8.- Forma del motor eléctrico lineal del sistema Hyperloop.....	209
Ilustración 8.9.- Detalle de las distancias existentes del entrehierro en el motor lineal del sistema Hyperloop	210
Ilustración 8.10.- Estructuras de hormigón en el sistema Hyperloop.....	210

Ilustración 8.11.- Superestructura del sistema Hyperloop.....	211
Ilustración 8.12.- Circuito eléctrico del sistema Hyperloop.....	211
Ilustración 8.13.- Sistema de vacío para el lanzamiento del sistema Hyperloop.....	212
Ilustración 8.14.- Esquema eléctrico general del funcionamiento de los FACs.....	214
Ilustración 8.15.- Esquema eléctrico de un equipo SVC	214
Ilustración 8.16.- Esquema eléctrico de un equipo SVC light	214
Ilustración 8.17.-Equipo SVC light	215
Ilustración 8.18.- Interruptor automático extrarrápido FKS II	216

1.3.- Índice de Tablas

	<i>Página</i>
Tabla 2.1.- Clasificación del sector ferroviario.....	2
Tabla 2.2.- Utilización de los transportes en España	3
Tabla 4.1.- Comparativa del consumo energético entre medios de transporte	26
Tabla 4.2.- Electrificación de las vías ferroviarias en España.....	27
Tabla 4.3.- Tensiones normalizadas según UNE - EN - 50163	42
Tabla 4.4.- Comparativa entre las configuraciones generales de las subestaciones de tracción	61
Tabla 4.5.- ET 03.359.101.7: Dimensiones y peso de los transformadores de potencia sumergidos en aceite	72
Tabla 4.6.- ET 03.359.121.5: Dimensiones y peso de los transformadores de potencia de tipo seco.....	73
Tabla 4.7.-Resumen de las características asignadas para los transformadores de 3.300 kVA y 6.600 kVA según ET 03.359.121.5	74
Tabla 4.8.- Leyenda del edificio de corriente continua	76
Tabla 4.9.- Dimensiones normalizadas de una subestación de tracción de corriente alterna.....	81
Tabla 4.10.- Características eléctricas de la acometida de las subestaciones de tracción en corriente alterna.....	81
Tabla 4.11.- Características generales de los seccionadores de entrada de línea	84
Tabla 4.12.- Características constructivas del seccionador de entrada de línea	85
Tabla 4.13.- Características del circuito de accionamiento del seccionador de entrada de línea.....	85
Tabla 4.14.- Características de los transformadores de tensión de medida.....	86
Tabla 4.15.- Características de los transformadores de intensidad de medida.....	87
Tabla 4.16.- Características de los transformadores de tensión de medida y protección	89
Tabla 4.17.- Características de los interruptores automáticos de protección de línea y del transformador de potencia.....	90
Tabla 4.18.- Características del accionamiento de los interruptores automáticos de protección de línea y del transformador.....	90
Tabla 4.19.- Características de los transformadores de intensidad de protección.....	92
Tabla 4.20.- Características de las autoválvulas de protección del transformador	93
Tabla 4.21.- Características técnicas del contador de sobretensiones de las autoválvulas de protección del transformador. Fabricante: ABB	94
Tabla 4.22.- Características del embarrado	95
Tabla 4.23.- Características técnicas de los transformadores de tracción para subestaciones de corriente alterna según la ET 03.359.504.2	96
Tabla 4.24.- Características constructivas de los transformadores de tracción para subestaciones de corriente alterna según la ET 03.359.504.2	96
Tabla 4.25.-Características eléctricas de los transformadores de servicios auxiliares según ET 03.359.117.3.....	99
Tabla 4.26.- Características constructivas de los transformadores de servicios auxiliares según ET 03.359.117.3.....	99
Tabla 4.27.-Características de los aisladores de apoyo en la zona de 25 kV	101

Tabla 4.28.- Características de las autoválvulas en la zona de 25 kV.....	101
Tabla 4.29.- Tipos de relés de protección y su código ANSI	107
Tabla 4.30.- Características del perfil utilizado en el sistema de catenaria rígida.....	117
Tabla 4.31.- Características técnicas del modelo de catenaria CA – 160	134
Tabla 4.32.- Características técnicas del modelo de catenaria CA – 220	134
Tabla 5.1.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 HGA 1433 del fabricante ALSTOM	166
Tabla 5.2.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 LMS 1052 del fabricante ALSTOM	167
Tabla 5.3.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 LCA 1640 del fabricante ALSTOM	168
Tabla 5.4.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 ELA 2848 C del fabricante ALSTOM	169
Tabla 5.5.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 ECA 1836 A del fabricante ALSTOM.....	170
Tabla 5.6.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 FXA 2854 A del fabricante ALSTOM	171
Tabla 5.7.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 FJA 3257 A del fabricante ALSTOM	172
Tabla 5.8.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 12 LCS 3550 C del fabricante ALSTOM	173
Tabla 5.9.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 FRA 4567 D del fabricante ALSTOM	174
Tabla 5.10.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 FXA 4553 del fabricante ALSTOM	175
Tabla 6.1.- Elementos utilizados en las simulaciones de los rectificadores	180
Tabla 6.2.- Parámetros de la primera simulación	181
Tabla 6.3.- Características de los rectificadores utilizados en las subestaciones. Fabricante Sécheron	187
Tabla 6.4.- Resumen de las características del rectificador 750 VDC de CAF	190
Tabla 6.5.- Modelos de rectificadores del fabricante CAF y sus características principales.....	192

CAPÍTULO 2:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 2.- INTRODUCCIÓN

	<i>Página</i>
2.1.- Descripción del capítulo	2
2.2.- Motivación.....	2
2.3.- Objetivo del presente trabajo fin de grado	4
2.4.- Estructura del presente trabajo fin de grado.....	4

2.1.- Descripción del capítulo

En el presente capítulo se realiza la descripción de la motivación generada para realizar dicho trabajo fin de grado, así como una breve descripción sobre los objetivos de este trabajo fin de grado y la exposición de la estructura que se va a llevar a cabo.

2.2.- Motivación

El sector del transporte constituye un tema fundamental para las administraciones y gobiernos de todo el mundo, tales como la intermodalidad, la explotación sostenible, la gestión de recursos e infraestructuras, así como el control y regulación del impacto ambiental y socioeconómico del mismo.

A la hora de realizar un estudio de viabilidad de un determinado medio de transporte para su posterior construcción se ha de obtener información acerca del coste de producción acerca de los siguientes procesos industriales:

- Materiales y energía.
- Fabricación de vehículos.
- Construcción y diseño de la infraestructura.
- Costes de la explotación.
- Mantenimiento de los vehículos e infraestructuras.
- Gestión de residuos.

Una clasificación del sector del transporte ferroviario queda definida en la siguiente tabla:

TIPO DE TRANSPORTE	FERROVIARIO
PERSONAS	☒ AVE y largo recorrido ☒ Media distancia ☒ Cercanías ☒ Ferrocarriles autonómicos ☒ FEVE ☒ Metros ☒ Tranvías
MERCANCÍAS	☒ Trenes de mercancías interiores ☒ Trenes transfronterizos

Tabla 2.1.- Clasificación del sector ferroviario.

Los transportes motorizados tales como el viario, ferroviario, aéreo y marítimo cuentan con la siguiente cuota de utilización en España, según los datos del ministerio de fomento recogidos en 2007, se muestran en la siguiente tabla:

TIPO DE TRANSPORTE	Nº DE VIAJES (MILLONES)	%
Viario	23.840	92,1
Ferrovioario	1.949	7,5
Aéreo	89	0,3
Marítimo	20	0,1
TOTAL	25.898	100

Tabla 2.2.- Utilización de los transportes en España

Siendo el transporte ferroviario el segundo medio de transporte más utilizado por los españoles para desplazarse tanto nacionalmente como internacionalmente.

En el ámbito internacional, el sector ferroviario está experimentando un auge en los mercados emergentes de BRIC (Brasil, Rusia, India y China) debido a la creciente demanda de material ferroviario de última generación y de alta velocidad, dichas áreas de conocimiento contienen un alto contenido tecnológico.

Como ejemplo de inversiones en dicho sector, en primer lugar cabe citar la de Brasil, cuya inversión se estima en 90.000 millones de euros hasta 2023 en el desarrollo, creación y mejora de sus líneas.

En segundo lugar cabe citar la inversión prevista en la India, que ronda la cantidad de 780.000 millones de euros en aumentar su red ferroviaria, mejorar la red ferroviaria existente y el metro urbano.

En tercer lugar cabe destacar la inversión Rusa, cuya cifra ronda los 331000 millones de euros, con un proyecto de infraestructura de más de 85.000 kilómetros de longitud y 9 husos horarios, para colocarse así como la tercera línea más extensa del mundo. En cuarto, y último lugar, cabe destacar al gigante asiático, es decir, China, que prevé una inversión que asciende a una cantidad de 250.000 millones de euros destinados a proyectar una red de 120.000 kilómetros de vías.

Dado el auge y la expansión del sector, este trabajo fin de grado tiene la motivación de dar a conocer la estructura ferroviaria utilizada actualmente, así como los equipos utilizados, y los nuevos proyectos de futuro.

2.3.- Objetivo del presente trabajo fin de grado

Dado el crecimiento y el auge en dicho sector comentado en el apartado anterior, este trabajo fin de grado tiene como objetivo ahondar en la tracción ferroviaria, en el que se van a describir la infraestructura ferroviaria actual desde una perspectiva técnica, con el fin de esclarecer los aspectos de diseño de dicha infraestructura.

También se incluyen una descripción de las máquinas de tracción que se utilizan en la actualidad. En dicho capítulo se desarrollarán cada una de las máquinas utilizadas en la tracción ferroviaria, así como características técnicas de diseño, con el fin de realizar algún proyecto o para dar lugar a una investigación a partir de las máquinas que se utilizan en la actualidad.

Es parte del objetivo del presente trabajo fin de grado el análisis y descripción de los equipos electrónicos que se utilizan en la tracción ferroviaria, así como el de mostrar sus aspectos técnicos y de diseño.

En último lugar, como objetivo de este trabajo fin de grado, también cabe destacar el de realizar una descripción de las perspectivas de futuro de este sector en cuanto a nivel tecnológico se refiere, y los retos de futuro del mismo, que pueden dar pie a futuras implantaciones de las mismas o su consiguiente investigación entorno a dicho campo.

2.4.- Estructura del presente trabajo fin de grado

Este trabajo fin de grado consta de 8 capítulos, sin tener en cuenta la introducción y la bibliografía, y cuya descripción del contenido es la siguiente:

El *capítulo 1* es el índice general del presente documento, en el que aparecen cada uno de los capítulos y sus apartados numerados, así como la

localización, mediante el número de página, de dichos apartados y capítulos de este trabajo fin de grado.

En el *capítulo 3* se recoge la terminología técnica en lo referente a la tracción eléctrica ferroviaria que aparece en el trabajo este trabajo fin de grado.

El *capítulo 4* tiene como objetivo describir la infraestructura eléctrica actual, utilizada en la tracción eléctrica ferroviaria, se explicarán los elementos de la que se compone la misma, así como una descripción técnica de dichos elementos.

El *capítulo 5* describe las máquinas de tracción eléctrica ferroviaria utilizadas en la actualidad, así como una descripción de las características técnicas.

En el *capítulo 6* se mostrarán todos los equipos electrónicos de potencia utilizados en la tracción eléctrica ferroviaria, en el que se mostraran los equipos de uso común, esquemas de los mismos, así como características técnicas y de funcionamiento de dichos equipos electrónicos.

El *capítulo 7* está orientado a realizar una breve descripción de los nuevos desarrollos que se están llevando en la actualidad en lo referente a la infraestructura eléctrica para la tracción ferroviaria, así como nuevos métodos de tracción y eficiencia energética.

El capítulo 8 está destinado a realizar una clasificación de los sistemas de seguridad que se utilizan en la actualidad, así como describir los sistemas de seguridad y posicionamiento de una locomotora de tracción eléctrica.

En el capítulo 9 está reflejada toda la bibliografía utilizada para realizar el presente trabajo fin de grado, en el que se incluyen la normativa técnica utilizada, las referencias bibliográficas, los artículos técnicos de interés y las direcciones de las páginas web que han servido de fuentes de información.

CAPÍTULO 3: TERMINOLOGÍA

CAPÍTULO 3.- TERMINOLOGÍA

	<i>Página</i>
3.1.- Descripción del capítulo	9
3.2.- Conceptos Técnicos	9
3.2.1.- Agujas aéreas	9
3.2.2.- Aisladores de sección	9
3.2.3.- Alta tensión	9
3.2.4.- Ancho de vía	9
3.2.5.- Aparamenta eléctrica	9
3.2.6.- Aparatos de corte	9
3.2.7.- Apartadero	10
3.2.8.- Apeadero	10
3.2.9.- Balasto	10
3.2.10.- Baja tensión	10
3.2.11.- Cable de guarda	10
3.2.12.- Cable de tierra	10
3.2.13.- Cable de tierra de fibra óptica (OPGW)	10
3.2.14.- Cable de retorno	11
3.2.15.- Cantón	11
3.2.16.- Cargadero	11
3.2.17.- Carril o raíl	11
3.2.18.- Catenaria	11
3.2.19.- Ciclo de carga	11
3.2.20.- Corriente de puesta a tierra	12
3.2.21.- Corriente nominal o asignada	12
3.2.22.- Electrodo de tierra	12
3.2.23.- Estación	12
3.2.24.- Feeders	12
3.2.25.- Feeder de acompañamiento	12
3.2.26.- Feeder negativo	13
3.2.27.- Feeder Positivo o de Alimentación	13
3.2.28.- Feeder de retorno	13
3.2.29.- Hilo de contacto	13

3.2.30.- Instalación de tierra	13
3.2.31.- Interruptor automático	13
3.2.32.- Magnitudes asignadas.....	13
3.2.33.- Material rodante	14
3.2.34.- Media tensión.....	14
3.2.35.- Pantógrafo	14
3.2.36.- Péndola.....	14
3.2.37.- Redes de transporte de compañía	14
3.2.38.- Seccionador	14
3.2.39.- Sobrecarga de corta duración	15
3.2.40.- Sobrecarga de larga duración	15
3.2.41.- Subestación de tracción	15
3.2.42.- Superestructura	15
3.2.43.- Sustentador.....	15
3.2.44.- Transformador convertidor de tracción	15
3.2.45.- Transformador de tracción	15
3.2.46.- Traviesa	16
3.2.47.- Vano de una línea.....	16
3.3.- Colección Fotográfica.....	16

3.1.- Descripción del capítulo

En este capítulo se recogen los términos técnicos más generales utilizados en la tracción eléctrica, así como una colección fotográfica a continuación de los términos, con el objetivo de ejemplificar los términos citados en este capítulo.

3.2.- Conceptos Técnicos

A continuación se describen en los siguientes apartados los conceptos técnicos más relevantes en la tracción eléctrica ferroviaria según la Comisión Electrotécnica Internacional (I.E.C.).

3.2.1.- Agujas aéreas

Instalación eléctrica destinada a realizar la transición de una vía a otra de un tren.

3.2.2.- Aisladores de sección

Elemento destinado a realizar una separación eléctrica entre feeders.

3.2.3.- Alta tensión

Tensión nominal o asignada superior a 55 kV.

3.2.4.- Ancho de vía

Separación entre carriles del trazado ferroviario.

3.2.5.- Aparamenta eléctrica

Conjunto de dispositivos de maniobra, de regulación, de seguridad y control, y elementos de canalización utilizados en las instalaciones eléctricas

3.2.6.- Aparatos de corte

Dispositivos utilizados para cerciorar la continuidad o discontinuidad de los circuitos eléctricos.

3.2.7.- Apartadero

Estación de poco tráfico de viajeros, cuyo objetivo es la regulación del tráfico ferroviario, y que proporciona la posibilidad de realizar cruces entre trenes, así como adelantamientos, o cambios de vía.

3.2.8.- Apeadero

Estaciones el fin único de realizar la subida o la bajada de pasajeros, y no constan de personal.

3.2.9.- Balasto

Elemento granular silíceo en el que descansan las traviesas, cuya finalidad es la de amortiguar el paso del tren, así como repartir los esfuerzos que ejercen el tren sobre los carriles o vías, e impedir su desplazamiento.

3.2.10.- Baja tensión

Tensión nominal o asignada inferior a 1 kV.

3.2.11.- Cable de guarda

Conductor utilizado en las líneas de alta tensión cuyo objetivo es el de proteger, en forma de pantalla, la instalación eléctrica frente a descargas atmosféricas.

3.2.12.- Cable de tierra

Conductor dispuesto a lo largo del trazado ferroviario, uniendo todas las estructuras y postes a través de sus partes metálicas, con el objetivo de proteger la instalación eléctrica, y minimizar los efectos, frente a perturbaciones producidas por agentes externos o por falta de aislamiento.

3.2.13.- Cable de tierra de fibra óptica (OPGW)

Conductor de tierra que contiene fibra óptica dispuesta en el interior, para realizar un suministro de telecomunicaciones

3.2.14.- Cable de retorno

Conductor cuyo objetivo es el de reforzar los carriles o vías, es decir, son los encargados de conducir la corriente de retorno de las vías, alejándolas de las mismas. Mediante el cable de retorno también reducimos las perturbaciones originadas por los sistemas de señalización dispuestos en las vías.

3.2.15.- Cantón

Tramo de la línea ferroviaria alimentada por una subestación, y separada eléctricamente de otra línea ferroviaria alimentada por otra subestación diferente a lo largo del trazado ferroviario.

3.2.16.- Cargadero

Instalaciones destinadas a la carga y la descarga de vagones a una línea a través de una o más agujas de plena vía.

3.2.17.- Carril o raíl

Perfiles longitudinales metálicos cuyo objetivo es el de soportar y guiar los trenes a lo largo del trazado ferroviario, así como elemento conductor de la corriente del circuito de alimentación del tren a través del contacto de las ruedas del tren.

3.2.18.- Catenaria

Sistemas de varios conductores dispuesto a lo largo del trazado ferroviario, destinado al transporte de la energía eléctrica.

3.2.19.- Ciclo de carga

Indicador de la variación de las cargas solicitadas al transformador de tracción respecto al tiempo, expresada en valor por unidad de las corrientes nominales o asignadas, para la prevención y diseño de transformador de tracción cuando se origina una sobrecarga o una falta de carga en la red eléctrica ferroviaria.

3.2.20.- Corriente de puesta a tierra

Sumatoria de todas las corrientes que se derivan a tierra debido a todos los agentes externos, perturbaciones ocasionadas y fallos de aislamiento.

3.2.21.- Corriente nominal o asignada

Corriente que soporta una instalación eléctrica, un elemento o un equipo de manera indefinida en condiciones asignadas de funcionamiento.

3.2.22.- Electrodo de tierra

Elemento conductor, ya sea una barra, un conductor o un conjunto de conductores interconectados, dispuesto bajo tierra que tienen como objetivo establecer el punto de conexión de tierra de la instalación.

3.2.23.- Estación

Instalación destinada a alojar un conjunto de vías y sus correspondientes agujas, con el fin de dar un servicio comercial, en todos los ámbitos, destinado a los usuarios del ferrocarril.

3.2.24.- Feeders

Conductores cuyo objetivo es aumentar la sección total de la línea aérea para servir de apoyo a la misma a la hora de alimentar un punto característico del trazado ferroviario.

3.2.25.- Feeder de acompañamiento

Conductor destinado a minimizar los efectos del calentamiento del conductor cuando existen consumos elevados en puntos característicos del trazado ferroviario, así como para mantener la tensión cuando en la línea de alimentación existe una caída de tensión considerable o cuando existe una insuficiencia de potencia suministrada a la línea de alimentación.

3.2.26.- Feeder negativo

Conductor de tensión negativa cuyo objetivo es la circulación de la corriente de retorno para los sistemas duales.

3.2.27.- Feeder Positivo o de Alimentación

Conductor de tensión positiva cuyo objetivo es la circulación de la corriente de alimentación cuando se necesita aumentar la sección en un determinado punto del trazado ferroviario, debido a su baja impedancia y su consiguiente aumento de la intensidad admisible de la catenaria.

3.2.28.- Feeder de retorno

Conductor cuyo objetivo es el de disminuir la impedancia del circuito de retorno para reducir las caídas de tensión en la línea de alimentación.

3.2.29.- Hilo de contacto

Conductor encargado de proporcionar el suministro de la energía eléctrica al tren, mediante el contacto directo con el pantógrafo.

3.2.30.- Instalación de tierra

Instalación eléctrica formada por los electrodos y los conductores de tierra.

3.2.31.- Interruptor automático

Elemento de protección encargado de realizar la interrupción del suministro eléctrico cuando el circuito eléctrico está en carga, así como soportar unas condiciones anormales de funcionamiento, como por ejemplo un cortocircuito, y restablecer el suministro.

3.2.32.- Magnitudes asignadas

Magnitudes como la tensión, la corriente o la impedancia cuyos valores establecen el régimen normal de funcionamiento del sistema eléctrico.

3.2.33.- Material rodante

Conjunto de unidades motoras y unidades remolcadas que circulan por los trazados ferroviarios y que conforman los diferentes tipos de trenes, referidos también a su ámbito comercial.

3.2.34.- Media tensión

Tensión nominal o asignada entre 1 kV y 55 kV.

3.2.35.- Pantógrafo

Dispositivo mecánico – hidráulico regulado encargado de captar la energía eléctrica de la línea de alimentación para proporcionarle suministro de energía a todo el sistema eléctrico alojado en el tren. Este dispositivo se mantiene constantemente en contacto con el hilo de contacto del sistema de alimentación, ajustándose automáticamente a la altura necesaria para proporcionar dicho contacto, ya que una desconexión instantánea puede provocar un deterioro en nuestra unidad de tracción.

3.2.36.- Péndola

Conjunto de elementos conductores que tienen la finalidad de unir eléctricamente el sustentador con el hilo de contacto, para mantener a este último a una distancia vertical constante con respecto al plano formado por las vías del tren.

3.2.37.- Redes de transporte de compañía

Son las instalaciones eléctricas de compañías suministradoras destinadas al suministro de energía eléctrica a las subestaciones de tracción.

3.2.38.- Seccionador

Elemento de protección encargado de realizar la interrupción del suministro eléctrico cuando el circuito eléctrico sin carga, así como soportar unas condiciones anormales de funcionamiento, como por ejemplo un cortocircuito, y restablecer el suministro.

3.2.39.- Sobrecarga de corta duración

Período de tiempo hasta 480 segundos, cuando existe una sobrecarga permanente en el sistema eléctrico.

3.2.40.- Sobrecarga de larga duración

Período de tiempo comprendido entre 480 a 7200 segundos, cuando existe una sobrecarga permanente en el sistema eléctrico.

3.2.41.- Subestación de tracción

Instalación eléctrica destinada a transformar y rectificar, dependiendo del tipo de corriente a suministrar, la corriente necesaria para enviarla a la red de transporte que alimentará a las líneas de alimentación del trazado ferroviario.

3.2.42.- Superestructura

Conjunto de carril o vías, aparatos, elementos e instalaciones necesarias para la circulación correcta y eficaz de los trenes.

3.2.43.- Sustentador

Conductor encargado de soportar y dar suministro eléctrico al hilo de contacto a través de las péndolas.

3.2.44.- Transformador convertidor de tracción

Transformador de tracción situado en la alimentación de un grupo convertidor que alimenta a las líneas de contacto a través de un (unos) convertidor(es) estático(s).

3.2.45.- Transformador de tracción

Transformador conectado a una línea de contacto a través de un convertidor usado en instalaciones fijas de aplicaciones ferroviarias.

3.2.46.- Traviesa

Elemento portante de las vías, situado entre los carriles o vías y el balastro, y dispuestos de forma transversal al eje de las mismas.

3.2.47.- Vano de una línea

Distancia comprendida entre dos apoyos consecutivos de la línea aérea de alimentación del trazado ferroviario.

3.3.- Colección Fotográfica



Ilustración 3.1.- Aguja aérea

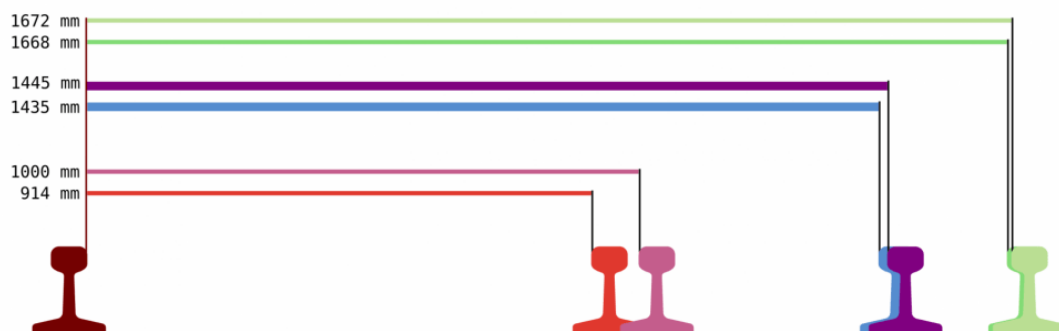


Ilustración 3.2.- Anchos de vías existentes en Europa

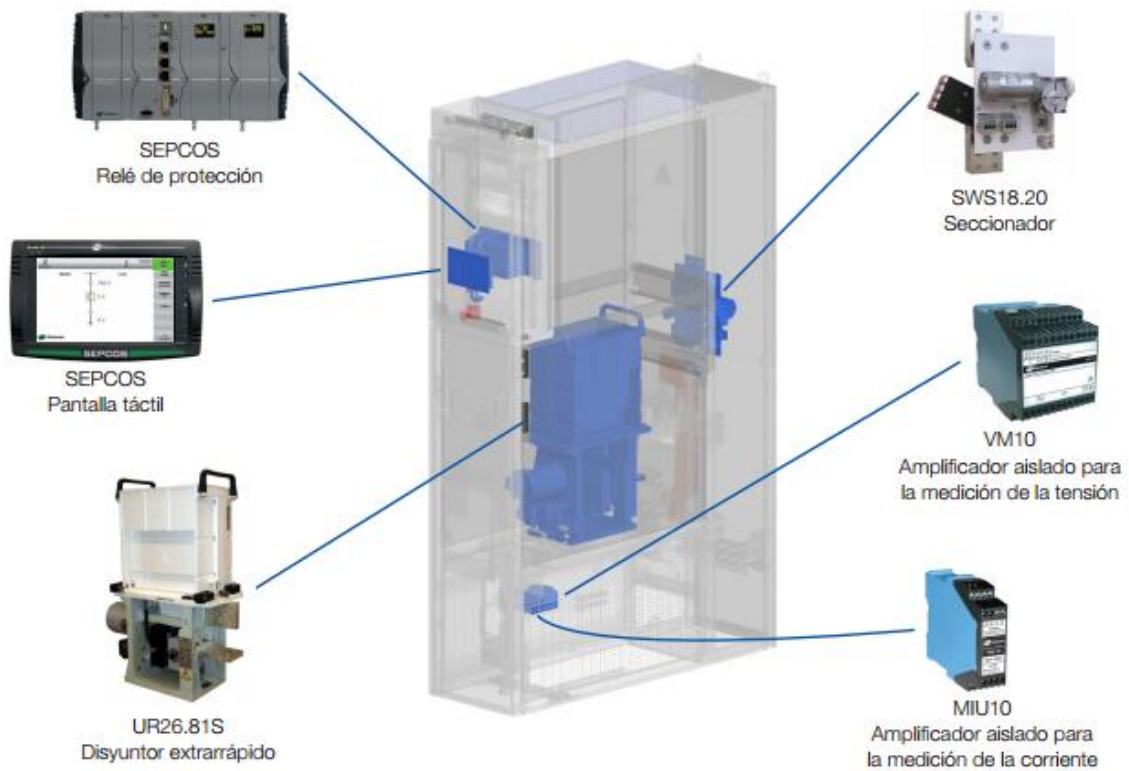


Ilustración 3.3.- Componentes de un disyuntor extrarrápido



Ilustración 3.4.- Apeadero

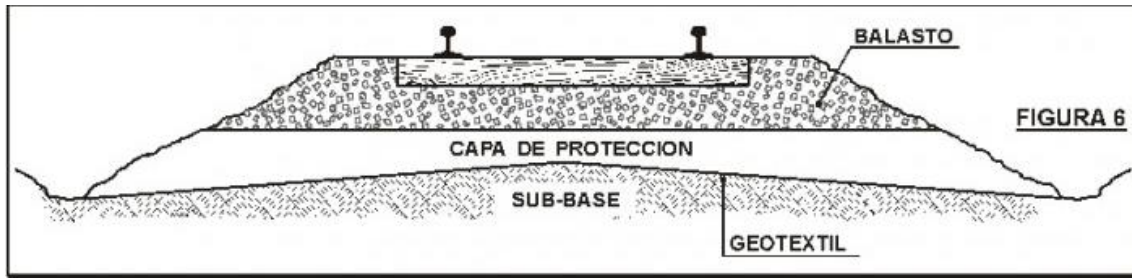


Ilustración 3.5.- Ubicación del balastro

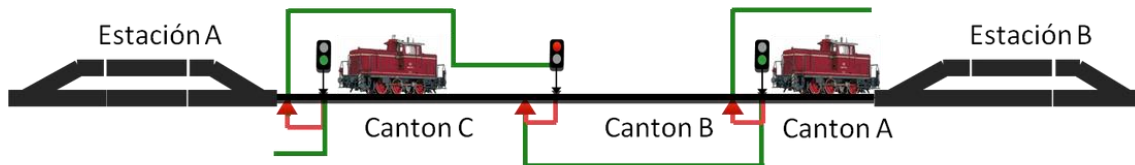


Ilustración 3.6.- Descripción gráfica de un cantón



Ilustración 3.7.- Cargadero de mineral en Almería. Cable inglés

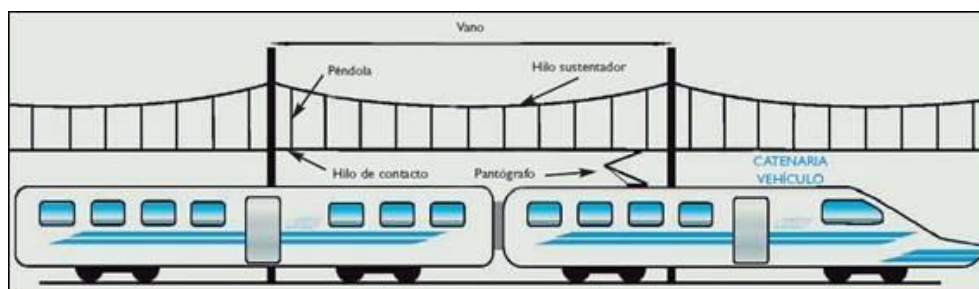


Ilustración 3.8.- Descripción esquemática de una catenaria



Ilustración 3.9.- Estación



Ilustración 3.10.- Material rodante. Ave serie 103

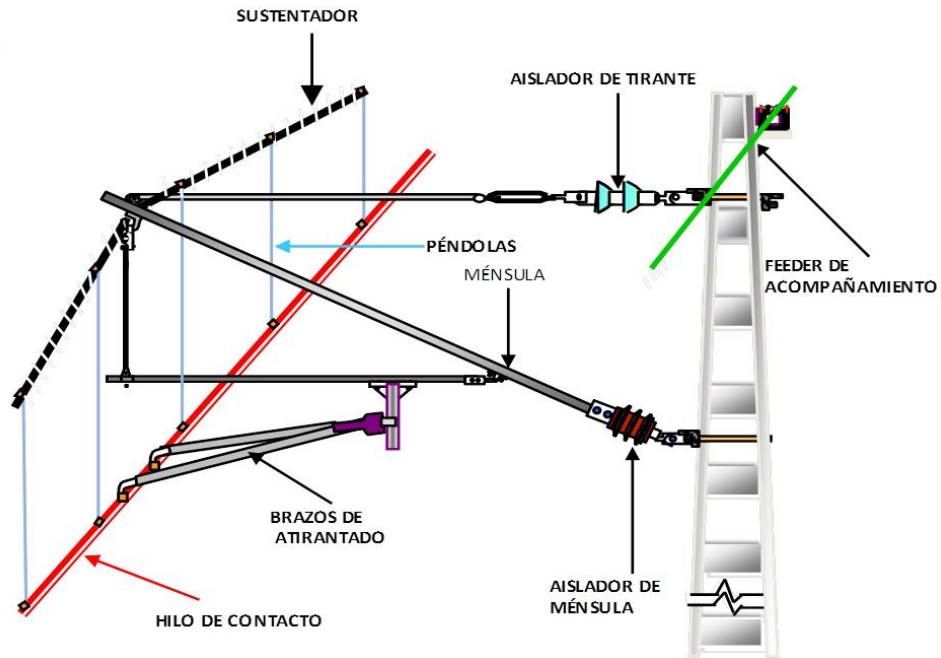


Ilustración 3.11.- Elementos que conforman la catenaria



Ilustración 3.12.- Pantógrafo

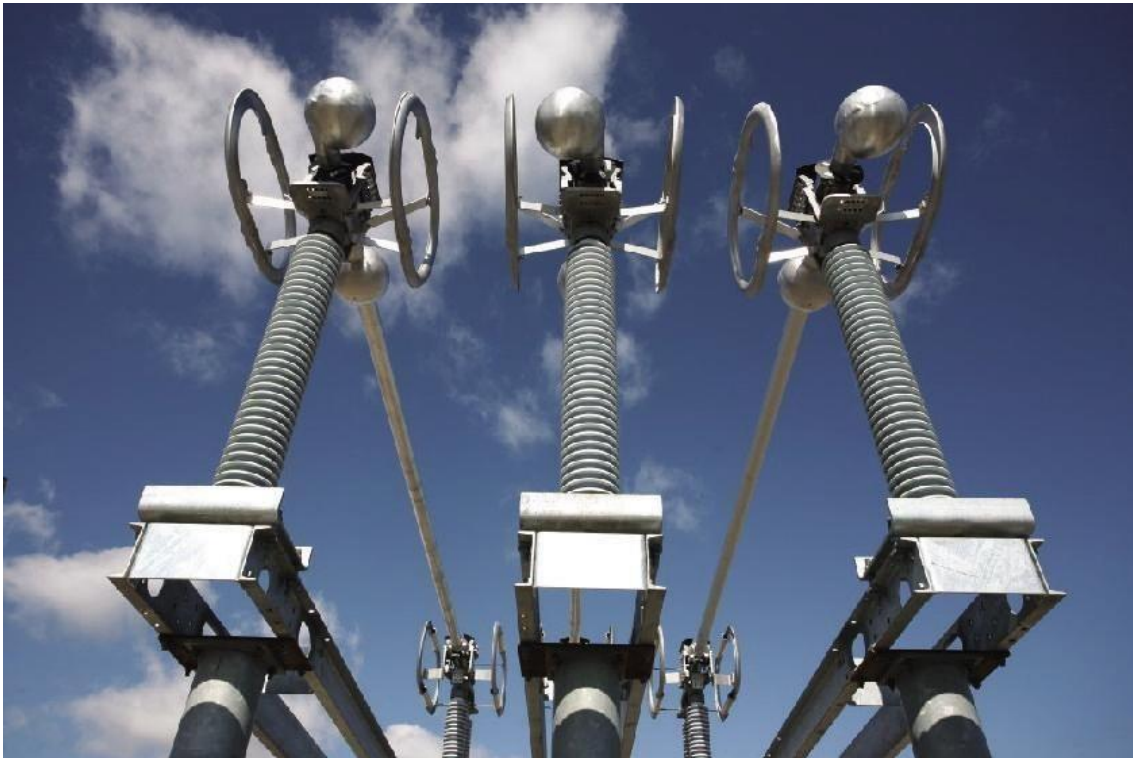


Ilustración 3.13.- Seccionador de alta tensión



Ilustración 3.14.- Subestación de tracción



Ilustración 3.15.- Transformador de tracción



Ilustración 3.16.- Superestructura ferroviaria

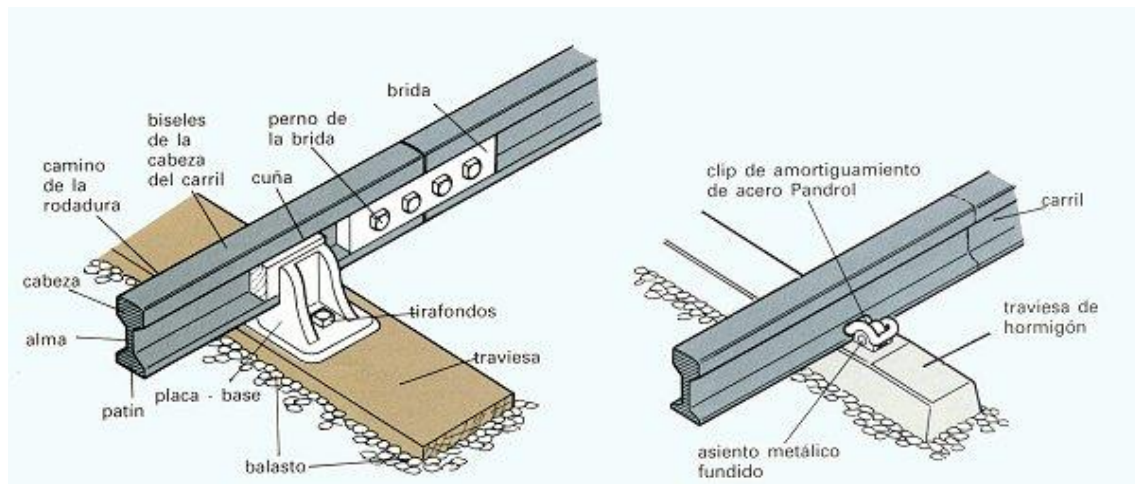


Ilustración 3.17.- Elementos en la vía

CAPÍTULO 4:

INFRAESTRUCTURA

ELÉCTRICA

CAPÍTULO 4.- INFRAESTRUCTURA ELÉCTRICA

Página

4.1.- Introducción	26
4.2.- Descripción general de la infraestructura ferroviaria	28
4.3.- Requisitos Técnicos Previos al Diseño de la Infraestructura	30
4.4.- Normativa Técnica que Rige al Sector Ferroviario	32
4.5.- Electrificación.....	39
4.5.1.- Valores Normalizados de la Tensión	40
4.5.2.- Valores Normalizados de la Frecuencia en Corriente Alterna.....	42
4.5.3.- Esquema General de la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria	42
4.5.4.- Topología de Conexión Entre Subestaciones.....	44
4.5.5.- Zonas Neutras	45
4.5.6.- Sistemas de Electrificación para la Alimentación de la Tracción Eléctrica.....	46
4.5.6.1.- Alimentación en Corriente Continua.....	47
4.5.6.2.- Alimentación en Corriente Alterna	48
4.6.- Componentes que Conforman la Red Eléctrica de Tracción	52
4.6.1.- Generación Eléctrica. Estaciones Generadoras	53
4.6.2.- Líneas de Transporte y Distribución de Energía Eléctrica	54
4.6.3.- Subestaciones de Tracción	55
4.6.3.1.- Configuraciones de las Subestaciones de Tracción	59
4.6.3.2.- Subestaciones de Tracción en Corriente Continua.....	66
4.6.3.3.- Subestaciones de Tracción en Corriente Alterna.....	81
4.6.3.4.- Subestación de Tracción Móvil.....	108
4.6.4.- Alimentación de la Tracción Eléctrica	113
4.6.4.1.- Alimentación por Contacto	114
4.6.4.2.- Alimentación sin Contacto	135
4.6.5.- Circuito de Retorno y Puesta a Tierra.....	140

4.1.- Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo describir de forma técnica la infraestructura eléctrica del sector ferroviario, comenzando por realizar una breve descripción del panorama nacional con respecto a la infraestructura, así como la tipología del mismo según el tipo de material rodante. Además, como objetivo del mismo, se van a describir los requisitos técnicos necesarios en la fase inicial de diseño de dicha infraestructura, así como realizar una clasificación general de los elementos que conforman la estructura para, posteriormente, analizar las características técnicas de la misma.

Uno de los objetivos principales de la eficiencia energética consiste en aprovechar al máximo los recursos naturales y buscar otras formas alternativas de abastecimiento energético. Según un estudio de 2012 del instituto nacional de estadística (I.N.E.), el consumo energético medio, y por combustible, de los diferentes medios de transporte tiene unos valores que se recogen en la siguiente tabla:

TRANSPORTE	COMBUSTIBLE	ENERGÍA (Tera Julios)	Porcentaje (%)
Carretera	Gasolina	220.183	18,30%
	Gasóleo	788.227	65,50%
	GLP (Gas Licuado del petróleo)	1.171	0,10%
	Biomasa	93.973	7,81%
	Gaseosos	3.163	0,26%
	Subtotal Carretera	1.106.718	91,97%
Ferrocarril	Gasóleo	3.494	0,29%
	Gas natural	22	0,00%
	Electricidad	9.370	0,78%
	Electricidad (Metro)	4.178	0,35%
	Subtotal Ferrocarril	17.064	1,42%
Aéreo	Gasolina	217	0,02%
	Keroseno	43.133	3,58%
	Subtotal Aéreo	43.349	3,60%
Marítimo	Gasóleo	31.882	2,65%
	Fuelóleo	4.339	0,36%
	Subtotal Marítimo	36.221	3,01%

Tabla 4.1.- Comparativa del consumo energético entre medios de transporte

La red ferroviaria española cuenta con 15.922 kilómetros de vías de ferrocarril (AVE y FEVE), 583,8 kilómetros de vías de metro y 174,1 kilómetros de vías de tranvía según los datos de 2012 obtenidos del *Instituto Nacional de Estadística (INE)*. Y según las base de datos de 2012 del *Eurostat* el parque ferroviario español cuenta con 142 locomotoras diésel y 297 locomotoras eléctricas.

La red ferroviaria española cuenta con infraestructura sin electrificar, cuya evolución desde 1980 se muestra en la siguiente tabla:

AÑO	TOTAL DE VÍAS SIN ELECTRIFICAR [KM]	TOTAL DE VÍAS ELECTRIFICADAS [KM]
1980	9820	5904
1985	8083	6721
1990	7578	6994
1991	7578	7004
1992	7443	7632
1993	7061	7568
1994	6988	7694
1995	6717	7591
1996	6717	7564
1997	6654	7654
1998	6575	7714
1999	6571	7790
2000	6559	7788
2001	6559	7788
2002	6499	7927
2003	6432	8477
2004	6447	8338
2005	6537	8478
2006	6486	8726
2007	6455	9099
2008	6434	9116
2009	6394	8936
2010	6398	9439
2011	6317	9615
2012	6268	9654

Tabla 4.2.- Electrificación de las vías ferroviarias en España

De forma gráfica, la evolución de la electrificación de las vías ferroviarias españolas se muestra en la siguiente figura:

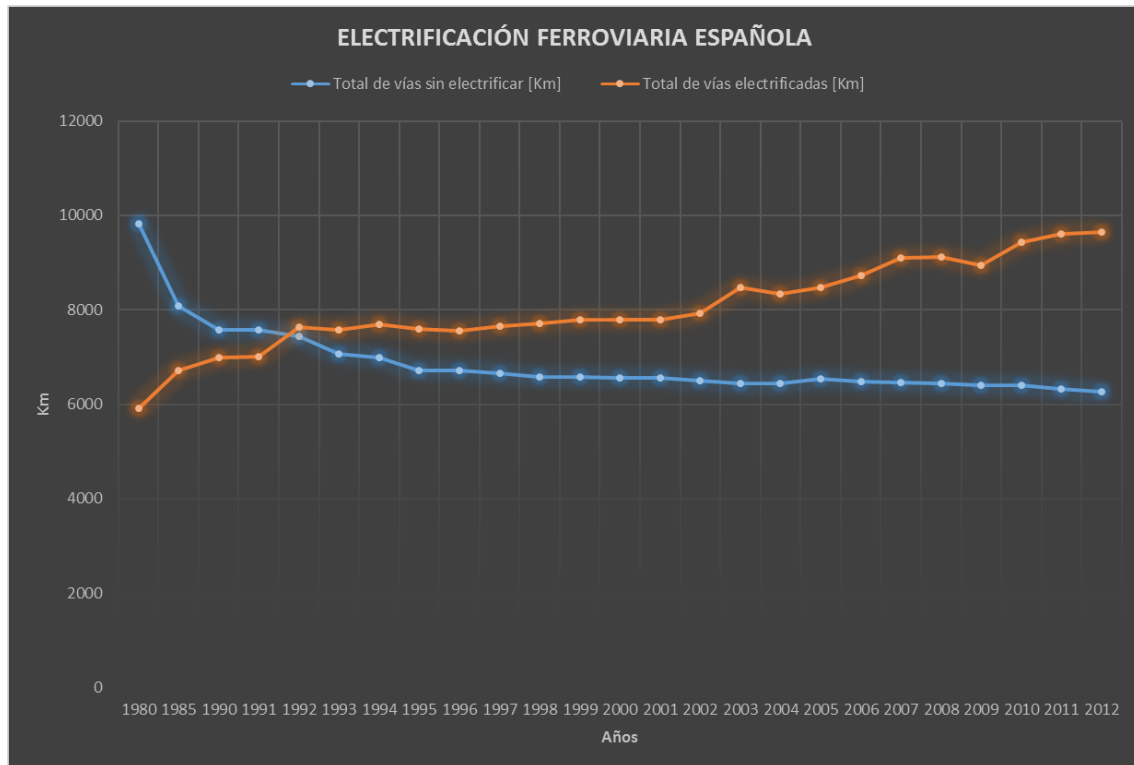


Ilustración 4.1.- Evolución de la electrificación ferroviaria española

Como se puede observar, aún quedan bastantes kilómetros de vías sin electrificar en el que se pueden electrificar o implantar un nuevo sistema.

El tipo de infraestructura viene determinada por el tipo de material rodante al que va destinada dicha estructura pudiendo distinguir entre:

- Metropolitano (Metro, tranvía)
- Ferrocarril
- Alta velocidad

4.2.- Descripción general de la infraestructura ferroviaria

La infraestructura ferroviaria, en el campo de la tracción eléctrica ferroviaria, tiene como finalidad transmitir la energía eléctrica a las unidades de tracción (trenes) que están destinadas a prestar un servicio, dentro de unos criterios de explotación en el que están diseñados para ello. Para ello la infraestructura está compuesta de una serie de elementos que hacen posible alcanzar dicho objetivo.

La infraestructura ferroviaria de tracción eléctrica está compuesta por los siguientes elementos:

- Red de tracción eléctrica.
- Infraestructura ferroviaria.
- Superestructura.

Una descripción gráfica de la infraestructura ferroviaria es la que se muestra en la siguiente imagen:

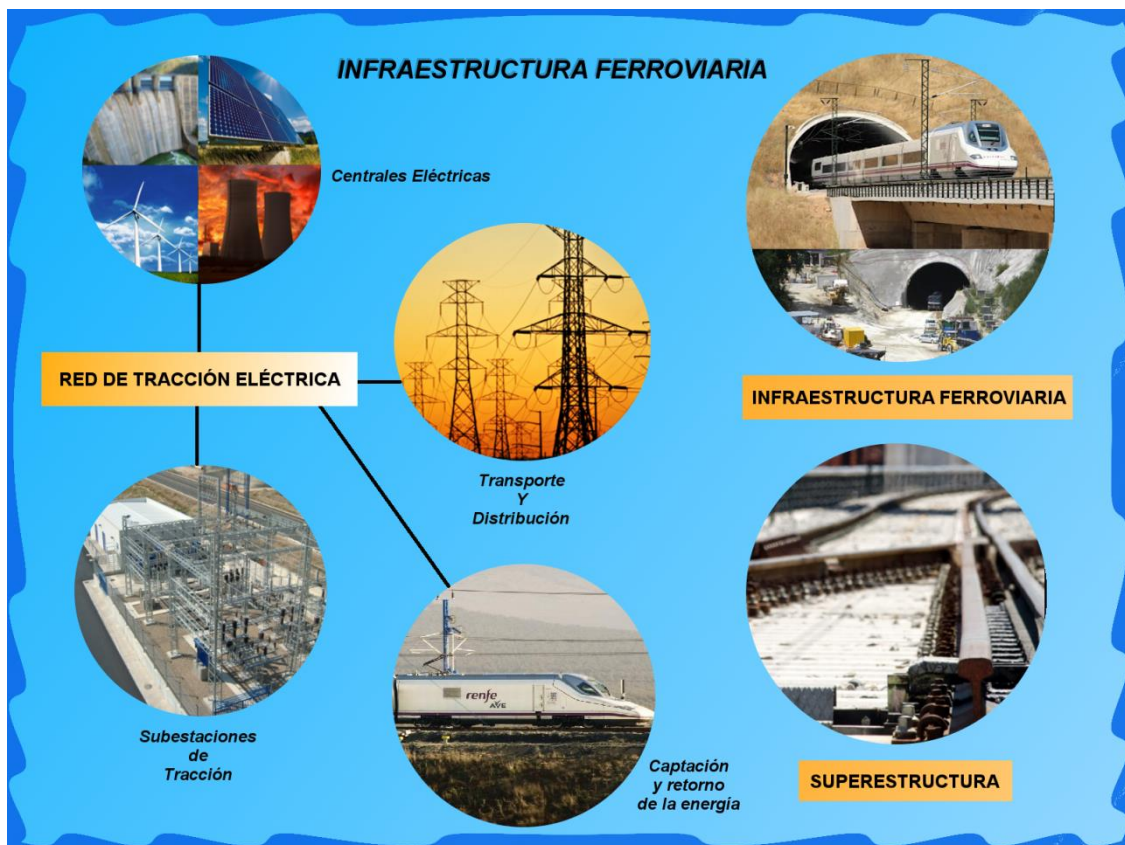


Ilustración 4.2.- Infraestructura ferroviaria

La red de tracción eléctrica, según la norma UNE-EN-50163, se define como *“la red de distribución de electricidad en el ferrocarril usada para proporcionar energía al material rodante”*.

Dicha red de tracción eléctrica está compuesta por los siguientes sistemas eléctricos:

- Centrales eléctricas.
- Subestaciones de tracción.

- Líneas eléctricas de transporte y distribución de energía eléctrica.
- Instalaciones eléctricas de los puestos de seccionamiento.
- Redes de líneas de contacto.
- Circuito de retorno de las redes de tracción eléctrica.

La infraestructura ferroviaria hace referencia a la obra civil necesaria para realizar el trazado de la línea ferroviaria, en la cual está alojada la superestructura, y que consiste en la realización de las obras como túneles, puentes, desmontes, terraplenes, excavaciones, nivelación del terreno, etc.

La *superestructura* hace referencia al conjunto de elementos que hacen posible la circulación del tren a lo largo del trayecto, tales como:

- Vía.
- Elementos de vía.
- Cambios de vía (agujas).

4.3.- Requisitos Técnicos Previos al Diseño de la Infraestructura

Como en cualquier proyecto o trabajo técnico, hemos de conocer toda la información previa necesaria para comenzar a diseñar y planificar dicho proyecto. Para ello debemos de obtener una información que podemos separar en cuatro grandes grupos debido a su tipología, y que son:

- Datos extrínsecos.
- Datos intrínsecos.
- Interoperabilidad.
- Mantenimiento.

Los **datos o condiciones extrínsecas** hacen referencia a datos generales del ferrocarril y que no guardan relación con las características propias del sistema de alimentación, pudiéndose enumerar los siguientes:

1. Datos ferroviarios básicos:
 - Trazado de la vía.

- Ubicación de las estaciones y tipo de explotación.
- Velocidad máxima.
- Tipo de señalización y longitud de los cantones.

2. Datos de la superestructura:

- Gálibo.
- Ubicación de las obras de fábrica a lo largo del trazado.

3. Datos de los trenes:

- Gálibo estático y dinámico del tren.
- Propiedades dinámicas.
- Disponibilidad de basculación.
- Curvas de tracción.
- Condiciones de funcionamiento de la recuperación de energía mediante el freno.
- Tipo de elemento captador de energía y sus características

4. Datos del entorno, estéticos y medioambientales:

Los **datos intrínsecos** se definen como el conjunto de datos técnicos de la infraestructura eléctrica que sirven de base para realizar el cálculo del resto de parámetros específicos del sistema eléctrico. Las condiciones intrínsecas se pueden enumerar como:

1. Características eléctricas:

- Tensión de alimentación.
- Cargas eléctricas y dimensionamiento de los conductores.
- Coordinación de aislamiento.
- Circuito de retorno y red de tierras.
- Impedancias, resistencias y distribución de la corriente.
- Corrientes de cortocircuito.
- Sobre tensiones de origen externo.

2. Características mecánicas:

- Tensión mecánica de los conductores.
- Cargas y esfuerzos mecánicos permanentes y transitorios.
- Esfuerzos originados entre la catenaria y el pantógrafo.

3. Protección del sistema eléctrico y puesta a tierra:

- Protección contra el choque eléctrico.
- Protección contra el contacto indirecto.
- Protección del carril.

4. Características del campo eléctrico y magnético.

5. Características geométricas.

6. Diseño de los componentes eléctricos.

4.4.- Normativa Técnica que Rige al Sector Ferroviario

Para el diseño, proyección y fabricación de cualquier elemento que conforma el sistema ferroviario existen una serie de documentos de obligado cumplimiento generados por distintos organismos internacionales para su correcta interpretación y cumplimiento, y que se enumeran a continuación:

- Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad (ETI).
- Especificaciones Técnicas de Homologación (ETH).
- Normas Europeas (UNE – EN). Tales como:
 - EN – 60071 – 1. Coordinación de aislamiento. Definiciones, principios y reglas.
 - EN 50119. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Líneas aéreas de contacto para la tracción ferroviaria.
 - EN 50121 – 1. Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Generalidades.
 - EN 50121 – 5. Aplicaciones ferroviarias. Compatibilidad electromagnética. Instalaciones fijas de suministro de energía.

- EN 50122 – 1. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Medidas de protección relacionadas con la seguridad eléctrica y la puesta a tierra.
- EN 50122 – 2. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas de tracción de corriente continua.
- EN 50123 – 1. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Aparata de corriente continua. Generalidades.
- EN 50123 – 2. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Interruptores automáticos de corriente continua.
- EN 50123 – 3. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Interruptores – seccionadores, seccionadores de corriente continua para interior.
- EN 50123 – 4. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Interruptores – seccionadores, seccionadores e interruptores de puesta a tierra de corriente continua para exteriores.
- EN 50206 – 1. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Pantógrafos: características y ensayos. Pantógrafos para vehículos de línea principal.
- EN 50206 – 2. Aplicaciones ferroviarias. Material rodante. Pantógrafos: características y ensayos. Pantógrafos para metros y ferrocarriles ligeros.
- EN 50123 – 5. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Pararrayos y limitadores de tensión para uso específico en corriente continua.
- EN 50123 – 6. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Conjuntos de aparata de corriente continua.
- EN 50149. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Cable de contacto acanalado de cobre y aleaciones de cobre.

- EN 50189. Conductores para líneas aéreas. Alambre de acero galvanizado.
- EN 50183. Conductores para líneas aéreas. Alambres en aleación de Aluminio – Magnesio – Silicio.
- EN 50329. Aplicaciones ferroviarias. Transformadores de tensión.
- EN 50163. Aplicaciones ferroviarias. Suministro de tensión a los sistemas de tracción.
- EN – 50388. Aplicaciones ferroviarias. Alimentación eléctrica y material rodante.
- EN – 50443. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Efectos de las perturbaciones electromagnéticas causadas por las líneas ferroviarias en corriente alterna sobre canalizaciones.
- EN 50163. Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación a las redes de tracción.
- EN – 50125. Aplicaciones ferroviarias. Condiciones ambientales.
- EN 21267 – 1. Diseños técnicos. Aplicaciones ferroviarias. Principios generales.
- EN 21267 – 2. Diseños técnicos. Aplicaciones ferroviarias. Lista de piezas.
- EN 21267 – 3. Diseños técnicos. Aplicaciones ferroviarias. Gestión de las modificaciones de documentos técnicos.
- EN 50124. Aplicaciones ferroviarias. Coordinación de aislamiento.
- EN 50125 – 2. Aplicaciones ferroviarias. Condiciones de ambiente para el material. Instalaciones fijas eléctricas.
- EN 50126. Aplicaciones ferroviarias. Especificación sobre fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad.
- EN 50151. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Prescripciones particulares para aisladores de material compuesto.

- EN 50151 – 1. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Requerimientos particulares para seccionadores de corriente alterna. Interruptores monofásicos con tensión superior a 1000 V.
 - EN 50162. Protección contra la corrosión por corrientes vagabundas procedentes de los sistemas de corriente continua.
 - EN 50317. Aplicaciones ferroviarias. Sistema de trabajo. Prescripciones y validación de medidas de la interacción dinámica entre pantógrafo – catenaria.
 - EN 50318. Aplicaciones ferroviarias. Sistemas de trabajo. Validación de la simulación de la interacción dinámica pantógrafo – catenaria.
 - EN 50345. Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Tracción eléctrica. Cables sintéticos para soporte de líneas aéreas de contacto.
 - EN 50367. Aplicaciones ferroviarias. Criterios técnicos para la interacción pantógrafo – catenaria.
 - EN 50368. Aplicaciones ferroviarias. Suministro de potencia y material rodante. Criterios técnicos para la coordinación del suministro de potencia (subestación) y el material rodante para interoperabilidad.
- Métodos Comunes de Seguridad (CSM).
 - Normativa Técnica ADIF (RENFE). Referente a la electrificación, las normativas vigentes son las siguientes:
 - ET 03.300.180.1. Piezas de acero inoxidable.
 - ET 03.313.002.2. Cables de acero para usos generales.
 - ET 03.313.004.8. Cables de acero galvanizado para conductores de tierra en las líneas eléctricas aéreas.
 - ET 03.314.311.6. Tubos de sección circular de aluminio y sus aleaciones.

- ET 03.352.302.8. Aisladores de material cerámico para tensiones superiores a 1.000 V.
- ET 03.359.100.9. Disyuntores extrarrápidos para subestaciones eléctricas de tracción.
- ET 03.359.101.7. Transformadores de potencia sumergidos en aceite para subestaciones de tracción de 3,3 kV de corriente continua.
- ET 03.359.108.2. Analizador de línea aérea de contacto.
- ET 03.359.109.0_01.10. Sistema de control automatizado mediante PLCs.
- ET 03.359.109.0_02.10. Sistema de control automatizado mediante PLCs. Línea de acometida.
- ET 03.359.109.0_03.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Servicios auxiliares. Medida.
- ET 03.359.109.0_04.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Líneas de señales de tráfico.
- ET 03.359.109.0_05.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Grupo transformador – rectificador.
- ET 03.359.109.0_06.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Salida de feeder.
- ET 03.359.109.0_07.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Pórtico de seccionadores.
- ET 03.359.109.0_08.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Puesto de control centralizado.
- ET 03.359.109.0_09.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Adaptador de red.
- ET 03.359.109.0_10.10. Sistemas de control automatizado mediante PLCs. Gestor de protecciones.
- ET 03.359.110.8. Gestor de protecciones 3,3 kV.
- ET 03.359.115.7. Bobinas de aislamiento para subestaciones de tracción de corriente continua.
- ET 03.359.116.5. Transformadores de alimentación a SSAA para subestaciones de tracción de 3,3 kV de c.c.

- ET 03.359.117.3. Transformadores para alimentación de servicios auxiliares de 25 kV.
- ET 03.359.120.7_2.9. Telemandos de energía (líneas convencionales). Puesto central.
- ET 03.359.121.5. Transformadores de potencia de tipo seco para subestaciones de tracción de 3,3 kV de c.c.
- ET 03.359.503.4. Cabinas bifásicas blindadas de 55 kV aisladas en gas SF6 y Addenda nº 1.
- ET 03.359.504.2. Transformadores de potencia para subestaciones de tracción. Sistema 2 x 25 kV.
- ET 03.359.505.9. Autotransformadores sumergidos en aceite para centros de autotransformación.
- ET 03.364.004.6. Herrajes helicoidales preformados para electrificación.
- ET 03.364.005.3. Conexiones eléctricas de carriles.
- ET 03.364.009.5. Tubos de acero para cuerpos de ménsula, soportes y brazos de atirantado para línea aérea de contacto.
- ET 03.364.010.3. Piezas de acero destinadas a elementos auxiliares de catenaria.
- ET 03.364.015.2. Grifas y manguitos de cobre electrolítico para conexión y empalme en catenaria.
- ET 03.364.016.0. Grifas de aleación de cobre para empalme de hilo de contacto en catenaria.
- ET 03.364.017.8. Anclajes de seguridad para electrificación.
- ET 03.364.018.6. Grifas de atirantados y de péndola para la catenaria.
- ET 03.364.020.2. Manguitos de empalme y grapas de aluminio para sujeción o derivación de cables de aluminio en la línea aérea de contacto.
- ET 03.364.021.0. Grapas de sujeción, conexión y terminales para cable de aluminio en la toma de tierra de la L.A.C.

- ET 03.364.101.0. Estructuras metálicas para soporte de línea aérea de contacto.
- ET 03.364.102.8. Brazos de atirantado para electrificación.
- ET 03.364.150.7. Seccionadores unipolares para instalación en exterior de 3 kV c.c. y de 25 kV c.a. para catenaria.
- ET 03.364.151.5. Accionamientos de seccionadores.
- ET 03.364.153.1. Aisladores de sección de material compuesto para L.A.C. de 3 kV c.c. y 25 kV c.a.
- ET 03.364.154.9. Aisladores de porcelana para tensiones de 3.300 V c.c. para la suspensión y atirantado de catenaria (tipos A – 11 y RT – 51).
- ET 03.364.155.6. Accionamientos hidráulicos para seccionadores de catenaria.
- ET 03.364.157.2. Cables aislados para feeders de corriente continua.
- ET 03.364.158.0. Conductores de cobre desnudos para electrificación.
- ET 03.364.159.8. Cables de cobre débilmente aleados para electrificación.
- ET 03.364.160.6. Pértigas aislantes.
- ET 03.364.161.4. Cables desnudos de aluminio y de aluminio con alma de acero para líneas eléctricas aéreas.
- ET 03.364.162.2. Aisladores de material cerámico para L.A.C. de 3 kV c.c. y de 25 kV c.a.
- ET 03.364.163.0. Aisladores de material cerámico para conjuntos de suspensión de L.A.C. de 3 kV c.c.
- ET 03.364.164.8. Aisladores de vidrio tipos A11 y RT51 para L.A.C. de 3 kV c.c.
- ET 03.364.165.5. Aisladores de vidrio para L.A.C. de 3 kV c.c. y de 25 kV c.a.
- ET 03.364.197.8. Útiles de operación para pértigas.
- ET 03.364.200.0. Grapas de anclaje tipo cono.

- ET 03.364.201.8. Verificadores de ausencia de tensión de 3 kV c.c.
 - ET 03.364.202.6. Aisladores compuestos para catenaria.
 - ET 03.364.203.4. Verificadores de tensión de 3 kV c.c. con indicación adicional de c.a.
 - ET 03.364.291.9. Hilo ranurado para línea de contacto.
 - ET 03.364.502.9. Herrajes de acero para electrificación ferroviaria de alta velocidad.
 - ET 03.364.503.7. Herrajes de fundición de aluminio para electrificación ferroviaria de alta velocidad.
 - ET 03.364.504.5. Tubos de aluminio para ménsulas para electrificación ferroviaria de alta velocidad.
 - ET 03.364.505.2. Armaduras y barras de acero corrugado para cimentaciones de estructuras portantes de alta velocidad.
 - ET 03.366.206.5. Electrodo (picas) de puesta a tierra, constituidos por varillas cilíndricas bimetálicas.
-
- Normativa NAE LAC. Normas de montaje españolas.
 - Normativa NAE SE. Normas españolas de aplicación en las instalaciones de subestación.
 - Directivas técnicas europeas (ETI) dentro de la red europea de líneas interoperables, donde se reflejan las condiciones que deben desempeñar los diferentes subsistemas ferroviarios en el que se han dividido.

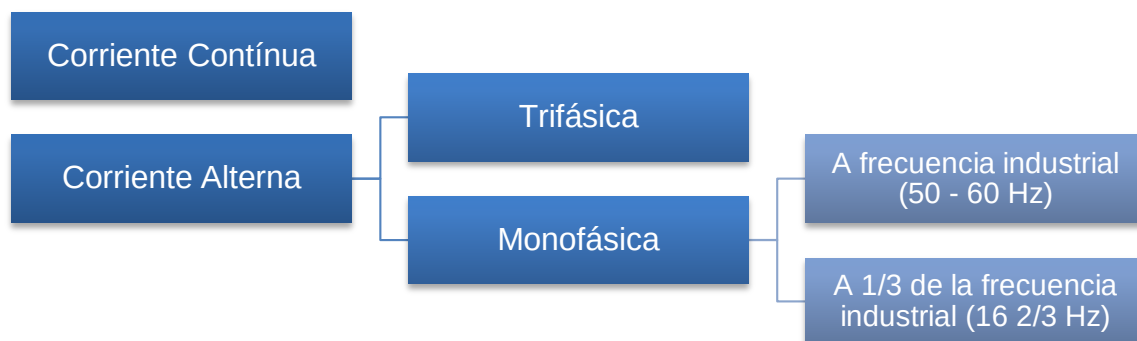
4.5.- Electrificación

La **electrificación** hace referencia a las características que ha de tener la energía eléctrica tanto en la instalación de la acometida, como en la instalación de alimentación de las unidades de tracción eléctrica, así como los esquemas generales de alimentación característicos del sistema eléctrico.

Para ello, en este apartado se procede a describir las características de la energía eléctrica puesta en juego en la red de tracción eléctrica en cuanto al tipo de corriente, los rangos de tensiones existentes en el sistema eléctrico de tracción eléctrica ferroviaria, así como los valores de frecuencia en el caso de que el sistema sea en corriente alterna.

También se procederá a realizar una descripción de los diferentes esquemas generales de alimentación a la tracción eléctrica existentes según dichos parámetros característicos.

Dependiendo del tipo de material rodante a proyectar existen cuatro posibilidades de electrificación de la red eléctrica ferroviaria dependiendo del tipo de tracción visto en apartados anteriores, y que se resumen en el siguiente esquema:

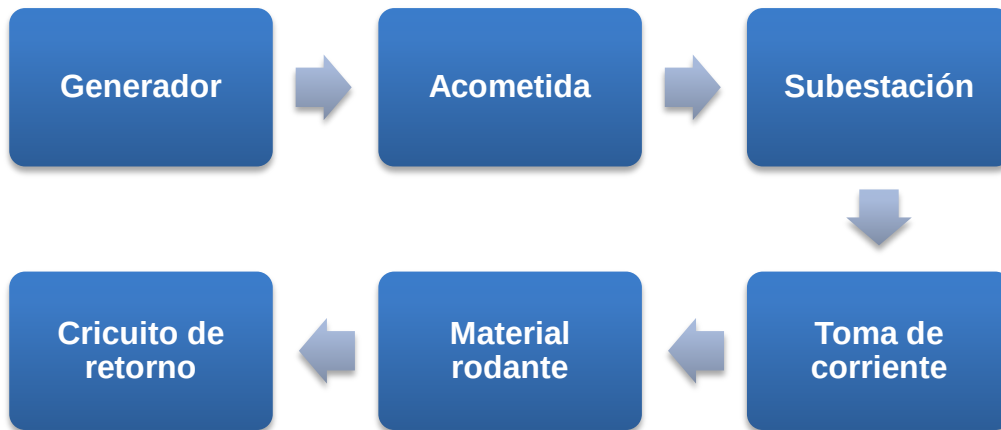


4.5.1.- Valores Normalizados de la Tensión

Los valores de tensión del sistema eléctrico de tracción ferroviaria dependen de la parte del sistema a la que se alimenta, pudiendo diferenciar dos partes:

- Acometida del sistema eléctrico.
- Toma de corriente.

Para diferenciar estas dos partes de la red eléctrica ferroviaria se muestra el siguiente esquema:



El esquema eléctrico general de un sistema eléctrico de tracción ferroviaria una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

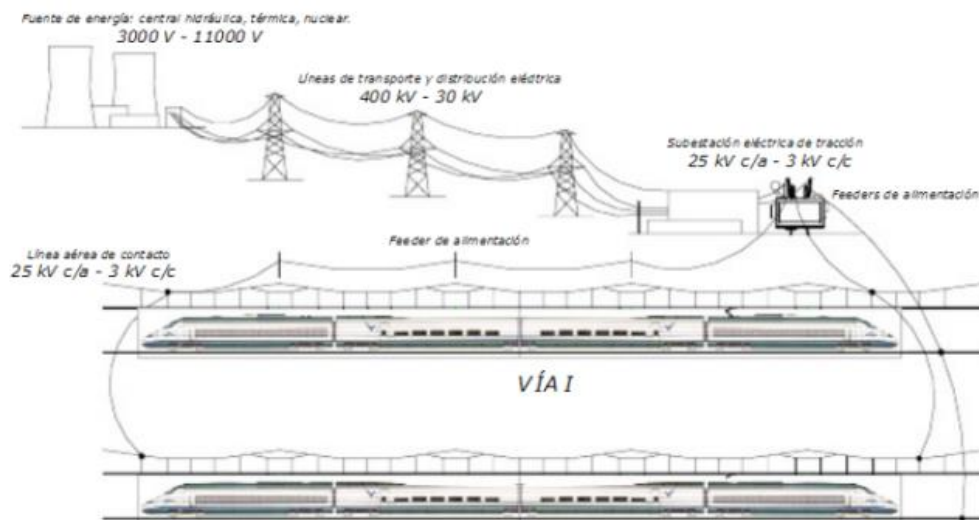


Ilustración 4.3.- Esquema eléctrico general del sistema eléctrico de tracción

La *acometida del sistema eléctrico* constituye todos los elementos de generación, transporte y distribución hasta las subestaciones de tracción eléctrica, y cuyos niveles de tensión normalizados se clasifican según el tipo de material rodante como:

- Líneas convencionales (20 – 25 kV, 45 kV, 60 – 66 kV).
- Líneas de alta velocidad (110 kV, 135 kV, 220 kV, 380 – 400 kV).

La *toma de corriente* es la parte del sistema eléctrico de tracción que conforma el transporte y distribución de la energía eléctrica desde la subestación de tracción hasta la toma de corriente de las unidades de tracción a través del hilo de contacto, y cuyos niveles de tensión normalizados según la norma UNE – EN – 50163 se recogen en la siguiente tabla:

Sistema de electrificación	Tensión no permanente mínima $U_{\min 2}$ [V]	Tensión permanente mínima $U_{\min 1}$ [V]	Tensión nominal U_n [V]	Tensión permanente máxima $U_{\max 1}$ [V]	Uso habitual
Corriente Continua (Valores Medios)	400 500 1.000 2.000	400 500 1.000 2.000	600 750 1.500 3.000	720 900 1.800 3.600	Metropolitano Metropolitano Metropolitano Ferrocarril
Corriente Alterna (Valores Eficaces)	11.000 17.500	12.000 19.000	15.000 25.000	17.250 27.500	Ferrocarril Ferrocarril y A.V.

Tabla 4.3.- Tensiones normalizadas según UNE - EN - 50163

4.5.2.- Valores Normalizados de la Frecuencia en Corriente Alterna

En un sistema eléctrico de alimentación a la tracción eléctrica nos podemos encontrar los siguientes valores de frecuencia:

- Frecuencia industrial (50 – 60 Hz)
- 1/3 de la frecuencia industrial (16 2/3 Hz)

Dependiendo del tipo de tracción debemos diseñar nuestra instalación con uno u otro valor de la frecuencia. Este parámetro influye en la complejidad del sistema de alimentación debido a que el valor de la frecuencia de 1/3 de la frecuencia industrial no es comercial y se ha de disponer de unidades transformadoras o generadoras de dicha frecuencia para poder alimentar a las unidades de tracción.

4.5.3.- Esquema General de la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria

Un paso importante a la hora de proyectar nuestro sistema eléctrico destinado a la alimentación de la tracción eléctrica es determinar cómo realizar dicha alimentación según el tipo de tracción, que conlleva conocer las características de la energía eléctrica. Para ello existen tres esquemas

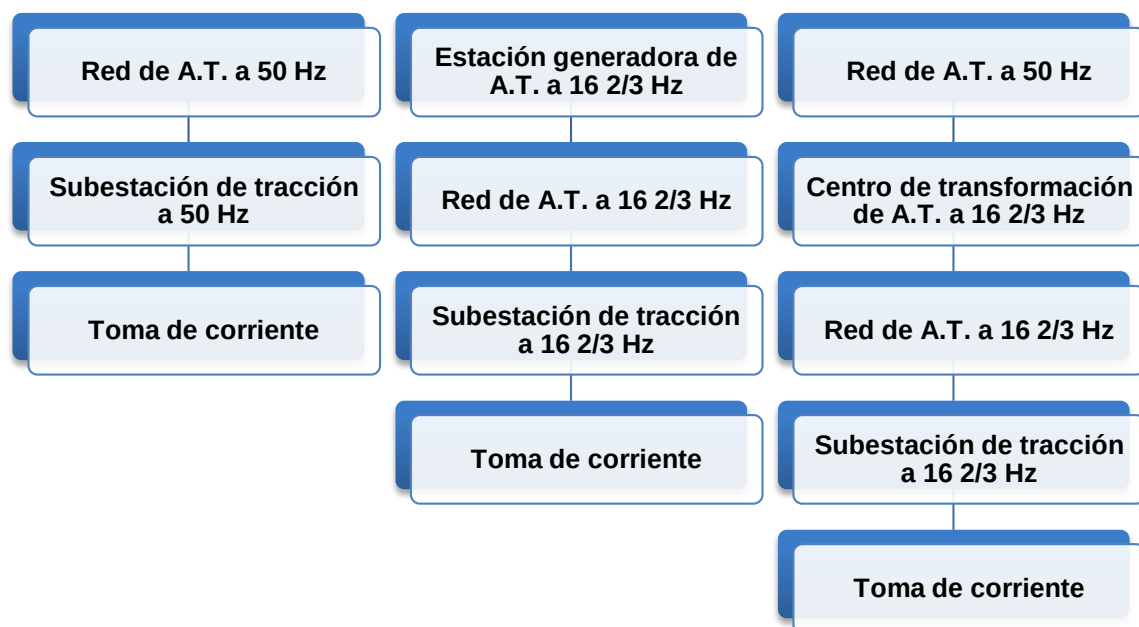
generales de alimentación a la tracción eléctrica que se proceden a describir a continuación:

- **Primer Esquema.** Consiste en alimentar las unidades de transformación / rectificación de la subestación de tracción directamente de la red de alta tensión a 50 Hz de compañía. De esta forma es la compañía eléctrica (Endesa, Iberdrola,...) la que suministra la energía a nuestra red eléctrica de tracción. En muy raras ocasiones, el administrador de infraestructuras ferroviarias posee el sistema eléctrico de acometida al sistema eléctrico ferroviario.
- **Segundo Esquema.** En este caso el administrador de infraestructura ferroviaria es propietaria de la instalación eléctrica de acometida y generación, llegando a ser propietaria de las centrales generadoras de alta tensión a 16 2/3 Hz debido a su carácter no comercial. Esta instalación de acometida, que en este caso es gestionada por el administrador de infraestructura, es la encargada de dar suministro a las unidades transformadoras / rectificadoras de las subestaciones de tracción a través de un instalaciones eléctricas de transporte de alta tensión a la frecuencia 16 2/3 Hz.
- **Tercer Esquema.** Se caracteriza por ser una combinación de los dos esquemas vistos en los apartados anteriores, en la que se suministra la energía eléctrica desde la red de distribución y transporte de alta tensión a 50 Hz de la compañía suministradora de energía eléctrica, siendo esta parte del esquema la acometida de nuestra red de tracción eléctrica. La acometida, en este esquema, da suministro a una unidad transformadora (parecida a una subestación de tracción en lo referente a equipación y aparamenta eléctrica) que transforma la energía eléctrica de alta tensión a 50 Hz a 16 2/3 Hz para posteriormente ser transferida a una red de alta tensión de alta tensión a 16 2/3 Hz que da suministro a las unidades transformadoras / rectificadoras de las

subestaciones de tracción que son las encargadas de alimentar las tomas de corriente por parte de las unidades de tracción.

En numerosas ocasiones el administrador de infraestructuras ferroviarias se encarga de la proyección de dichas instalaciones eléctricas para posteriormente ceder su gestión y mantenimiento a las compañías eléctricas.

A continuación se muestra un esquema con los tres esquemas generales que conforman las distintas configuraciones de una red eléctrica de tracción ferroviaria:



4.5.4.- Topología de Conexión Entre Subestaciones

Las subestaciones de tracción se encuentran interconectadas en sí tal y como el sistema eléctrico de potencia nacional lo está. Existen tres formas de interconectar estas subestaciones de tracción para ofrecer una alimentación de energía eléctrica de manera ininterrumpida.

En los sistemas de alimentación en corriente alterna existen unas zonas neutras entre subestaciones en las que se realiza el correcto acoplamiento eléctrico entre las mismas.

Las diferentes topologías que se pueden encontrar en un sistema eléctrico de tracción son las siguientes:

- **Topología en Gamma (Γ).** Este tipo de conexión consiste en la alimentación de cada tramo (o catón) del trazado ferroviario a través de una única subestación.
- **Topología Pi (π).** En este tipo de conexión cada tramo (o cantón) está alimentado por las dos subestaciones de tracción de sus extremos, siendo ambas subestaciones las que se encargan de dar suministro a los trenes que circulan por dicho tramo del trazado ferroviario.
- **Topología en T.** Este tipo de conexión se caracteriza por alimentar dos tramos (o cantones) mediante una única subestación. Este tipo de conexión se da cuando existe una avería en un transformador de una subestación vecina, o cuando se realizan tareas de mantenimiento.

4.5.5.- Zonas Neutras

Las zonas neutras son tramos o cantones en los sistemas de alimentación en corriente alterna donde la catenaria se encuentra sin alimentar, con el objetivo de realizar la transición por parte del tren (o trenes) entre tramos (o cantones) consecutivos, ya que cada cantón está alimentado de una subestación diferente, y no se podría realizar el acoplamiento entre ambos ya que cada subestación tiene una acometida diferente en cuanto a conexión de fases se refiere. Ya que para equilibrar el sistema eléctrico, las subestaciones se van conectando a las fases de la red eléctrica de forma alternativa.

La imposibilidad de este conexionado radica en el desfase que tiene la tensión que aporta cada subestación.

Estas zonas neutras se disponen en zonas del trazado ferroviario donde los trenes puedan moverse únicamente con su inercia, pero aun así, estas zonas neutras disponen de un sistema de alimentación de emergencia por si alguna unidad de tracción se detuviese por cualquier motivo en estas zonas neutras.

A continuación se muestra una imagen con un esquema general de la disposición de las zonas neutras en el sistema de tracción en corriente alterna:

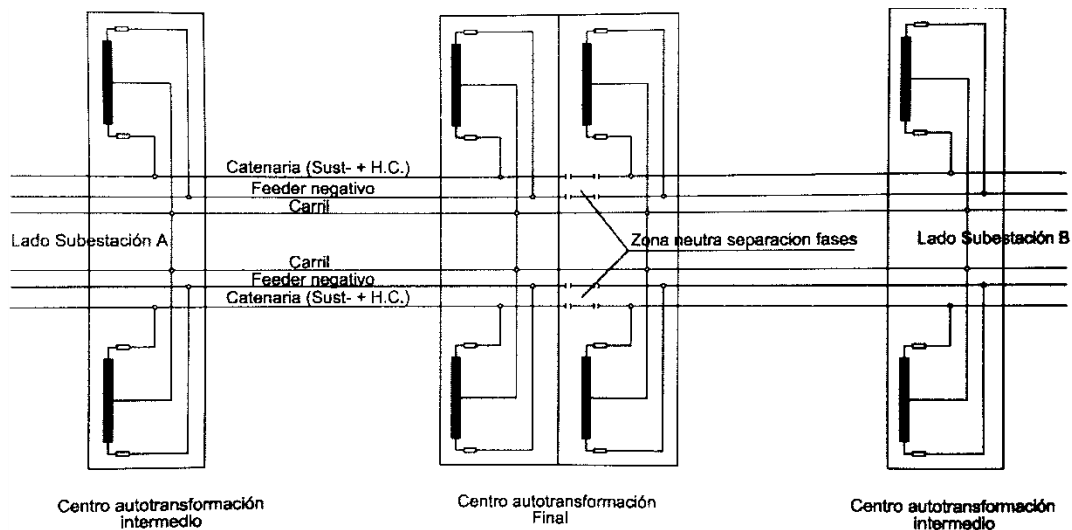
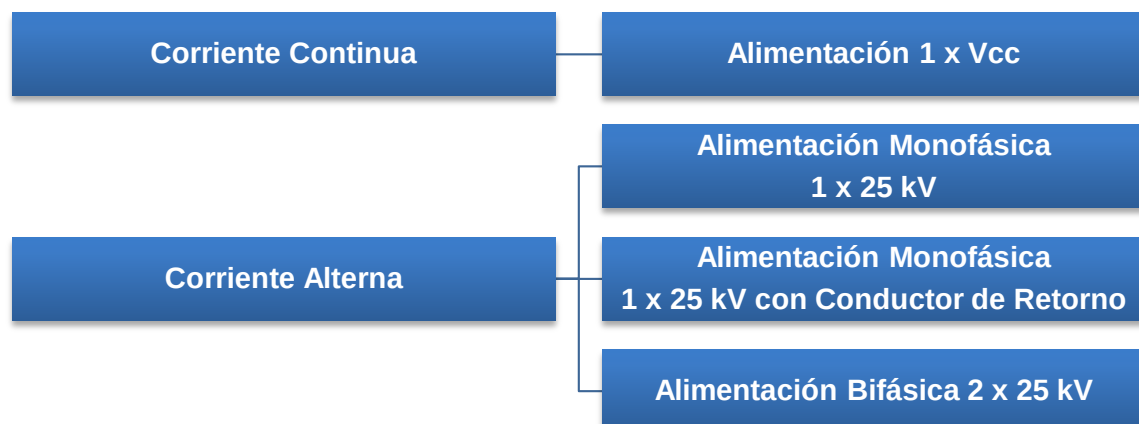


Ilustración 4.4.- Zonas neutras

4.5.6.- Sistemas de Electrificación para la Alimentación de la Tracción Eléctrica

Una vez transformada, o transformada y rectificada, la energía eléctrica por parte de las subestaciones de tracción dependiendo del tipo de material rodante a la que va destinada la red eléctrica de tracción, existen diferentes sistemas de electrificación de la alimentación a la tracción eléctrica mediante el cual, el material rodante capta dicha energía saliente de las subestaciones de tracción.

En los siguientes apartados se describe en que consiste cada uno de los sistemas de electrificación de la alimentación, que se clasifican según el tipo de corriente en:



4.5.6.1.- Alimentación en Corriente Continua

La alimentación en corriente continua se realiza tras transformar y rectificar la corriente en las subestaciones de tracción proveniente de la red eléctrica nacional.

Es el sistema de alimentación más simple en cuanto a circuito eléctrico se refiere, además de poseer la ventaja de que alimenta directamente a los motores de corriente continua de nuestra unidad de tracción, debido a que estos motores poseen una gran simplicidad de control y regulación.

Debido a la característica de la corriente continua en esta forma de alimentación, los conductores que forman parte de la instalación poseerán secciones elevadas debido a las altas intensidades demandadas y las bajas tensiones de alimentación. Y además, debido a las altas caídas de tensión originadas, los seccionamientos de los tramos (o cantones) del circuito eléctrico entre alimentación de las diferentes subestaciones se han de realizar a pocos kilómetros para cumplir las condicionantes de calidad de suministro.

La alimentación en corriente continua está destinado a la alimentación de ferrocarriles y metropolitanos, ya que los trenes de alta velocidad se alimentan en corriente alterna debido a las altas demandas de corriente que si se alimentasen en corriente continua derivarían en un encarecimiento de la infraestructura debido a un aumento del número de subestaciones necesarias a disponer a lo largo del trazado ferroviaria, además de un aumento de sección por parte de los conductores de alimentación.

Sistema de alimentación 1 x Vcc

El sistema de alimentación 1 x Vcc está formado por un conductor de toma de corriente (o línea de contacto) que posee el valor de tensión dependiendo del tipo de tracción a alimentar, otro conductor de retorno de la energía que está conectado a tierra y de tensión nula.

El conductor que alimenta a la unidad de tracción se denomina feeder de alimentación, mientras que el carril de la vía hace de conductor retorno de la

energía. Debido a las características de la corriente continua en cuanto a sus elevados valores de intensidad a tensiones bajas, y su circulación uniforme a través de los conductores, por ello, hay veces en las que se debe disponer de otro conductor adicional conectado en paralelo al feeder de alimentación que tiene como objetivo aumentar la sección global del conductor de alimentación, denominándose a dicho conductor feeder de acompañamiento, y se suele utilizar en tramos o cantones en el que exista un cruce de trenes, un tramo doble, en las agujas, estaciones, etc. En el caso de necesitar una sección muy elevada se recurre a reducir la distancia entre subestaciones para cumplir con las condiciones de suministro. Las características de dichos conductores se describirán en los siguientes apartados del presente capítulo.

De forma gráfica, la alimentación $1 \times V_{cc}$ se muestra en la siguiente imagen:

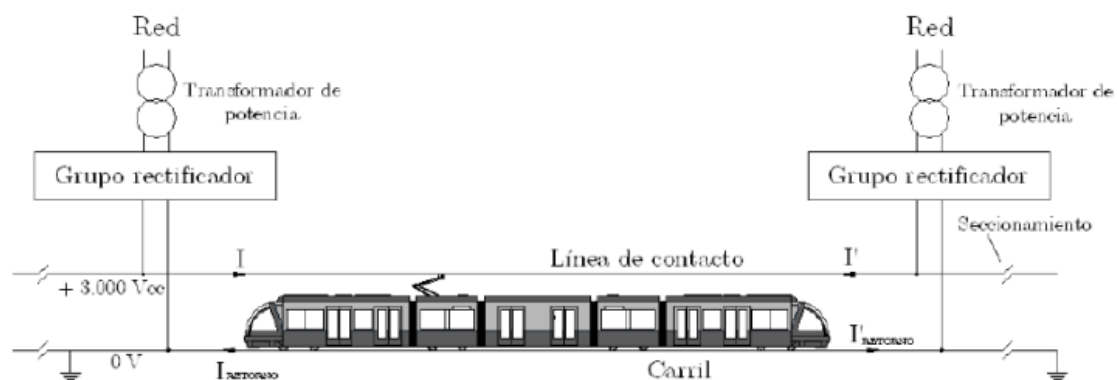


Ilustración 4.5.- Esquema general del sistema de alimentación $1 \times V_{cc}$

4.5.6.2.- Alimentación en Corriente Alterna

La alimentación en corriente alterna es utilizada por los ferrocarriles y los trenes de alta velocidad. El valor característico de la tensión en este sistema de alimentación es más elevado con respecto a la alimentación de corriente continua. Una de las ventajas de la alimentación en corriente alterna es la ausencia de corrientes armónicas en nuestro circuito, debido a que energía eléctrica no ha sufrido ninguna rectificación en la subestación de tracción, las únicas perturbaciones que se pueden encontrar suelen provenir del sistema eléctrico exterior al sistema eléctrico de tracción, debido a que dependiendo del tipo de alimentación a dichas subestaciones comentadas en apartados

anteriores, en muchos casos las compañías eléctricas son las que dan suministro de energía eléctrica a las subestaciones de tracción.

La alimentación en corriente alterna puede ser a $1/3$ de la frecuencia industrial ($16 \frac{2}{3}$ Hz) o a frecuencia industrial (50 - 60 Hz) en cada uno de los sistema de alimentación que se comentan seguidamente, pero manteniendo siempre el mismo valor de la tensión diseñado para nuestra alimentación a las unidades de tracción según la norma UNE – EN – 50163.

Sistema de alimentación monofásica 1 x 25 kV

En este sistema, nuestro circuito eléctrico se compone de la catenaria (o feeder de alimentación) y el carril (conductor de retorno) que están conectados a la salida del transformador monofásico de la subestación, haciendo la catenaria la función de fase, y el carril de retorno de neutro.

Debido a las características de esta conexión, y a la forma del terreno, el retorno de la corriente se realiza en un 70% a través del carril, un 20% se realiza a través de la parte más superficial del terreno y en un 10 % a través de los estratos más profundos del terreno. Este defecto repercute en los sistemas de seguridad y comunicación existentes en el trazado ferroviario, debido a la existencia de corriente electromagnéticas en el terreno.

De forma gráfica, este tipo queda definido tal y como se muestra en la siguiente imagen:

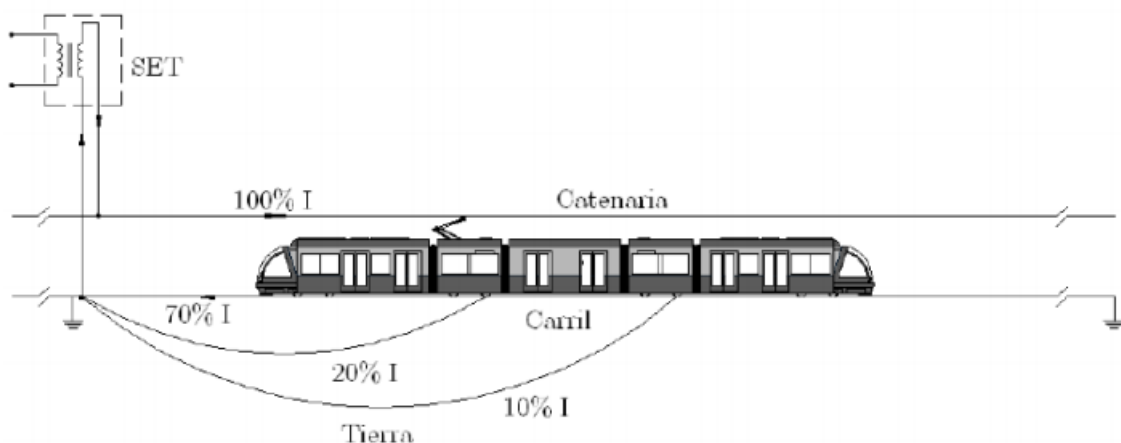


Ilustración 4.6.- Esquema general del sistema de alimentación 1 x 25 kV

Sistema de alimentación monofásica 1 x 25 kV con retorno

El principio de funcionamiento de este sistema es exactamente igual que el anterior, con la variante de que se dispone de un conductor de retorno de la corriente adicional (feeder de retorno) paralelo al carril. Esto hace que la energía que aumentemos la sección del circuito de retorno, disminuyen la cantidad de energía eléctrica que circula por tierra.

De forma gráfica, este tipo queda definido tal y como se muestra en la siguiente imagen:

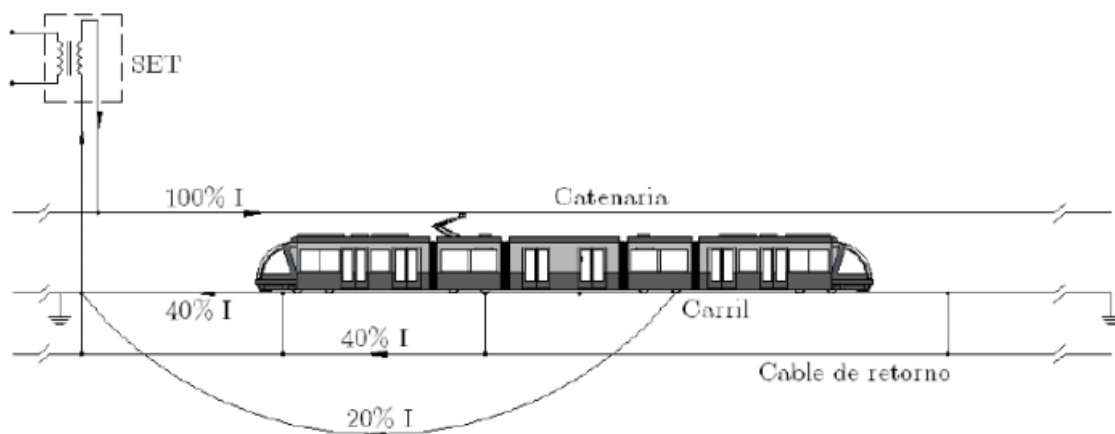


Ilustración 4.7.- Esquema general del sistema de alimentación 1 x 25 kV con conductor de retorno

Sistema de alimentación bifásica 2 x 25 kV

El sistema de alimentación bifásico 2 x 25 kV se diseñó posteriormente al sistema de alimentación monofásico 1 x 25 kV para poder cumplir con los requisitos de explotación, dado que se originó un aumento de la densidad de tráfico y un aumento de la velocidad por parte de las unidades de tracción, que conllevó a un aumento de la potencia demandada, y por lo tanto, un aumento del valor de la tensión de la línea acometida por parte de las compañías suministradoras de energía.

El sistema de alimentación bifásico 2 x 25 kV consiste en un circuito eléctrico con los siguientes tres conductores: catenaria, carril y feeder negativo.

Este sistema de alimentación está formado, a su vez, por subestaciones de tracción que suministran la energía que disponen de transformadores con toma intermedia (tres conductores en el secundario) y por centros de autotransformación que están provisto de autotransformadores entre cada subestación de tracción.

La toma intermedia de los transformadores y autotransformadores está conectada al circuito de tierras y al carril, mientras que la catenaria y el feeder negativo se conectan a las dos salidas restantes de los transformadores y autotransformadores, tendiendo en cada conductor un valor de tensión de ± 25 kV, por lo tanto, entre catenaria y carril, o entre feeder negativo y carril existe una diferencia de potencial de 25 kV, mientras que se consigue una diferencia de potencia de 50 kV entre la catenaria y el feeder negativo.

De forma gráfica, este sistema de alimentación se muestra en la siguiente imagen:

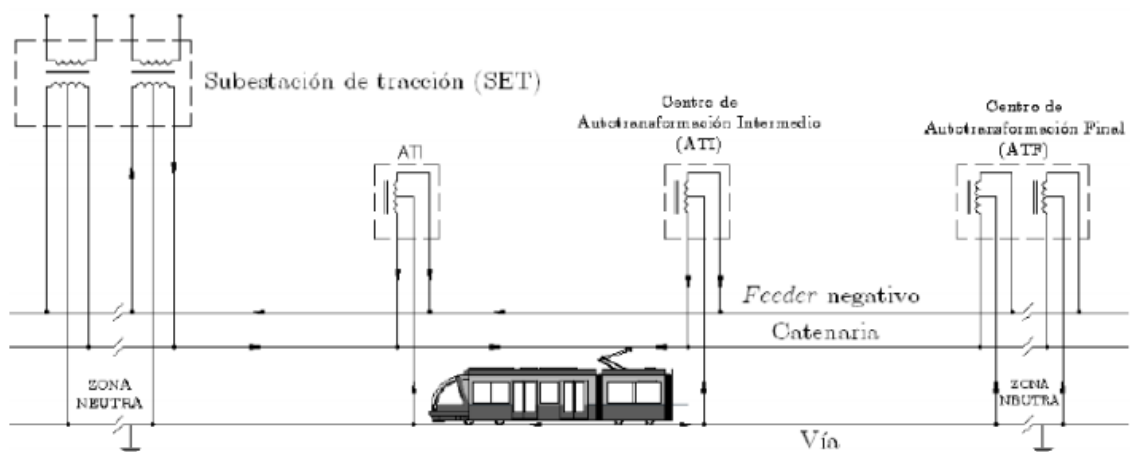


Ilustración 4.8.- Esquema general del sistema de alimentación 2 x 25kV

En este sistema de alimentación, tal y como se ha mostrado en la imagen anterior, existen dos tipos de circuito según la zona en la que se encuentre la unidad de tracción, y son los siguientes:

- Circuito entre autotransformadores. En este caso la corriente circula hasta la toma intermedia de los autotransformadores a través de la unidad de tracción. La corriente de cada

autotransformador depende inversamente de la distancia tren – autotransformador.

- Circuito existente entre la subestación y el centro de autotransformación. Cuando la unidad de tracción se encuentra en esta zona, el carril queda excluido del circuito eléctrico sin realizar alguna función. En este caso, entre el feeder y la catenaria existe una diferencia de potencial de 50 kV, y la mitad exacta del valor de la corriente que circulará por cada conductor independientemente de la distancia a la que se encuentre uno u otro conductor.

Para ejemplificar lo descrito anteriormente se muestra la siguiente imagen en la que se puede diferenciar a la unidad de tracción en cada caso y la distribución de corrientes y el valor de la tensión:

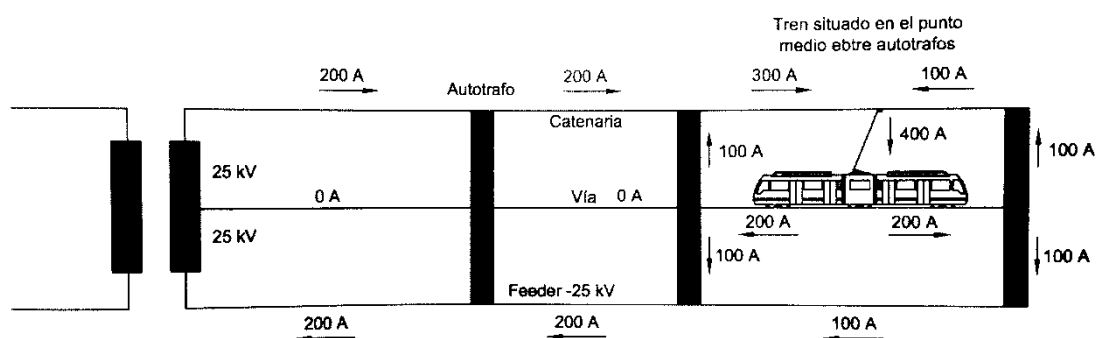


Ilustración 4.9.- Zonas del sistema de alimentación 2 x 25 kV

Con este sistema de alimentación se consigue reducir la sección de los conductores, reducir la caída de tensión originada entre subestaciones, y aumentar la separación entre subestaciones de tracción con respecto al sistema de alimentación 1 x 25 kV.

4.6.- Componentes que Conforman la Red Eléctrica de Tracción

La red eléctrica de tracción es el conjunto de instalaciones eléctricas que hacen posible el correcto funcionamiento de la unidad de tracción, por eso en este apartado se va a realizar una descripción técnica de cada una de las partes del sistema, así como los equipamientos y la aparamenta eléctrica incluidos en cada uno de las instalaciones eléctricas que constituyen dicha red.

Las unidades de tracción se puede considerar como sistema eléctrico debido a que a bordo de las mismas hay aparataje y material eléctrico a bordo, pero la enumeración y descripción técnica de los componentes que conforman el material rodante se reserva para los capítulos posteriores debido a que en este capítulo se está describiendo la infraestructura eléctrica que posibilita el funcionamiento de dichas unidades de tracción.

Los componentes de la red eléctrica de tracción que se van a describir en los siguientes apartados se enumeran a continuación:

- Generación eléctrica. Estaciones generadoras.
- Líneas eléctricas de transporte y distribución de energía eléctrica.
- Subestaciones de tracción.
- Alimentación de la tracción eléctrica.
- Circuito de retorno.

4.6.1.- Generación Eléctrica. Estaciones Generadoras

Las *centrales eléctricas* y las *estaciones generadoras* son las encargadas de generar la energía eléctrica necesaria para abastecer todos los elementos del sistema eléctrico de tracción ferroviaria que forman parte de la red eléctrica de tracción, en el que como fin último es el correcto funcionamiento y abastecimiento ininterrumpido de nuestro material rodante.

La diferencia entre las centrales eléctricas y las estaciones generadoras radica en el valor de la frecuencia que genera cada una y de la propiedad de las mismas, donde las centrales eléctricas generan energía eléctrica a alta tensión y con una frecuencia de 50 Hz, y cuya propiedad pertenece a las compañías suministradoras de energía, además de tener la capacidad de abastecer a otras instalaciones eléctricas debido al mallado de la red eléctrica nacional; mientras que las estaciones generadoras están diseñadas exclusivamente para abastecer a las instalaciones eléctricas de tracción debido a que la energía se genera a $1/3$ de la frecuencia industrial ($16 \frac{2}{3}$ Hz) y su propiedad principalmente es del administrador de infraestructuras ferroviarias,

aunque pudiéndose ceder estas estaciones a las empresas suministradoras de energía.

4.6.2.- Líneas de Transporte y Distribución de Energía Eléctrica

Las líneas de transporte y distribución tienen como objetivo transportar la energía generada a las subestaciones de tracción, así como hacer de enlace entre instalaciones eléctricas.

Para proyectar las líneas de transporte y distribución se deberá realizar de acuerdo a los dos criterios siguientes:

- *Dimensionamiento eléctrico.* Cuyos parámetros principales de cálculo son la potencia máxima consumida por el sistema eléctrico de tracción y la tensión de alimentación del mismo. Dicho dimensionamiento se realiza conforme al reglamento de alta tensión.
- *Dimensionamiento mecánico.* Se realiza mediante las normas y reglamentos nacionales, como por ejemplo el reglamento de alta tensión.

Dichas líneas de transporte y distribución pueden ser de dos tipos: aéreas o subterráneas. Dichas configuraciones quedan definidas en el reglamento de alta tensión, siendo las más comunes las líneas aéreas de transporte como método de transporte de la energía eléctrica, debido a su bajo coste e instalación.

No se procede a realizar una descripción técnica de diseño debido a que no posee ningún elemento o aparamenta eléctrica destinada exclusivamente a la tracción eléctrica ferroviaria.

A continuación se muestra una imagen donde aparece una línea aérea de transporte conectada al pórtico de entrada de una subestación de tracción:



Ilustración 4.10.- Apoyo con derivación abasteciendo una subestación de tracción

4.6.3.- Subestaciones de Tracción

Las subestaciones de tracción eléctrica están proyectadas con el objetivo de transformar la energía eléctrica según el tipo de material rodante para abastecer de dicha energía eléctrica al mismo según sus características técnicas.

Los tipos de centrales que podemos encontrar son:

- **Subestaciones de tracción fijas.** Son aquellas en la que la aparataje se encuentra alojada en un recinto cercado y vallado y que están destinadas al suministro permanente de energía eléctrica.
- **Subestaciones de tracción móviles.** Son aquellas en las que la aparataje se encuentra acoplada al material rodante en un vagón aparte, y están destinadas al suministro de energía en caso de avería de una subestación, o construcción de un tramo de la vía, o también cuando se comienza una nueva construcción de una subestación.

Los dos tipos de centrales descritas anteriormente se muestran en la siguiente imagen:



Ilustración 4.11.-Subestación de tracción fija

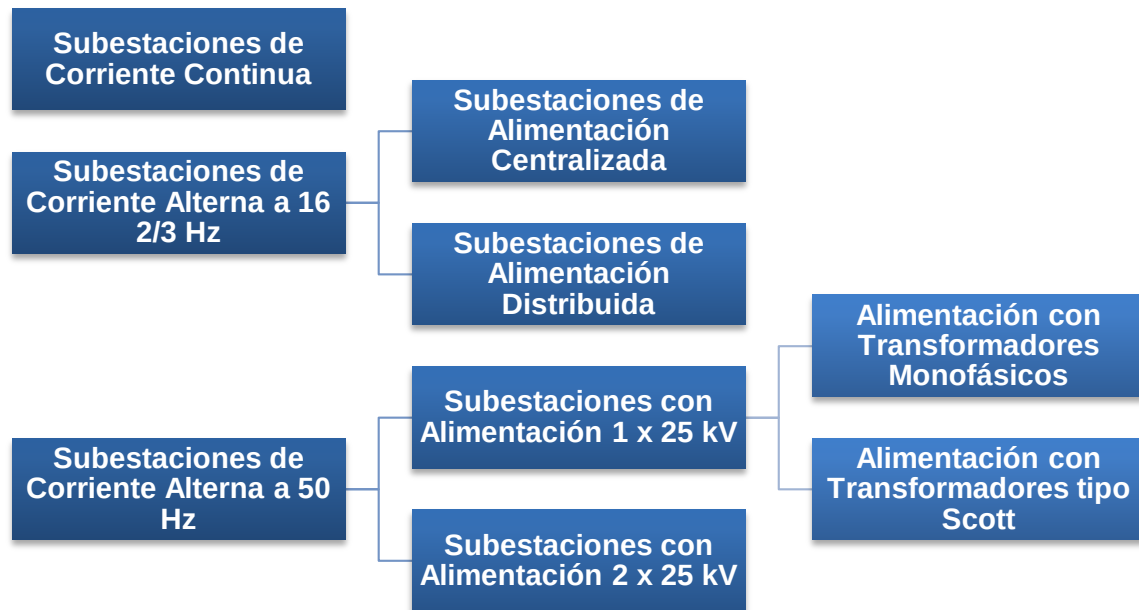


Ilustración 4.12.- Subestación de tracción móvil



Ilustración 4.13.- Modelo antiguo de una subestación de tracción móvil

Dentro de las subestaciones de tracción fijas podemos clasificarlas a su vez, según su electrificación, como:



Los diferentes tipos de subestaciones que se acaban de mencionar se describirán más detalladamente en apartados posteriores del presente capítulo.

Una vez determinado el tipo de material rodante, y a su vez el tipo de subestación de tracción a proyectar, se procederá a realizar un estudio previo de los siguientes condicionantes:

- Calidad de la alimentación (UNE – EN – 50388).
- Factor de potencia de los trenes (UNE – EN – 50388).
- Factor de potencia inductivo (UNE – EN – 50163 y 50388).
- Factor de potencia capacitivo.
- Coordinación de las protecciones (UNE – EN – 50388).

A la hora de proyectar un tramo ferroviario debemos de tener en cuenta también la distribución de las subestaciones de tracción, que hace referencia a la disposición de las mismas a lo largo del trazado ferroviario proyectado, así como el número de las mismas, atendiendo a los siguientes factores:

- Tensión de alimentación.
- Disponibilidad de las líneas de alimentación.

- Potencia demandada según las previsiones de explotación.
- Corrientes de cortocircuito.
- Fiabilidad de la alimentación

La normativa técnica de referencia que se necesita para proyectar una subestación de tracción eléctrica se enumera a continuación:

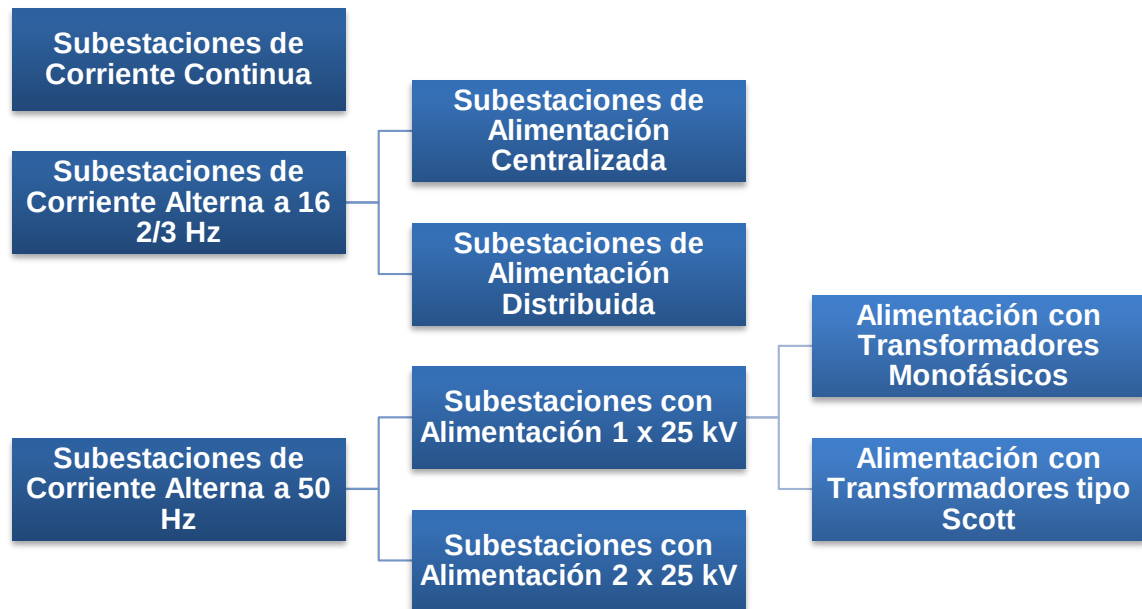
- Reglamento de Alta Tensión (RD 223/2008) con sus correspondientes Instrucciones Técnicas Complementarias asociadas al mismo.
- Reglamento de Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación (RD 337/2014).
- Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión (RD 842/2002).
- Reglamento de Eficiencia Energética (RD 1890/2008).
- Normativa CEI. Donde caben destacar las siguientes:
 - CEI 913. Líneas aéreas de tracción eléctrica.
 - CEI 850. Tensiones de alimentación de las redes de tracción.
 - CEI 71 – 1. Coordinación de aislamiento. Términos, definiciones, principios y reglas.
 - CEI 815. Guía sobre aisladores en ambientes polucionados.
 - CEI 383. Ensayos de aisladores en cerámica o vidrio destinados a las líneas aéreas de tensión nominal superior a 1.000 V.
 - CEI 1109. Aisladores compuestos destinados a las líneas aéreas en corriente alterna de tensión nominal superior a 1.000 V.
 - CEI 1325. Aisladores para líneas aéreas de tensión nominal superior a 1.000 V. Elementos de aisladores de cerámica o vidrio para sistemas de corriente continua. Métodos de ensayo y criterios de aceptación.

- CEI 61952. Aisladores para líneas aéreas. Aisladores compuestos para postes de corriente alterna de tensión nominal superior a 1.000 V.
- Normativa UNE.
- Especificaciones Técnicas de Adif dirigidas a la aparamenta e instrumentación que conforma la subestación de tracción.
- Normativa Avifauna (Ley 18/2008).

4.6.3.1.- Configuraciones de las Subestaciones de Tracción

La configuración de las subestaciones hace referencia a los tipos de subestaciones de tracción existentes y sus características intrínsecas según las características de la corriente a las que van destinadas.

Como hemos visto en el apartado anterior podemos realizar la siguiente clasificación de las subestaciones de tracción:



De forma gráfica, según el tipo de corriente característica de la subestación, podemos encontrar las siguientes configuraciones generales de las subestaciones:

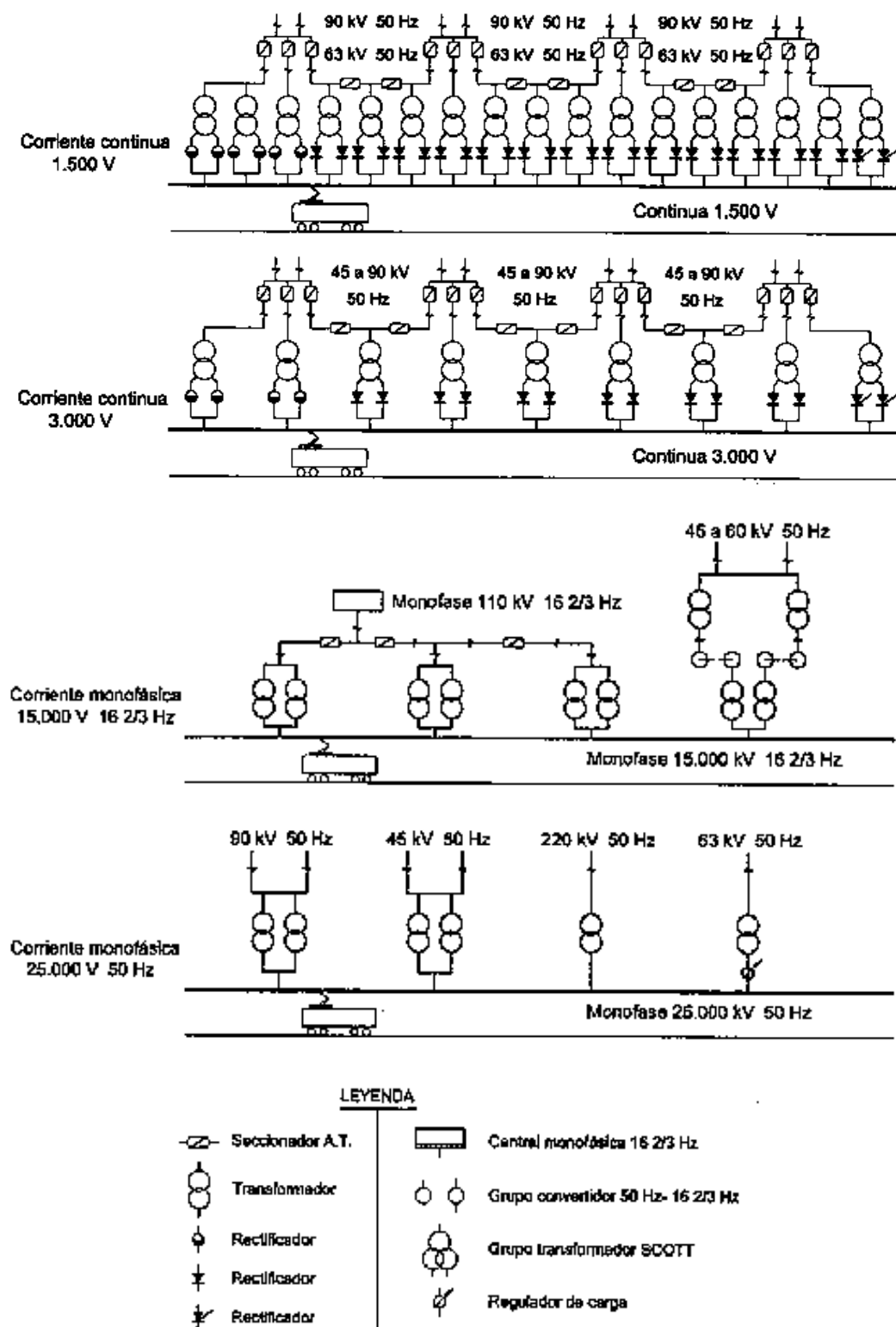


Ilustración 4.14.- Configuración de las subestaciones

Una comparativa entre dichas configuraciones generales de las subestaciones de tracción mostradas en la imagen anterior se muestra en la siguiente tabla:

	CORRIENTE CONTINUA	CORRIENTE ALTERNA (16 2/3 HZ)	CORRIENTE ALTERNA (50 HZ)
VENTAJAS	- Fácil control y regulación de las unidades de tracción. - Fácil acoplamiento o entre cantones	- Número reducido de subestaciones - Sección de los conductores de alimentación reducidos - Fácil acoplamiento entre cantones.	- Poco numerosas y simples. - Secciones muy reducidas de los conductores
DESVENTAJAS	- Numerosas y complejas - Elevada sección del conductor de alimentación. - Inyección de corrientes armónicas.	- Alimentación de las subestaciones a frecuencia diferente a la de compañía. - Elevado coste de implantación	Disposición de zonas neutras para el correcto acoplamiento entre cantones

Tabla 4.4.- Comparativa entre las configuraciones generales de las subestaciones de tracción

Una vez vista la clasificación general, así como las configuraciones específicas de cada una de las subestaciones, a continuación se describen las configuraciones de cada una de las subestaciones por separada que nos podemos encontrar en un sistema eléctrico de tracción ferroviaria.

Subestaciones de Corriente Continua

Las subestaciones de corriente continua son aquellas cuyo objetivo es transformar la energía eléctrica en corriente alterna a corriente continua mediante un equipo rectificador basado en el rectificador de onda completa en puente de Graetz. En los apartados siguientes se realiza una descripción de las características más importantes del mismo, así como las partes y elementos que la componen.

Subestaciones de Alimentación Centralizada

Las subestaciones de alimentación centralizada son aquellas que están abastecidas de energía eléctrica de las centrales generadoras monofásicas a 110 kV y 16 2/3 Hz, y se encargan en transformar dicha energía proveniente de la central a un valor de tensión de alimentación de 15 kV y 16 2/3 Hz.

Estas subestaciones están conectadas en paralelo cada dos subestaciones consecutivas.

Tienen como ventaja la rápida detección de algún defecto a tierra originado en nuestro sistema de alimentación a la tracción ferroviaria.

El esquema eléctrico de conexión de las subestaciones de alimentación centralizada se representa la siguiente imagen:

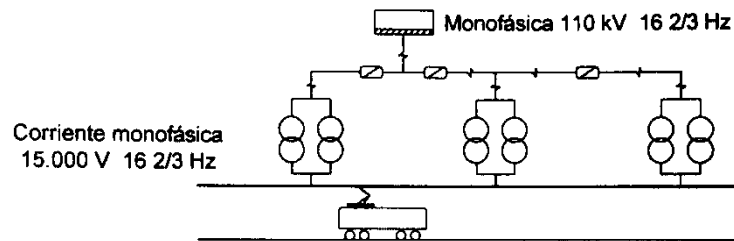


Ilustración 4.15.- Subestaciones de alimentación centralizada

Subestaciones de Alimentación Distribuida

Las subestaciones de alimentación distribuida son aquellas que poseen una acometida trifásica a 50 Hz. Cada una de ellas dispone de dos transformadores, donde uno de ellos transforma la energía eléctrica de la acometida a un valor de tensión de 6'3 kV, que a su vez abastece a un motor trifásico síncrono dispuesto en la subestación.

El motor síncrono está acoplado a un generador síncrono monofásico a 5 kV y 16 2/3 Hz a través de un eje.

El segundo transformador, también monofásico, se encarga de elevar la tensión que proporciona el generador síncrono de 5kV y 16 2/3 Hz a 15 kV y 16 2/3 Hz.

Cuando se dispone de dichas subestaciones en el trazado ferroviario, no podemos realizar una conexión en paralelo entre estas subestaciones ya que no se puede realizar un acoplamiento eléctrico al poseer cada una de ellas un generador síncrono independiente.

Subestaciones de Alimentación 1 x 25 kV. Alimentación con Transformadores Monofásicos

Las subestaciones con alimentación a través de transformadores monofásicos son aquellas que poseen un transformador monofásico que se encarga de realizar la transformación de tensión de la acometida, que normalmente se alimentan a un valor de tensión de 110 kV o superior a frecuencia industrial, para alimentar a la catenaria y el carril.

Como ventaja comentar su simplicidad de implantación y su bajo coste de construcción, ya que no dispone de tanta aparamenta eléctrica. Por el contrario, cabe destacar el desequilibrio que se produce en la red trifásica de compañía dada la naturaleza monofásica de la misma.

Para solucionar dicho inconveniente de desequilibrio eléctrico, las subestaciones del trazado ferroviario van alternando la conexión a las fases para reestablecer el equilibrio eléctrico, denominándose dicha topología de conexión, *conexión en V*.

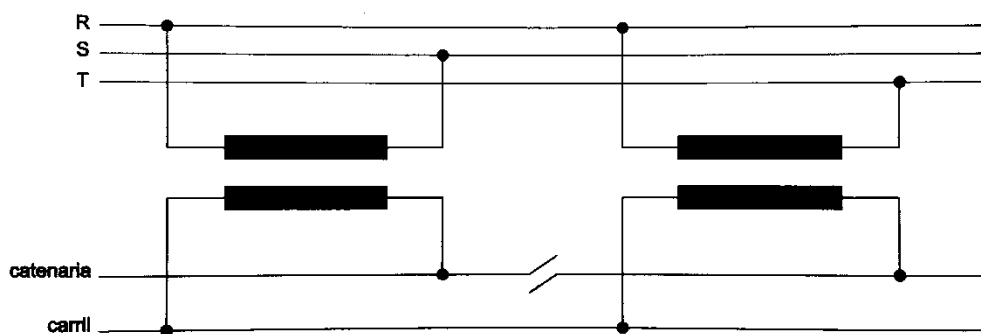


Ilustración 4.16.- Subestaciones de alimentación con transformadores monofásicos. Conexión en V

Subestaciones de Alimentación 1 x 25 kV. Alimentación con Transformadores Tipo Scott

Las subestaciones de alimentación con transformadores monofásicos de conexión tipo Scott poseen dos transformadores monofásicos con la conexión de este tipo con el objetivo de reducir las tensiones provenientes de la línea trifásica de acometida a 110 kV, o superior, a un sistema bifásico de 25 kV desfasadas entre sí $\pi/2$. El efecto que se consigue con esta conexión es la

reducción del desequilibrio producido a medida que los transformadores van igualando su carga.

El esquema de conexión tipo Scott que se utiliza en aplicaciones ferroviarias de dichos transformadores se muestra en la siguiente imagen:

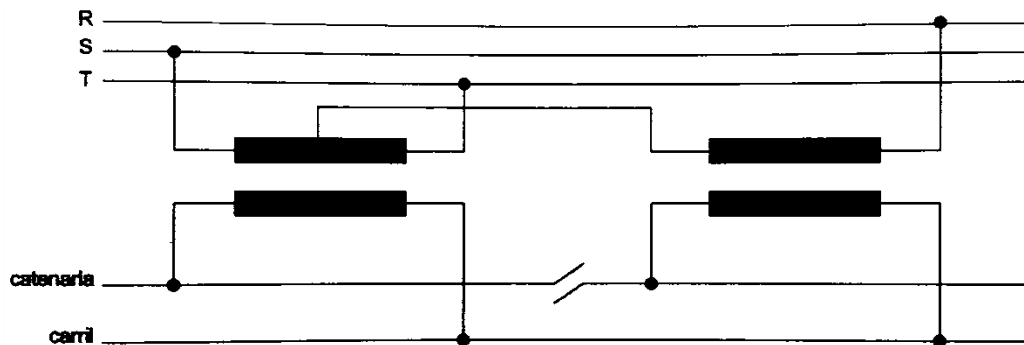


Ilustración 4.17.- Subestaciones de alimentación con transformadores tipo Scott

Con este tipo de subestaciones reducimos el desequilibrio que provoca en la red trifásica de acometida un transformador monofásico, además de permitir una alimentación a tensiones más bajas y con potencias de cortocircuito más bajas. Como inconveniente está el coste de la instalación, y las pérdidas de vacío de los transformadores.

Subestaciones de Alimentación 2 x 25 kV

Estas subestaciones están destinadas a solventar los problemas originados del aumento de tráfico en tramos del trazado ferroviario, ya que se necesita una línea de acometida mayor con unos valores de tensión entre 220 – 400 kV.

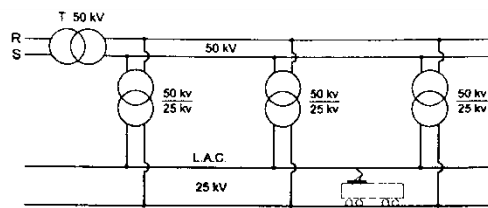
Estas subestaciones se encargan de proporcionar una tensión de alimentación de 50 kV entre el feeder de acompañamiento y la catenaria, y están provistas de transformadores monofásicos con toma intermedia para conectar y también el carril.

Con estas subestaciones se reducen los desequilibrios que originarían una subestación de alimentación monofásica, así como la reducción de la caída de tensión entre tramos.

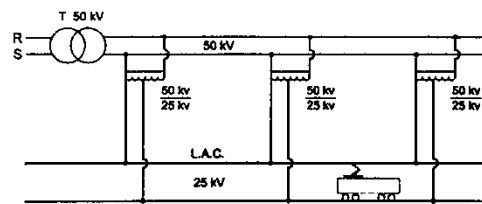
Como ventaja comentar que la potencia entregada es mayor, lo que permite unidades de tracción con potencias mayores, y un mayor número de unidades de tracción en un mismo punto, tal y como estaciones, o cambios de vías.

Además, en este tipo de subestaciones, la separación entre subestaciones aumenta al disponer de centros de autotransformación entre cada subestación, reduciendo el coste total de la instalación.

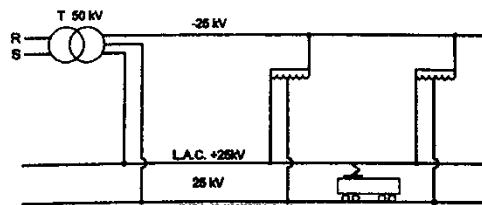
Algunos esquemas de este tipo de subestaciones se muestran en la siguiente imagen:



A) Desde una línea de distribución de 50 kV (r,s) se derivan los transformadores 50/25 que alimentan a la línea de contacto.



B) Del esquema precedente se sustituyen los transformadores por autotransformadores de iguales características.



C) Se llega al esquema con feeder -25 kV y autotransformadores eliminando la fase "s" que del esquema precedente resulta en paralelo con la línea de contacto.

Ilustración 4.18.- Subestaciones con alimentación 2 x 25 kV

En un cruce de varias vías, o en una estación en mitad del trazado ferroviario, el esquema eléctrico del sistema de alimentación 2 x 25 kV tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

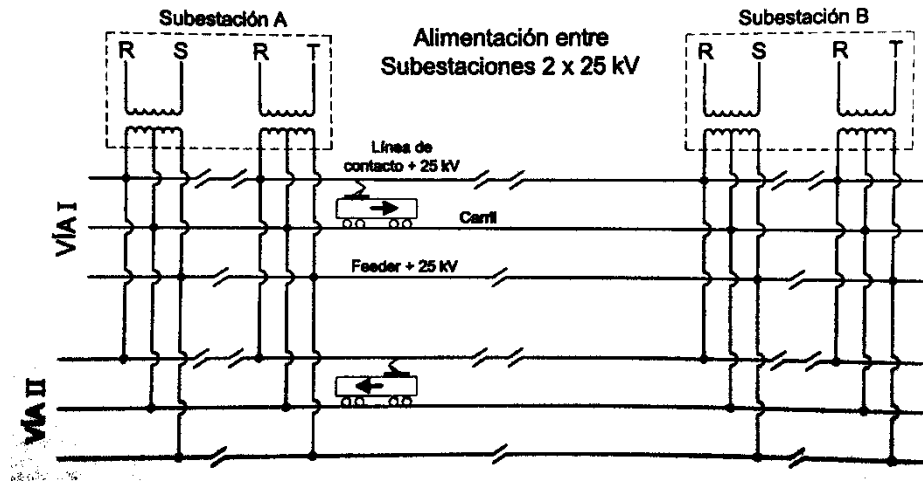


Ilustración 4.19.- Subestaciones con alimentación 2 x 25 kV en cruces de vías

En este sistema de alimentación, el esquema de reparto de intensidad tiene una forma tal y como la siguiente imagen:

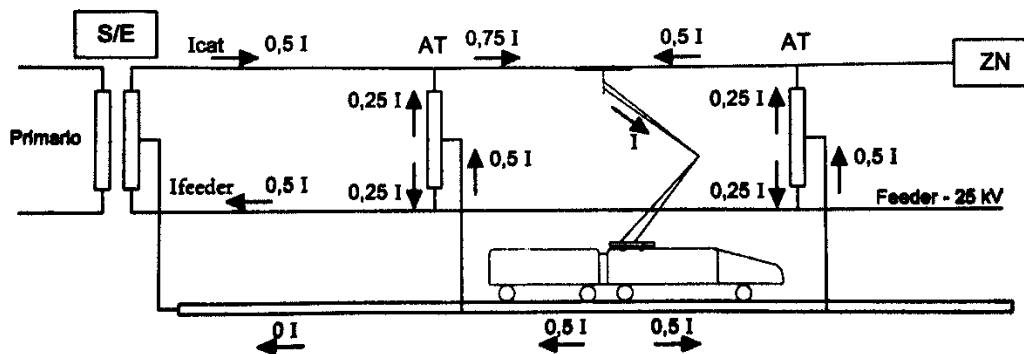


Ilustración 4.20.- Distribución de la corriente en el sistema de alimentación 2 x 25 kV

4.6.3.2.- Subestaciones de Tracción en Corriente Continua

Una subestación de tracción eléctrica en corriente continua se define como una instalación eléctrica destinada a transformar la energía eléctrica de corriente alterna de la acometida eléctrica, modificando su valor para posteriormente ser rectificada a corriente continua, cuyo fin último es el de suministrar dicha energía eléctrica transformada y rectificada al circuito de toma de corriente que dará suministro energético a la unidad de tracción.

Estas subestaciones están destinadas a la tracción de trenes metropolitanos (metros, tranvías, etc.) y ferrocarriles que no pertenecen a la alta velocidad.

Las subestaciones de tracción eléctrica en corriente continua son las más complejas tecnológicamente hablando, debido a la rectificación que se debe realizar a la energía eléctrica, ya que esto conlleva un equipamiento electrónico para rectificar y filtrar la energía suministrada.

La mayor de las ventajas reside en la simplicidad de la unidad de tracción en cuanto a su regulación y control se refiere, y también a una disminución del grado de complejidad del equipamiento tecnológico a bordo de la misma.

Como inconveniente se presenta la generación de armónicos que influye negativamente en el correcto funcionamiento de nuestra instalación.

Una subestación de tracción en corriente continua consta de las siguientes partes:

- Edificio de alterna.
- Parque de alta tensión.
- Zona de transformadores.
- Edificio de continua.
- Pórtico de feeders.

En la siguiente ilustración se puede diferenciar cada una de las partes que conforma una subestación de tracción en corriente continua:

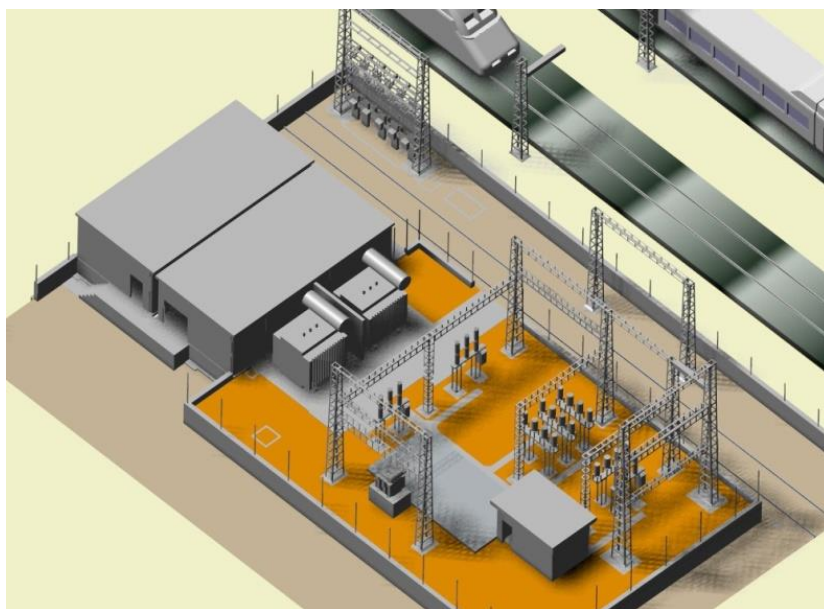


Ilustración 4.21.- Partes de una subestación de corriente continua

De forma gráfica, el esquema general de una subestación de tracción tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

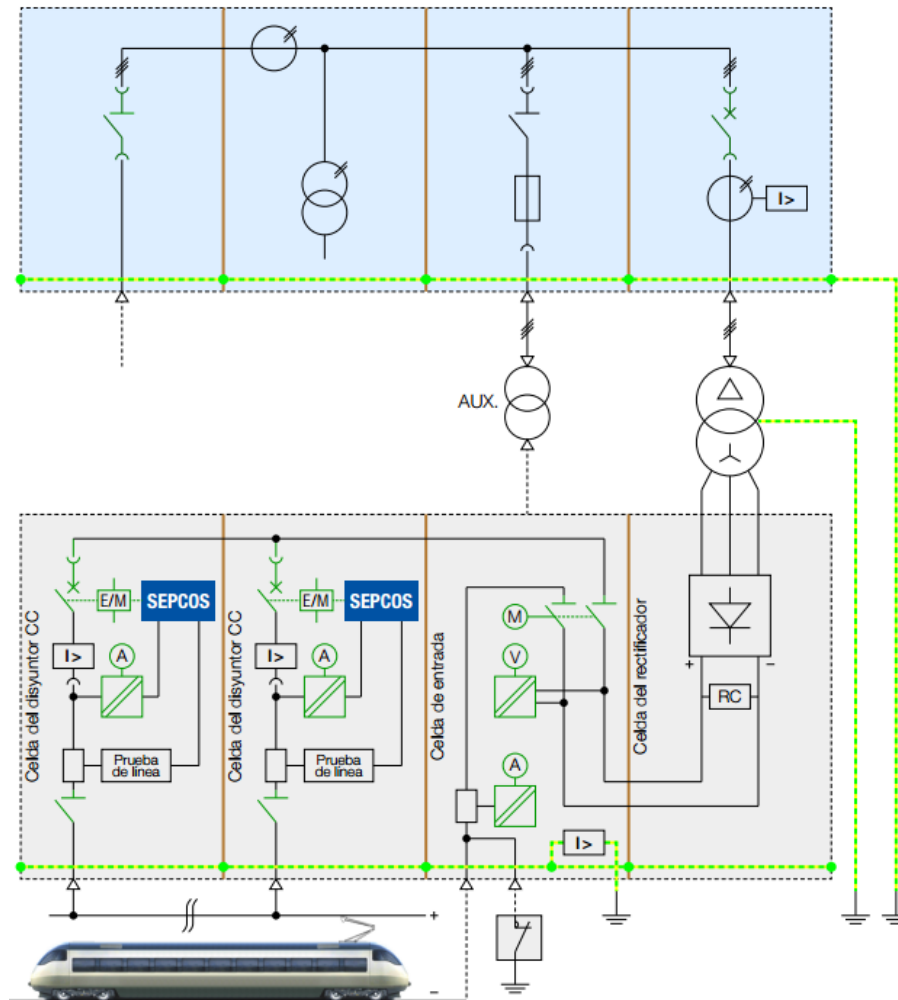


Ilustración 4.22.- Esquema eléctrico general de una subestación de tracción de corriente continua

Edificio de Alterna

El edificio de alterna es una construcción, un edificio anexo a la subestación destinado a conexionar la acometida en media tensión (20 – 25 kV) y la subestación. Cuando la tensión de la acometida es superior a los 25 kV esta instalación se lleva a cabo en un parque intemperie a través de pórticos de media tensión.

En este edificio se aloja la aparamenta de protección y medida eléctrica, tal como: seccionadores, interruptores, autoválvulas, transformadores de servicios auxiliares, equipos de medida, etc.

Actualmente, existen unas cabinas compactas de hexafluoruro de azufre (SF₆) que contienen dicha aparamenta cuando se requiere de una instalación más reducida.

En estos casos, esta aparamenta está alojada en el edificio de continua, ya que no se puede disponer de parques de intemperie cuando la subestación debe de estar alojada en núcleos urbanos como los metros (metro de Madrid, metro de Barcelona, etc.) o los tranvías. Por contra, este tipo de instalación encarece su precio debido al encarecimiento de la aparamenta y los costes de mantenimiento generados.

Parque de Alta Tensión o Parque de Intemperie

Cuando la tensión de alimentación de la acometida a la subestación es superior a 25 kV en corriente alterna, el edificio de alterna visto anteriormente se sustituye por un recinto dentro de la subestación delimitado por pórticos y columnas de celosía metálica, desempeñando la función del edificio de alterna ya que en él se aloja la aparamenta de medida y protección necesaria para dar suministro de energía eléctrica a la subestación, denominándose este conjunto de infraestructura y aparamenta como *parque de alta tensión o parque de intemperie*.

Este tipo de instalación también se puede realizar en cabinas blindadas de SF₆, reduciéndose así las dimensiones de esta zona de la subestación, pero con el inconveniente de un aumento económico elevado.

Este tipo de instalación es común encontrarlas en subestaciones destinadas para alimentar líneas ferroviarias de ferrocarriles convencionales, mientras que los edificios de alternar son más comunes hallarlos en subestaciones que dan suministro a líneas de ferrocarriles metropolitanos (metros, tranvías, etc.).

Las dimensiones normalizadas de este parque exterior como mínimo pueden ser de 50 metros de largo y 10 metros de anchos, siendo su superficie mínima de 500 m².

De forma gráfica, el parque de intemperie puede tener la siguiente composición según la siguiente imagen:

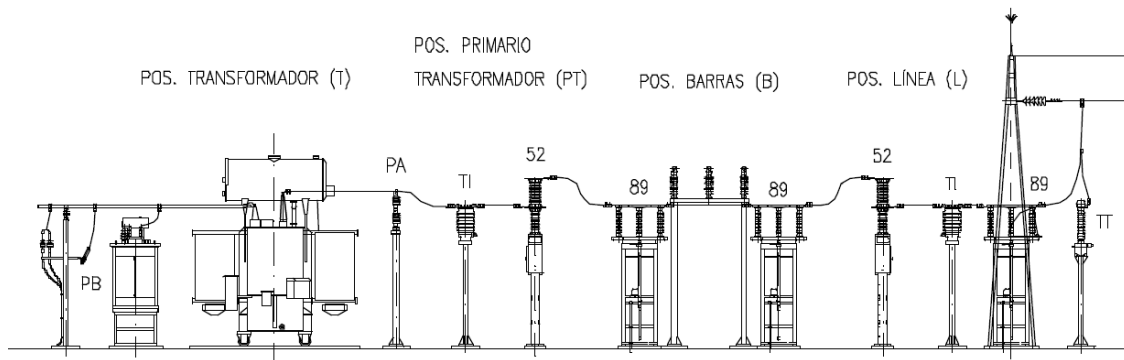


Ilustración 4.23.- Ejemplo de S/E 66/15 kV de intemperie. Alzado de la línea, embarrado y transformadores

Como se muestra en la imagen, generalmente, al parque exterior le llega la línea de acometida trifásica de media – alta tensión, que se conecta directamente al pórtico de entrada celosía metálica de la subestación.

Del pórtico de entrada, los conductores se conectan a un seccionador tripolar con accionamiento manual que dará servicio a las autoválvulas que se encargan de descargar alguna sobretensión originada en la acometida de la subestación directamente a tierra o alguna sobretensión de tipo atmosférico, con el fin de proteger la subestación de tracción ante una perturbación exterior.

Una vez pasada la autoválvula, los conductores se conectan a otro seccionador tripolar, pero de accionamiento eléctrico, que funciona en yuxtaposición con un disyuntor automático conectado seguidamente al seccionador, donde la apertura del seccionador está ligada a la apertura del disyuntor automático. Ambos elementos pueden ser accionados telemáticamente (de forma local, o remota) o manualmente.

A continuación del disyuntor, se conecta cada fase a un transformador de intensidad, con el fin de proteger a la subestaciones de tracción cuando se origine una sobrecarga. Estos transformadores de intensidad están conectados a unos relés que se encargan de la desconexión del disyuntor en presencia de una sobrecarga.

Seguidamente, las fases se conectan a un embarrado a través de otro seccionador tripolar de accionamiento manual.

A la salida del embarrado, las fases se conectan a los transformadores de tensión e intensidad destinados a los equipos de medida por parte de la compañía suministradora de la energía eléctrica, realizando esta derivación a través de otro seccionador.

Finalmente, a la salida de los transformadores de intensidad y tensión se conectan nuevamente las fases a un seccionador tripolar, para alimentar a un embarrado general que dará servicio a los transformadores de tracción por un lado, y en otro circuito alimentará a los transformadores de servicios auxiliares. Entre el embarrado y los transformadores se dispone de un seccionador y un disyuntor, para proteger contra sobrecargas originadas realizando la misma función que al principio, pero teniendo en cuenta que a las fases se les ha realiza una transformación y los equipos de protección tendrán unas características eléctricas diferentes.

Transformadores de Tracción de la Subestación

Los transformadores tienen como objetivo transformar la energía eléctrica de la acometida, y entre equipos, para adecuarlas a las necesidades que se requieran en cada elemento de la subestación. En una subestación de tracción podemos encontrar los siguientes transformadores:

- Transformadores de tracción: Transformadores para subestaciones de tracción tranviaria o transformadores para subestaciones de tracción ferroviaria.
- Transformadores de servicios auxiliares.
- Transformadores de señalización y enclavamientos.
- Transformadores de medida y protección.

Los **transformadores de tracción** de las subestaciones de corriente continua pueden ser de dos tipos: sumergidos en aceite, según la especificación técnica de ADIF “*ET 03.359.101.7: Transformadores de potencia sumergidos en aceite para subestaciones de tracción de 3,3 kV de corriente*

continua”, o en seco, según la especificación técnica de ADIF “ET 03.359.121.5: transformadores de potencia de tipo seco para subestaciones de tracción de 3,3 kV de corriente continua”.

En estas especificaciones técnicas, a su vez, se incluyen los dos tipos de transformadores que se pueden instalar según el tipo de material rodante que va destinada, y que son los siguientes:

- Transformadores para subestaciones de tracción de tranvías, cuyas características técnicas generales son las siguientes:
 - Están destinados a las líneas de alimentación con tensiones de 750 Vcc o 1500 Vcc.
 - Su potencia aparente nominal es de 1.000 kVA, 1.500 kVA o 2.200 kVA.
- Transformadores para subestaciones de tracción de tranvías, cuyas características técnicas generales son las siguientes:
 - Están destinados a las líneas de alimentación con tensiones de 1.500 Vcc o 3.000 Vcc.
 - Su potencia aparente nominal es de 1.000 kVA, 1.500 kVA o 2.200 kVA.

Las características dimensionales y de peso, según las especificaciones técnicas de ADIF ET 03.359.101.7 y ET 03.359.121.5, se recogen en la siguiente tabla:

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR	PESO TOTAL (INCLUIDO ACEITE)	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)
3.300 kVA	15.000 kg	4.000	2.600	3.500
6.600 kVA	25.000 kg	5.000	3.500	4.000

Tabla 4.5.- ET 03.359.101.7: Dimensiones y peso de los transformadores de potencia sumergidos en aceite

POTENCIA DEL TRANSFORMADOR	PESO TOTAL	LARGO (mm)	ANCHO (mm)	ALTO (mm)
3.300 kVA	15.700 kg	3.600	1.800	4.500
6.600 kVA	25.000 kg	4.100	2.300	5.000

Tabla 4.6.- ET 03.359.121.5: Dimensiones y peso de los transformadores de potencia de tipo seco

Estas especificaciones técnicas también enumeran los accesorios que han de tener los transformadores de potencia, y son los siguientes:

- Depósito de expansión, con boca de llenado, dispositivo para vaciado e indicador de nivel tipo magnético con contactos de nivel máximo y mínimo.
- Desecador de aire con carga de silicagel.
- Relé Buchholz de dos flotadores contactos de alarma y disparo.
- Termómetro de esfera, antivibratorio, con aguja de máxima y dos contactos ajustables.
- Válvula de alivio de sobrepresión súbita con contacto de disparo.
- Conmutadores de tensiones, con mando sobre tapa accionable sin tensión.
- Dos termostatos.
- Válvula de vaciado rápido.
- Elementos de elevación, arrastre, desencubado y fijación para el transporte.
- Ruedas de transporte orientables en las dos direcciones principales, con pestaña para carril, ancho de vía tipo ADIF.
- Soportes para poyo de gatos hidráulicos.
- Bornas de conexión a tierra.

Las características técnicas de un transformador de potencia de 3.300 kVA y 6.600 kVA según las especificaciones técnicas de ADIF son las que aparecen recogidas en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	3.300 kVA	6.600 kVA
Tensión nominal del primario	20 kV	20 kV
	25 kV	25 kV
	30 kV	30 kV
	45 kV	45 kV
	66 kV	66 kV
Tensión nominal del secundario	1.300 V	1.300 V
Intensidad nominal del primario	95,26 A	190,52 A
	76,21 A	154,42 A
	63,51 A	127,02 A
	42,34 A	84,68 A
	28,87 A	57,74 A
Material de los arrollamientos	Cobre o aluminio	Cobre o aluminio
Grupo de conexión	Yy0d11	Yy0d11
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Ucc entre el primario y cada secundario	9%	9%
Instalación	Exterior / Interior	Exterior / Interior
Pérdidas de vacío	3.400 W	4.800 W
	3.500 W	5.000 W
	3.500 W	5.000 W
	4.000 W	5.700 W
	4.600W	6.500 W
Pérdidas en carga	26.000 W	45.000 W

Tabla 4.7.-Resumen de las características asignadas para los transformadores de 3.300 kVA y 6.600 kVA según ET 03.359.121.5

Los **transformadores de servicios auxiliares** de las subestaciones de corriente continua están reglados mediante la especificación técnicas de ADIF “ET 03.359.116.5: Transformadores de alimentación auxiliares para subestaciones de tracción de 3,3 kV de corriente continua”, y se definen según esta como los transformadores trifásicos que se instalan, en el interior de los edificios o en los parques de intemperie, de las subestaciones eléctricas de tracción destinados a la alimentación de los servicios auxiliares de la subestación (carga de baterías, alumbrado, señalización, telemando y enclavamiento), así como a otros transformadores propios o ajenos a la misma.

Las características técnicas de los transformadores auxiliares deben ser, según la especificación técnica ET 03.359.116.5, las siguientes:

- Potencia asignada: 100, 160, 250 y 400 kVA.
- Para transformadores sumergidos en baño de aceite:
 - Tensión asignada del primario: 20, 25, 30, 45 y 66 kV.
 - Serie de aislamiento: 24, 36, 52 y 72,5 kV.
- Para transformadores secos:
 - Tensión asignada del primario: 20, 25 y 30 kV.
 - Serie de aislamiento: 24 y 36 kV
- Tensión asignada del secundario: 240 V.
- Grupo de conexión: Yzn11.
- Frecuencia asignada: 50 Hz.
- Tensión de cortocircuito:
 - Transformador sumergido en baño de aceite: 4% (75 °C).
 - Transformador tipo seco: 6% (120 °C).
- Peso total: 2.500 kg.
- Longitud: 3.000 mm.
- Anchura: 2.000 mm.
- Altura: 3.500 mm.

Edificio de Corriente Continua

El edificio de corriente continua es una construcción alojada en la subestación en la que se disponen los elementos de medida, protección, rectificación y filtrado de la energía eléctrica, característico de las subestaciones de tracción de corriente continua.

La planta del edificio de corriente continua puede tener una configuración tal y como se muestra en la siguiente imagen:

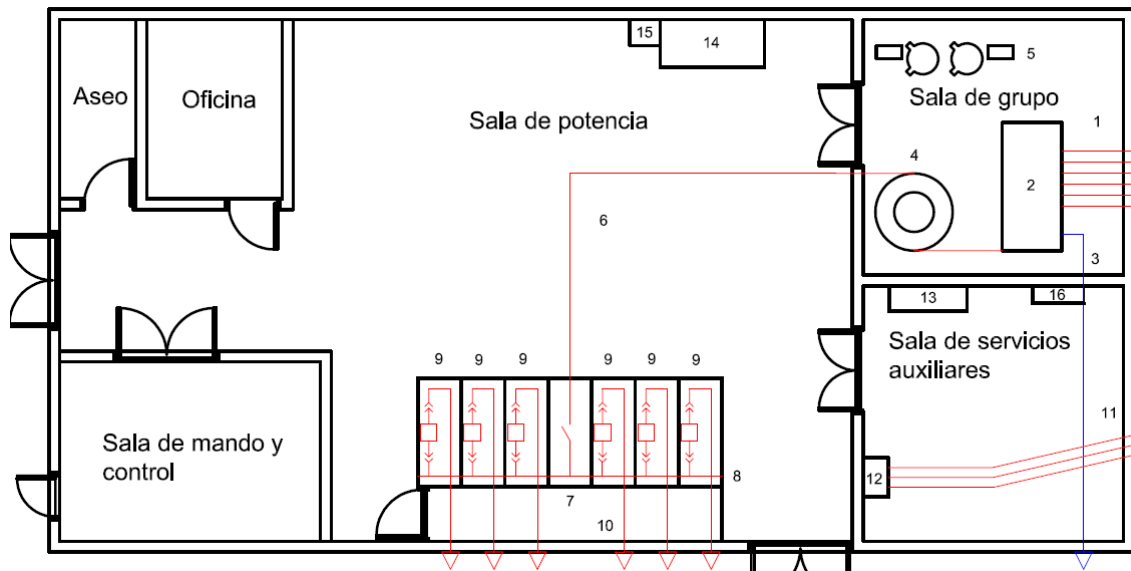


Ilustración 4.24.- Planta de un edificio de corriente continua

Donde la leyenda de los elementos que lo forman en referencia a la imagen anterior se muestra en la siguiente tabla:

LEYENDA
1. Acometida transformador de potencia - rectificador (RHZ1 3,6/6 kV).
2. Rectificador (6 MW).
3. Acometida del negativo rectificador - armario de negativos (RZ1 0,6/1 kV).
4. Bobina de alisamiento.
5. Filtros de armónicos.
6. Acometida del positivo rectificador - celdas de feeder (RHZ1 6/10 kV).
7. Celda de seccionador de grupo.
8. Barra ómnibus.
9. Celda de feeder.
10. Acometida del positivo celdas de feeder - pórtico de feeder (RHZ1 6/10 kV).
11. Acometida de entrada al cuadro general de BT (RZ1 0,6/1 kV).
12. Cuadro general de baja tensión.
13. Armario de servicios auxiliares.
14. Armario de rectificadores y baterías.
15. Armario de servicios auxiliares de continua.
16. Cuadro de fuerza y alumbrado.

Tabla 4.8.- Leyenda del edificio de corriente continua

A continuación se van a describir de forma general la aparamenta que conforman el edificio de corriente continua visto en la imagen anterior, reservando una descripción más técnica para el capítulo 6.

Los elementos que conforman el edificio de corriente continua son los siguientes:

- **Rectificador de potencia.** En la especificación técnica de ADIF “ET 03.359.104.1: Grupos rectificadores de 3000 y 6000 kW” se definen el objetivo del elemento, así como las características técnicas de uso, mantenimiento y ensayo. El rectificador de potencia es el elemento más importante de las subestaciones de corriente continua ya que tiene como objetivo rectificar la energía eléctrica en corriente alterna a corriente continua. Este elemento será descrito más ampliamente en el capítulo de electrónica de potencia.
- **Filtro de corriente.** Consiste en una bobina fabricada en aluminio, con un número de espiras de entre 20 a 40, con una sección transversal de unos 800 mm², y cuyo objetivo consiste en alisar la corriente continua saliente de grupo rectificador, reduciendo en factor de rizado y aumentando la calidad de la corriente continua suministrada. Este elemento está en desuso debido al desarrollo tecnológico que está surgiendo en la electrónica de potencia, disponiéndose cada vez menos en las subestaciones.
- **Filtro de armónicos.** Es un equipo electrónico que se encarga de eliminar todos los armónicos de cualquier orden generados en los equipos de rectificación. Está dispuesto a continuación del filtro de corriente, si lo hubiese, o en serie con el rectificador de potencia. Este elemento se ha ganado importancia con el desarrollo de las telecomunicaciones y equipos electrónicos de la red, ya que cada día existen más equipos electrónicos en la red que al no ser cargas lineales deforman la forma de onda de la corriente y tensión.
- **Disyuntores extrarápidos.** Son disyuntores provistos de circuitería, y capaces de detectar cortocircuitos a largas distancias, sobrecargas y derivaciones. Van conectados a continuación del filtro de armónicos, de desconexión en carga y controlados a distancia (telemando), y su función es la de interrumpir el paso de

la corriente continua en caso de falta o defecto generado “aguas abajo” con una gran poder de corte.

- **Barra ómnibus.** Embarrado común cuyo objetivo es distribuir la energía eléctrica entre los diferentes circuitos que se encargan de alimentar a los tomas de alimentación.
- **Celdas de seccionamiento, protección y acometida.** Son celdas modulares de chapa metálica que acogen cada una los elementos de seccionamiento, protección y medida.
- **Bobinas de aislamiento.** Según la especificación técnica de ADIF “ET 03.359.115.7: Bobina de aislamiento para subestaciones de tracción de corriente continua” define las bobinas de aislamiento como un elemento que se instala en serie a la salida de los rectificadores de tracción, y tiene como objetivo proporcionar una impedancia elevada al flujo de corrientes armónicas, así como reducir el incremento de corriente en las faltas en lo sistemas de corriente continua. Estas bobinas de aislamiento será de tipo seco, de núcleo de aire, sin pantalla magnética, para instalación interior, con arrollamiento con refrigeración por aire natural y con una inductancia constante, poseyendo las siguiente características eléctricas:

- Tensión asignada (U_d): 3,3 kV.
- Tensión asignada de aislamiento (U_{Nm}): 4,8 kV.
- Corriente continua asignada (I_d): 909 A (potencia del rectificador asociado 3.000 kW) y 1.818 A (potencia del rectificador asociado 6.000 kW).
- Inductancia incremental asignada (L_{inc}): 0,6 mH.

Pórtico de Feeders

Se denomina pórtico de feeders a la estructura metálica de tipo pórtico que hace de enlace entre la subestación de tracción y la línea de alimentación a la tracción ferroviaria, alojándose en la misma todos los conductores procedentes de la subestación (alimentación, feeders, retorno, etc.).

El pórtico de feeders se encuentra dentro del recinto de la subestación de tracción, y cerca superestructura ferroviaria.

Otro objetivo que tienen los pórticos de feeders en la subestaciones es el de mantener constante la alimentación de la línea de toma de corriente cuando se realicen labores de reparación o mantenimiento, gracias a los elementos seccionadores que posee el mismo.

Están provisto de herraje, aisladores, seccionadores by-pass y seccionadores de feeder, cumpliendo con los requisitos de seguridad que marca la normativa de subestación MIE – RAT.

Los pórticos de feeders tienen la forma como el de la siguiente imagen:

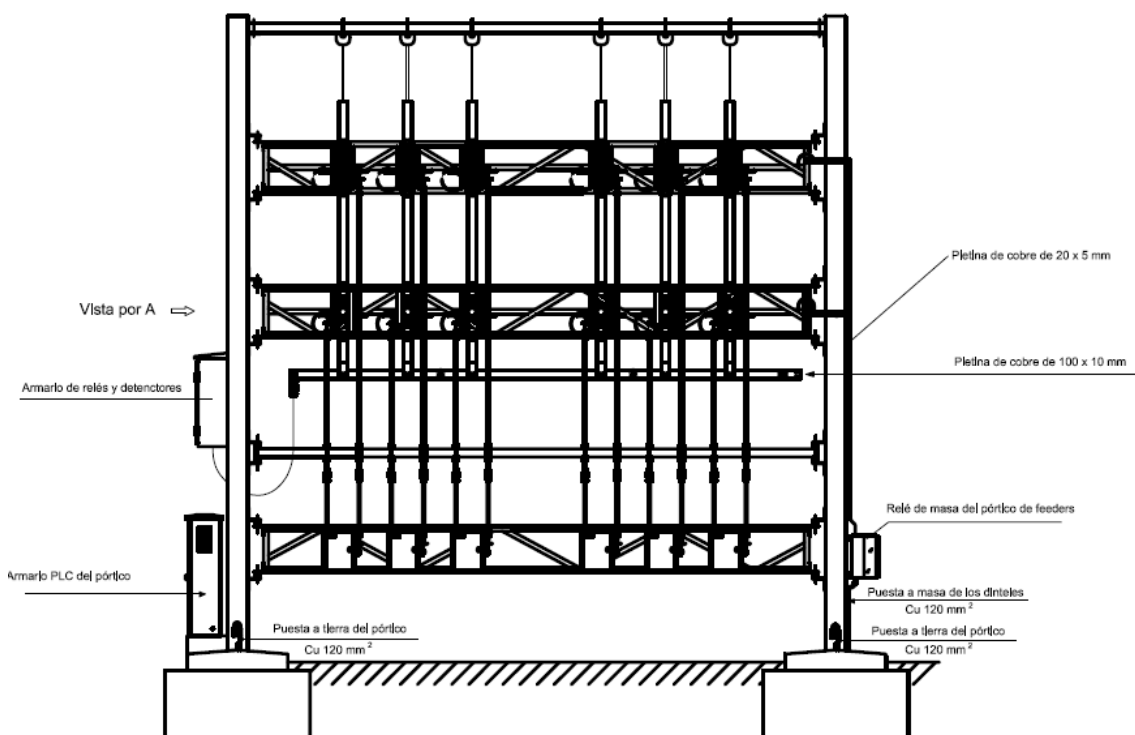


Ilustración 4.25.- Alzado del pórtico de feeders

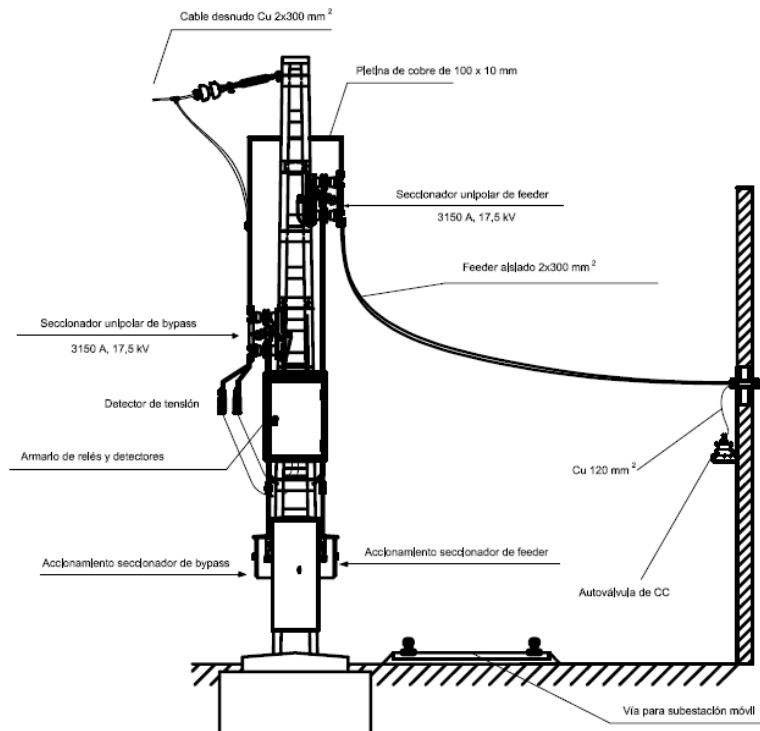


Ilustración 4.26.- Perfil del pórtico de feeders



Ilustración 4.27.- Pórtico de feeders

4.6.3.3.- Subestaciones de Tracción en Corriente Alterna

Las subestaciones de corriente alterna son recintos delimitados próximos a las vías del tren en los que se incluyen todos los elementos protección, transformación y medida situados en diferentes zonas del mismo, y que están destinadas a suministrar y adecuar la energía eléctrica necesaria para abastecer a los sistemas de alimentación 1 x 25 kV y 2 x 25 kV.

Las zonas características que conforman la subestaciones de tracción en corriente alterna son las siguientes:

- Parque exterior de alta tensión.
- Zona de 25 kV.
- Zona de acometida a la alimentación de tracción.

Independientemente que la acometida tenga un valor de tensión de 220 kV o 400 kV, las dimensiones más comunes que puede tener una subestación se muestran en la siguiente tabla:

Tensión de Alimentación	Largo (m)	Ancho (m)	Superficie (m ²)
220 kV o 400 kV	87	64	5.568

Tabla 4.9.- Dimensiones normalizadas de una subestación de tracción de corriente alterna

Según la norma MIE – RAT 12 y 15, el perímetro de la subestación estará provisto de una valla metálica de simple torsión de 2,20 m de altura, provista de alambre de espinos en la parte superior de la misma. Dicha valla estará situada sobre un muro de 0,30 m para alcanzar una altura total de 2,50 m.

Las características eléctricas de la acometida a la subestación a través del parque intemperie, vienen resumidas en la siguiente tabla:

Características	Acometida 220 kV	Acometida 400 kV
Tensión nominal	220 kV	400 kV
Tensión más elevada de la red	245 kV	420 kV
Corriente de cortocircuito	40 kA	50 kA
Corriente de cortocircuito dinámica	100 kA	125 kA
Tensión asignada de las autoválvulas	172 kV	312 kV
Tensión de prueba tipo rayo 1,2 / 50 µs	1.050 kV	1.425 kV

Tabla 4.10.- Características eléctricas de la acometida de las subestaciones de tracción en corriente alterna

Parque Exterior de Alta Tensión

El parque exterior de alta tensión es una zona de la subestación donde encontramos todos los elementos de seccionamiento, protección y media de intermedia de alta tensión dispuestos en las estructuras de celosía metálicas y pórticos.

El parque exterior de alta tensión es el que alberga la acometida de alta tensión (132 kV, 220 kV o 400 kV) procedente de la compañía suministradora.

El parque exterior de alta tensión de una subestación de tracción de corriente alterna tiene una composición parecida al parque exterior de una subestación de corriente continua, con la diferencia en la distancia de aislamiento y el nivel de tensión que deben soportar la aparataje dispuesta en él. De una forma gráfica, el alzado del parque intermedia de alta tensión de una subestación de corriente alterna se muestra en la siguiente imagen:

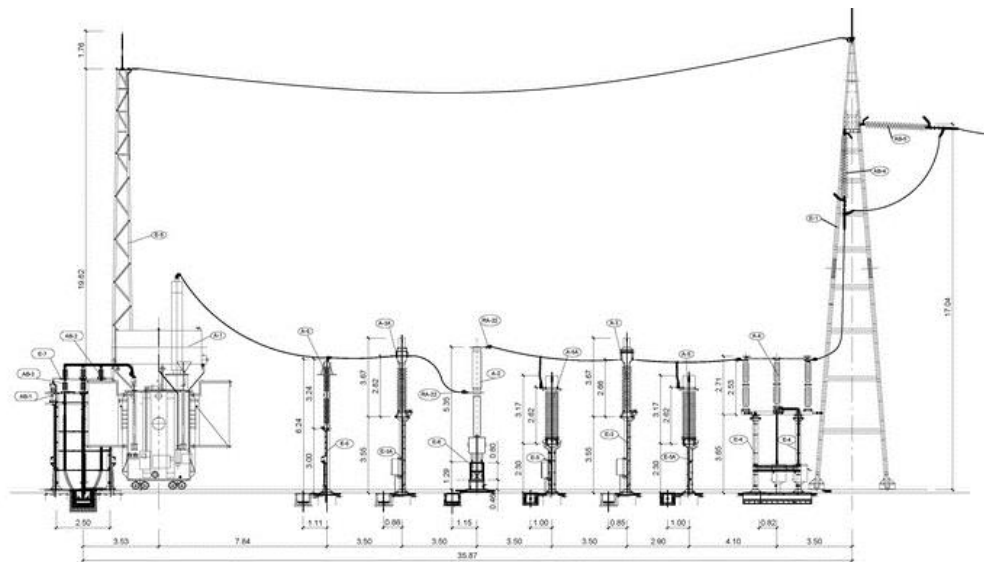


Ilustración 4.28.- Alzado del parque intermedia de alta tensión de una subestación de tracción de corriente alterna

El circuito eléctrico del parque de intermedia de alta tensión comienza con la conexión de la acometida trifásica de compañía al pórtico de entrada, quedándose aislada de las partes metálicas a través de una cadena de aisladores (porcelana, vidrio o polímeros).

Desde la acometida trifásica siguen hacia el seccionador de entrada de línea, aisladas las fases sobre una cadena de aisladores de suspensión. En el seccionador de entrada, una de las fases que se conectan no continúan en el circuito, quedándose solamente dos fases a la salida del seccionador de entrada.

A la salida del seccionador de entrada se conecta a cada fase, seguidamente, un transformador de tensión de medida monofásico, posteriormente un transformador de intensidad monofásico de medida y, a continuación de este, un transformador de tensión de protección. Una vez pasada esta zona de transformadores de medida y protección, la línea se conecta a un interruptor automático de SF6.

A la salida del interruptor automático de SF6 se disponen dos transformadores de intensidad de protección.

El último elemento, antes de dar servicio al transformador de tracción, es una autoválvula de protección contra sobretensiones. Para el conexionado de estos elementos se utilizan unos embarrados cuyas características técnicas se muestran más adelante.

Una vez nombrados cada uno de los elementos que están dispuestos en el parque intemperie de alta tensión de una subestación de tracción de corriente alterna, a continuación se van a describir las características técnicas de cada uno de estos elementos y su función principal.

El **seccionador de entrada de línea** tiene como objetivo separar eléctricamente la subestación de tracción de la línea de acometida para labores de mantenimiento, reparación o maniobra a partir de la subestación de tracción.

El seccionador está compuesto por un seccionador tripolar rotativo de tres columnas y doble apertura lateral, con doble seccionamiento, mando por motor y señalización de posición. Va provisto de unas cuchillas, en el lado hacia el transformador, que están puestas a tierra para derivar algún defecto. De una forma gráfica, el seccionador de entrada de línea queda representado por la siguiente imagen:



Ilustración 4.29.- Seccionador de entrada de línea

Dependiendo del nivel de tensión de la acometida, las características generales que deben tener estos seccionadores, y que cumplen las normas CEI y ANSI C37, se recogen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Tensión nominal	220 kV	400 kV
Tensión máxima del material	245 kV	420 kV
Tensión de prueba de maniobra	460 kV	820 kV
Tensión de prueba tipo rayo 1,2 / 50 μ s	1.050 kV	1.452 kV
Tensión de prueba a impulsos tipo rayo 250 / 2.500 μ s	775 kV	1.050 kV
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Intensidad nominal	1.600 A	3.150 A
Intensidad admisible de corta duración (1s)	40 kA	50 kA
Intensidad dinámica (valor de cresta)	100 kA	125 kA
Accionamiento eléctrico por motor con tensión de maniobra	125 V (C.C.)	125 V (C.C.)
Material de los aisladores	Porcelana	Porcelana

Tabla 4.11.- Características generales de los seccionadores de entrada de línea

Como características constructivas, ambos seccionadores, poseen las siguientes:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Ejecución	Rotativa de tres columnas (la central giratoria, doble ruptura lateral)
Instalación	Intemperie
Disposición	Tripolar
Terminaciones de bancadas, enclavamientos y transmisiones	Galvanizada en caliente
Tipo de bornas en alta tensión	Planas
Tipo de montaje	Horizontal, sobre bancada metálica
Material de las bornas en alta tensión	Aluminio
Terminaciones de las líneas de corriente y contactos	Plateados

Tabla 4.12.- Características constructivas del seccionador de entrada de línea

Como se ha comentado anteriormente, dicho seccionador lleva un circuito de accionamiento eléctrico a través de un motor. Las características de este circuito de accionamiento es el siguiente:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tipo de accionamiento	Motor eléctrico
Tensión nominal del motor	125 V (C.C.)
Potencia absorbida por el motor	Menos de 1.000 W
Potencia disipada por el accionamiento	20 W
Grado de protección del armario	IP 54
Entrada de cables	Prensaestopas por la zona inferior
Pulsadores	Seccionador de línea (uno para abrir y otro para cerrar) Seccionador de puesta a tierra (uno para abrir y otro para cerrar)
Contactos auxiliares	10 N.A. y 10 N.C.

Tabla 4.13.- Características del circuito de accionamiento del seccionador de entrada de línea

Los **transformadores de tensión de medida** están dispuestos en un apoyo de celosía metálica HEA-200. Los conductores necesarios para realizar el conexionado de la línea al transformador será del tipo ROTCZ1FZ1 (R: Aislamiento de polietileno reticulado (XLPE); OTC: Pantalla trenzada de cobre; Z1: Cubierta de la pantalla libre de alógenos), con un aislamiento eléctrico de 0,6 / 1 kV, y una sección de 1 x 6 mm².

A continuación se muestran dos imágenes correspondientes al transformador de tensión de medida y su sección para poder observar los elementos que conforman al mismo en la siguiente imagen:



Ilustración 4.30.- Transformador de tensión de medida

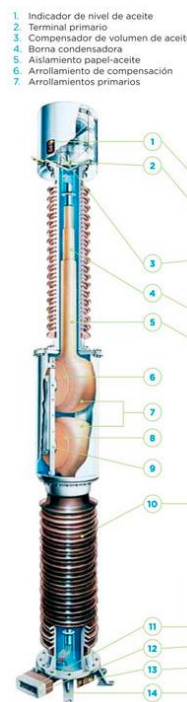


Ilustración 4.31.- Sección del transformador de tensión de medida

Las características que deben tener estos transformadores de tensión de medida se indican en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Conexión	Fase - Tierra	Fase – Tierra
Aislamiento	Aceite mineral	Aceite mineral
Ejecución	Intemperie	Intemperie
Aislador	Porcelana	Porcelana
Terminales primarios	Aluminio	Aluminio
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Tensión de servicio	220 kV	400 kV
Potencia de los devanados	50 VA	50 VA
Clase de precisión	0,2	0,2
Factor de potencia	0,8	0,8
Peso total aproximado (aceite incluido)	1.040 kg	1.780 kg
Relación de transformación	$220:\sqrt{3} / 0,110$	$400:\sqrt{3} / 0,110$

Tabla 4.14.- Características de los transformadores de tensión de medida

Los **transformadores de intensidad de medida** dispuestos a continuación tienen como características la disposición de un solo secundario, estarán sumergidos en aceite e irán alojados sobre un apoyo de celosía metálica HEA 200.

Los conductores a utilizar serán del mismo tipo que para los transformadores de tensión de medida, siendo del tipo ROTCZ1FZ1 (R: Aislamiento de polietileno reticulado (XLPE); OTC: Pantalla trenzada de cobre; Z1: Cubierta de la pantalla libre de alógenos), con un aislamiento eléctrico de 0,6 / 1 kV, y una sección de 1 x 6 mm².

Las características que deben tener estos transformadores de intensidad de medida se indican en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Conexión	Fase - Tierra	Fase – Tierra
Aislamiento	Aceite mineral	Aceite mineral
Ejecución	Intemperie	Intemperie
Aislador	Porcelana	Porcelana
Terminales primarios	Aluminio	Aluminio
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Tensión máxima de servicio	245 kV	420 kV
Potencia de los devanados	20 VA	20 VA
Clase de precisión	0,2	0,2
Factor de potencia	0,8	0,8
Peso total aproximado (aceite incluido)	560 kg	920 kg
Relación de transformación	75 – 150 / 5 A	75 – 150 / 5 A

Tabla 4.15.- Características de los transformadores de intensidad de medida

A continuación se muestran dos imágenes correspondientes al transformador de tensión de medida y su sección para poder observar los elementos que conforman al mismo en la siguiente imagen:



Ilustración 4.32.- Transformador de intensidad de medida

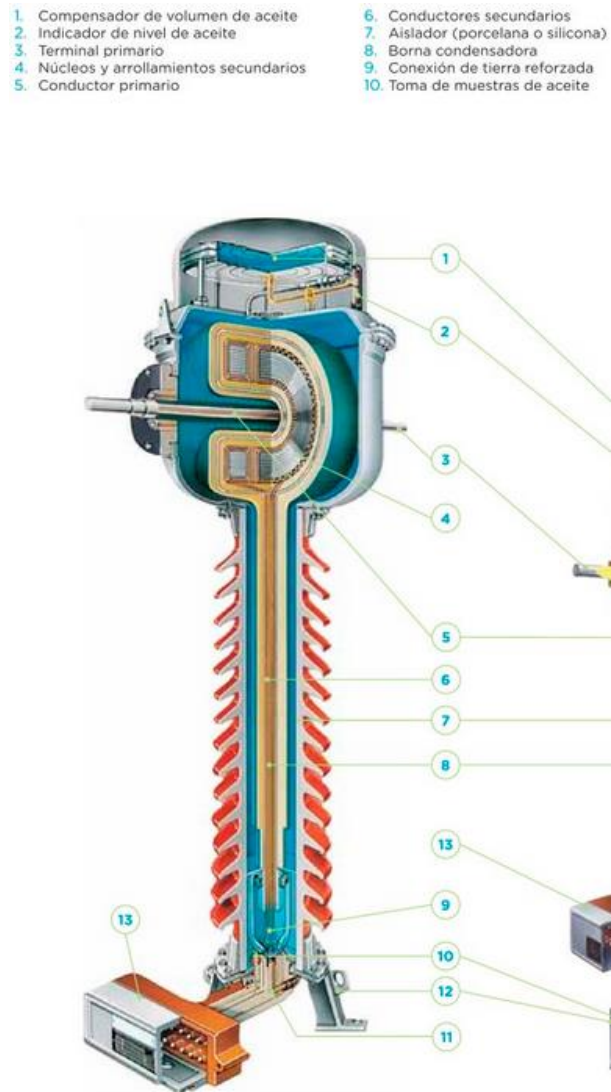


Ilustración 4.33.- Sección del transformador de intensidad de medida

Los **transformadores de tensión de medida y protección** utilizados a continuación del transformador de intensidad se deben colocar uno para cada línea, teniendo como característica principal de cada transformador la disposición de tres secundarios, dos para medida y uno para protección.

Este transformador estará posado sobre un apoyo de celosía metálica del tipo HEA 200 galvanizado en caliente. Estos transformadores son de tipo inductivo con circuito antirresonante, y sus características principales se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Conexión	Fase - Tierra	Fase – Tierra
Aislamiento	Aceite mineral	Aceite mineral
Ejecución	Intemperie	Intemperie
Aislador	Porcelana	Porcelana
Terminales primarios	Aluminio	Aluminio
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Tensión de servicio	220 kV	400 kV
Potencia de los devanados		
Devanado nº 1: Protección	100 VA	100 VA
Devanado nº 2: Medida para control interno	50 VA cl 0,5	50 VA cl 0,5
Devanado nº 3: Medida de compañía	50 VA cl 0,2	50 VA cl 0,2
Factor de potencia	0,8	0,8
Peso total aproximado (aceite incluido)	1.040 kg	1.780 kg
Relación de transformación	$220:\sqrt{3} / 0,110$	$400:\sqrt{3} / 0,110$

Tabla 4.16.- Características de los transformadores de tensión de medida y protección

El siguiente elemento a describir es el **interruptor automático de protección de línea y del transformador de potencia**, cuyo objetivo es proteger a la línea de alimentación y, a su vez, proteger al transformador de tracción.

Como características a destacar, este interruptor posee un corte bipolar, con dos columnas de accionamiento por polo, alojado en una cámara de SF6.

Posee un aislador de porcelana que hace de aislador soporte, y cuenta con un equipo de acumulación de energía para su puesta en funcionamiento.

Dependiendo del nivel de tensión de la acometida, las características generales que deben tener estos interruptores, se recogen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Tensión nominal	220 kV	400 kV
Tensión máxima del material	245 kV	420 kV
Tensión de prueba de maniobra	460 kV	820 kV
Tensión de prueba tipo rayo 1,2 / 50 μ s	1.050 kV	1.452 kV
Tensión de prueba a impulsos tipo rayo 250 / 2.500 μ s	775 kV	1.050 kV
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Intensidad nominal	1.205 A	2.500 A
Intensidad admisible de corta duración (1s)	40 kA	50 kA
Intensidad dinámica (valor de cresta)	100 kA	125 kA
Poder de corte en cortocircuito	40 kA	50 kA
Accionamiento eléctrico por motor con tensión de maniobra	125 V (C.C.)	125 V (C.C.)
Material de los aisladores	Porcelana	Porcelana

Tabla 4.17.- Características de los interruptores automáticos de protección de línea y del transformador de potencia

Este interruptor lleva un accionamiento eléctrico a través de un motor. Las características de este circuito de accionamiento es el siguiente:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tipo de accionamiento	Motor eléctrico
Tensión nominal del motor	125 V (C.C.)
Potencia absorbida por el motor	Menos de 1.000 W
Potencia disipada por el accionamiento	20 W
Grado de protección del armario	IP 54
Entrada de cables	Prensaestopas por la zona inferior
Pulsadores	Seccionador de línea (uno para abrir y otro para cerrar) Seccionador de puesta a tierra (uno para abrir y otro para cerrar)
Contactos auxiliares	10 N.A. y 10 N.C.

Tabla 4.18.- Características del accionamiento de los interruptores automáticos de protección de línea y del transformador

Un ejemplo de este tipo de interruptor sería como el que ofrece el fabricante ABB, y tiene la siguiente imagen:



Ilustración 4.34.- Interruptor automático de protección de línea y del transformador de potencia

Los **transformadores de intensidad de protección** dispuestos a continuación deben ser dos, y monofásicos, para cada una de las protecciones del transformador. Además, deberá contar con cinco secundarios repartidos en: dos para el circuito de protección, otros dos para el circuito de medida y el restante para la compañía suministradora.

Estarán sumergidos en aceite e irán alojados sobre un apoyo de celosía metálica HEA 200.

Los conductores a utilizar serán del mismo tipo que para los transformadores de intensidad de medida, siendo del tipo ROTCZ1FZ1 (R: Aislamiento de polietileno reticulado (XLPE); OTC: Pantalla trenzada de cobre; Z1: Cubierta de la pantalla libre de alógenos), con un aislamiento eléctrico de 0,6 / 1 kV, y una sección de 1 x 6 mm².

Las características que deben tener estos transformadores de intensidad de protección se indican en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Conexión	Fase - Tierra	Fase – Tierra
Aislamiento	Aceite mineral	Aceite mineral
Ejecución	Intemperie	Intemperie
Aislador	Porcelana	Porcelana
Terminales primarios	Aluminio	Aluminio
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Tensión máxima de servicio	245 kV	420 kV
Potencia de los devanados		
Devanado nº 1: Protección de sobreintensidad	75 VA	75 VA
Devanado nº 2: Medida de la subestación	50 VA cl 0,5	50 VA cl 0,5
Devanado nº 3: Medida fiscal	25 VA cl 0,2	25 VA cl 0,2
Devanado nº 4: Protección diferencial	25 VA	25 VA
Clase de precisión	0,2	0,2
Factor de potencia	0,8	0,8
Peso total aproximado (aceite incluido)	560 kg	920 kg
Relación de transformación	75 – 150 / 5 A	75 – 150 / 5 A

Tabla 4.19.- Características de los transformadores de intensidad de protección

Las **autoválvulas de protección del transformador** deberán tener dos pararrayos autovalvulares de resistencia variable de óxido de zinc, cuyo objetivo será el de proteger al circuito eléctrico frente a sobretensiones producidas por fenómenos atmosféricos o sobretensiones debido a las maniobras de la red de la compañía suministradora.

Además, estas autoválvulas disponen de un contador de descargas para valores de 10 kA o superior y un miliamperímetro para medir la intensidad de fuga superficial que pueda originarse. Irán alojadas sobre un apoyo de celosía metálica HEA 200, con una línea de fuga de 31 mm / kV.

Las características que deben tener estos autoválvulas se indican en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICAS	220 kV	400 kV
Tensión asignada de la autoválvula	189 kV	312 kV
Tensión máxima de servicio	245 kV	420 kV
Ejecución	Intemperie	Intemperie
Aislador	Porcelana	Porcelana
Corriente nominal de descarga	10 kA	10 kA
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Material envolvente	Porcelana	Porcelana
Sobretensiones temporales		
Tensión máxima residual para 10 kA de cresta	453 kV	748 kV
Tensión máxima residual para 20 kA de cresta	494 kV	816 kV
Intensidad de cortocircuito soportada en 0,2 s	50 kA	50 kA
Factor de potencia	0,8	0,8
Línea de fuga mínima (31 mm / kV)	7.595 mm	13.020 mm

Tabla 4.20.- Características de las autoválvulas de protección del transformador

Las autoválvulas de protección tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.35.- Autoválvulas de protección del transformador

El contador de sobretensiones comentado que va como complemento a la válvula tiene unas características técnicas, según el fabricante ABB, como las que se recogen en la siguiente tabla:

Recuento de sobretensiones		Opcional	
Umbral de recuento (8/20 μ s)	10 A	Intervalo de medición de la corriente de pérdida resistiva (nivel pico)	10 – 2000 μ A
Clasificación de amplitud de la sobrecorriente (8/20 μ s)	10 - 99 A 100-999 A 1,000 - 4,999 A 5,000 - 9,999 A > 10,000 A	Error en la corriente de pérdida resistiva	< 10 μ A (10 – 50 μ A); < 20 % (50 – 2000 μ A)
Error de amplitud en el recuento de sobretensiones	< 20 %	Método de diagnóstico, clasificación según IEC 60099-5, Enmienda 1	Método B2 – Análisis de armónica de tercer orden con compensación de armónicas en la tensión
Resolución temporal del recuento de sobretensiones	< 0,5 s	Comunicación de datos entre el sensor y el transceptor	
Formato del fechador de recuento de sobretensiones	AAAA:MM:DD:hh:mm:ss (resolución de 1 s)	Modelo	Radio AM (OOK) Con aprobación ETS y FCC
Capacidad de memoria de recuento de sobretensiones	1,000 registros (cíclico)	Frecuencia	868,35 MHz (916,50 MHz para Norteamérica y Australia)
Medición de corriente de pérdida		Antena	Integrada en placa de circuitos
Intervalo de medición de la corriente de pérdida resistiva total (nivel pico)	0,1 -50 mA (conversión A/D de 10 bits, autorange)	Potencia de salida	- 3 dBm (0,75 mW)
Error en la corriente de pérdida total	< 5 %	Intervalo de trabajo	60 m
Generalidades			
	Sensor	Transceptor	
Condiciones climáticas	Diseño sellado, hermético, IP 67 (Compartimiento de batería, IP 65)	Hermético, IP 54	
Temperaturas ambiente	-50 °C a +60 °C Trabajo: -40 °C a +60 °C	-10 °C a +50 °C	
Frecuencias de medición	50 ó 60 Hz (automática)	N/A	
Capacidad de cortocircuito	65 kA según IEC 60099-4	N/A	
Alimentación	Versión aire libre: Célula solar y probeta de campo Versión interior: Batería de litio de 9 V 6LR61/PP3	Batería de 9 V Tipo alcalino 6LR61/PP3	
Periodo de cambio de la batería	8 años para la batería de litio de 1.200 mAh (para uso en recintos cerrados)	> 4 horas	

Tabla 4.21.- Características técnicas del contador de sobretensiones de las autoválvulas de protección del transformador. Fabricante: ABB

El contador de sobretensiones anteriormente comentado que va como complemento a la válvula tiene una forma tal y como aparece en la siguiente imagen:



Ilustración 4.36.- Contador de sobretensiones de las autoválvulas de protección del transformador

El parque exterior también posee unos **embarrados** que realizan la conexión eléctrica entre la aparamenta y elementos del mismo. Los embarras, tanto para 220 kV como para 400 kV, deben poseer las siguientes características:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Material	Aleación de aluminio E-AlMg Si 0,5 F22
Referencia del conductor	LA – 380 duplex
Forma	Tubular hueca
Diámetro	25,38 mm
Sección	381 mm ²
Corriente admisible a 50 °C ambiental	2 kA
Distancia entre ejes de fase	3.500 mm

Tabla 4.22.- Características del embarrado

Transformadores de Tracción de la Subestación

Como se ha comentado anteriormente, los transformadores tienen como objetivo transformar la energía eléctrica de la acometida, y entre equipos, para adecuarlas a las necesidades que se requieran en cada elemento de la subestación. En una subestación de tracción podemos encontrar los siguientes transformadores:

- Transformadores de tracción.
- Transformadores de servicios auxiliares.

Los **transformadores de tracción** de las subestaciones de corriente alterna son sumergidos en aceite, y deben estar diseñados acorde con la especificación técnica de ADIF “ET 03.359.504.2: Transformadores de potencia para subestaciones de tracción. Sistema 2 x 25 kV”.

Tal y como se puede resumir en el capítulo cuarto de esta especificación técnica (ET 03.359.504.2) los transformadores de tracción para subestaciones de tracción en corriente alterna deberán tener las siguientes características técnicas eléctricas dependiendo de los dos tipos de acometidas posibles:

CARACTERÍSTICA	220 kV	400 Kv
Potencia nominal	60 MVA	60 MVA
Instalación	Intemperie	Intemperie
Refrigeración	ONAN	ONAN
Frecuencia	50 Hz	50 Hz
Número de fases	2	2
Grupo de conexión	li0 – li6	li0 – li6
Neutro de la red de alimentación	Rígido a tierra	Rígido a tierra
Factor de potencia	0,8	0,8
Tensión en el primario	220 kV	220 kV
Tensión en el secundario	2 x 27,5 kV	2 x 27,5 kV
Tensión de cortocircuito (Ucc)	10 %	10 %
Temperatura ambiental máxima de diseño	45 °C	45 °C
Sobretensión de diseño en aceite	60 °C	60 °C
Pérdidas en vacío	30 kW	30 kW

Tabla 4.23.- Características técnicas de los transformadores de tracción para subestaciones de corriente alterna según la ET 03.359.504.2

Esta especificación técnica, en el apartado 4.4, enumera las características técnicas constructivas que deben tener estos tipos de transformador, siendo las más relevantes las que se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	220 kV	400 Kv
Disposición del devanado primario	Discos	Discos
Disposición del devanado secundario	Hélices	Hélices
Línea de fuga: 31 mm / kV	7.595 mm	13.020 mm
Altura total del transformador	8.900 mm	9.800 mm
Altura de las bornas de alta tensión	9.100 mm	9.920 mm
Largo del transformador	7.200 mm	7.200 mm
Ancho del transformador	6.600 mm	6.600 mm
Peso total con aceite	145.000 kg	149.500 kg
Peso desencubado	61.000 kg	63.000 kg

Tabla 4.24.- Características constructivas de los transformadores de tracción para subestaciones de corriente alterna según la ET 03.359.504.2

Bajo el título 'Accesorios' del apartado 4.5 de la ET 03.359.504.2, los accesorios y elementos de transporte que se deberán disponer en el transformador de tracción serán los siguientes:

- Tren de rodadura con bastidor y ruedas.
- Cuatro ruedas con bloqueo para su desplazamiento longitudinal y transversal.
- Patillas de arrastre y fijación del transformador.
- Dos bornas en el lado de alta tensión, y tres para el lado de baja tensión.
- Depósito de expansión provisto de las correspondientes tuberías, válvulas, así como válvulas de llenado y vaciado, purga, toma de muestras, etc.
- Indicador del nivel de aceite.
- Regulador.
- Indicador de nivel de aceite para el regulador.
- Caja de conexiones.
- Válvula de vaciado total.
- Bornas para conexión a tierra.
- Placa de características.
- Termómetro con sonda PT 100. Debe de disponer de un indicador de temperatura máxima, además de poseer dos contactos para el circuito de alarmas y otros dos contactos para el circuito de actuación.
- Termostato de temperatura máxima.
- Transformador de intensidad monofásicos, con una relación de transformación de 200 / 5 A, y una caja de conexión IP 54 para la protección de cuba.
- Relé Buchholz para proteger el regulador de carga, con la disposición de un contacto para el circuito de alarma y otro contacto para el circuito de actuación.
- Válvula de sobrepresión.

La sección de un transformador de tracción puede ser tal y como se muestra en la siguiente imagen:

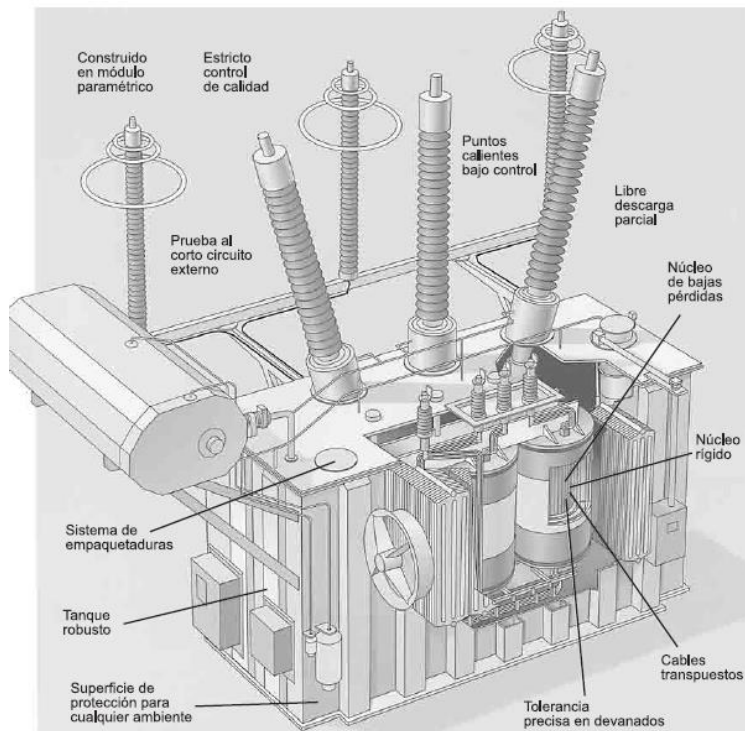


Ilustración 4.37.- Sección y partes del transformador de tracción de una subestaciones en corriente alterna

La forma de un transformador de tracción instalado en una subestación de tracción puede ser tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.38.-Transformador de tracción dispuesto en una subestación de tracción en corriente alterna. Fabricante: ALKARGO

Los **transformadores de servicios auxiliares** de las subestaciones de corriente alterna son transformadores monofásico en seco, y deben estar diseñados de acuerdo con la especificación técnica de ADIF “ET 03.359.117.3: *Transformadores para alimentación de servicios auxiliares de 25 kV*”.

Tal y como se puede resumir en el capítulo cuarto de esta especificación técnica (ET 03.359.117.3) los transformadores de servicios auxiliares para subestaciones de tracción en corriente alterna deberán tener las siguientes características técnicas eléctricas independientemente de los dos tipos de acometidas posibles:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia nominal	250 kVA y 100 kVA
Tensión de aislamiento	36 kV
Refrigeración	Ventilación natural por aire
Frecuencia	50 Hz
Grupo de conexión	Ii0
Instalación	Interior
Factor de potencia	0,8
Pérdidas en vacío a tensión nominal	1.600 W
Pérdidas debidas a la carga	2.800 W
Tensión de cortocircuito (Ucc)	8 %

Tabla 4.25.-Características eléctricas de los transformadores de servicios auxiliares según ET 03.359.117.3

Esta especificación técnica, en el apartado 4.12, enumera las características técnicas constructivas que deben tener estos tipos de transformador, siendo las más relevantes las que se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Altura del transformador	1.850 mm
Largo del transformador	1.000 mm
Ancho del transformador	800 mm
Peso total aproximado	1.650 kg

Tabla 4.26.- Características constructivas de los transformadores de servicios auxiliares según ET 03.359.117.3

La forma de un transformador de servicios auxiliares que aparece en cualquier catálogo de cualquier fabricante específico de subestaciones de de tracción puede ser tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.39.- Transformadores de tracción de servicios auxiliares para subestaciones de tracción en corriente alterna

Zona de 25 kV

Una vez pasada la línea por los transformadores de tracción, la tensión se reduce a niveles de media tensión. La zona de 25 kV comprende el tramo del circuito eléctrico desde la salida de los transformadores de tracción hasta las celdas de salida de seccionamiento y protección que darán servicio al pórtico de catenaria y feeders.

La zona de 25 kV es una edificación donde se aloja la aparamenta de media tensión de protección y medida a través de celdas, así como los sistemas de control y comunicación de la subestación, y el circuito de los servicios auxiliares y su transformador.

A continuación se van a enumerar cada uno de los elementos que pueden formar la zona de 25 kV de una subestación de tracción de corriente alterna, así como sus características eléctricas más relevantes.

Los **aisladores de apoyo** tienen como objetivo alojar al embarrado de salida del transformador de tracción y aislarlo de cualquier elemento conductor, y posee las siguientes características:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tensión nominal	52 kV
Tensión soportada bajo la lluvia	105 kV
Tensión soportada al choque	250 kV
Carga de rotura a flexión	400 daNm
Carga de rotura a torsión	180 daNm

Tabla 4.27.-Características de los aisladores de apoyo en la zona de 25 kV

Otros elementos que están presentes en esta zona de 25 kV son las **autoválvulas** que se encargan de proteger esta zona contra sobretensiones. Van conectadas en derivación al embarrado. Las características que deben tener estas autoválvulas, según las normas IEC 60099 – 4 y UNE 21087 – 3, son las siguientes:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Tensión nominal	45 kV
Tensión máxima de operación en continua (Uc)	36 kV
Corriente nominal de descarga	20 kA
Peso	4,8 kg

Tabla 4.28.- Características de las autoválvulas en la zona de 25 kV

Los elementos que llevan a cabo la correcta distribución de la energía eléctrica hacia las catenarias y feeders son las **celdas de protección y seccionamiento de media tensión en SF6**. Las celdas de protección y seccionamiento de media tensión en SF6 son las siguientes:

- Celda de protección de llegada de los transformadores de tracción. Esta celda está formada por la siguiente aparamenta y características :
 - Un interruptor bipolar.
 - Un seccionador.
 - Un compartimento de barras generales.

- Un compartimento de conectores enchufable para cables.
 - Un compartimento de relés.
 - Dos transformadores de intensidad toroidales de 2.000 / 5 – 5 – 5 A, 20 VA.
 - Dos transformadores de tensión de 27,5 / 0,11 kV de 30 VA.
 - Intensidad térmica durante 3 segundos: 25 kA.
 - Intensidad dinámica nominal: 63 kA.
- Celda de alimentación a catenaria y feeder. Esta celda está formada por la siguiente aparamenta y características :
- Un interruptor bipolar.
 - Un seccionador.
 - Un compartimento de barras generales.
 - Un compartimento de conectores enchufable para cables.
 - Un compartimento de relés.
 - Dos transformadores de intensidad toroidales de 2.000 / 5 – 5 A, 20 VA.
 - Dos transformadores de tensión de 27,5 / 0,11 kV de 30 VA.
 - Intensidad térmica durante 3 segundos: 25 kA.
- Celda de acoplamiento longitudinal. Esta celda está formada por la siguiente aparamenta y características :
- Un interruptor bipolar.
 - Un seccionador.
 - Un compartimento de barras generales.
 - Un compartimento de relés.
 - Dos transformadores de tensión de 27,5 / 0,11/ 0,11 kV de 30 VA.
- Celda de acoplamiento – remonte de barras. Esta celda está formada por la siguiente aparamenta y características :
- Un interruptor bipolar.

- Un seccionador.
 - Un compartimento de barras generales.
 - Un compartimento de relés.
 - Dos transformadores de tensión de 27,5 / 0,11/ 0,11 kV de 30 VA.
- Celda de protección del transformador de servicios auxiliares. Esta celda está formada por la siguiente aparamenta y características :
- Un interruptor bipolar.
 - Un seccionador.
 - Un compartimento de barras generales.
 - Un compartimento de conectores enchufable para cables.
 - Un compartimento de relés.
 - Dos transformadores de intensidad toroidales de 2.000 / 5 – 5 A, 20 VA.
 - Dos transformadores de tensión de 27,5 / 0,11/ 0,11 kV de 30 VA.
 - Intensidad térmica durante 3 segundos: 25 kA.
 - Intensidad dinámica nominal: 63 kA.

Para realizar el conexionado entre estas celdas necesitamos disponer de **embarrados y aparamenta** tales como las siguientes:

- Embarrados bipolares. Son pletinas de cobre redondeadas o conductores de cobre cilíndricos y con las siguientes características:
- Tensión nominal: 55 kV.
 - Intensidad nomina: 2.000 A.
 - Intensidad dinámica (3 s de cresta): 63 kA.
- Seccionador. Cuenta con las siguientes características técnicas:
- Tensión nominal: 55 kV.

- Intensidad nominal: 2.000 A.
 - Tensión de control: 125 V (C.C.).
 - Resistencia a corrientes de corta duración (3 s): 25 kA.
 - Resistencia a corrientes de corta duración (cresta): 63 kA.
 - Tensión del motor de accionamiento: 125 V (C.C.).
- Interruptor automático. De corte bipolar en SF6 con accionamiento motorizado. Además, deberá de disponer de un contactor, con contactos auxiliares para tareas de enclavamientos, supervisión y control, y cuyas características técnicas son las siguientes:
- Tensión nominal: 55 kV.
 - Intensidad nominal: 2.000 A.
 - Poder de corte: 25 kA.
 - Capacidad de corte de los interruptores en sucesivas desconexiones con una intensidad de cortocircuito de 25 kA y con una tensión de 55 kV: 20 veces la intensidad de cortocircuito.
 - Capacidad de corte de los interruptores en sucesivas desconexiones con el 20% de la intensidad de cortocircuito de 25 kA y con una tensión de 55 kV: 400 veces 0,2 por la intensidad de cortocircuito.
 - Capacidad de corte de los interruptores en sucesivas desconexiones con una intensidad de nominal de 2.000 A: 6.000 veces la intensidad nominal.

Zona de Acometida a Catenaria

La zona de acometida a la catenaria es el tramo de la línea dentro de la subestación desde las celdas de salida de protección y seccionamiento de la zona de 25 kV hasta el pórtico de salida a catenaria y feeders.

Como se ha comentado anteriormente, se denomina pórtico de feeders a la estructura metálica de tipo pórtico que hace de enlace entre la subestación de tracción y la línea de alimentación a la tracción ferroviaria, alojándose en la misma todos los conductores procedentes de la subestación (alimentación, feeders, retorno, etc.).

El pórtico de feeders se encuentra dentro del recinto de la subestación de tracción, y cerca superestructura ferroviaria.

En este tipo de subestación, el pórtico deberá poseer la siguiente aparamenta:

- Un seccionador bipolar de 2000 A, con doble apertura lateral y motorizado, con las siguientes características:
 - Tensión nominal: 52 kV.
 - Corriente nominal: 2.000 A.
- Dos autoválvulas de resistencia variable en óxido de zinc (ZnO) y con las siguientes características:
 - Tensión nominal: 45 kV.
 - Tensión máxima de operación continua (Uc): 36 kV.
 - Corriente asignada de descarga: 20 kA.
- Dos cadenas de aisladores con las siguientes características:
 - Tensión nominal: 52 kV.
 - Tensión soportada bajo lluvia: 105 kV.
 - Tensión soportada a impulsos tipo rayo: 250 kA.

Los pórticos para feeders y catenaria para subestación de tracción de corriente alterna son muy parecidos a los de corriente continua, teniendo una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.40.- Pórtico de catenaria y feeders para subestaciones de tracción en corriente alterna

Tipos de Relés de Protección

Dentro de la subestación de tracción se utilizan una serie de relés de protección según su función a desempeñar.

Por este motivo a continuación se reúnen, de forma general, todos los relés de protección existentes dentro de una subestación de tracción, y su correspondiente código ANSI, en la siguiente tabla:

CÓDIGO ANSI	DESCRIPCIÓN
2	Discordancia de polos
3	Vigilancia de circuitos de disparo
21	Protección de distancia o de impedancia
25	Comprobación de sincronización
26	Protección de temperatura alta
26 A	Alarma de temperatura alta
26 D	Disparo de temperatura alta
27	Mínima tensión
27 C	Mínima tensión de circuitos auxiliares
38	Control de temperatura
46	Desequilibrios de corriente
47	Desequilibrios de tensiones
49	Imagen térmica
50	Máxima corriente instantánea
50 BF	Fallo del interruptor de alta velocidad
50 N	Máxima corriente instantánea de neutro
50 S - 62	Fallo de interruptor
51	Máxima corriente temporizada
51 C	Sobreintensidad masa – cuba
51 N	Máxima corriente temporizada de neutro
59	Máxima tensión
63 TA	Bucholz transformador alarma
63 TD	Bucholz transformador disparo
63 RD	Bucholz regulador en carga disparo
64	Protección contra faltas a tierra
66 T	Disparo y bloqueo de protecciones del transformador
74	Desequilibrios de tensión
79	Reenganche
86	Disparo y bloqueo (función de cierre)
87 L	Protección diferencial de línea
87 T	Protección diferencial del transformador
90	Regulador de tensión automático

Tabla 4.29.- Tipos de relés de protección y su código ANSI

4.6.3.4.- Subestación de Tracción Móvil

Las subestaciones de tracción móvil son subestaciones de corriente continua en las que todos los elementos característico de la misma están alojados en una envolvente de formato contendedor, dispuesta dicha envolvente sobre una bancada, y en la que se puede mover a lo largo del trazado ferroviario gracias a una unidad de tracción que la remolca.

Las subestaciones de tracción móvil están destinadas a suministrar la energía eléctrica necesaria para alimentar las unidades de tracción en el caso de que se tenga que suplir alguna subestación de tracción que está siendo revisado o realizándosele alguna tarea de mantenimiento, así como en el caso de alguna incidencia en la vía, o la construcción de un nuevo trazado ferroviario.

Están alimentadas del circuito alimentación a las unidades de tracción a 25 kV a través del pantógrafo de la unidad de tracción, proporcionando una tensión de salida de 1,5 kV en corriente continua, y una tensión de 0,4 kV en alterna para servicios auxiliares.

Las dimensiones de las subestaciones de tracción móviles son: 11.958 mm de largo, 2.550 mm de ancho y 3.980 mm de altura. El peso de estas subestaciones está alrededor de los 25.500 kg.

Como características eléctricas de una subestación de tracción móvil se pueden nombrar las siguientes:

- Tensión nominal de aislamiento: 36 kV.
- Tensión nominal de alimentación: 25 kV.
- Frecuencia: 50 Hz.
- Potencia nominal del transformador de tracción: 2.250 kVA.
- Intensidad nominal del primario del transformador de tracción: 51,96 A.
- Potencia nominal del transformador de servicios auxiliares: 50 kVA.
- Intensidad nominal del primario del transformador de servicios auxiliares: 1,15 A.

- Potencia nominal del rectificador: 2000 kW.

Los componentes que conforman una subestación de tracción móvil son los siguientes:

- Un transformador de tracción.
- Un transformador de servicios auxiliares.
- Un equipo rectificador de doce pulsos.
- Dos salidas de feeder para alimentar a la catenaria.
- Equipo de comunicación, telemando y seguridad.
- Conjunto de baterías de 110 V en corriente continua.
- Cuadro de baja tensión.
- Máquina de climatización.
- Grupo de detección y extinción de incendios.
- Celas de seccionamiento, protección y medida.

La subestación de tracción tiene un aspecto tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.41.- Envoltente de la subestación de tracción móvil

Está fabricada con paneles de acero galvanizado de un grosor de 3 mm, con un recubrimiento de lana de roca para aislarla del calor (Clase A1) y aislarla acústicamente. Posee una puerta de acceso a los equipos debidamente señalizada.

Las subestaciones de tracción móviles se encuentran debidamente compartimentadas tal, y dimensionadas, como se muestra en la siguiente imagen:

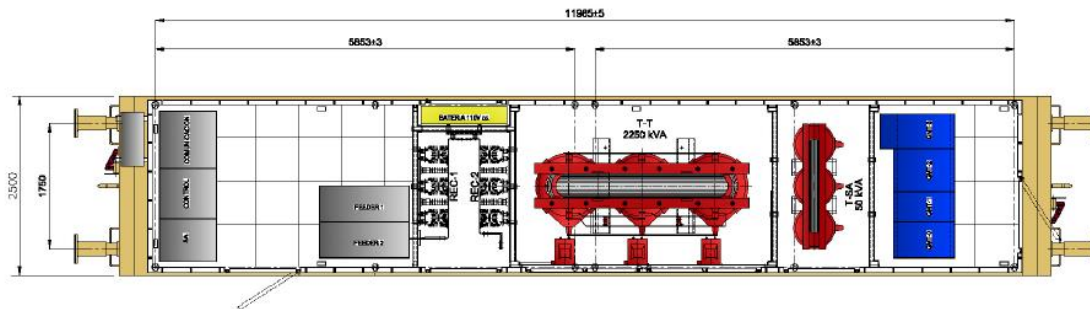


Ilustración 4.42.- Compartimentos de una subestación móvil

Las dimensiones, en el alzado, de una subestación móvil son tal y como se muestra en la siguiente imagen:

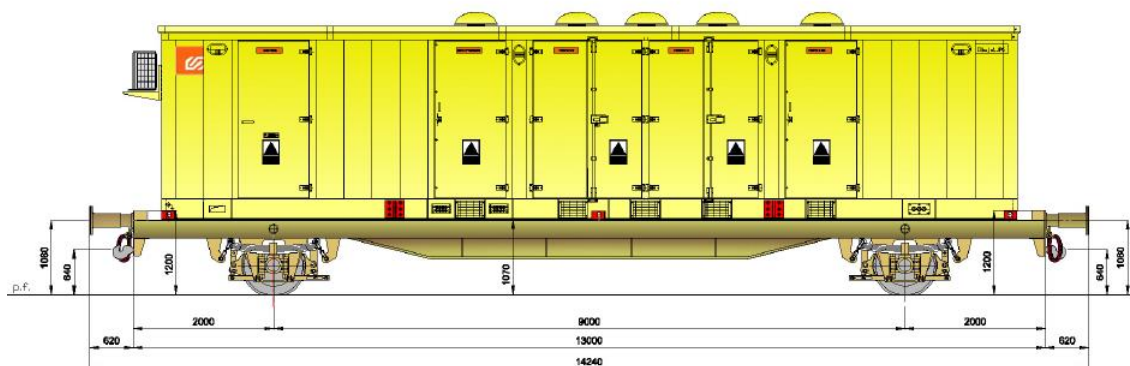


Ilustración 4.43.- Alzado de una subestación móvil

El compartimento del rectificador y de los transformadores tiene una forma como la de la siguiente imagen:



Ilustración 4.44.- Compartimento de rectificador y transformadores de una subestación de tracción móvil

El compartimento de las celdas de protección, seccionamiento y medida tienen la siguiente forma:



Ilustración 4.45.- Compartimento de seccionamiento, protección y medida de la subestación de tracción móvil

El compartimento que aloja a los dos feeders está formado por un disyuntor extrarápido extraíble, una placa de análisis de catenaria, un shunt de medida y protección y un controlador PLC para realizar las conmutaciones de control y protección. El compartimento de los feeders tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.46.- Compartimento de feeders de una subestación de tracción móvil



Ilustración 4.47.- Detalle del disyuntor extrarápido extraíble de las celdas de los feeders

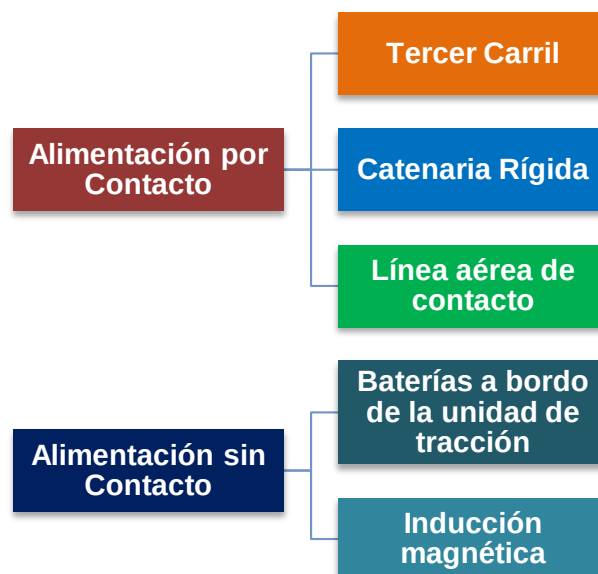
El compartimento de las baterías está compuesto por 84 baterías de 84 Ah, de una composición de Níquel – Cadmio ancladas a una bandeja de acero inoxidable tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 4.48.- Compartimento de las baterías de una subestación de tracción móvil

4.6.4.- Alimentación de la Tracción Eléctrica

La alimentación de la tracción eléctrica es una parte de la red eléctrica de tracción que hace referencia a cómo la unidad de tracción obtiene la energía eléctrica necesaria proporcionada por las subestaciones para su funcionamiento, pudiendo realizar la siguiente clasificación de los diferentes métodos que existen actualmente para alimentar las unidades de tracción:



4.6.4.1.- Alimentación por Contacto

Los sistemas de alimentación con toma de contacto son aquellos en los que la energía eléctrica se transfiere del circuito de alimentación a la unidad de tracción mediante un contacto físico entre los elementos de ambas partes destinados para la transferencia de energía eléctrica.

Tercer Carril

El sistema de alimentación del tercer carril es aquel en el que el conductor de alimentación es un carril alojado en una posición característica de la vía, provista del nivel de tensión suficiente como para alimentar la unidad de tracción. A su vez, la unidad de tracción esta provista de un patín encargado de captar la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

La tensión característica de este sistema de alimentación está en un rango de tensiones normalizadas entre 600 V y 750 V, cuyo uso está destinado a la alimentación de ferrocarriles metropolitanos.

El tercer carril tiene forma de perfil conductor, fabricado normalmente de acero o aluminio a. Este conductor está dispuesto a lo largo del trazado en una posición fija en la vía y a su vez aislado de tierra a través de un aislador de vidrio o porcelana.

Este tipo de alimentación se puede disponer sólo, siendo la única forma de alimentación a la unidad de tracción, o cómo complemento del sistema de alimentación mediante conductor aéreo, teniendo dos formas simultáneas de alimentación a la unidad de tracción, tal y como de un feeder de acompañamiento se tratase.

En la alimentación a través del tercer carril existen tres tipos de toma de corriente según la disposición espacial en el que captamos la energía eléctrica y podemos disponer el carril, y son los siguientes:

- **Toma superior.** En este caso el carril se dispone de tal manera que la captación de energía eléctrica se realiza por contacto de la

parte superior del tercer carril, a través de un patín conductor dispuesto en la unidad de tracción, siendo el efecto de la gravedad el encargado de mantener la unión física entre ambas partes.

- **Toma lateral.** El tercer carril está dispuesto de forma que la parte conductora del perfil del carril está dispuesta perpendicularmente al plano horizontal de la vía. En este caso, la captación de energía eléctrica por parte de la unidad de tracción se realiza a través de un patín provisto de amortiguadores o muelles que se encargan de mantener constante el contacto físico entre ambas partes cuando la unidad de tracción está en movimiento.
- **Toma inferior.** Esta forma de disponer el tercer carril se caracteriza por disponer la parte conductora del tercer carril paralelamente a la vía y boca abajo en dirección de la misma. Este tipo de toma de corriente posee un grado mayor de seguridad, en cuanto a accidentes eléctricos se refiere, a costa de un aumento en la complejidad de la instalación de dicho carril.

Los tipos de tomas del tercer carril se muestran en la siguiente ilustración a modo de ejemplificación:

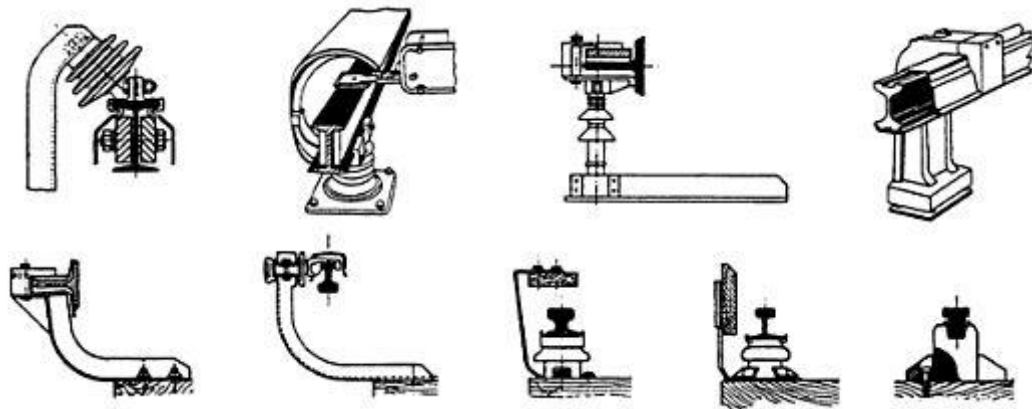


Ilustración 4.49.- Disposición de las tomas del tercer carril

Según la ficha informativa de Adif, el tercer carril es “una tecnología que compatibiliza la explotación de las dos vías en los dos anchos: convencional (1.668 mm) e internacional (1.435 mm) simultáneamente” y como ventaja adicional “permite velocidades superiores a 200 km/h en plena vía”.

Como inconvenientes cabe destacar se elevado coste de implantación de los aparatos de vías necesarios para su montaje debido a la cantidad de dichos elementos y su complejidad. También existe el inconveniente de la baja seguridad que proporciona para las personas, debido a que la toma de corriente se encuentra muy cerca de las vías, y esto puede originar accidentes de contactos directos.

Catenaria Rígida

El sistema de alimentación a través de una catenaria rígida está basado en el mismo principio de funcionamiento, donde el conductor de alimentación está ubicado sobre el material rodante, estando este dotado de un pantógrafo que hace la función de elemento captado de la energía. Está diseñado para tramos del trazado ferroviario con alimentación a través de pantógrafo donde el gálibo es reducido, como por ejemplo en túneles.

En este sistema, el conductor de alimentación esta formador por un conjunto de perfil – hilos de contacto unidas a través de bridas. Los perfiles tienen una forma de polígono invertido para optimizar la relación rigidez – peso propio, teniendo en su parte inferior un redondel donde se aloja el hilo de contacto.

Este conjunto de perfil – hilo de contacto se dispone anclado a parte superior de la superestructura a través de herrajes, soportes y aisladores que separan eléctricamente la parte conductora y la superestructura.

El perfil está fabricado en un acero dulce extruido, mientras que el hilo de contacto es un conductor de cobre uniforme con una secciones comerciales de 107, 120 o 150 mm². Por ejemplo, si el conductor de cobre elegido es el de 150 mm², con el perfil de aluminio sumarian una sección total de 1.558 mm².

Las características técnicas que debe tener dicho perfil se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Área de la sección del carril de aluminio	2.214 mm ²
Peso por metro lineal	5,8 kg
Carga de rotura	24 a 27 kg/mm ²
Límite elástico	17 a 20 kg/mm ²
Momento de inercia vertical	339 cm ⁴
Momento de inercia horizontal	113 cm ⁴
Momento resistente vertical	67,3 cm ³
Momento resistente horizontal	26,6 cm ³
Módulo de elasticidad	7.033 kg/mm ²
Coefficiente de dilatación	0,0000238
Resistividad del aluminio	0,0285 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Tabla 4.30.- Características del perfil utilizado en el sistema de catenaria rígida

Un ejemplo de este tipo de perfil con su hilo de contacto es el que se muestra en la imagen siguiente:

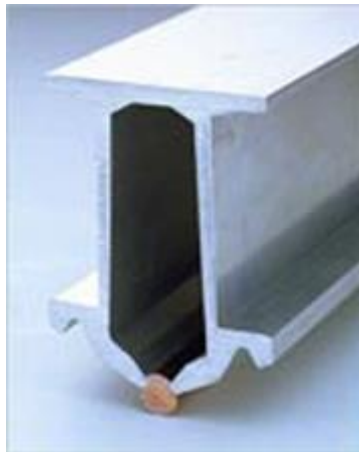


Ilustración 4.50.- Conjunto perfil – hilo de contacto del sistema de alimentación con catenaria rígida

Este conjunto de perfil – hilo de contacto se dispone anclado a parte superior de la superestructura a través de herrajes, soportes y aisladores que separan eléctricamente la parte conductora y la superestructura.

Para su montaje a lo largo de un tramo del trazado ferroviario, la catenaria rígida dispone de los siguientes elementos:

El **cantón** se define así al tramo que contiene a la unión rígida de varios perfiles con sus conductores, siendo la longitud máxima de un cantón de 492 metros, que equivalen a 41 perfiles unidos mecánicamente.

La **brida de toma de corriente** es un herraje cuyo objetivo es el de suministrar energía eléctrica al perfil mediante la conexión del perfil y el feeder, así como unir dos perfiles contiguos. Las bridas de toma de corriente tienen la siguiente forma:



Ilustración 4.51.- Brida de toma de corriente

La **brida de puesta a tierra** se utiliza para labores de mantenimiento de tramos del trazado ferroviario con este sistema de alimentación, donde esta brida conecta directamente a tierra la catenaria formada por el perfil y el conductor. Las bridas de puesta a tierra tienen la siguiente forma:



Ilustración 4.52.- Brida de puesta a tierra

Los **aisladores de sección** se encargan de separar eléctricamente dos cantones alimentados por feeders o conductores de alimentación diferentes.

El **punto fijo** se denomina al punto central del cantón en el que su movilidad deberá de ser nula y para ello se disponen en dicho lugar de herrajes que lo fijan a la superestructura. Los puntos fijos tienen la siguiente forma:



Ilustración 4.53.- Punto fijo

Las **juntas de dilatación** son elementos utilizados entre cantones para reducir el efecto de la dilatación que se origina en los materiales metálicos debidos al calor.

Los seccionamientos son zonas de transición de dos cantones del mismo trazado ferroviario. Para realizar dicha transición realizamos seccionamientos que consisten en disponer las dos catenarias de forma paralela. Los seccionamientos tienen la siguiente forma:

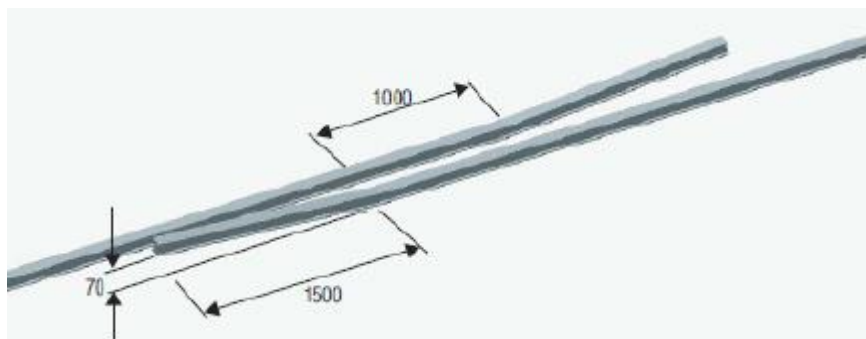


Ilustración 4.54.- Seccionamientos

Los soportes son un conjunto de herrajes y aisladores que tienen como objetivo mantener a la catenaria rígida a una altura constante para realizar una perfecta interacción entre el pantógrafo y la catenaria. Existen tres tipos diferentes: independientes, de tipo ménsula y de tipo barra. Los soportes tienen la siguiente forma:

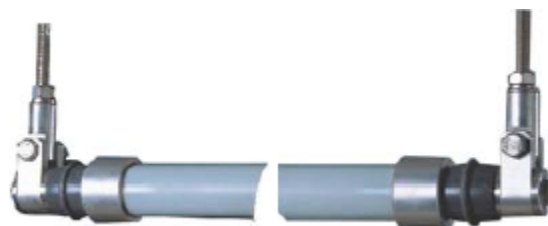


Ilustración 4.55.- Soporte de tipo barra

Los **descentramientos** hacen referencia a la distancia horizontal existente desde el eje central de la vía, estableciendo como una distancia de 200 milímetros a cada lado del eje central de la vía, con un máximo de 250 milímetros de descentramiento en un lado.

Las **agujas aéreas** son perfiles con conductores dispuestos de una vía a otra que tienen como objetivo mantener la alimentación eléctrica cuando el material rodante realiza un cambio de vía.

El **aislamiento** está formado por aisladores y su función es la de separar eléctricamente el circuito de alimentación del resto de elementos.

Está fabricado en vidrio o porcelana, y tienen una forma parecida a los aisladores utilizados en las instalaciones de alta tensión. Los aisladores utilizados en este sistema de alimentación tienen la siguiente forma:



Ilustración 4.56.- Aisladores

Los **puntos de transición entre la catenaria rígida y la línea aérea** de contacto se disponen cuando en un tramo del trazado ferroviario existen una línea aérea de alimentación y a continuación una catenaria rígida debido a un túnel o un paso a nivel, se deben disponer de las denominadas barras de transición que realizarán el cambio de un sistema de alimentación a otro.

En la siguiente imagen se muestra la transición realizada mediante barras de transición:



Ilustración 4.57.- Barras de transición

A continuación se muestran una serie de imágenes donde se puede apreciar algunos elementos que conforman este sistema de alimentación al material rodante y la disposición de las agujas aéreas en él:



Ilustración 4.58.- Catenaria rígida



Ilustración 4.59.- Catenaria rígida con aguja aérea en un túnel

Línea Aérea de Contacto

La línea aérea de contacto es otra forma de disponer los conductores de alimentación a través del trazado ferroviario para alimentar al material rodante como tranvías, ferrocarriles o trenes de alta velocidad. Este sistema está regido por la norma UNE – EN 50119, y que define el *sistema de línea aérea de contacto* como: *‘es la red de apoyo para proporcionar energía eléctrica a unidades de alimentación electromotrices’*. En dicha norma se define *línea aérea de contacto* como: *‘línea de contacto en la que los conductores están colocados por encima o al lado del límite superior del gálibo de los vehículos’*.

Este sistema está formado por los siguientes elementos:

- Apoyos de celosía metálica.
- Cimentaciones.
- Hilos de contacto.
- Sustentadores.
- Conductores de retorno.
- Feeders.
- Carriles conductores aéreos.
- Péndolas.

Un esquema de este tipo de alimentación a través de línea aérea de contacto se muestra en la siguiente imagen:

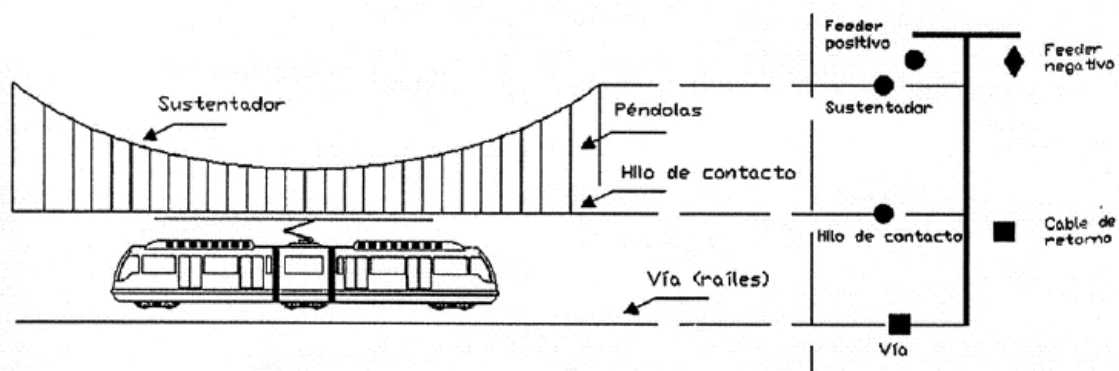


Ilustración 4.60.- Esquema del sistema de alimentación a través de línea aérea de contacto

De forma gráfica, este sistema de alimentación tiene los siguientes elementos, según el tipo de catenaria, que se muestran en las siguientes imágenes:

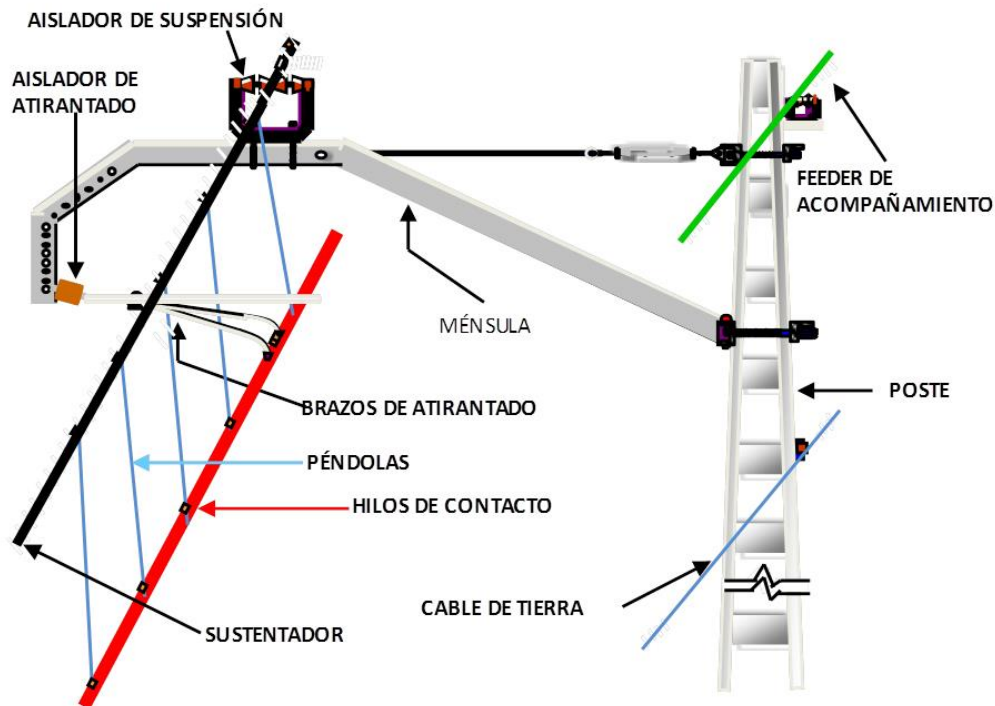


Ilustración 4.61.- Catenaria tipo CA – 160

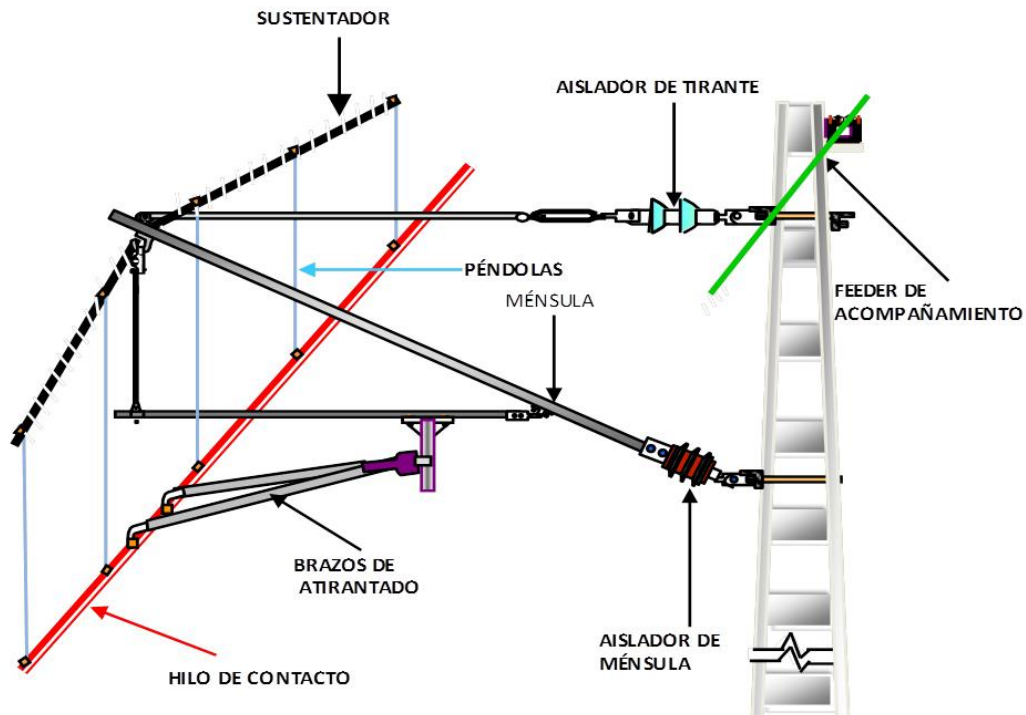


Ilustración 4.62.-Catenaria tipo CA – 220

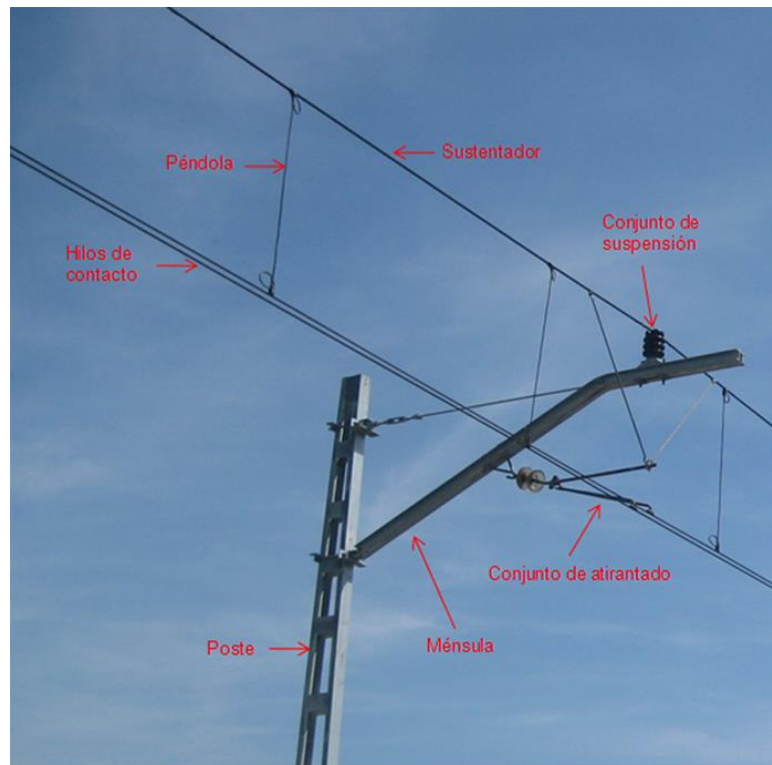


Ilustración 4.63.- Catenaria de ADIF tipo CA – 160

Las líneas aéreas de contacto las podemos clasificar en cuatro grandes grupos, que a su vez tendrán otra clasificación específica, y que son los siguientes:

- Por su composición:
 - Tranviaria. Se caracteriza por disponer de un solo hilo de contacto alojado directamente en los postes.



Ilustración 4.64.- Catenaria tranviaria

- Sencilla. Es la más común y se caracteriza por estar constituida por un sustentador, uno o dos hilos de contacto y péndolas.



Ilustración 4.65.- Catenaria sencilla

- Catenaria compuesta. Este tipo de catenaria se utiliza cuando es necesario aumentar la sección conductora total. Para ello, este tipo de configuración está formada por uno o varios sustentadores, conductores auxiliares, hilos de contacto y péndolas entre los conductores.

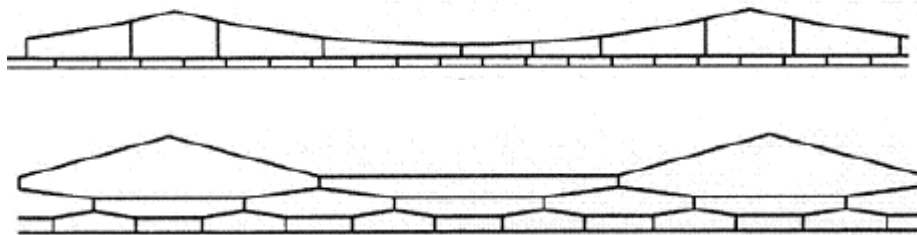


Ilustración 4.66.- Catenaria compuesta y tipo malla

- Por la disposición hilo de contacto – sustentador:
 - Recta y poligonal. Sustentador e hilo de contacto están sobre el mismo eje vertical
 - Trapezoidal. En este caso el sustentador hace de eje vertical, mientras que el hilo de contacto se va disponiendo más cerca y más lejos, alternativamente, del sustentador.

Este tipo de catenaria se utiliza en zonas donde existen fuertes vientos.

- Inclínada. En este tipo de catenaria, el sustentador se encuentra fijado a los apoyos, de forma que el hilo de contacto se queda desplazado verticalmente dependiendo de la tensión de los mismos.

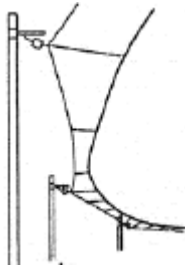


Ilustración 4.67.- Catenaria inclinada

- Por su tensión mecánica:
 - Sin compensación. En este tipo de catenaria, la tensión mecánica a la que se instalan los conductores no está regulada.

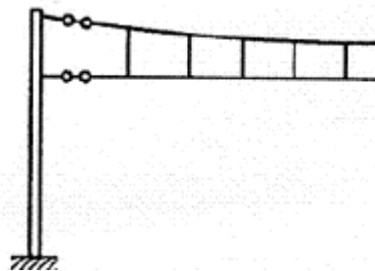


Ilustración 4.68.- Catenaria sin regulación

- Con compensación. Cuando se regula la tensión mecánica de conductores e hilo de contacto. Existen múltiples formas de compensar a la catenaria, dependiendo el elemento que deseemos tensar.

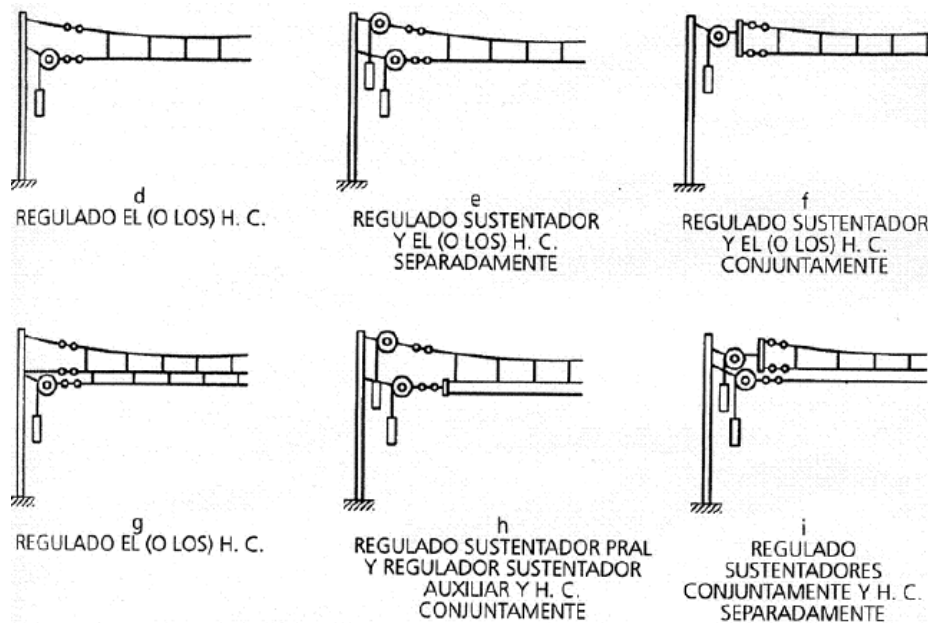


Ilustración 4.69.- Catenaria con compensación

- Por el tipo de corriente:
 - Catenaria de corriente alterna.
 - Catenaria de corriente continua.

Todos los elementos, y sus características, que conforman el sistema de alimentación por línea aérea de contacto son los siguientes:

El **hilo de contacto** es el elemento de la catenaria que se pone en contacto con el pantógrafo. Es un conductor ranurado verticalmente que se sustenta a través de las péndolas.

Las características técnicas que debe tener el hilo de contacto y su fabricación vienen reflejadas en la norma UNE – EN 50149 y la especificación técnica del administrador ferroviario (ADIF) ET 03.364.203.4: '*Hilo ranurado para línea de contacto*'.

Una configuración normalizada según la norma UNE – EN 50149 se muestra en la siguiente imagen:

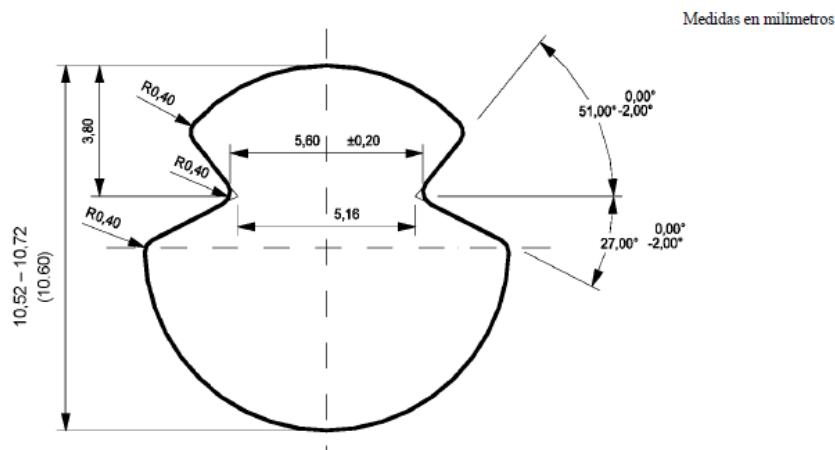


Ilustración 4.70.- Hilo conductor. Dimensiones normalizadas según la norma UNE – EN 50149

El **sustentador** es el conductor del sistema de la catenaria cuyas funciones son las de aumentar la sección conductora total (función eléctrica) y aguantar el peso del hilo de contacto a través de péndolas (función mecánica). Este conductor es de cobre y sus características técnicas deben estar de acuerdo con la especificación técnica (ADIF) ET 03.364.157.2: 'Conductores de cobre desnudos para electrificación'.

Los **feeders** son conductores cuyo objetivo es servir de apoyo al circuito de alimentación al material rodante. Los tipos de feeders que se pueden disponer en una catenaria son: feeders de acompañamiento, feeders negativos, feeders de retorno. Estos conductores están diseñados de acuerdo con la especificación técnica del administrador ferroviario de infraestructura (ADIF) ET 03.364.158.0.

El **conductor de tierra** es un conductor cuya función es la de derivar a tierra los defectos originados por perturbaciones de tipo atmosférico o defectos de aislamiento en el circuito de alimentación. Está dispuesto a lo largo del trazado ferroviario uniendo las partes metálicas de los apoyos de celosía metálica. Estos conductores están diseñados de acuerdo con la especificación técnica del administrador ferroviario de infraestructura (ADIF) ET 03.364.161.4: 'Cables desnudos de aluminio y de aluminio con alma de acero para líneas eléctricas aéreas'.

Las péndolas son elementos formados por herrajes cuyo objetivo es el de unir físicamente el sustentador con el hilo de contacto para mantener el hilo de contacto a una distancia constante del eje horizontal de la vía, así como distribuir el peso del hilo de contacto.

Existen dos tipos de péndolas: péndolas no equipotenciales y péndolas equipotenciales.

Las *péndolas no equipotenciales* tienen la función puramente mecánica, mantienen el hilo de contacto en una posición correcta y distribuye su peso a lo largo del tendido eléctrico.

Las *péndolas equipotenciales* se disponen en trazados ferroviarios de una alta densidad de tráfico o material rodante de alta velocidad, donde el hilo conductor y el sustentador deben de estar lo más próximos posible.



Ilustración 4.71.- Péndola no equipotencial



Ilustración 4.72.- Péndola equipotencial

Las **estructuras portantes** son todos aquellos elementos que se encargan de soportar todos los esfuerzos existentes en la catenaria. Las características técnicas de diseño de estos elementos vienen reflejadas en la especificación técnica de ADIF ET 03.364.101.0: *‘Estructuras metálicas para soporte de línea aérea de contacto’*.

Todos los estos elementos se enumeran en:

- Apoyos de celosía metálica.
- Ménsulas.
 - Celosía.
 - Tubulares.
 - Especiales.
- Pórticos:
 - Rígidos.
 - Funiculares.
- Herrajes auxiliares.
 - Crucetas.
 - Mensulillas.
 - Seccionadores. Este tipo especial de seccionador debe tener unas características técnicas según la especificación técnica de ADIF ET 03.364.150.7: *‘Seccionadores unipolares para instalación en exterior de 3 kV en corriente continua y de 25 kV en corriente alterna para catenaria’*.

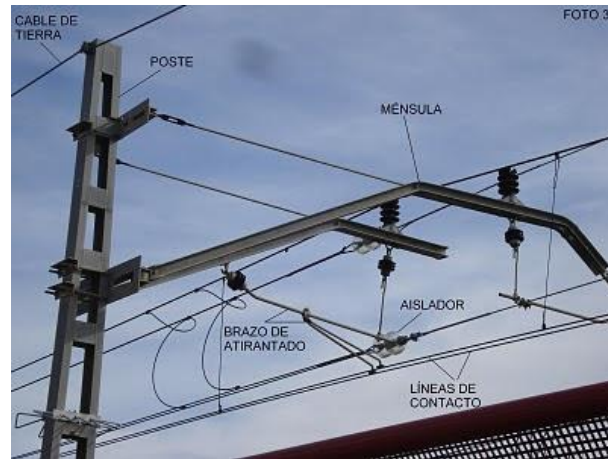


Ilustración 4.73.- Estructuras portantes

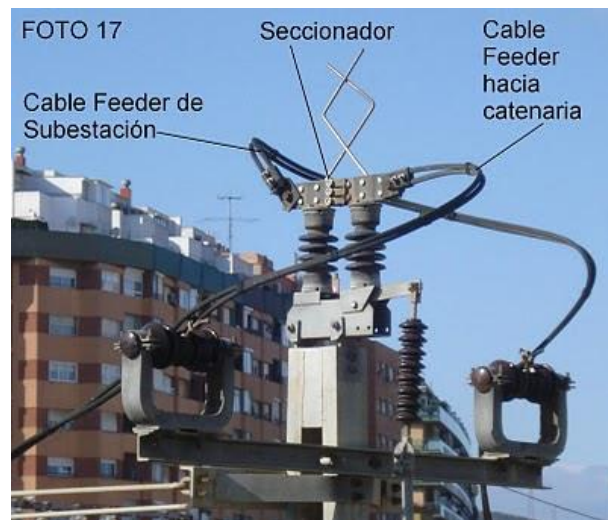


Ilustración 4.74.- Detalle del seccionador



Ilustración 4.75.- Pórticos

Las **cimentaciones** se denominan a los macizos de hormigón que se deben utilizar para anclar en el suelo los apoyos de celosía metálica que se utilizan a lo largo del trazado ferroviario.

Los **aisladores** son los elementos encargados de separar eléctricamente todos los conductores activos del circuito de alimentación, ya que son conductores desnudos, de tierra, de las estructuras portantes y de los herrajes.

Sus características técnicas deben estar de acuerdo con la especificación técnica (ADIF) ET 03.364.202.6: *'Aisladores compuestos para catenaria'*.

Los **conductores auxiliares** son cables que se utilizan para montar la línea aérea de contacto, como por ejemplo los fiadores de los seccionadores, los conductores de soporte de los contrapesos, los conductores para la regulación de la tensión mecánica, etc.

Sus características técnicas deben estar de acuerdo con la especificación técnica (ADIF) ET 03.313.002.2: *'Cables de acero para usos generales'*.

Los **herrajes** son todos aquellos elementos de fijación, tornillería y conexión como las grifas de conexión, grifas de suspensión, grifas de atirantado, grifas de empalme, grifas de amarre o grapa de anclaje.

Sus características técnicas deben estar de acuerdo con las especificaciones técnicas (ADIF): ET 03.364.502.9: *'Herrajes de acero para electrificación ferroviaria de alta velocidad'*; ET 03.364.503.7: *'Herrajes de fundición de aluminio para electrificación ferroviaria de alta velocidad'*; ET 03.364.200.0: *'Grapas de anclaje tipo cono'*; ET 03.300.180.1: *'Piezas de acero inoxidable'*; ET 03.364.004.6: *'Herrajes helicoidales preformados para electrificación'*.

En España, existen dos modelos de catenaria que se utilizan para montar las líneas de alimentación a materiales rodantes como ferrocarriles y trenes de alta velocidad (A.V.E.). Estos dos tipos de catenaria son los que propone el administrador de infraestructura ferroviaria española (ADIF) y son los siguientes:

- Modelo de catenaria CA – 160.
- Modelo de catenaria CA – 220.

Estos dos modelos tienen una forma tal y como se muestra en las siguientes imágenes:



Ilustración 4.76.- Modelo de catenaria CA – 160

El modelo de la imagen anterior se encuentra instalado en trazados ferroviarios como la línea Madrid – Guadalajara, la línea Madrid – Alcázar, líneas de cercanías de Madrid y Barcelona, etc.

A continuación se muestra una imagen con el modelo de catenaria CA – 220, que se encuentra instalado en trazados ferroviarios como la línea de alta velocidad del corredor del mediterráneo, la línea Valencia – Alcázar, etc.



Ilustración 4.77.- Modelo de catenaria CA – 220

Las características técnicas principales que tiene el modelo de catenaria CA – 160 que dicta el administrador de infraestructuras ferroviarias (ADIF) se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Velocidad de diseño	160 km/h
Composición del sustentador	Cobre 150 mm ²
Composición del hilo de contacto	Cobre 2 x 107 mm ²
Tensiones mecánicas en el sustentador	14.250 N
Tensiones mecánicas en el hilo de contacto	10.500 N
Altura del hilo de contacto	5,30 m
Altura total de la estructura	6,7 m
Descentramiento	± 20 cm
Longitud máxima del cantón	1.200 m
Vano máximo	60 m
Flecha máxima de los hilos de contacto	0,6 x vano / 1000
Ménsulas	Tipo celosía

Tabla 4.31.- Características técnicas del modelo de catenaria CA – 160

Las características técnicas principales que tiene el modelo de catenaria CA – 220 se muestran en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Velocidad de diseño	220 km/h
Composición del sustentador	Cobre 185 mm ²
Composición del hilo de contacto	Cobre - Plata 2 x 150 mm ²
Composición del feeder de acompañamiento	Cobre 240 mm ²
Tensiones mecánicas en el sustentador	24.750 N
Tensiones mecánicas en el hilo de contacto	18.750 N
Altura del hilo de contacto	5,30 m
Altura total de la estructura	6,7 m
Descentramiento	± 20 cm
Longitud máxima del cantón	1.200 m
Vano máximo	60 m
Flecha máxima de los hilos de contacto	0,5 x vano / 1000
Ménsulas	Tipo tubular

Tabla 4.32.- Características técnicas del modelo de catenaria CA – 220

4.6.4.2.- Alimentación sin Contacto

Los sistemas de alimentación sin contacto a las unidades de tracción se pueden definir como aquellos en las que no existe un contacto físico entre pantógrafo y catenaria para poderse abastecer de la energía necesaria lo largo del trazado ferroviario, como son la alimentación a través de baterías a bordo de la unidad de tracción y a través de inducción magnética, que permiten funcionamiento de la unidad de tracción. Con estos sistemas eliminamos las pérdidas por fricción generadas, así como la complejidad de la disposición de la alimentación y su tendido eléctrico.

Alimentación a través de Baterías a Bordo de la Unidad de Tracción

El sistema de alimentación a través de baterías a bordo de la unidad de tracción fue desarrollado por la compañía de trenes del este de Japón en el año 2011 para reducir el impacto ambiental que producían las unidades de tracción con motores diésel, para poder sustituirlas por unidades de tracción totalmente eléctricas y provistas de un conjunto de baterías.

La motivación de este desarrollo era el de alimentar a la unidad de tracción eléctrica en aquellos tramos del trazado ferroviario que no estaban electrificados, y sin utilizar un motor de combustión interna.

La siguiente imagen se muestra un esquema de los elementos de una unidad de tracción con baterías a bordo:

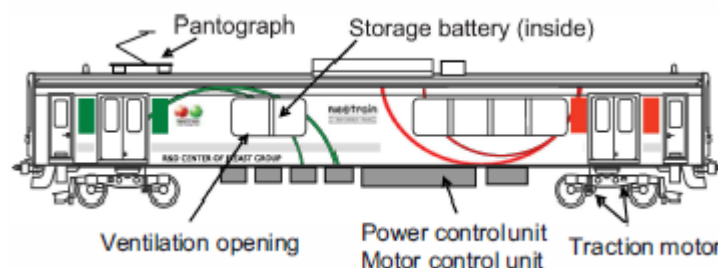


Ilustración 4.78.- Unidad de tracción con baterías a bordo

El funcionamiento de este sistema consiste en lo siguiente: mientras que el tren se encuentra en un tramo del trazado ferroviario electrificado o en una estación, la energía eléctrica suministrada se emplea para cargar las baterías

que se están a bordo, así como alimentar a los motores de tracción; ahora bien, cuando la unidad de tracción se encuentra en un tramo sin electrificar, las baterías que están a bordo son las encargadas de alimentar a los motores de tracción. De forma gráfica, el funcionamiento se muestra en la siguiente imagen:

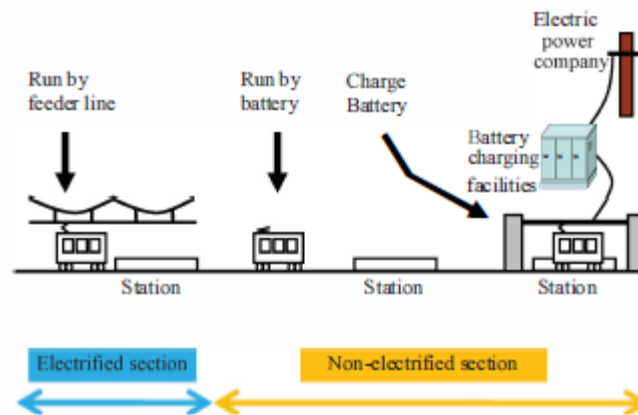


Ilustración 4.79.- Funcionamiento del sistema de alimentación con baterías a bordo de la unidad de tracción

De forma representativa, cuando la unidad de tracción se encuentra en una sección electrificada, el esquema eléctrico general de la distribución de la energía tiene el siguiente aspecto:

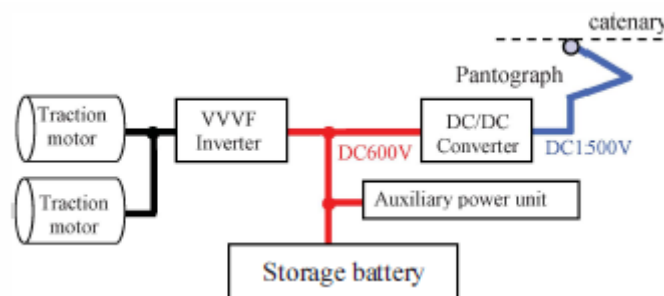


Ilustración 4.80.- Tramo electrificado

Como podemos observar en la imagen anterior, la unidad de tracción está alimentada a través del pantógrafo por una catenaria electrificada a 1.500 V en corriente continua.

Dicha corriente continua pasa por un convertidor que disminuye el valor de la tensión de alimentación a 600 V en corriente continua.

El convertidor alimenta a un inversor, al conjunto de baterías y a una unidad auxiliar de potencia.

La función del inversor es convertir la corriente continua que proviene de convertidor y transformarla en corriente alterna para alimentar a los motores de tracción de corriente alterna.

En el caso de que nos encontremos en un tramo que no se encuentre electrificado, el funcionamiento es como el que se muestra en la siguiente imagen:

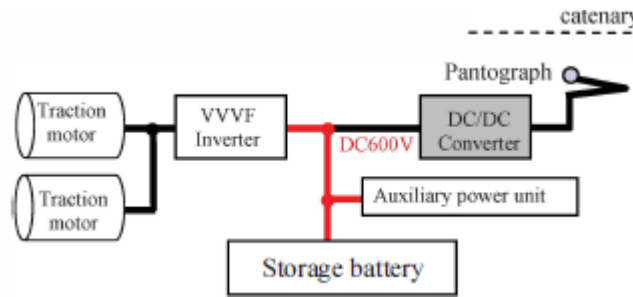


Ilustración 4.81.- Tramo no electrificado

Tal y como se observa en la imagen, en este caso, la unidad auxiliar de potencia y el conjunto de baterías son los que se encargan de alimentar el inversor a 600 V en corriente continua que a su vez, dicho inversor, se encarga de adecuar la energía eléctrica para alimentar a los motores de corriente alterna.

El tipo de baterías que se disponen están fabricadas de ion – litio, con una capacidad de almacenaje de 30 Ah. La capacidad total de las baterías instaladas en la unidad de tracción es de 72 kWh.

La carga de baterías también se realiza mediante el método del freno regenerativo, que aprovecha la energía generada cuando la unidad de tracción desciende cuando existe un desnivel en el trazado ferroviario.

En este caso, los motores de tracción funcionan como generadores, que a través del inversor, permiten cargar las baterías, aprovechando dicha energía potencial de una forma más ecológica.

Alimentación a Través de Inducción Magnética

El planteamiento de implantar la alimentación sin contacto surge de los problemas de mantenimiento originados en los métodos de alimentación por contacto, que al ser realizados a través de un contacto mecánico - eléctrico permanente, los elementos como los pantógrafos, la catenarias, el tercer carril, etc. hace que se vayan deteriorando muy rápidamente debido a deformaciones originadas por la fricción originada, y sobrecalentamientos por el alto valor de intensidad que debe circular a través de ellos, originando también 'chisporroteos' que amedrentan sus características de fábrica.

La alimentación a través de la inducción magnética se caracteriza por alimentar a las unidades de tracción a través del campo magnético creado por un conductor, y un elemento captador de dicho campo magnético a bordo de la unidad de tracción.

Estos dos elementos (generador de inducción magnética y receptor) deben estar separados entre sí a una determinada distancia, ya que la intensidad del campo magnético disminuye con la distancia según las leyes de la física eléctrica.

Existen dos variantes de esta forma de alimentación. La primera recibe el nombre de 'Aliss', y su principio de funcionamiento consiste en alimentar a través de inducción magnética con el principio explicado anteriormente, con la variante de ir alimentando tramos del trazado ferroviaria cada cinco metros a través de un sistema electrónico formado por IGBT que accionan el tramo a través de la detección por proximidad de la inductancia a bordo del material rodante.

De forma gráfica, el principio de funcionamiento de este sistema es tal y como se muestra en la siguiente imagen:

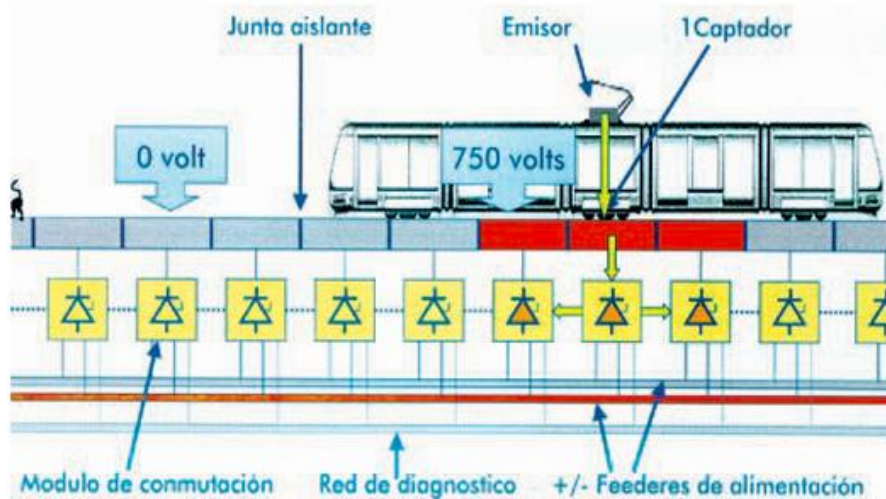


Ilustración 4.82.- Sistema Aliss

Otro sistema que forma parte de esta forma de alimentación es el sistema denominada 'Stream', donde su principio de funcionamiento se basa en disponer de un patín alojado en las vías del tren que genera el campo magnético necesario para la transferencia de energía mediante el fenómeno de la inducción, y a su vez se dispone de un elemento captador de dicho campo en la unidad de tracción.

El principio de funcionamiento queda representado en la siguiente imagen:

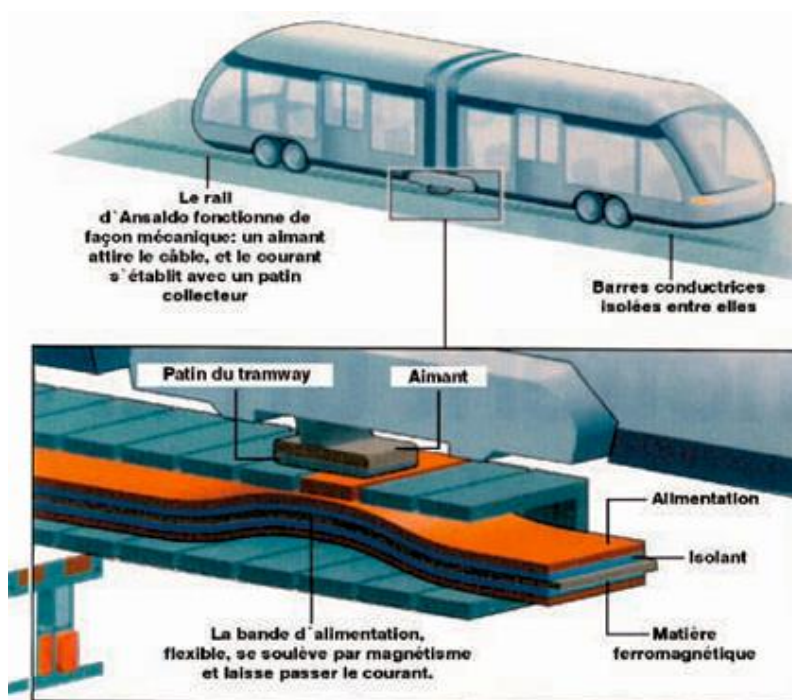


Ilustración 4.83.- Sistema Stream

4.6.5.- Circuito de Retorno y Puesta a Tierra

El circuito de retorno y la puesta a tierra son los últimos elementos que nos encontramos en la red eléctrica de tracción ferroviaria. El circuito de retorno lo forman los raíles (carril o riel) dispuestos sobre las traviesas de las vías. Son perfiles de acero extruidos y su función es la de retornar la corriente a la subestación que sale del material rodante a través de las ruedas, guiar a los vehículos y conducción del circuito de señalización (función eléctrica), además de soportar la carga del material rodante a su paso. De una forma gráfica se muestra el recorrido de la energía eléctrica entre el sistema de alimentación y el carril, en la siguiente imagen:

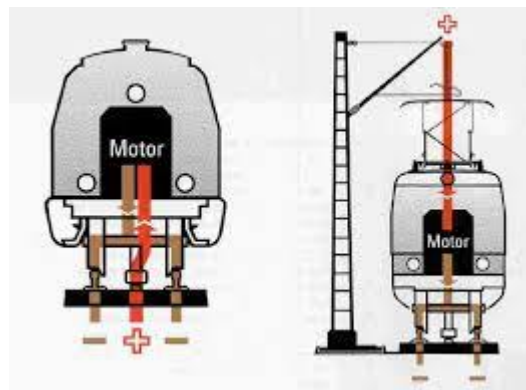


Ilustración 4.84.- Esquema de la función del carril como circuito de retorno

Estos carriles conductores se pueden fabricar en diferentes perfiles según el material rodante al que van destinados, y sus características de diseño tiene que estar acorde a la especificación técnica de ADIF ET 03.360.101.4: '*Carriles de acero no tratado*'.

Para realizar su conexión eléctrica se ha de cumplir lo expuesto en la especificación técnica de ADIF ET 03.364.005.3: '*Conexiones eléctricas de carriles*'. En esta especificación técnica se definen las características geométricas, mecánicas y eléctricas de dicha conexión.

El carril más utilizado tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

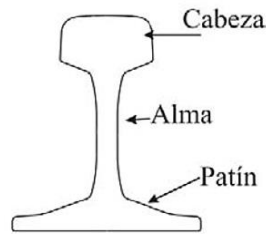


Ilustración 4.85.- Sección transversal del perfil del carril

También nos encontramos con los siguientes tipos de perfiles según el material rodante que circule sobre él (metro, tranvías, ferrocarril, alta velocidad, etc.) en la siguiente imagen:

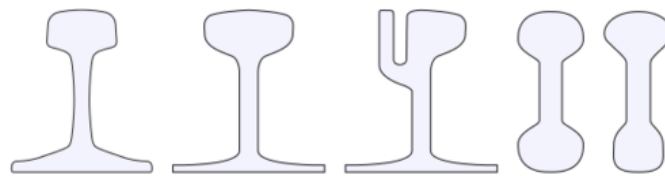


Ilustración 4.86.- Sección transversal de los carriles más utilizados en la infraestructura ferroviaria

La fabricación del carril es un proceso industrial que tiene las siguientes fases: fabricación del acero, laminación y acabado. Este proceso de fabricación sigue un proceso tal y como el que aparece en la imagen siguiente:

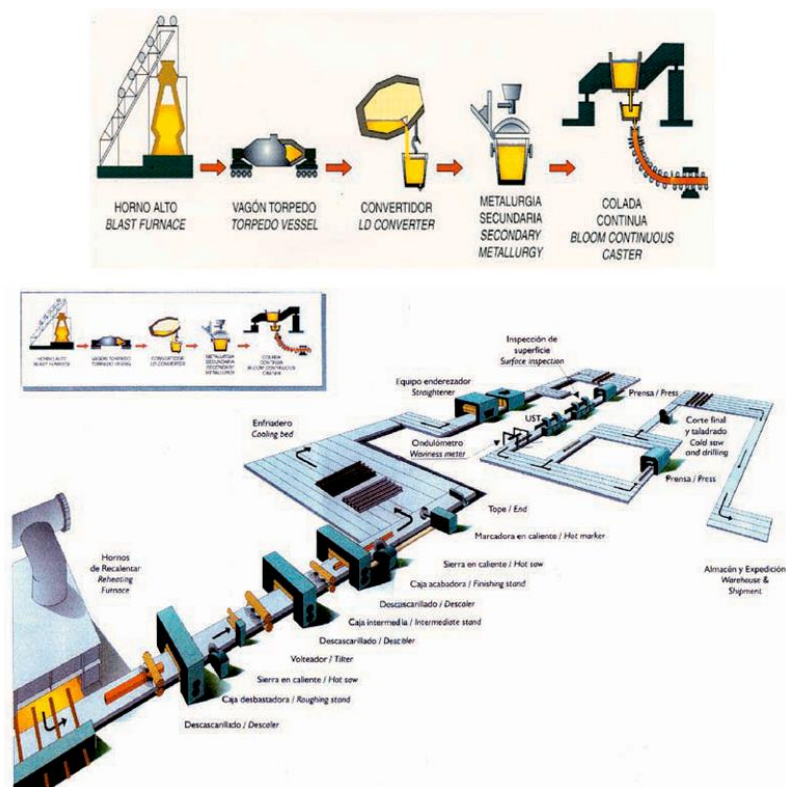


Ilustración 4.87.- Proceso de fabricación de los carriles

Como detalle del proceso, se muestra en la siguiente imagen el proceso de laminación que se lleva a cabo, ya que es en este proceso donde nuestro perfil adquiere la forma deseada.

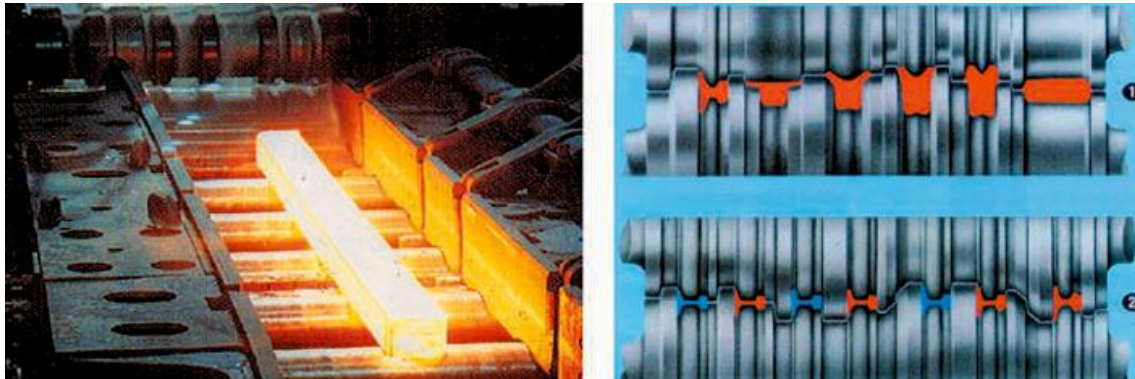


Ilustración 4.88.- Proceso de laminación del carril

En la imagen anterior se puede ver el proceso que sigue el bloque de acero recién forjado. Con el material aún caliente se van pasando por diversas laminadoras puestas una a continuación de la otra para y dándole forma con cada pasó a través de ellas.

Los circuitos de retorno y puesta a tierra deberán cumplir la siguiente serie de requisitos:

- El valor de la tensión de contacto no sobrepasen las tensiones de paso calculadas en el proyecto.
- El carril (o circuito de retorno) y la red e tierras de las subestaciones han de estar conectadas directamente en los sistemas de tracción en corriente alterna.
- El carril (o circuito de retorno) y la red e tierras de las subestaciones han de estar diseñadas según la norma UNE – EN 50122 - 2:2011 '*Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Seguridad eléctrica, puesta a tierra y circuito de retorno. Parte 2: Medidas de protección contra los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas de tracción de corriente continua*' para los sistemas de tracción de corriente continua.
- Toda la aparamenta conectada al carril ha de cumplir la norma UNE – EN 50124 – 1 '*Aplicaciones ferroviarias. Coordinación de*

aislamiento. Parte 1: Requisitos fundamentales. Distancias en el aire y líneas de fuga para cualquier equipo eléctrico y electrónico'.

- Los puestos de seccionamiento y la aparamenta deberán eliminar por completo la corriente de defecto originada en el carril.

Debido a la característica de la corriente, los circuitos de retorno y puesta a tierra se pueden clasificar en:

- Circuito de retorno y puesta a tierra en corriente alterna.
- Circuito de retorno y puesta a tierra en corriente continua.

Circuito de Retorno y Puesta a Tierra en Corriente Alterna

Los circuitos de corriente alterna difieren de los de corriente continua en una mayor caída de tensión entre el carril y la puesta a tierra en corriente alterna debido a que sus trazados ferroviarios son más largos, el material rodante que tracción es de mayor potencia y el valor de la tensión es también mayor.

Por este motivo, en el caso de que nuestro sistema de tracción eléctrica sea de corriente alterna, se deberá conectar eléctricamente el carril, con la red de tierras de todas las instalaciones cercas y de la propias subestaciones de tracción con el fin de reducir esta caída de tensión.

A continuación se muestra un esquema de conexión donde la línea de color rojo representa el circuito de retorno y la puesta a tierra de cada uno de los elementos eléctricos que conforman este sistema eléctrico:

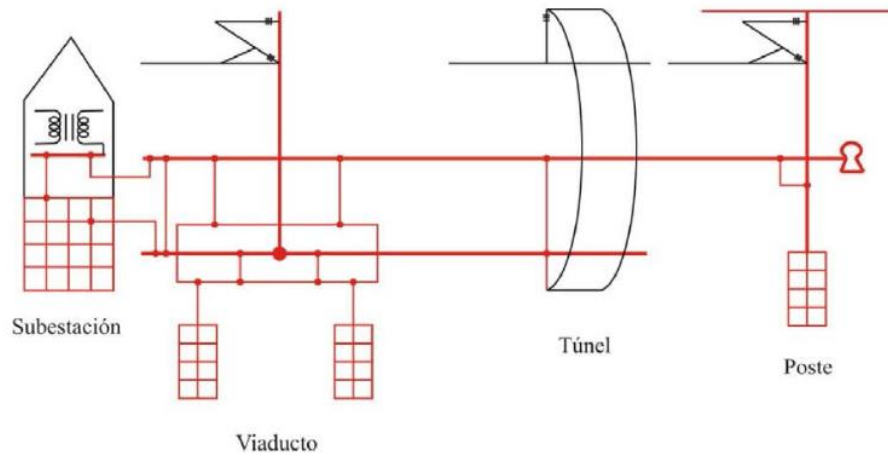


Ilustración 4.89.- Circuito eléctrico del circuito de retorno y la puesta a tierra en los sistemas de corriente alterna

Circuito de Retorno y Puesta a Tierra en Corriente Continua

En el caso de los sistemas eléctricos de tracción en corriente continua, debido a los elementos electrónicos dispuestos en la vía, se generan corrientes vagabundas que circulan por todos los circuitos.

Para reducir este fenómeno, en este caso, el conductor de retorno (o carril) y la red de tierras del sistema eléctrico se encuentran totalmente aislados eléctricamente con el fin de aumentar la resistencia eléctrica del circuito de tierra y limitar la corriente que se pierde a través del terreno, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

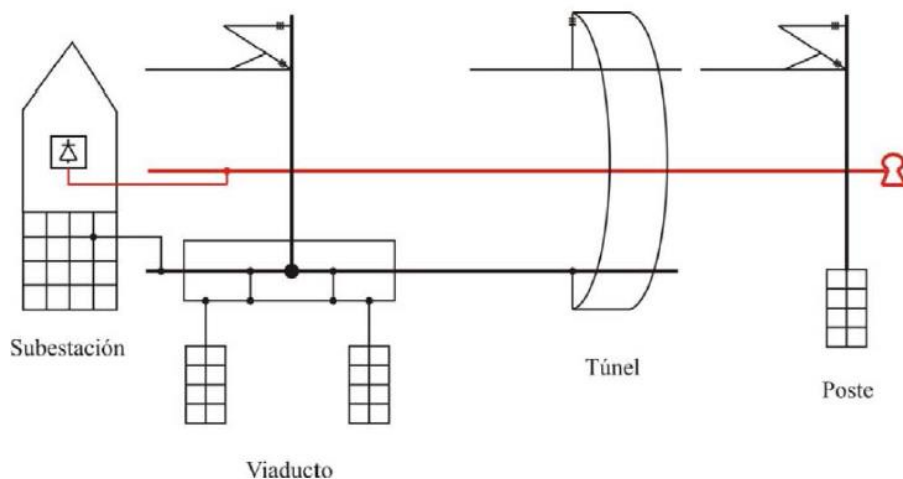


Ilustración 4.90.- Circuito eléctrico del circuito de retorno y la puesta a tierra en los sistemas de corriente continua

CAPÍTULO 5:

MOTORES DE

TRACCIÓN

CAPÍTULO 5.- MOTORES DE TRACCIÓN

	<i>Página</i>
5.1.- Introducción	147
5.2.- Clasificación de las Máquinas de Tracción.....	147
5.3.- Componentes de las Máquinas de Tracción	148
5.4.- Técnicas de Tracción	153
5.4.1.- Técnica Reostática	153
5.4.2.- Técnica Chopper	155
5.4.3.- Técnica Trifásica.....	157
5.4.4.- Técnica de la Levitación Magnética	160
5.5.- Normativa de Diseño de los Motores de Tracción para Aplicaciones Ferrovias	164
5.6.- Motores de Tracción Comerciales y Material Rodante. Características Técnicas.....	165
5.6.1.- Motores de Tracción para Tranvías	166
5.6.2.- Motores de Tracción para Metros	167
5.6.3.- Motores de Tracción para Cercanías	169
5.6.4.- Motores de Tracción para Ferrocarriles	171
5.6.5.- Motores de Tracción para Trenes de Alta Velocidad.....	173

5.1.- Introducción

Este capítulo tiene como objetivo realizar una clasificación del material rodante existente en la actualidad, así como describir las técnicas de tracción que se utiliza, describir las características técnicas de los motores de tracción comerciales y los componentes que conforman el circuito eléctrico de las máquinas de tracción.

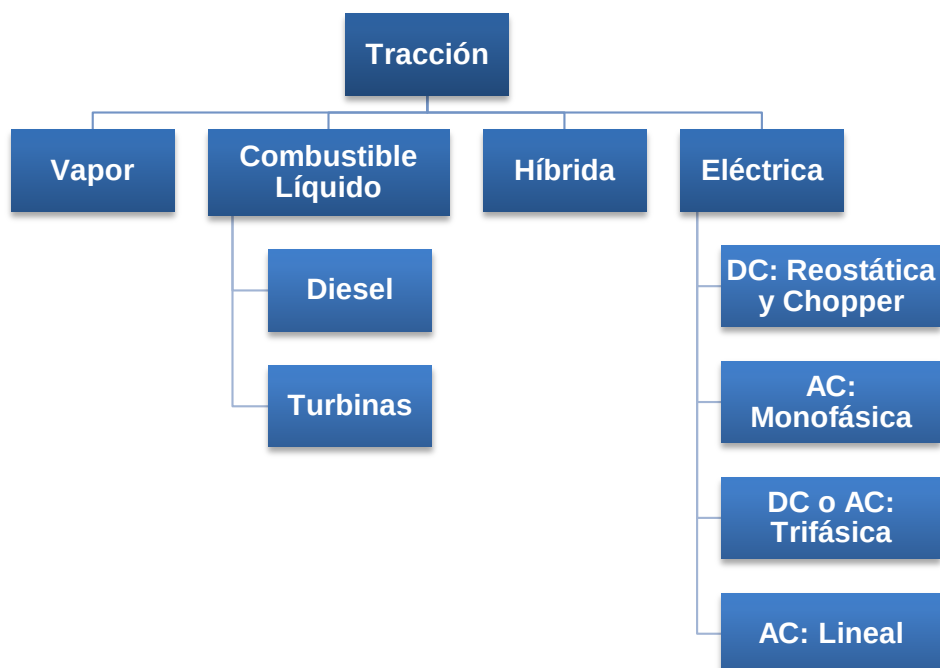
Hoy en día existe una tendencia a ir sustituyendo el material rodante de tracción por combustibles fósiles por los de tracción eléctrica e híbridos. Debido a la disminución de estos materiales se están buscando formas alternativas y eficientes de tracción.

5.2.- Clasificación de las Máquinas de Tracción

Existen muchos tipos de clasificaciones para el material rodante por el cual se identifican a las unidades de tracción.

Como punto de partida para este capítulo se realiza una clasificación de las unidades de tracción desde el punto de vista energético.

Las máquinas de tracción se pueden clasificar según el tipo combustible que el motor necesite para realizar la tracción del convoy, cómo:



5.3.- Componentes de las Máquinas de Tracción

Cada material rodante está provisto de una serie de elementos eléctrico que hacen posible su funcionamiento. Estos elementos eléctricos están dispuestos en un lugar concreto del circuito eléctrico general, siendo el esquema eléctrico general de una unidad de tracción el que se muestra a continuación:

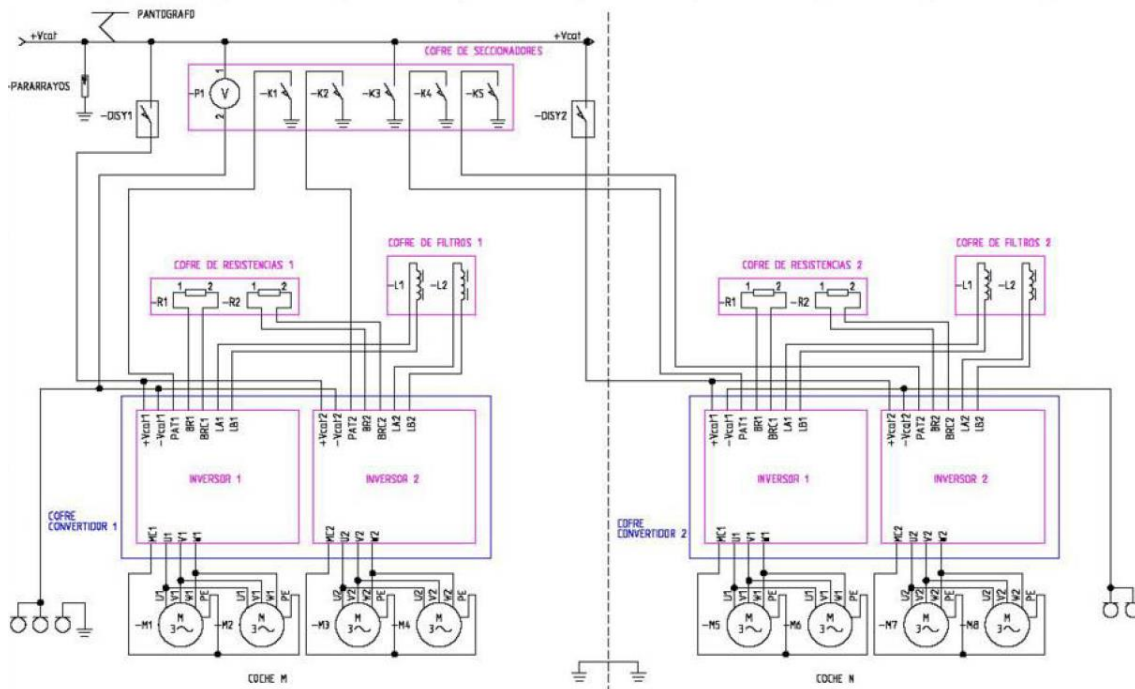


Ilustración 5.1.- Esquema eléctrico general de una unidad de tracción

De una forma más gráfica, el esquema del circuito eléctrico de una unidad de tracción tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

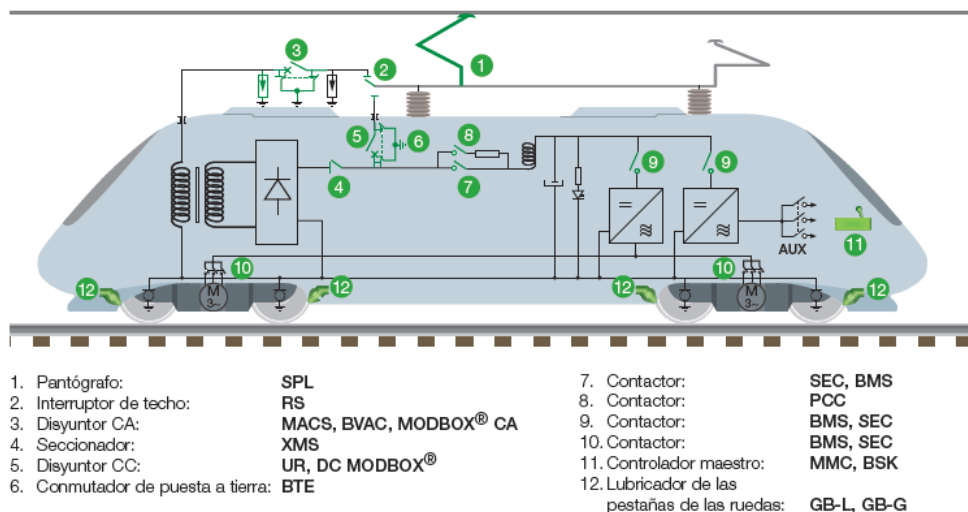


Ilustración 5.2.- Esquema eléctrico y componentes de una unidad de tracción

El primer elemento eléctrico que nos encontramos en el esquema eléctrico es el **pantógrafo**, y su función es la de captar la energía proveniente de la catenaria para suministrar la energía necesaria al circuito eléctrico a través de un mecanismo neumático. Las características técnicas de este elemento han de estar acorde con las normas UNE – EN 50126 y UNE – EN 61373.

El pantógrafo alojado en la unidad de tracción tiene una forma tal y como se muestra en la imagen siguiente:

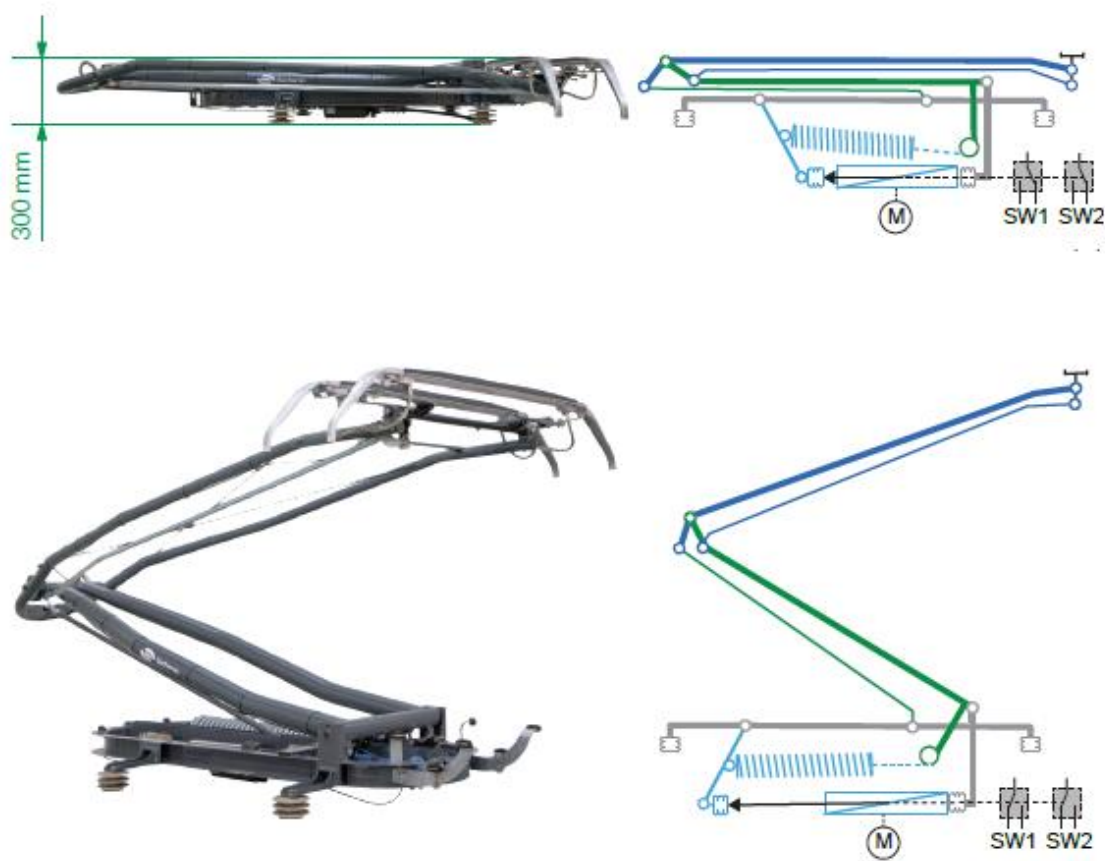


Ilustración 5.3.- Pantógrafo

El siguiente elemento que nos encontramos es el **pararrayos** y su función es la de proteger contra perturbaciones de tipo atmosférico u originadas en el circuito de la catenaria.

La forma que tiene un pararrayos que se instala en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.4.- Pararrayos a bordo de la unidad de tracción

Conectado en paralelo al pararrayos nos encontramos con el **disyuntor**, cuyo objetivo es separar eléctricamente, en carga, el circuito interno de la unidad de tracción frente a cortocircuitos o sobrecargas exteriores.

Los disyuntores se alojan en un dispositivo encofrado, y la forma que tiene un disyuntor que se instala en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.5.- Disyuntor a bordo de la unidad de tracción

A su vez, conectado también en paralelo al pararrayos y al disyuntor nos encontramos con el **cofre seccionador**, cuyo objetivo es conectar a tierra el circuito eléctrico de tracción, en vacío, para labores de maniobra y reparación.

La forma que tiene un seccionador que se instala en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.6.- Seccionadores a bordo de la unidad de tracción

Siguiendo el circuito, el siguiente elemento que nos encontramos es el **filtro de red**. El filtro de red consiste en una bobina y un condensador en resonancia con el fin de eliminar una corriente armónica según la frecuencia de resonancia diseñada.

La forma que tiene un filtro de red que se instala en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.7.- Filtro de red a bordo de la unidad de tracción

En este circuito también se aprecian las **resistencias de frenado**, que son resistencias eléctricas cuyo objetivo es disipar la energía cinética generada en el frenado de la unidad de tracción en forma de calor y estabilizar la tensión. Existen dos disposiciones para este elemento, y son: en el techo o debajo del bastidor.

La forma que tienen las resistencias de frenado que se instalan en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.8.- Resistencia de frenado a bordo de la unidad de tracción.

Además del convertidor de tracción, que se explicará más detalladamente en el siguiente capítulo, encontramos el elemento que proporciona el movimiento necesario a la unidad de tracción, y es el **motor de tracción**.

Está alojado en el bogie, y se disponen de cuatro motores por bogie (uno por cada rueda). En los siguientes apartados se describirá más técnicamente este elemento y se mostraran las características técnicas más relevantes de los motores de tracciones que se utilizan en el material móvil actual.

La forma que tiene un motor que se instala en el material rodante se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.9.- Motor eléctrico de tracción ferroviaria a bordo de la unidad de tracción

Al igual que otros motores industriales, los utilizados para tracción ferroviaria pueden ser de los siguientes tipos:

- Motores de corriente continua.
- Motores asíncronos de corriente alterna.
- Motores síncronos de corriente alterna.

5.4.- Técnicas de Tracción

En este apartado se van a describir cada una de las técnicas de tracción que podemos encontrarnos en la tracción eléctrica actual, enumerándolas en las siguientes:

- Técnica reostática.
- Técnica Chopper.
- Técnica trifásica.
- Técnica de la levitación magnética.

5.4.1.- Técnica Reostática

La técnica reostática se considera una técnica precursora a los sistemas actuales de control de los motores de tracción, ya que esta técnica fue la primera que se desarrolló en la tracción eléctrica ferroviaria.

Está destinada al control y regulación de los motores de corriente continua, que tienen una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

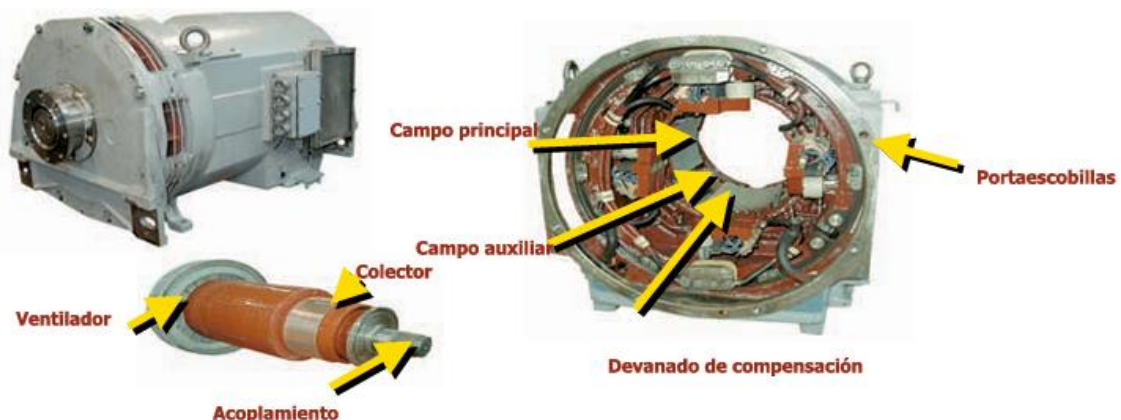


Ilustración 5.10.- Motor de tracción eléctrica ferroviaria de corriente continua

Los motores de corriente continua los podemos encontrar actualmente en materiales rodantes como tranvías o metros.

Esta técnica de control está formada por resistencias reostáticas, contactores y relés cuyo funcionamiento está formado por dos pasos: el primer paso es el de arranque, y el segundo paso es el de marcha. Cada unidad motora posee en su bogie cuatro motores eléctricos.

En el primer paso, el esquema eléctrico es el siguiente:

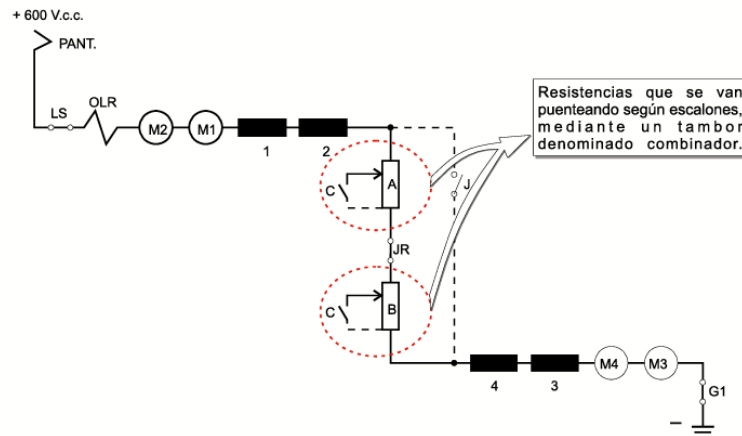


Ilustración 5.11.- Esquema del arranque de la unidad de tracción en la técnica reostática

Tal y como se aprecia en el esquema anterior, en el arranque se disponen en serie los motores de corriente continua serie con dos reóstatos, A y B, con el objetivo de regular la tensión en bornes de los motores para una puesta en marcha de la unidad de tracción de forma lenta y continua.

Una vez alcanzada la velocidad de marcha, realizamos una conmutación a través del contacto 'J' para conectar los motores en paralelo de dos en dos, tal y como se muestra en el siguiente esquema eléctrico:

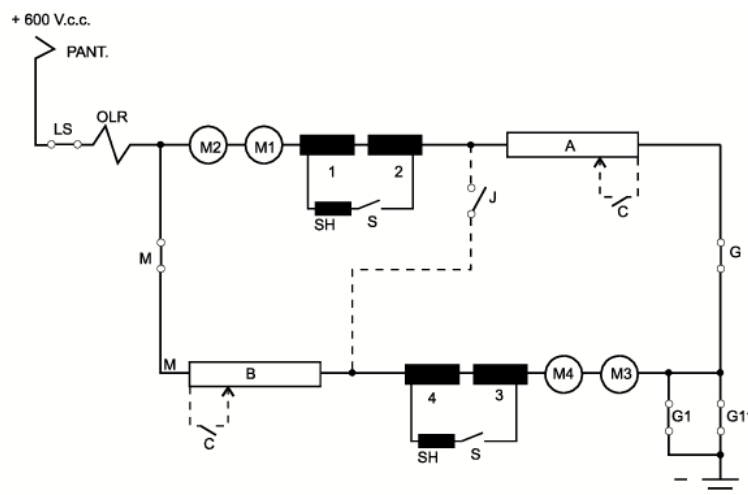


Ilustración 5.12.- Esquema de la marcha de la unidad de tracción en la técnica reostática

Con este esquema se consigue alimentar a los dos ramas con los motores de la misma forma, pudiendo equilibrar la tensiones con los reóstatos ubicados en cada rama.

5.4.2.- Técnica Chopper

La técnica de control de la unidad de tracción a través de un chopper surgió con el desarrollo de dispositivos electrónicos de potencia, ya que la técnica reostática que se utilizada tiene unos consumos energéticos muy elevados debido a que la energía disipada en las resistencias.

La técnica chopper, al igual que la reostática, está destinada al control de unidades de tracción con motores de corriente continua. El chopper, o troceador, es un dispositivo electrónico compuesto de tiristores, y su esquema básico se muestra en la siguiente imagen:

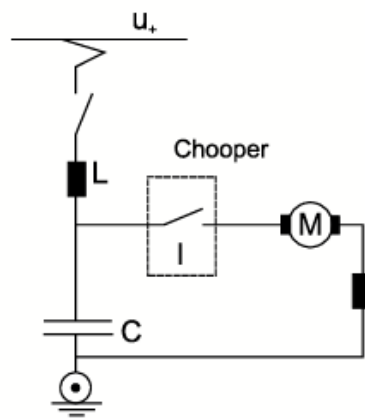
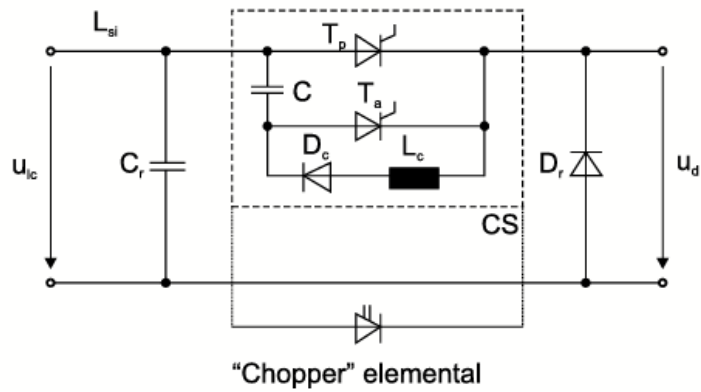


Ilustración 5.13.- Esquema eléctrico de la técnica con choppers

El chopper, o troceador, funciona como un interruptor que se abre, o cierra, a unas determinadas frecuencias (2/3 Hz y 250 Hz) con el fin de alimentar al motor eléctrico mediante pulsos de energía eléctrica. El chopper comienza con pulsos de corriente de corta frecuencia para ir accionando el motor, para, posteriormente, ir aumentando la frecuencia del pulso para terminar con alimentar al motor de forma continuada.

El esquema eléctrico de un chopper se muestra en la siguiente imagen:



T_p = Tiristor
 T_a = Tiristor de apagado
 D_c = Diodo de circulación
 D_r = Diodo de rueda libre

Ilustración 5.14.- Esquema eléctrico de un chopper

Actualmente, en la fabricación de los choppers se utilizan tiristores del tipo GTOs o IGBTs. El esquema eléctrico de una unidad de tracción que está basada en esta técnica de control es el que se muestra en la siguiente imagen:

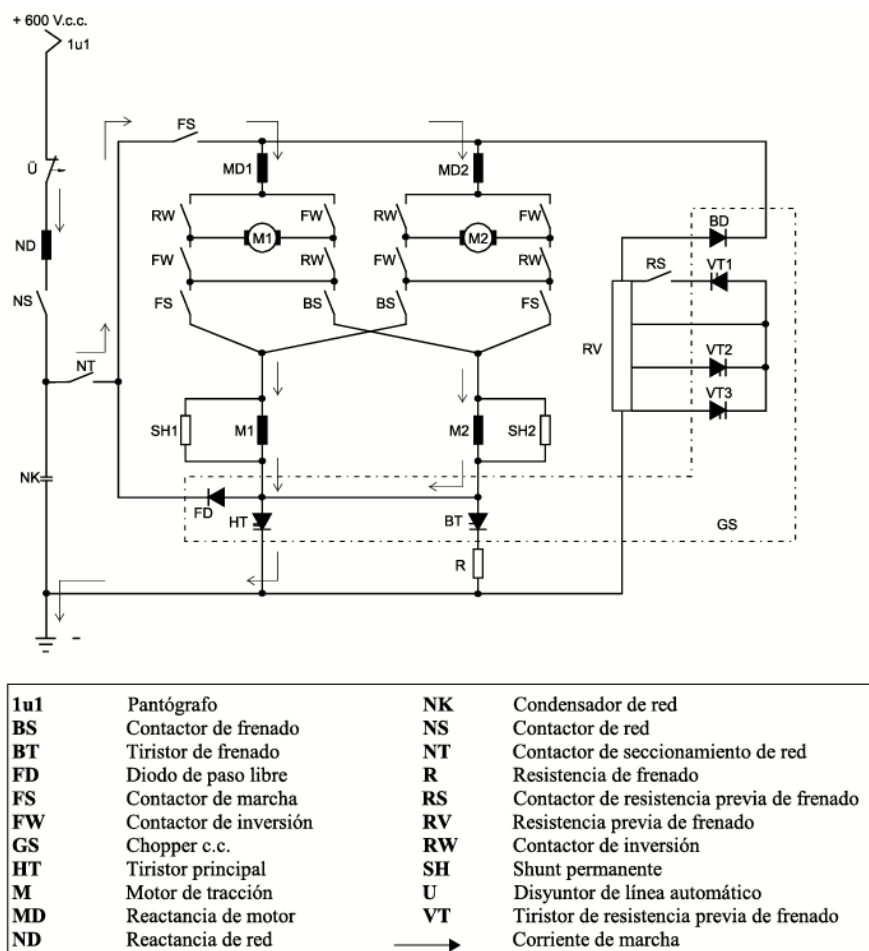


Ilustración 5.15.- Esquema eléctrico general de una unidad de tracción basada en el control a través de choppers

Con esta técnica, se posibilita el uso de freno regenerativo, aprovechándose la energía de frenado que se liberaba en las resistencias de frenado. El frenado regenerativo se consigue gracias a que el chopper obtiene la información necesaria del condensador del circuito (**NK**) a través del valor de la tensión en bornes, para poder reconducir la energía eléctrica hacia el circuito de alimentación.

5.4.3.- Técnica Trifásica

La técnica trifásica hace referencia al control y regulación de los motores trifásicos utilizados en el material rodante. La alimentación que realiza el material rodante es en corriente continua o alterna a alta tensión monofásica, para poder alimentar y regular los motores de tracción se disponen en el material rodante de dispositivos electrónicos para, o bien, convertir la corriente continua en corriente alterna trifásica, o reducir el valor de la tensión de alimentación para poder alimentar a los motores trifásicos, así como regular la velocidad de los mismos.

Esta técnica tiene dos variantes, cuyo fin es el de alimentar y regular a los motores de corriente alterna trifásicos dispuestos en el material rodante, y que se enumeran a continuación:

- **Catenaria en corriente continua.**
- **Catenaria en corriente alterna de tensión elevada.**

La técnica trifásica de en el caso de la **alimentación al material rodante en corriente continua** tiene como objetivo alimentar a los motores trifásicos cuando la alimentación se realiza en corriente continua. Para poder alimentar a los motores en corriente alterna trifásica se ha de disponer de un chopper alimentado desde la catenaria de corriente continua con el mismo fin que la técnica chopper, la de regular la velocidad del motor trifásico a través de pulsos eléctricos de frecuencias ascendentes, a continuación de este si dispone de un ondulator (o rectificador) cuya función es la de transformar la corriente continua en corriente alterna trifásica para poder alimentar al motor. Por lo

tanto, hemos de disponer de un chopper que se encarga de regular al motor, y de un rectificador para modificar la energía eléctrica.

El diagrama de bloques de esta técnica a través de choppers y rectificadores se muestra en la siguiente imagen:

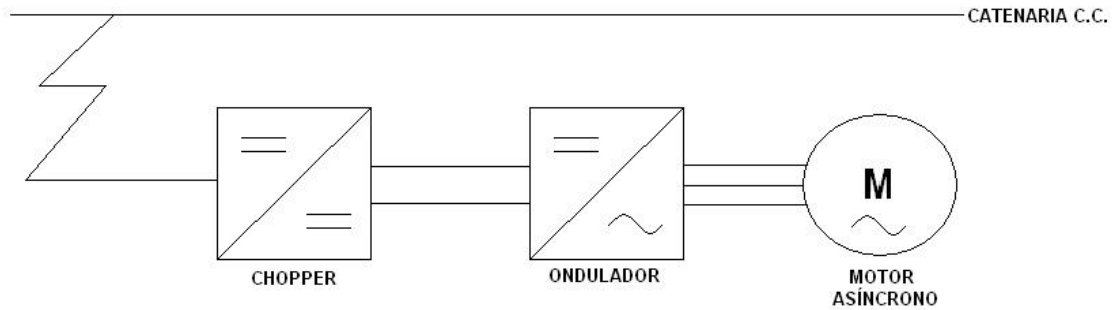


Ilustración 5.16.- Diagrama de bloques de la técnica de regulación trifásica con alimentación en corriente continua

El esquema eléctrico general de esta técnica a través de onduladores de corriente se muestra en la siguiente imagen:

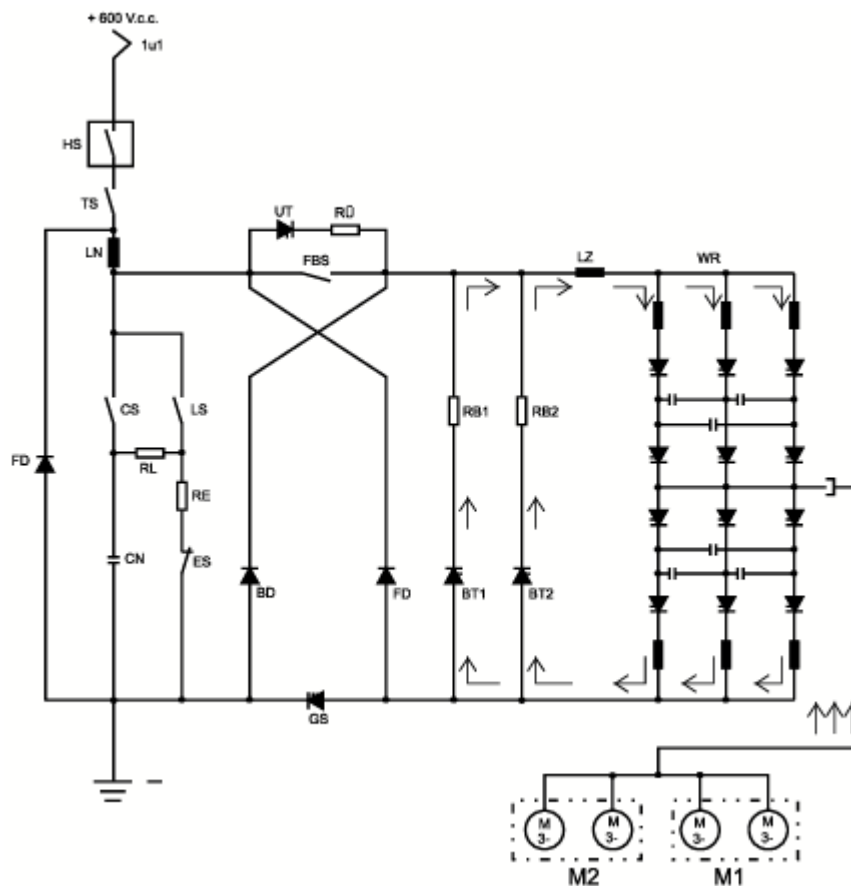


Ilustración 5.17.- Esquema eléctrico general de la regulación trifásica con onduladores de corriente

Cuya leyenda se recoge en la siguiente imagen:

1u1	Pantógrafo	LZ	Reactancia de circuito intermedio
BD	Diodo de frenado	M1-M2	Motor doble
BT1-BT2	Tiristor de frenado	RB1-RB2	Resistencia de frenado
CN	Condensador de red	RE	Resistencia de descarga condensador
S	Contactador de condensador	RL	Resistencia de carga condensador
ES	Contactador de descarga condensador	RÜ	Resistencia de puenteo
FBS	Contactador de marcha y frenado	TS	Contactador de seccionamiento de red
FD	Diodo de paso libre	UT	Tiristor de puenteo
GS	Chopper	WR	Ondulador seguimiento fase
HS	Disyuntor	→	Freno reostático
LN	Reactancia de red	→	Freno de recuperación
LS	Contactador de carga condensador		

Ilustración 5.18.- Leyenda del esquema eléctrico general de la regulación trifásica con onduladores de corriente

La técnica trifásica de en el caso de la **alimentación al material rodante en corriente alterna** tiene como objetivo alimentar a los motores trifásicos cuando la alimentación se realiza en corriente alterna.

En primer lugar, el valor de la tensión de los sistemas de alimentación en corriente alterna es de unos 25 kV, mientras que los motores poseen una tensión de pase de unos 290 V (depende del fabricante), por lo tanto al principio del circuito se dispone de un transformador reductor que se ajusta al nivel de tensión de funcionamiento del motor trifásico.

Una vez reducida la tensión, para poder alimentar a los motores en corriente alterna trifásica se ha de disponer de un chopper alimentado desde la catenaria de corriente continua con el mismo fin que la técnica chopper, la de regular la velocidad del motor trifásico a través de pulsos eléctricos de frecuencias ascendentes, a continuación de este si dispone de un ondulador (o rectificador) cuya función es la de transformar la corriente continua en corriente alterna trifásica para poder alimentar al motor. Por lo tanto, hemos de disponer de un chopper que se encarga de regular al motor, y de un rectificador para modificar la energía eléctrica. Esta técnica se utilizada para la tracción de trenes de alta velocidad como el AVE español.

El diagrama de bloques de esta técnica se muestra en la siguiente imagen:

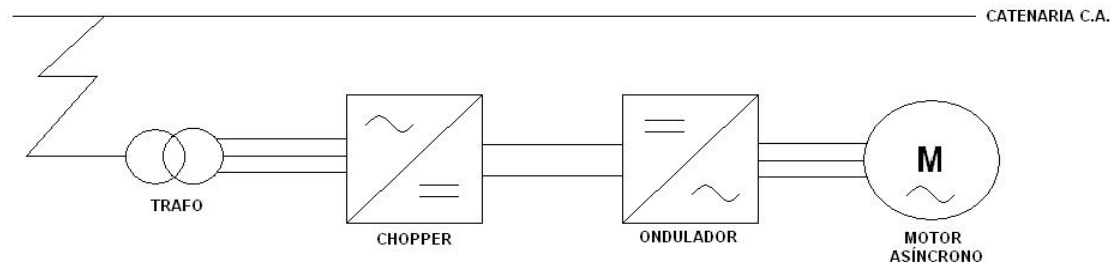


Ilustración 5.19.- Diagrama de bloques de la técnica de regulación trifásica con alimentación en corriente alterna

5.4.4.- Técnica de la Levitación Magnética

Los trenes de levitación magnética son aquellos que mediante motores eléctricos lineales son capaces de mover al material móvil basado en el principio de la levitación magnética, es decir, la atracción y repulsión que se origina entre dos campos magnéticos.

La ventaja fundamental que nos ofrece este sistema es la eliminación del rozamiento con las vías, ya que al estar suspendido sobre estas, no existe el contacto físico, por lo que podemos llegar a alcanzar una velocidad de unos 600 km/h, velocidad recogida del tren maglev japonés.

Existen, a su vez, dos métodos de suspensión, y que son:

- **Suspensión electromagnética (EMS).**
- **Suspensión electrodinámica (EDS).**

La **suspensión electromagnética (EMS)** consiste en el movimiento del material móvil a través de dos electroimanes ubicados en la unidad de tracción y en la vía, de tal forma que los electroimanes actúan repeliéndose mutuamente haciendo levitar a la unidad móvil. A continuación se muestra un esquema de funcionamiento de este sistema en la siguiente imagen:

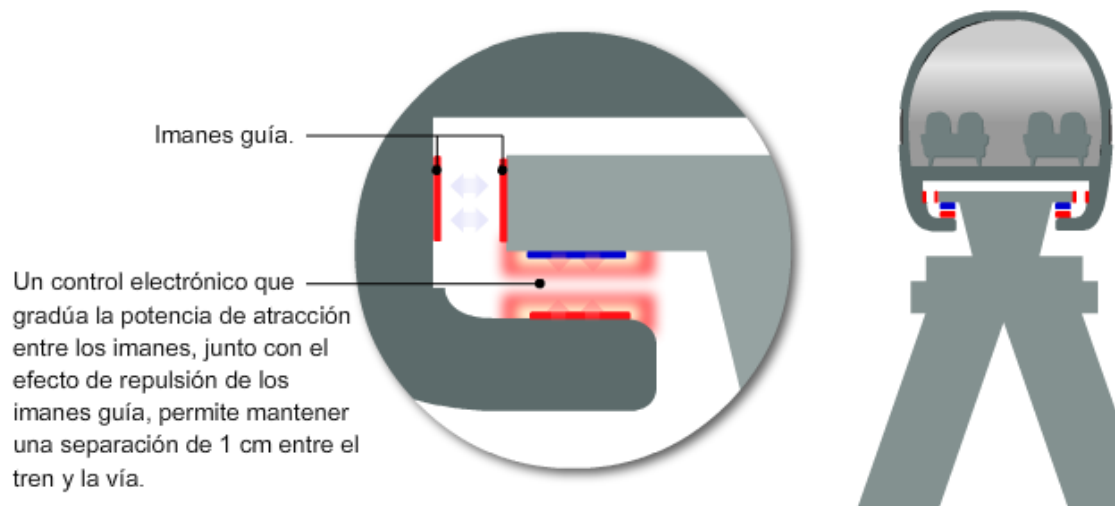


Ilustración 5.20.- Suspensión electromagnética (EMS)

Para este sistema de levitación magnética se dispone de un motor lineal a bordo de la unidad de tracción, con una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

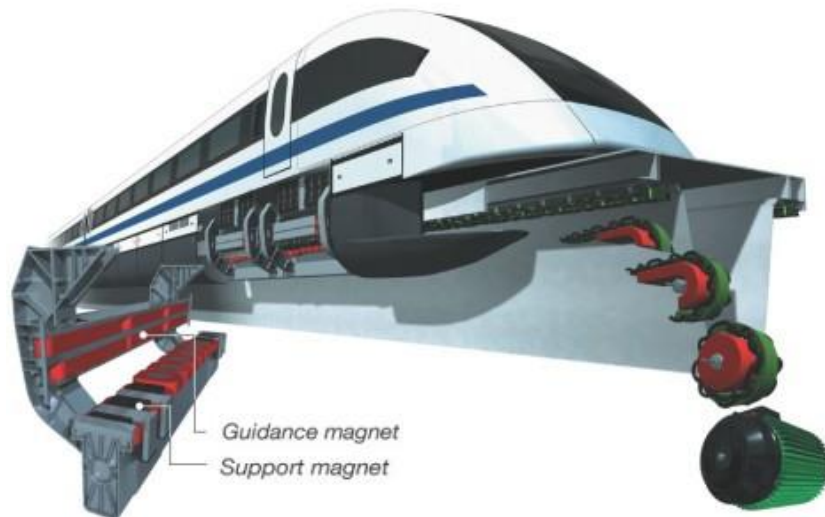


Ilustración 5.21.- Sección del sistema de suspensión electromagnética (EMS)

La forma que tiene el motor lineal provisto en el material móvil tiene se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.22.- Motor lineal utilizado en la tracción de los trenes maglev

La propulsión de este sistema se explica con los fenómenos de repulsión y atracción de dos campos magnéticos, donde el tren tiene una polaridad fija, mientras que la vía tiene una polaridad alternativa que va atrayendo y repeliendo al material móvil, dotándolo de movimiento, este fenómeno se puede ver de una forma gráfica en la siguiente imagen:

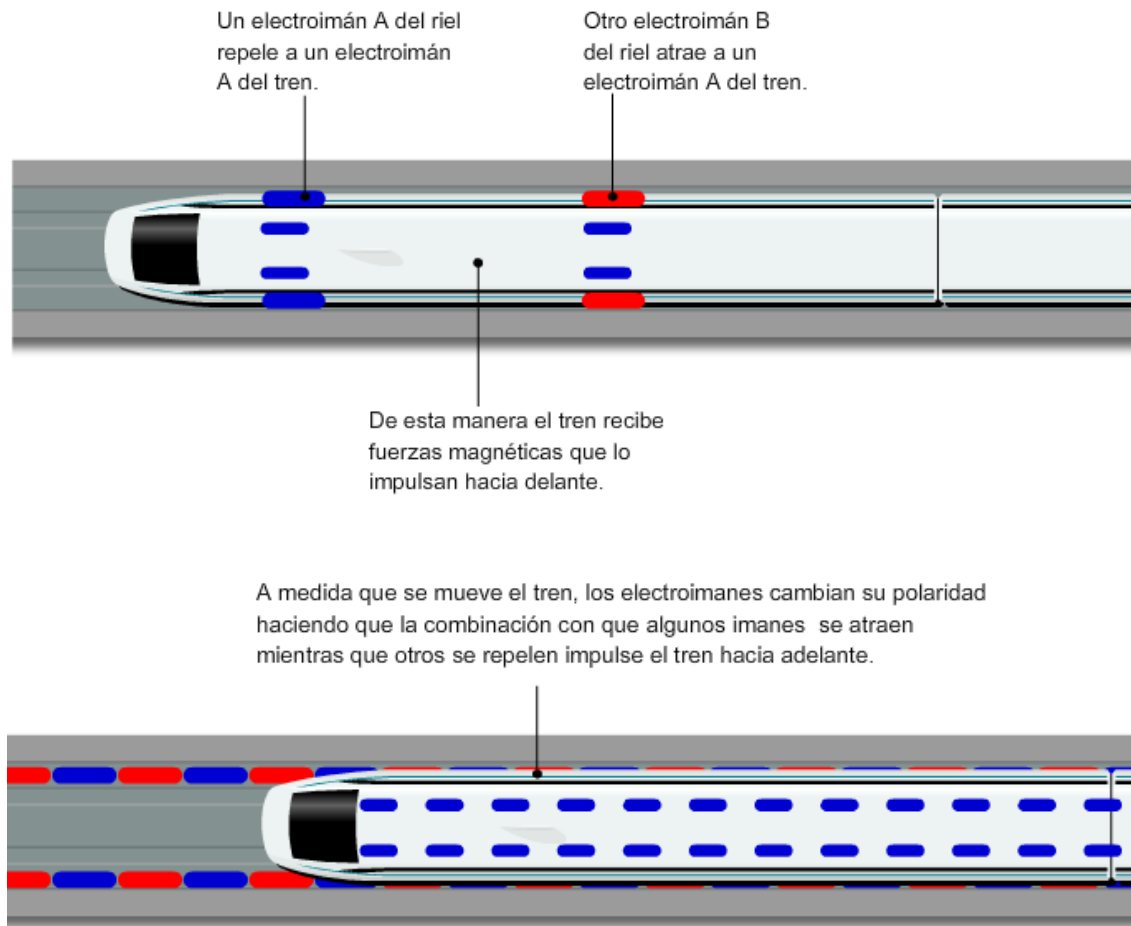


Ilustración 5.23.- Diagrama de los fenómenos de atracción y repulsión originados entre el material móvil y la vía

La otra forma de tracción recibe el nombre de **suspensión electrodinámica** (EMS) y consiste en disponer imanes electromagnéticos tanto en el material móvil, como en la vía, con la característica especial de que la vía en este caso tiene forma de U. La vía tiene una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

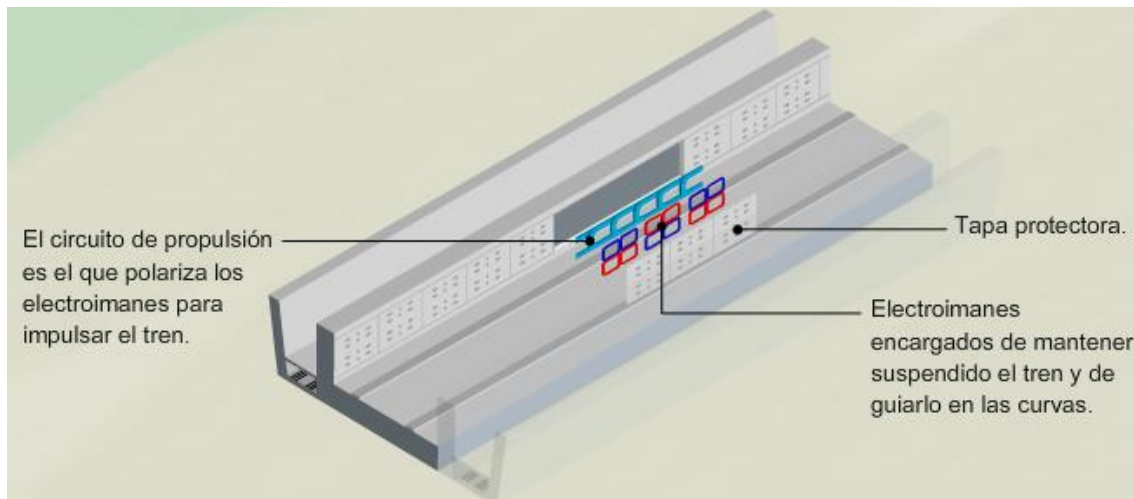


Ilustración 5.24.- Forma de la vía en el sistema de suspensión electromagnética

El material móvil va provisto de unas bobinas superconductores en los laterales tal y como se muestra en la siguiente imagen:

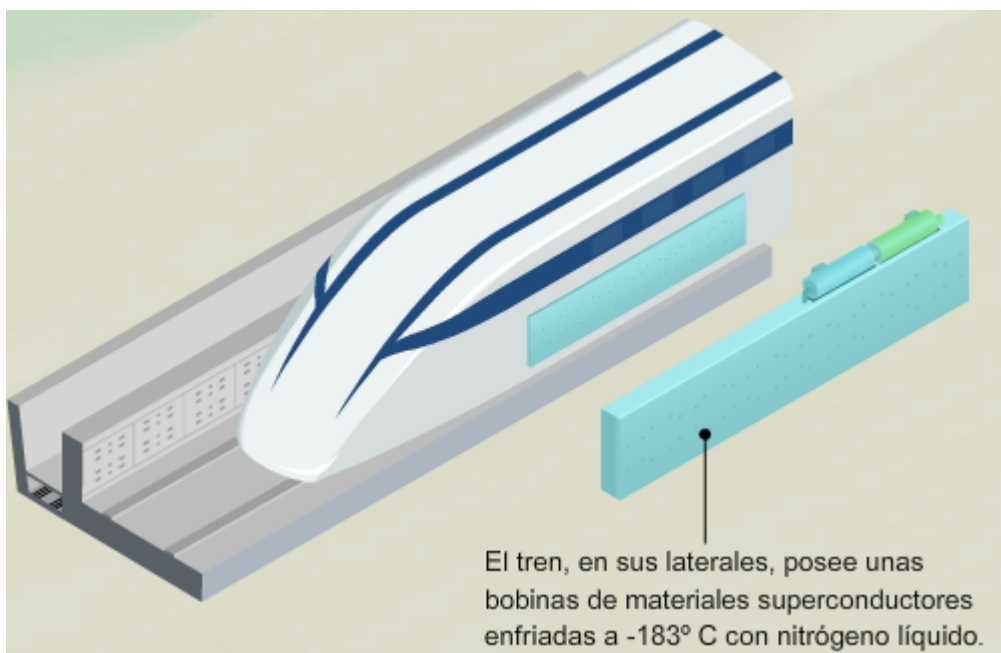
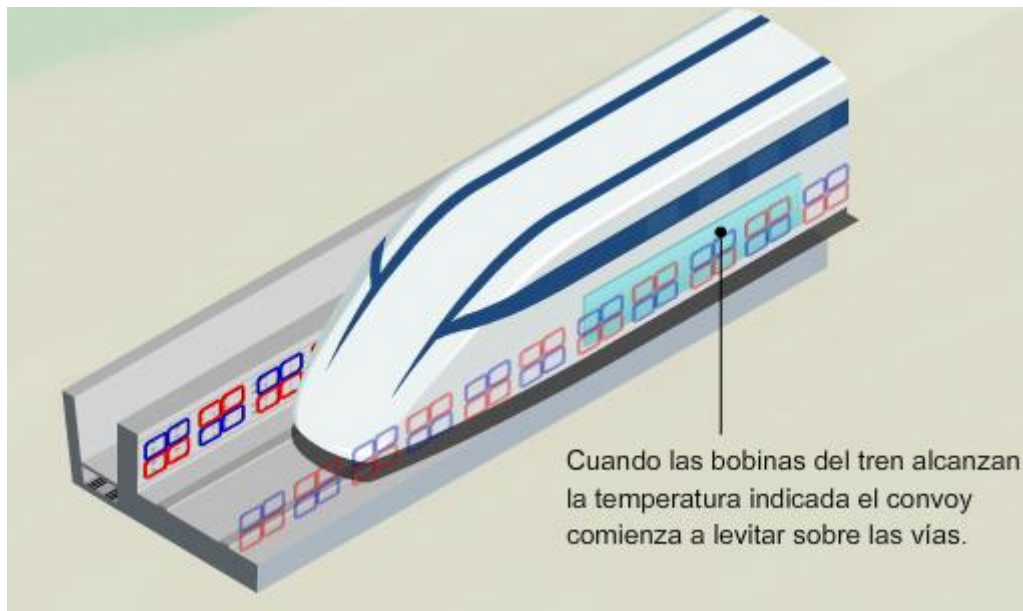


Ilustración 5.25.- Bobinas superconductoras alojadas en los laterales del material móvil para la tracción en el sistema de suspensión electrodinámica (EDS)

La forma de propulsión de este sistema también se explica con los fenómenos de repulsión y atracción de dos campos magnéticos, donde el tren tiene una polaridad fija, mientras que la vía tiene una polaridad alternativa que va atrayendo y repeliendo al material móvil, dotándolo de movimiento, con la diferencia de que los superconductores del tren han de estar frío para que el material móvil comience a levitar, este fenómeno se puede ver de una forma gráfica en la siguiente imagen:



Cuando las bobinas del tren alcanzan la temperatura indicada el convoy comienza a levitar sobre las vías.

Ilustración 5.26.- Propulsión en el sistema de suspensión electrodinámica (EDS)

5.5.- Normativa de Diseño de los Motores de Tracción para Aplicaciones Ferroviarias

Los motores de tracción ferroviaria no tienen la misma normativa de diseño que los motores de potencia que usualmente se utilizan para usos industriales, por este motivo se enumeran, a continuación, las normas europeas necesarias a cumplir para realizar un proyecto o un diseño de estos motores de tracción:

- UNE EN – 60349 – 1:2011. Tracción eléctrica. Máquinas eléctricas rotativas para ferrocarriles y vehículos de carretera. Parte 1: Máquinas distintas de los motores de corriente alterna alimentados por convertidor electrónico.
- UNE EN – 60349 – 2:2011. Tracción eléctrica. Máquinas eléctricas rotativas para ferrocarriles y vehículos de carretera. Parte 2: Motores de corriente alterna alimentados por convertidos electrónico.
- UNE EN – 60349 – 4:2013. Tracción eléctrica. Máquinas eléctricas rotativas para ferrocarriles y vehículos de carretera. Parte 4: Máquinas eléctricas síncronas de imanes permanentes conectadas a un convertidor electrónico.

5.6.- Motores de Tracción Comerciales y Material Rodante. Características Técnicas

En este apartado se van a describir los motores de tracción que se utiliza en el material rodante actual, así como sus características técnicas.

Los motores de tracción comerciales tienen una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 5.27.- Motor de tracción eléctrica ferroviaria del fabricante ABB

Cuyos elementos enumerados en la imagen anterior son los siguientes:

1. Carcasa de hierro modular.
2. Estructura para el soporte del motor.
3. Rodamientos de acero.
4. Ventilación natural a través de rejillas.
5. Eje de aleación de acero.
6. Eje HUNG para motores totalmente suspendidos.
7. Aislamiento VPI de resina en base a la silicona.
8. Rotor con aislamiento resistente.
9. Protección adicional del rotor contra la humedad y elementos abrasivos.
10. Forma del bobinado.

A continuación se van a mostrar una serie de motores y sus características técnicas por tipo de material rodante.

5.6.1.- Motores de Tracción para Tranvías

En primer lugar empezamos con el motor **4 HGA 1433** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

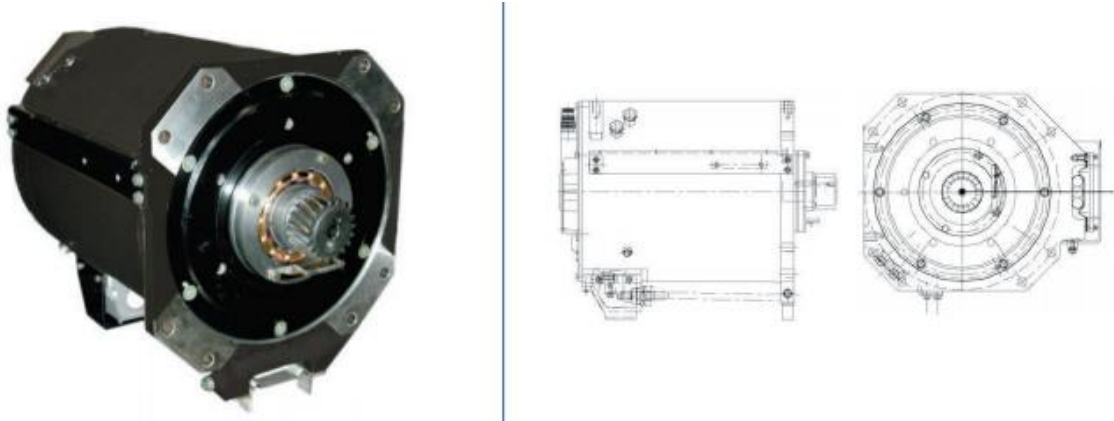


Ilustración 5.28.- Motor de tracción ferroviaria 4 HGA 1433 del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 HGA 1433
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	120 kW
Velocidad nominal	2.600 r.p.m.
Par	440 N · m
Transmisión	Piñones
Alto	400 mm
Ancho	450 mm
Largo	528 mm
Peso	335 kg

Tabla 5.1.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 HGA 1433 del fabricante ALSTOM

El siguiente motor de aplicaciones tranviarias es el **6 LMS 1052** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

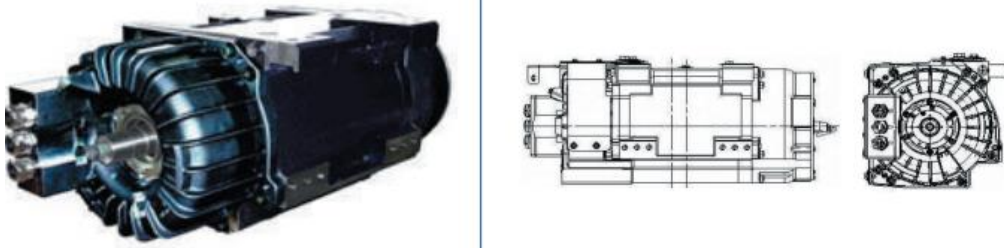


Ilustración 5.29.- Motor de tracción ferroviaria 6 LMS 1052 del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	6 LMS 1052
Tipo	Síncrono
Potencia nominal	150 kW
Velocidad nominal	2.600 r.p.m.
Par	550 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	350 mm
Ancho	350 mm
Largo	720 mm
Peso	330 kg

Tabla 5.2.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 LMS 1052 del fabricante ALSTOM

5.6.2.- Motores de Tracción para Metros

En primer lugar empezamos con el motor **4 LCA 1640** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

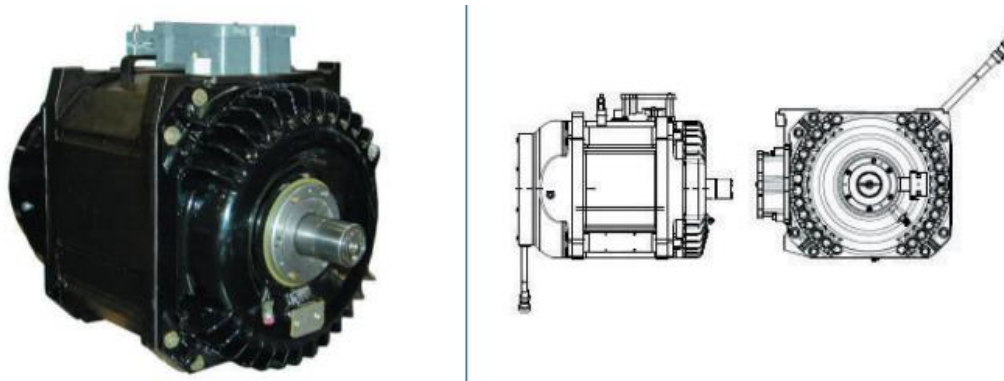


Ilustración 5.30.- Motor de tracción ferroviaria 4 LCA 1640 del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 LCA 1640
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	110 kW
Velocidad nominal	1.750 r.p.m.
Par	600 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	430 mm
Ancho	567 mm
Largo	740 mm
Peso	480 kg

Tabla 5.3.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 LCA 1640 del fabricante ALSTOM

El siguiente motor para metros es el **4 ELA 2848 C** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

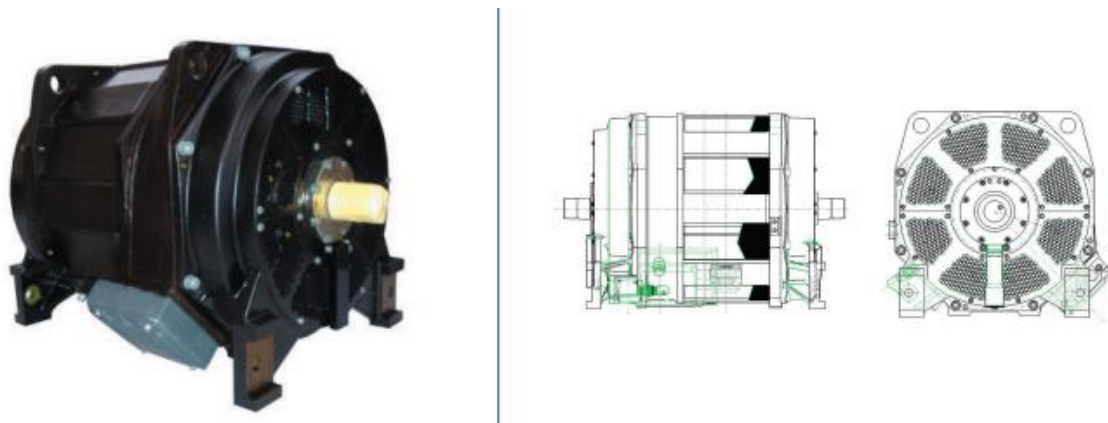


Ilustración 5.31.- Motor de tracción ferroviaria 4 ELA 2848 C del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 ELA 2848 C
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	300 kW
Velocidad nominal	2.300 r.p.m.
Par	1.245 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	650 mm
Ancho	650 mm
Largo	760 mm
Peso	1.100 kg

Tabla 5.4.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 ELA 2848 C del fabricante ALSTOM

5.6.3.- Motores de Tracción para Cercanías

En primer lugar empezamos con el motor **4 ECA 1836 A** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

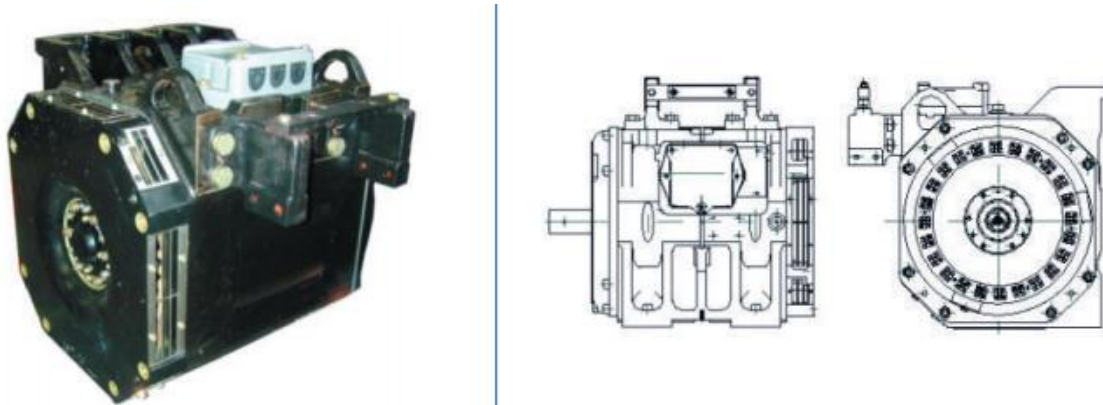


Ilustración 5.32.- Motor de tracción ferroviaria 4 ECA 1836 C del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 ECA 1836 A
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	180 kW
Velocidad nominal	2.000 r.p.m.
Par	860 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	507 mm
Ancho	520 mm
Largo	577 mm
Peso	740 kg

Tabla 5.5.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 ECA 1836 A del fabricante ALSTOM

El siguiente motor para cercanías es el **4 FXA 2854 A** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

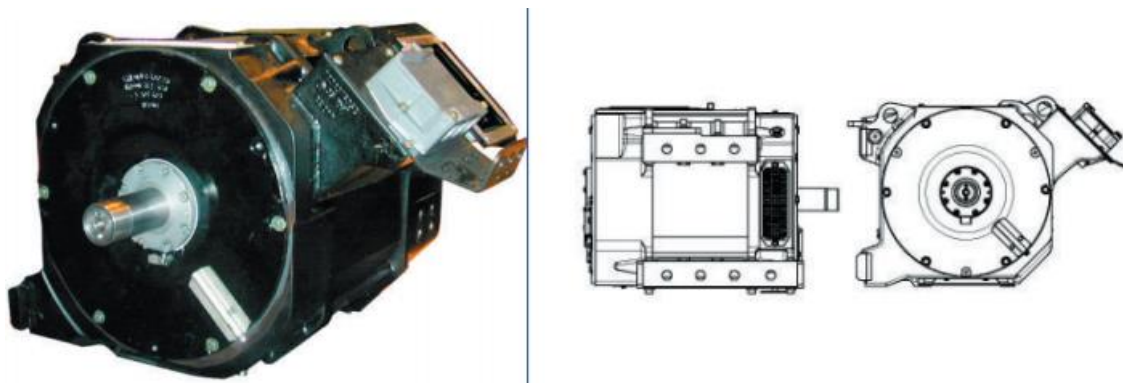


Ilustración 5.33.- Motor de tracción ferroviaria 4 FXA 2854 del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 FXA 2854 A
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	180 kW
Velocidad nominal	2.000 r.p.m.
Par	860 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	507 mm
Ancho	520 mm
Largo	577 mm
Peso	740 kg

Tabla 5.6.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 FXA 2854 A del fabricante ALSTOM

5.6.4.- Motores de Tracción para Ferrocarriles

En primer lugar empezamos con el motor **6 FJA 3257 A** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

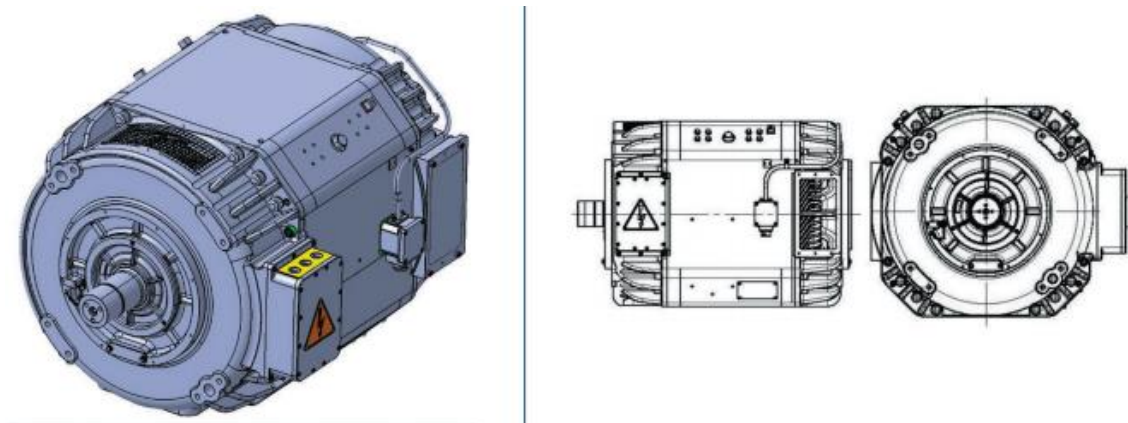


Ilustración 5.34.- Motor de tracción ferroviaria 6 FJA 3257 A del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	6 FJA 3257 A
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	708 kW
Velocidad nominal	2.200 r.p.m.
Par	3.073 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	680 mm
Ancho	680 mm
Largo	890 mm
Peso	1.613 kg

Tabla 5.7.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 FJA 3257 A del fabricante ALSTOM

El siguiente motor para ferrocarriles es el **12 LCS 3550 C** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

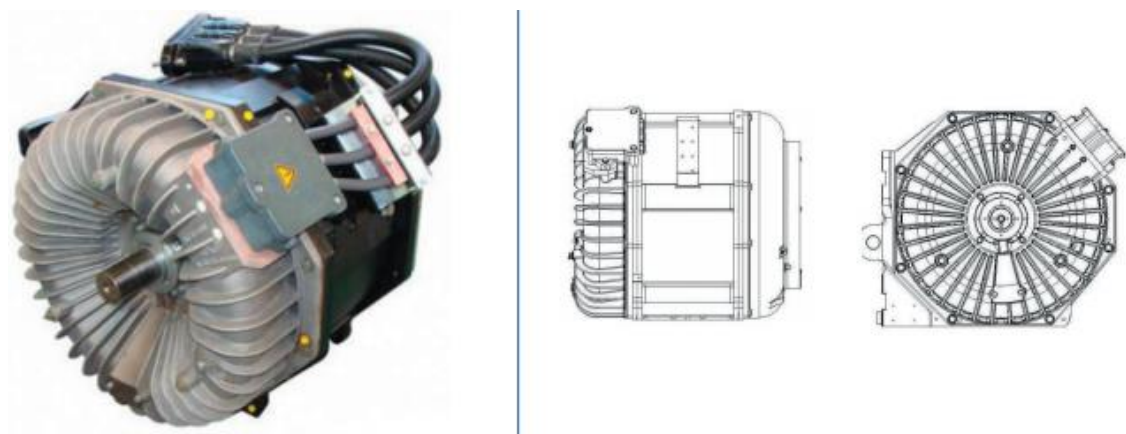


Ilustración 5.35.- Motor de tracción ferroviaria 12 LCS 3550 C del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	12 LCS 3550 C
Tipo	Síncrono
Potencia nominal	900 kW
Velocidad nominal	3.500 r.p.m.
Par	2.456 N · m
Transmisión	Sobre el eje
Alto	650 mm
Ancho	650 mm
Largo	735 mm
Peso	785 kg

Tabla 5.8.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 12 LCS 3550 C del fabricante ALSTOM

5.6.5.- Motores de Tracción para Trenes de Alta Velocidad

En primer lugar empezamos con el motor **FJA 3257 A** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

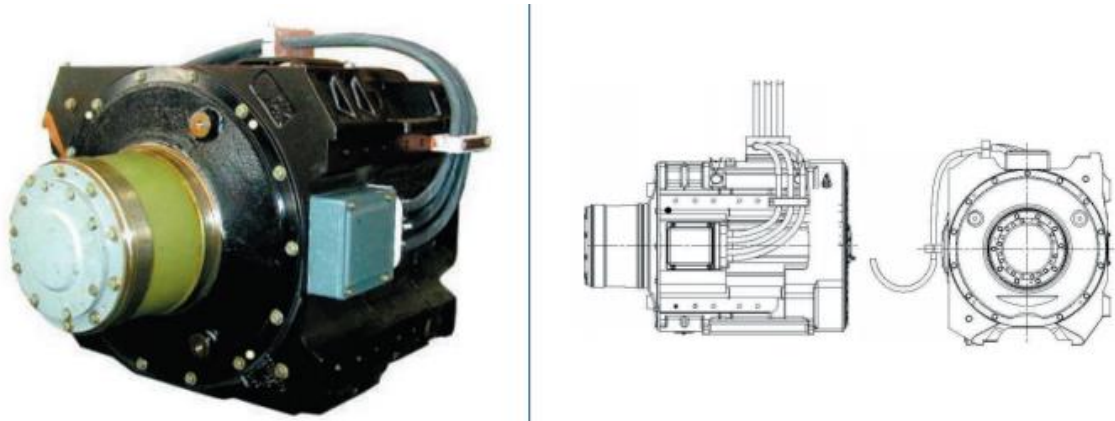


Ilustración 5.36.- Motor de tracción ferroviaria 6 FRA 4567 D del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	6 FRA 4567 D
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	1.634 kW
Velocidad nominal	1.753 r.p.m.
Par	8.901 N · m
Transmisión	Piñones
Alto	907 mm
Ancho	800 mm
Largo	1.253 mm
Peso	2.767 kg

Tabla 5.9.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 6 FRA 4567 D del fabricante ALSTOM

El siguiente motor para trenes de alta velocidad es el **4 FXA 4553** del fabricante ALSTOM, cuya forma se muestra en la siguiente imagen:

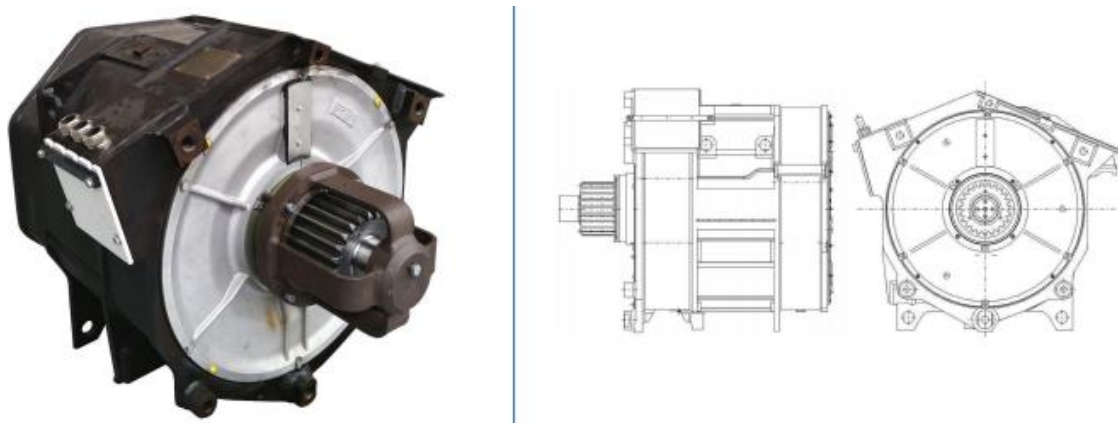


Ilustración 5.37.- Motor de tracción ferroviaria 4 FXA 4553 del fabricante ALSTOM

Cuyas características técnicas más relevantes aparecen en la siguiente tabla:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Referencia	4 FXA 4553
Tipo	Asíncrono
Potencia nominal	1.314 kW
Velocidad nominal	1.469 r.p.m.
Par	8.542 N · m
Transmisión	Piñones
Alto	890 mm
Ancho	890 mm
Largo	842 mm
Peso	2.350 kg

Tabla 5.10.- Características técnicas del motor de tracción ferroviaria 4 FXA 4553 del fabricante ALSTOM

CAPÍTULO 6: ELECTRÓNICA DE POTENCIA

CAPÍTULO 6.- ELECTRÓNICA DE POTENCIA

	<i>Página</i>
6.1.- Introducción	178
6.2.- Rectificadores Trifásicos en la Tracción Ferroviaria.....	178
6.2.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda	178
6.2.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico	179
6.3.- Análisis de los Rectificadores Trifásicos.....	180
6.3.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda	181
6.3.1.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura	181
6.3.1.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva en Paralelo con una Carga Capacitiva	182
6.3.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico	183
6.3.2.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura	184
6.3.2.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva con un Condensador en Paralelo.....	186
6.4.- Rectificadores Comerciales en la Infraestructura.....	187
6.5.- Rectificadores Comerciales a Bordo de las Unidades de Tracción	189

6.1.- Introducción

Este capítulo tiene como objetivo describir, y analizar gráficamente, los rectificadores que se utilizan en la tracción ferroviaria, ya que es el elemento de electrónica de potencia más importante tanto en la infraestructura como en las máquinas de tracción. Este elemento se encuentra presente en las subestaciones de corriente continua, así como a bordo de unidades de tracción.

Para ello, en primer lugar, se van a describir los esquemas de los rectificadores que se pueden utilizar.

En segundo lugar se va a realizar un análisis gráfico del funcionamiento de los rectificadores descritos, mediante el software OrCAD Pspice.

En tercer lugar se mostraran algunos rangos de potencia de algunos fabricantes para contrastar con el análisis realizado.

6.2.- Rectificadores Trifásicos en la Tracción Ferroviaria

Los rectificadores en la tracción ferroviaria tienen el objetivo de transformar la corriente alterna en corriente continua. Esta transformación de la forma de onda se puede realizar, bien en nuestra subestación de tracción, o en nuestra unidad móvil. Los rectificadores que se van a analizar son dos:

- Rectificador trifásico de doble onda.
- Rectificador trifásico dodecafásico.

Los rectificadores de tracción están regulados según la especificación técnica de ADIF *“ET 03.359.104.1: Grupos rectificadores de 3000 y 6000 kW”*

6.2.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda

En este esquema de conexión tenemos un transformador Dy, y un rectificador formado por seis diodos, cuya conducción es dos a dos, es decir, los diodos entran en conducción en la siguiente secuencia: 12 23 34 45 56 61. La onda de tensión resultante está compuesta de 30° de cada onda del

generador de tensión. La forma de onda se analizará en el siguiente apartado. La forma onda resultante en bornes de la carga posee un cierto rizado, es decir, que no es puramente continua, si no que posee una pequeña ondulación. Dicho rizado se puede reducir mediante un condensador. El esquema a realizar es una simplificación del real, ya que en la realidad se disponen de más elementos, como bobinas que hacen de filtro de armónicos y tiristores o transistores bipolares.

Este rectificador posee el siguiente esquema de conexión:

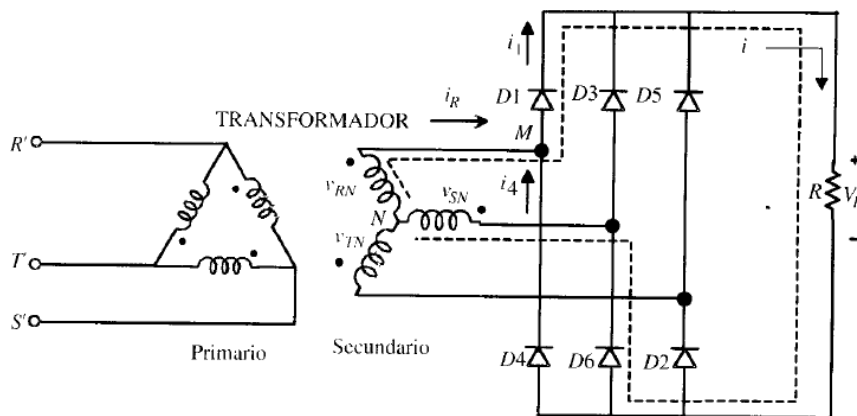


Ilustración 6.1.- Esquema del rectificador trifásico de doble onda con tres puentes de diodos

6.2.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico

Este rectificador tiene asociado un transformador Dyd (con las mismas tensiones secundarias). Este rectificador produce 12 impulsos por ciclo, y la diferencia de fases es de 30° . Con esta disposición también reducimos el nivel de armónicos en el primario del transformador, ya que los armónicos de orden 6 se anulan al sumarse las salidas de ambos puentes. El valor de la tensión media de corriente continua tiene un valor igual al doble de la tensión que en un rectificador con solo rectificador. En los apartados posteriores se irán viendo las curvas características en función de la carga.

Este tipo de rectificador es el más utilizado en la tracción ferroviaria, ya que disminuye el nivel de rizado, que se traduce en una reducción del coste de los filtros que alisan la corriente continua. Este rectificador tiene el siguiente esquema de conexión:

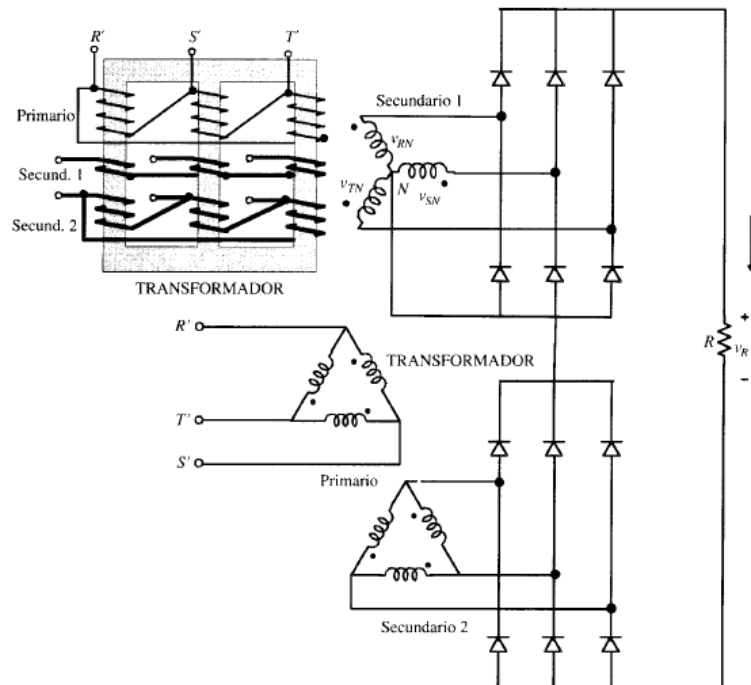


Ilustración 6.2.- Esquema del rectificador de doble onda con seis pares de puentes de diodos

6.3.- Análisis de los Rectificadores Trifásicos

En este apartado se van a realizar una serie de simulaciones mediante el programa OrCAD Pspice, en el que se analizarán las formas de onda obtenidas dependiendo el tipo de carga que tenemos conectada así como la adición de filtros. Los elementos a utilizar son:

ELEMENTO	SÍMBOLO	CÓDIGO DE LA LIBRERÍA
Fuente de tensión alterna		VSIN
Diodo de potencia		Power_Dbreak
Resistencia		R
Inductancia		L
Capacidad		C

Tabla 6.1.- Elementos utilizados en las simulaciones de los rectificadores

6.3.1.- Rectificador Trifásico de Doble Onda

En este apartado se van a realizar las simulaciones del rectificador trifásico de doble onda para una serie de cargas y filtros, en el que, en primer lugar, se va a describir el esquema, posteriormente se pondrán los valores de los elementos utilizados, y por último se mostrarán las gráficas así como la descripción de las mismas.

6.3.1.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura

El circuito modelado en OrCAD Pspice es el siguiente:

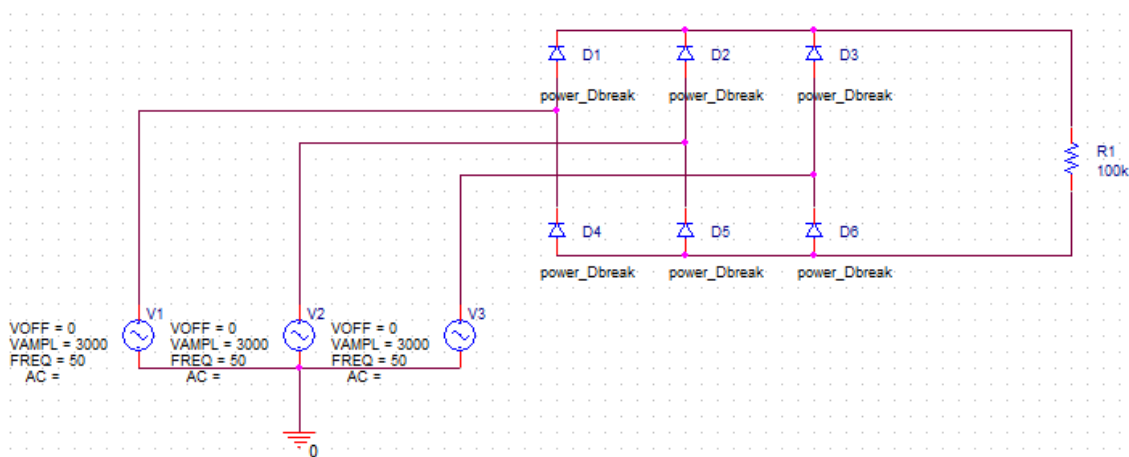


Ilustración 6.3.- Esquema en OrCAD Pspice para la primera simulación. Rectificador trifásico de doble onda

El valor de cada elemento está recogido en la siguiente tabla:

ELEMENTO	VALORES
V1	Tensión: 3000V
	Frecuencia: 50Hz
	Desfase: 0
V2	Tensión: 3000V
	Frecuencia: 50Hz
	Desfase: -120
V3	Tensión: 3000V
	Frecuencia: 50Hz
	Desfase: 120
Diodos	Potencia disipada: 6.75 μ W
Resistencia	100 k Ω

Tabla 6.2.- Parámetros de la primera simulación

Al simular, la gráfica de la tensión en la carga, frente a las tensiones de los generadores, obtenida es la siguiente:

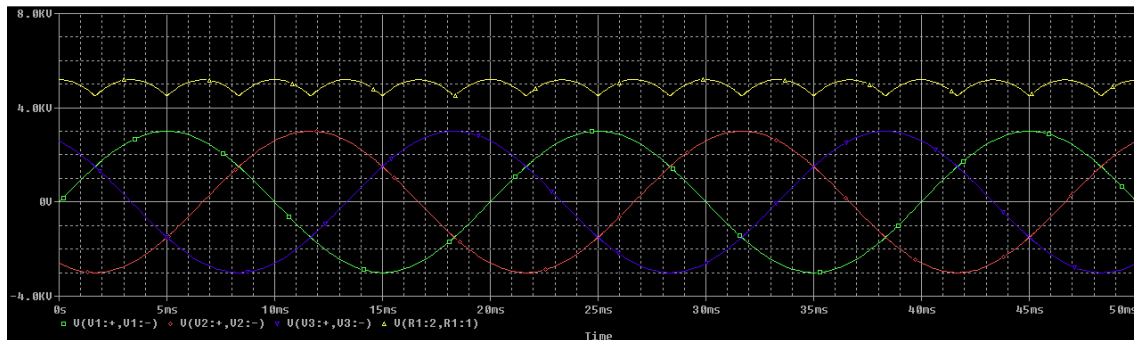


Ilustración 6.4.- Gráfica de tensión en la carga frente a la de los generadores

En la imagen anterior se puede ver como la tensión efectiva en la carga aumenta, y esto es debido a que cuando una de las ondas de los generadores está en su máximo, las dos ondas restantes no pasan por el cero, ya que está desfasadas entre sí 120° , y como el rectificador hace que la corriente circule en un único sentido, por eso se suman fasorialmente las ondas de tensión.

6.3.1.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva en Paralelo con una Carga Capacitiva

En esta segunda simulación he intentado realizado una simulación en la que he incluido una carga resistiva e inductiva a modo de simulación de un motor de corriente continua, y en paralelo, un condensador que reduce el rizado de la onda y actúa como filtro. El circuito modelado en OrCAD Pspice es el siguiente:

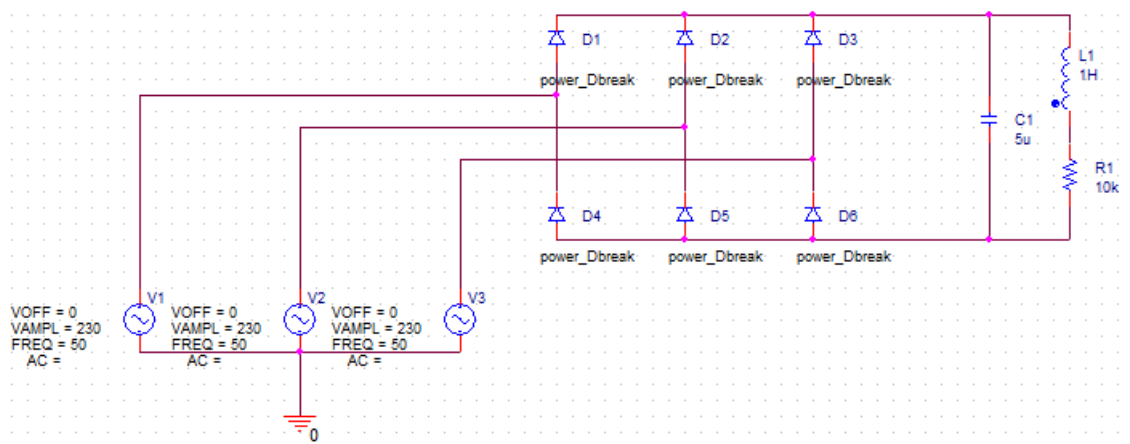


Ilustración 6.5.- Esquema del circuito de la segunda simulación. Rectificador trifásico de doble onda

En la imagen anterior se pueden ver los valores de los parámetros de los componentes utilizados.

Al simular, la gráfica que se obtiene de la tensión en bornes de la carga, y las tensiones del generador es la siguiente:

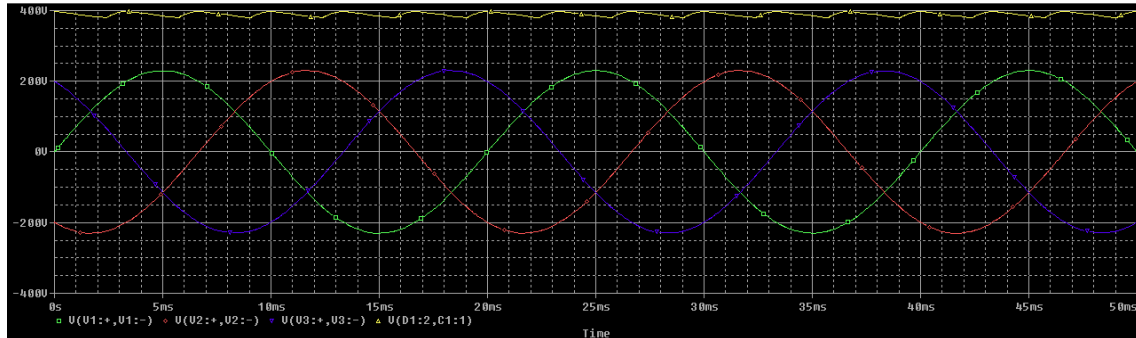


Ilustración 6.6.- Gráfica de tensión en bornes de la carga y tensión de los generadores

En la imagen anterior se puede ver como tenemos en bornes de la carga la tensión de línea, un poco reducida por la caída de tensión provocada por los diodos, pero se puede apreciar cómo se ha disminuido el rizado, ya que la onda resultante no es tan senoidal, sino que está más plana.

El valor máximo de la tensión rectificada es del 397'029 V medida mediante los cursores, y la tensión mínima de la onda rectificada tiene un valor de 379'498 V.

Con esta segunda simulación se muestra que se puede mejorar la onda rectificada por el puente de diodos, es decir, que para rectificar la corriente alterna y convertirla en corriente continua necesitamos de más elementos que provocan caídas de tensión, así como pérdidas de potencia por el calentamiento de los componentes.

6.3.2.- Rectificador Trifásico Dodecafásico

En este apartado se van a realizar las simulaciones del rectificador trifásico dodecafásico para una serie de cargas y filtros, en el que, en primer lugar, se va a describir el esquema, posteriormente se pondrán los valores de los elementos utilizados, y por último se mostrarán las gráficas así como la descripción de las mismas.

6.3.2.1.- Primera Simulación. Carga Resistiva Pura

En esta primera simulación he intentado realizado el esquema de un rectificador trifásico dodecafásico, donde en la simulación he incluido una carga resistiva. Los valores de los parámetros del circuito se muestran en la siguiente imagen:

El circuito modelado en OrCAD Pspice es el siguiente:

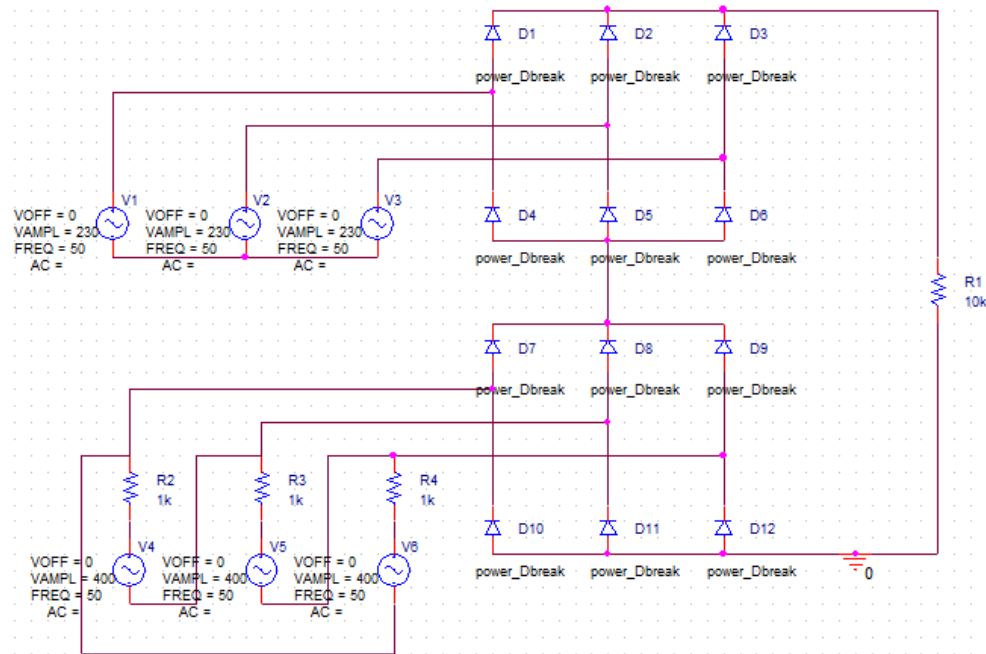


Ilustración 6.7.- Esquema del circuito de la primera simulación. Rectificador trifásico dodecafásico

Para poder simularlo, el programa necesita tener en serie de las fuentes de tensión en triángulo una resistencia, además de tener la misma tensión de línea en ambos puentes, de ahí que las tensiones sean distintas en los generadores conectados en estrella, y los generadores conectados en triángulo. Todos los generadores están desfasados entre sí 120° .

Además el ángulo referencia de tensión en estrella es de 0° , mientras que el ángulo de referencia de tensión del triángulo está en 30° .

En primer lugar se ha realizado una simulación que muestra la tensión de fase de los generadores en estrella y la tensión en bornes de la carga resistiva pura, siendo el resultado el siguiente:

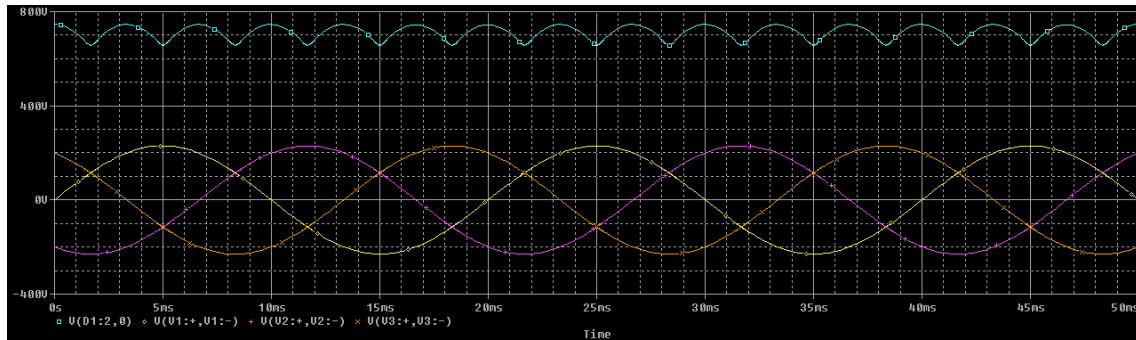


Ilustración 6.8.- Gráfica de la tensión de los generadores en estrella y de la tensión en bornes de la carga

En segundo lugar, para la misma simulación se muestra la tensión de fase de los generadores en triángulo, que es la misma que la de línea, y la tensión en bornes de la carga resistiva pura, siendo el resultado el siguiente:

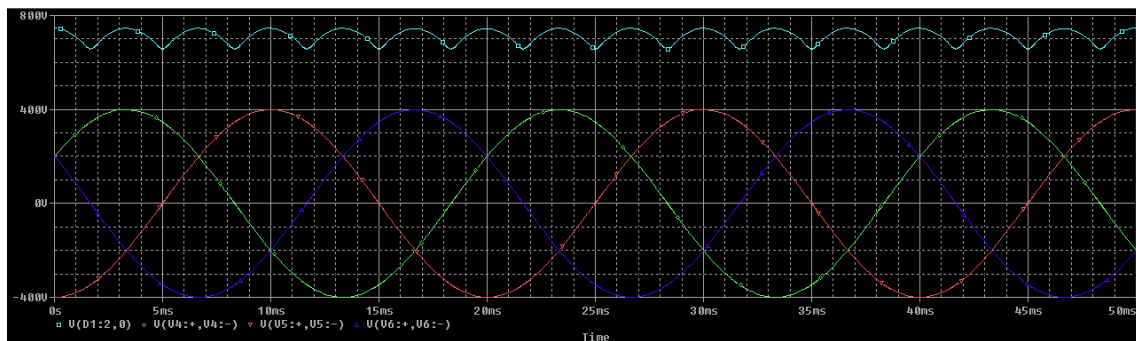


Ilustración 6.9.- Gráfica de la tensión de los generadores en triángulo y de la tensión en bornes de la carga

La diferencia de las imágenes anteriores está en el desfase de las tensiones y en que la tensión en estrella representada no es la de línea, sino de la fase.

Se puede observar como la tensión máxima en bornes de la carga es de 745'41 V, es decir, lo que hace el puente rectificador dodecafásico es obtener en la carga una tensión igual a la suma de las tensiones de línea de la salida de los dos devanados del transformador, incluyendo la caída de tensión que provocan 4 diodos, es decir, para este puente rectificador, la caída de tensión y las pérdidas de potencia aumenta debido a que se disponen de más elementos que conforman el circuito de potencia.

6.3.2.2.- Segunda Simulación. Carga Resistiva e Inductiva con un Condensador en Paralelo

En esta primera simulación he intentado realizado el esquema de un rectificador trifásico dodecafásico, donde para la simulación he incluido una carga resistiva e inductiva en paralelo con un condensador. Los valores de los parámetros del circuito se muestran en la siguiente imagen:

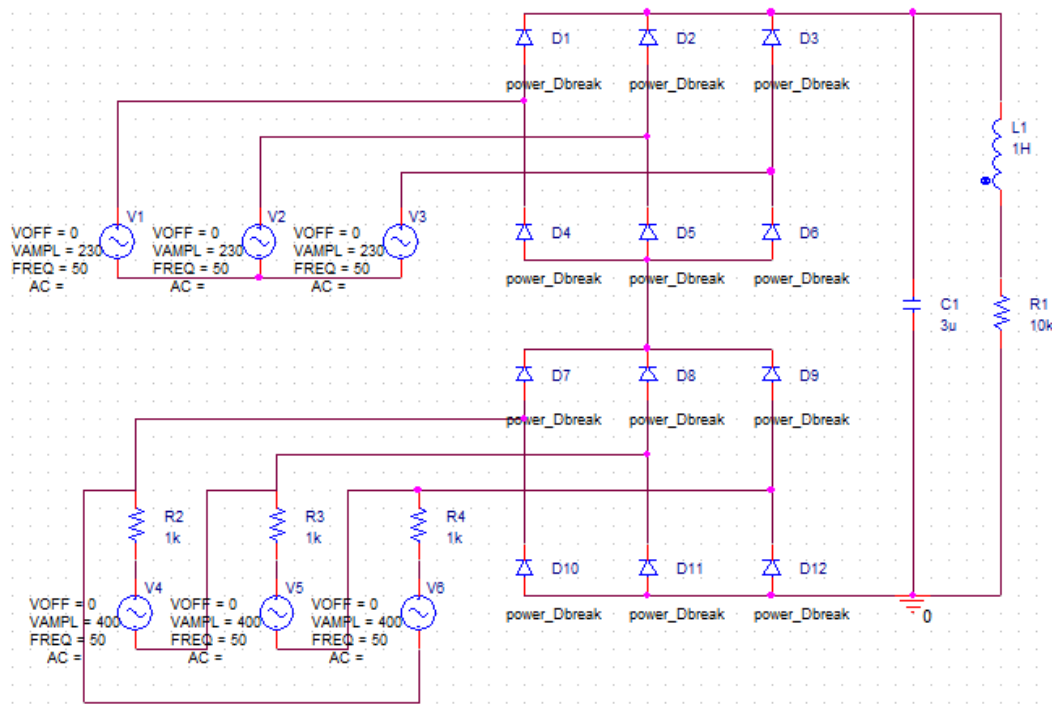


Ilustración 6.10.- Esquema del circuito de la segunda simulación. Rectificador trifásico dodecafásico

Al simular el circuito anterior, la gráfica obtenida de la tensión en bornes de la carga y de la tensión del devanado en estrella es la siguiente:

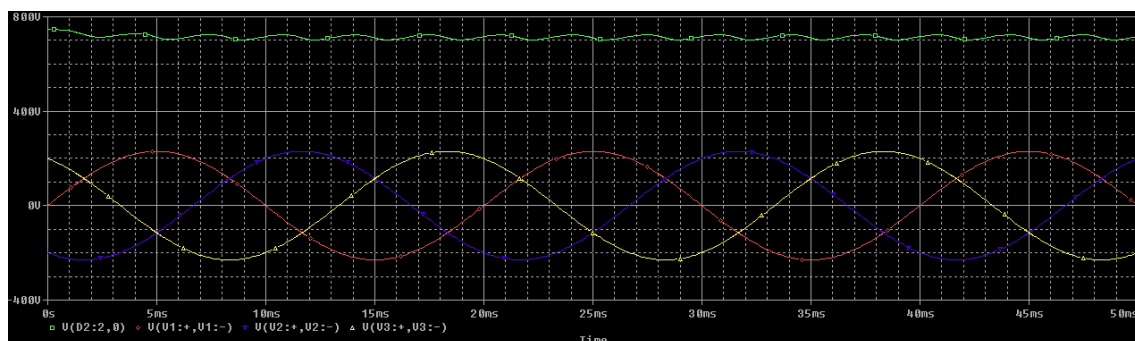


Ilustración 6.11.- Gráfica de la tensión de los generadores en estrella y de la tensión en bornes de la carga

En la imagen anterior se puede comprobar cómo se ha disminuido el rizado de la onda, y se ha hecho más plana, solamente con poner un condensador en paralelo.

De este circuito no hay nada más que comentar, ya que todo lo característico de este circuito se ha explicado en el apartado anterior, es decir, lo único que ha sido modificado es tipo de carga conectada a los bornes del puente dodecafásico.

6.4.- Rectificadores Comerciales en la Infraestructura

En este apartado se van a analizar algunos rectificadores comerciales, para comparar las características constructivas de los mismos.

En primer lugar se muestra un cuadro resumen de los rectificadores que se disponen en las subestaciones de tracción del fabricante Sécheron:

Gama de rectificadores estándar			
Tensión de CC asignada [V]	750	1500	3000
Corriente asignada [A]	hasta 6000	hasta 4000	hasta 3000
Sobrecarga	Clase VI según EN50328/IEC 60146 (otras bajo demanda)		
Temp. ambiente máxima [°C]	40 sin disminución de potencia		
Tensión máxima inversa del diodo [V]	2200	4500	4500
Altitud máxima [m]	1000 sin disminución de potencia		
Clase IP	IP20 hasta IP21 / IP30 hasta IP32 / IP40 hasta IP45		
Altura [mm]	2200		
Anchura [mm]	800 a 3200	800 a 3200	1200 a 2400
Profundidad [mm]	1400		

**Tabla 6.3.- Características de los rectificadores utilizados en las subestaciones.
Fabricante Sécheron**

En la imagen anterior se pueden observar las características de sus rectificadores, en las que se puede observar su gama de tensiones de corriente continua a la salida del rectificador, dato imprescindible a la hora de elegir el rectificador ya que depende de la tensión que ha de tener nuestra catenaria.

Un rectificador para subestaciones de dicho fabricante tendría la siguiente forma:

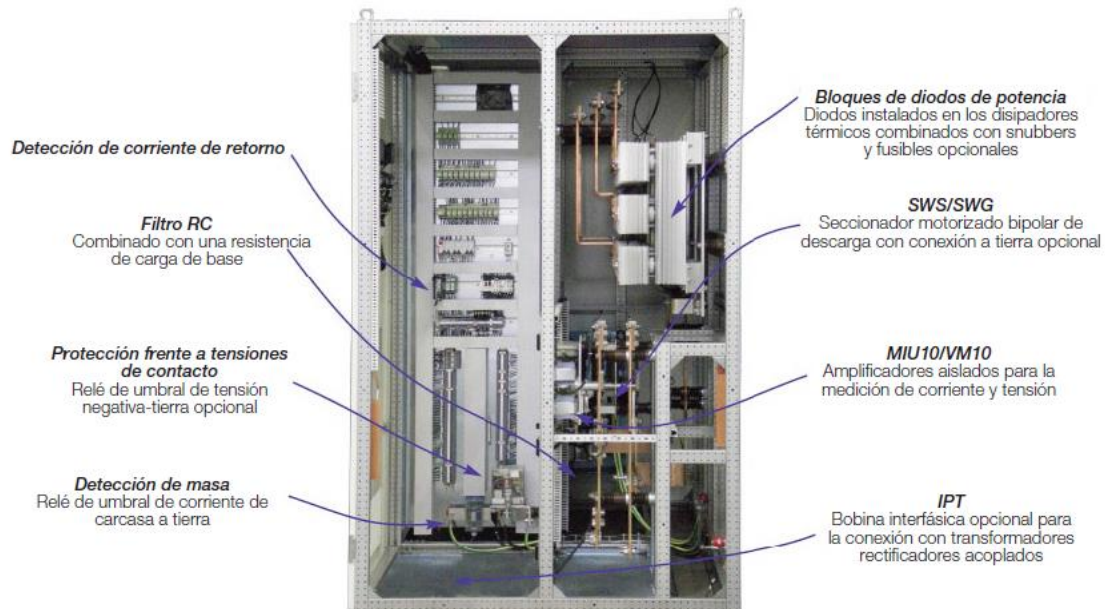


Ilustración 6.12.- Rectificador para subestaciones de tracción de corriente continua de Sécheron

En la que se pueden observar los distintos módulos que los componen. Con anterioridad se dijo que un rectificador de tracción era más complejo de lo que se estaba realizando la simulación, y con esta imagen se puede apreciar a groso modo los elementos de los que dispone un rectificador. Muchos de estos elementos son de protección y no influyen en la pérdida de potencia y calentamiento del mismo, pero por ejemplo se puede ver un bloque de amplificadores aislados, a parte de los bloques de diodos de potencia, o una bobina interfásica.

En las características de los rectificadores, dos parámetros a tener en cuenta son la temperatura y la altitud, no tienen nada que ver con parámetros eléctricos de tensión e intensidad, pero es importante el conocimiento de los mismos, ya que el fabricante nos está indicando con esto las condiciones ambientales que pueden limitar la operatividad del mismo.

Otro dato a tener en cuenta es la tensión inversa de los diodos, y como se puede observar en la simulación primera para el rectificador trifásico de doble onda, para la carga conectada la tensión inversa era de 5000 V, y para el rectificador de este fabricante por ejemplo, para esa carga en concreto, estaríamos superando el límite de los diodos.

El fabricante también nos proporciona un esquema de los circuitos eléctricos que están basados dichos rectificadores de sus diferentes modelos, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

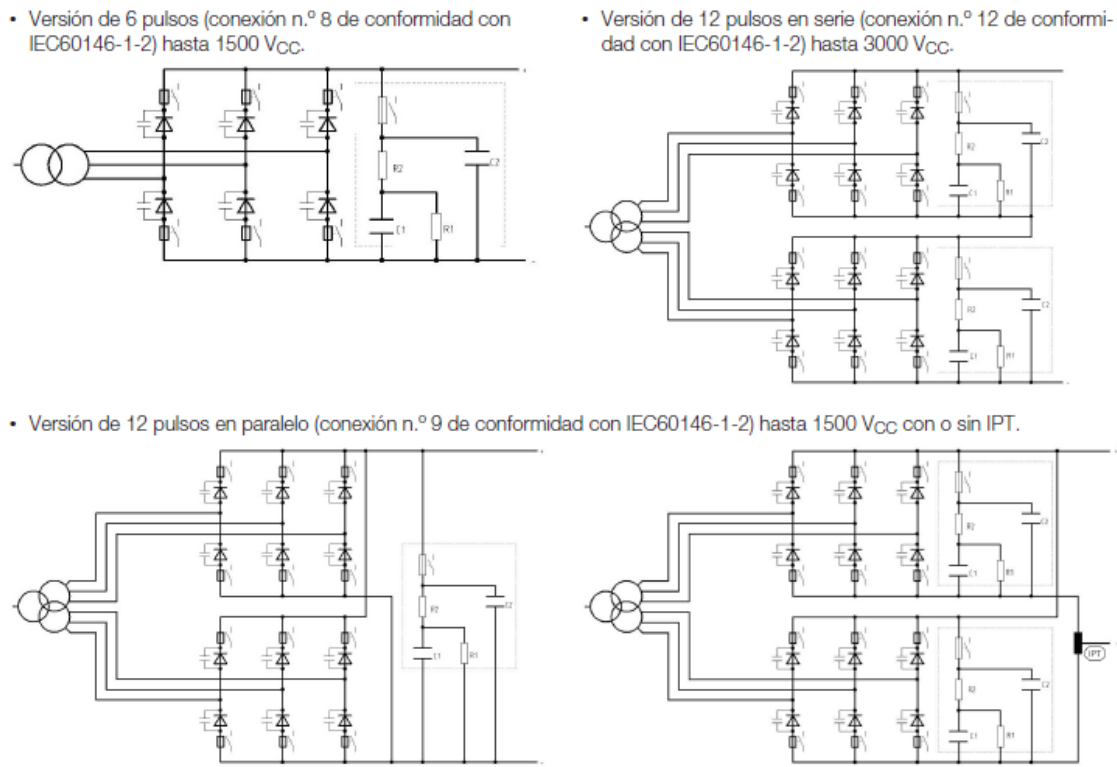


Ilustración 6.13.- Esquemas eléctricos de los diferentes modelos de rectificadores del fabricante Sécheron

6.5.- Rectificadores Comerciales a Bordo de las Unidades de Tracción

Los rectificadores comerciales a bordo de las unidades de tracción son unidades compactas y encofradas que se disponen en la unidad de tracción en cada bogie motorizado. Cada una de estas unidades encofradas poseen dos inversores independientes que se encargan de alimentar a los motores de tracción que se encuentran en los bogies (en total cuatro motores, uno por cada rueda que posee el bogie) así como filtros y elementos de protección y corte. De forma gráfica, estos rectificadores se disponen de la siguiente forma en las unidades de tracción:

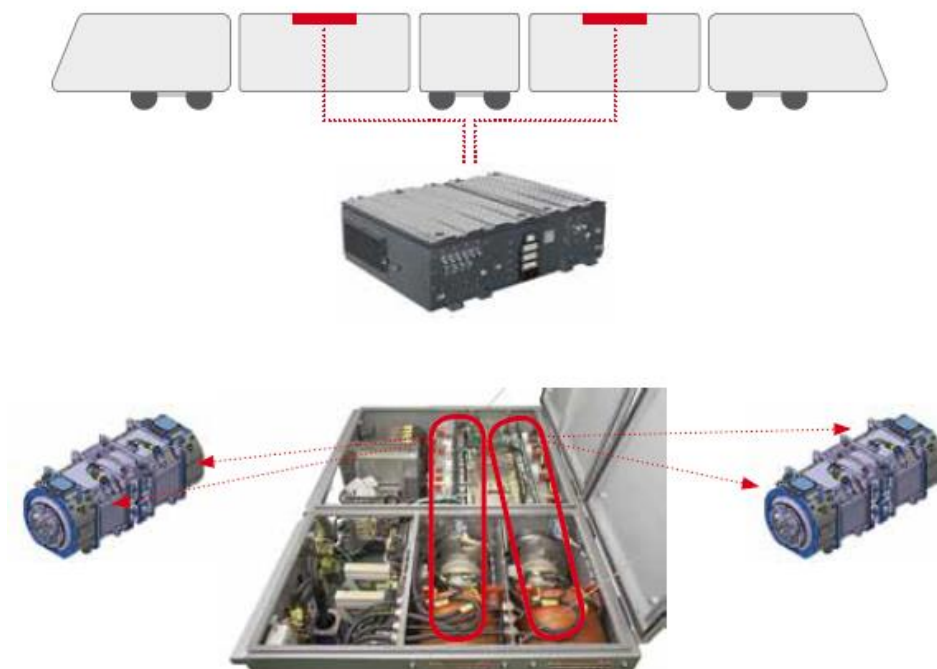


Ilustración 6.14.- Disposición de los rectificadores en las unidades de tracción

Un ejemplo de las características mecánicas y eléctricas principales que podemos encontrar en los rectificadores comerciales del fabricante CAF son las siguientes:

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS (Modelo 750 VDC)	
Dimensiones	1677x1335x478 mm (ancho x largo x alto)
Peso	447 kg
Material	Cofre de aluminio
Potencia nominal	300 kW
Potencia máxima	500 kW
Intensidad máxima de salida	370 A
Rendimiento	97%
Tensión de alimentación	Según EN 50163 (500 – 900 Vcc)
Tensión de salida	565 V ($V_{\text{catenaria}} = 750 \text{ Vcc}$)
	680 V ($V_{\text{catenaria}} = 900 \text{ Vcc}$)
Refrigeración	Ventilación forzada de aire
Características de los IGBT	$V_{\text{máxima}} = 1,7 \text{ kV}$
	$I_{\text{máxima}} = 800 \text{ A}$; $I_{\text{pico}} = 1600 \text{ A}$
	$T_{\text{funcionamiento}} = 125 \text{ °C}$

Tabla 6.4.- Resumen de las características del rectificador 750 VDC de CAF

El esquema eléctrico que tendría un convertidor de tracción a bordo de la unidad de tracción sería el siguiente:

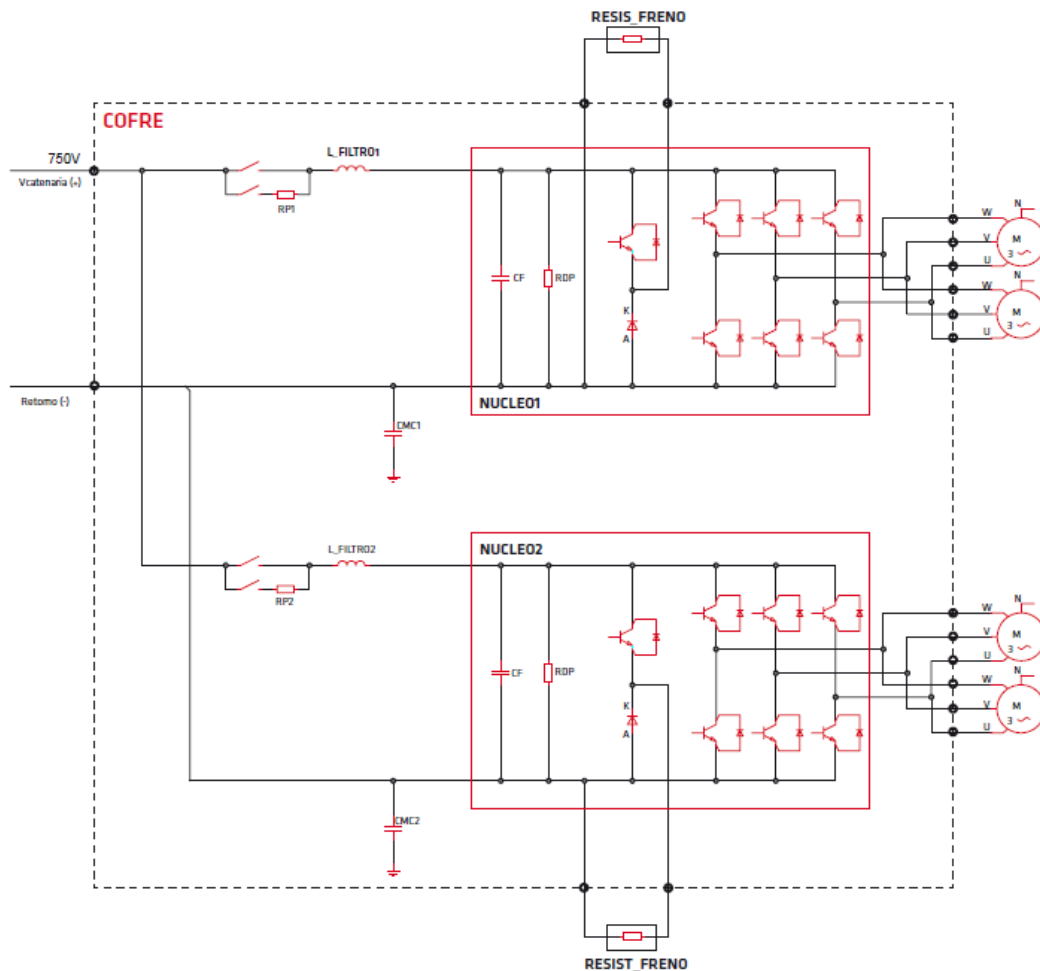


Ilustración 6.15.- Circuito eléctrico de un cofre rectificador del fabricante CAF

En la imagen anterior se puede observar que la alimentación del cofre procede de la catenaria directamente, así como el circuito de electrónica de potencia que conforma el cofre, y la alimentación a los motores de tracción y a las resistencias de frenado que se encargan de disipar la energía durante el frenado de la unidad de tracción.

Este circuito nos muestra como un cofre alimenta a los cuatro motores que posee el bogie. También se disponen contactos de conexión para maniobra y protección, así como bobinas y condensadores haciendo de filtros de corriente y armónicos.

A continuación se muestra un cuadro resumen de los diferentes modelos de rectificadores del fabricante CAF, así como sus características principales:

IMAGEN	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES
	• Rango de tensión AC de funcionamiento: 16.5kV – 31kV. • Potencia nominal: 700kW. • Refrigeración por aire forzado. • Sistema de frenado regenerativo.
Ilustración 6.16.- Convertidor de tracción eléctrica a 25 kV para la alta velocidad 	• Rango de tensión DC de funcionamiento: 400V-720V/500V-900V. • Potencia nominal: 240kW/300kW. • Refrigeración por aire forzado.
Ilustración 6.17.- Convertidor de tracción eléctrica para tranvías y metros 	• Rango de tensión DC de funcionamiento: 1000V – 1800V. • Potencia nominal: 600 kW. • Refrigeración natural basada en Heat Pipe.
Ilustración 6.18.- Convertidores de tracción a 1500 V para metros y trenes regionales 	• Rango de tensión DC de funcionamiento: 2100V – 3600V. • Potencia nominal: 1800 kW. Potencia max : 2400kW. • Refrigeración por aire forzado.
Ilustración 6.19.- Convertidor de tracción a 3000 V para metros y trenes regionales	

Tabla 6.5.- Modelos de rectificadores del fabricante CAF y sus características principales

CAPÍTULO 7: SISTEMAS DE SEGURIDAD

CAPÍTULO 7.- SISTEMAS DE SEGURIDAD

	<i>Página</i>
7.1.- Introducción	195
7.2.- Sistemas de Seguridad y Control en la Tracción Ferroviaria	195
7.2.1.- Sistema ASFA.....	195
7.2.2.- Sistema ERTMS	198
7.2.3.- Sistema PZA / INDUSI.....	199
7.2.4.- Sistema CROCODILE	200
7.2.5.- Sistema EIDOS.....	200

7.1.- Introducción

En este capítulo se van a describir los sistemas de seguridad que existen en la tracción ferroviaria. Para terminar se enumerarán una serie de conclusiones y opiniones personales obtenidas. Al final del documento aparecerá la bibliografía correspondiente a la información obtenida.

7.2.- Sistemas de Seguridad y Control en la Tracción Ferroviaria

En este apartado se van a describir los siguientes sistemas de seguridad y control en la tracción ferroviaria, dentro de los sistemas “auxiliares” tenemos:

- ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático).
- ERTMS (European Rail Traffic Management System, Sistema de Gestión de Tráfico Ferroviario Europeo).
- PZB/INDUSI (Control puntual del tren).
- CROCODILE.
- Sistema EIDOS (Equipamiento Informático Destinado a la Orientación y Seguridad).

7.2.1.- Sistema ASFA

El sistema ASFA (Anuncio de Señales y Frenado Automático) consiste en un sistema de emisión y recepción de señales, para su procesamiento y posterior control sobre el material rodante, en el que una serie de balizas dispuestas en la vía del ferrocarril emiten señales de información a diferentes frecuencias, donde dichas señales mandan la información acerca del estado del tramo de la vía respecto a límites de velocidad o paradas según las señales asociadas a las balizas, estas señales son recibidas en la cabina del tren, mediante un dispositivo electrónico que procesa la señal recibida y pone a disposición del conductor del tren la información sobre el estado del tramo que se está acercando, para poder adecuarse a las condiciones de la vía y no tener algún percance.

En el caso de que no se realice la actuación sobre el tren con respecto a la señal recibida por la baliza, se producirá un frenado automático de emergencia como consecuencia de la omisión de la señal producida por las balizas exteriores.

El sistema de emisión de señales se compone de dos balizas, una primera baliza colocada a una distancia de 5 m respecto a la señalización correspondiente de la vía, la segunda baliza de control se encuentra a unos 300 m aproximadamente respecto a la señalización de la vía. Dichas balizas se disponen paralelas y en la mitad de las vías del tren, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

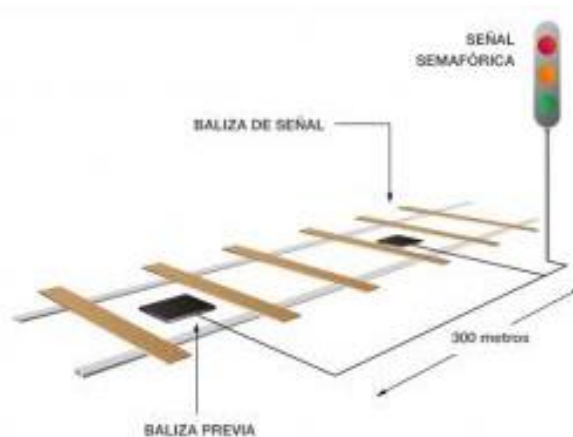


Ilustración 7.1.- Disposición de las balizas en el sistema ASFA

El sistema de recepción de la señal emitida por dichas balizas está dispuesto sobre la parte baja del tren, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

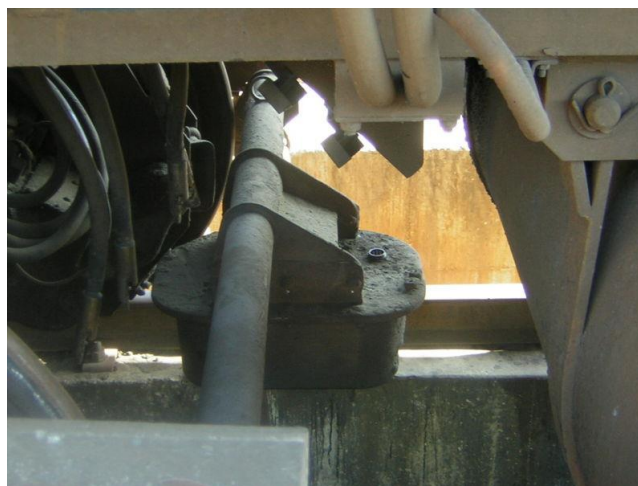


Ilustración 7.2.- Disposición de las balizas del tren en el sistema ASFA

El esquema de actuación del sistema ASFA es el mostrado en la siguiente imagen:



Ilustración 7.3.- Esquema general de actuación del sistema ASFA

Por ejemplo, para una parada por presencia de un tren, gráficamente se puede representar mediante la siguiente imagen:

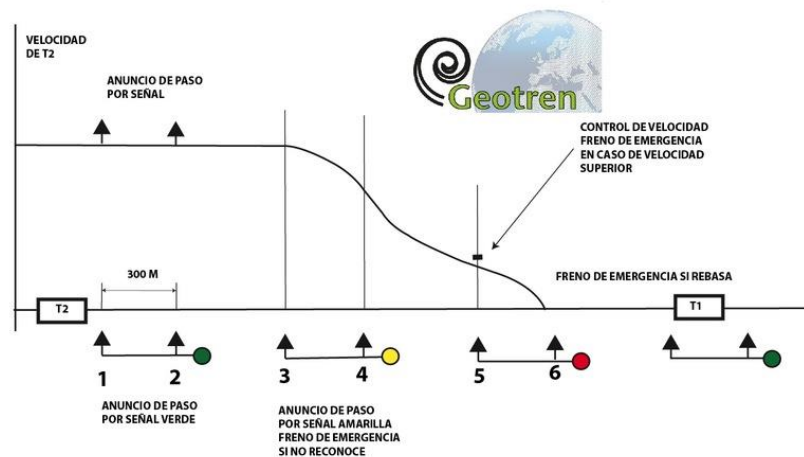


Ilustración 7.4.- Esquema general de actuación del sistema ASFA

Donde el sistema ASFA realizaría las siguientes funciones:

- En primer lugar, este esquema representa la actuación del sistema ASFA ante la presencia en la vía de otro tren, es decir, T1 representa un tren, y T2 representa el otro tren que se va a encontrar con el primero.
- Cuando el tren pasa por las dos primeras balizas, cuya señalización indica, mediante el color verde, el estado de vía libre se emite una señal con una amplitud grande y es continua en todo momento, debido a que no se tiene que actuar sobre el tren.

- Por el paso de las dos siguientes balizas, la señalización indica, mediante el color amarillo, el anuncio de parada o de precaución; como se puede observar se deforma la señal emitida por las balizas, y en el tren se transmite la señal, esperando la confirmación del maquinista para no activar el frenado automático, ya que dicha señal todavía no es de parada. El maquinista ante esta señal deberá de adecuar la velocidad del tren.
- Cuando el tren pasa por las dos posteriores, y últimas balizas, cuya señal emitida, en color rojo, es la de parada del tren, el tren se ha de detener mediante la acción del maquinista. En el caso de que por el paso de las balizas de señalización en color amarillo, el maquinista no hubiese actuado sobre su velocidad, en el punto remarcado actuaría el freno de emergencia.

7.2.2.- Sistema ERTMS

El sistema ERTMS (Sistema de Gestión de Tráfico Ferroviario) es un proyecto europeo, que está constituido por dos componentes técnicos:

- GSM-R, que es el sistema de comunicación inalámbrico entre el tren y la vía, es decir es el encargado de la transmisión de voz y datos entre el tren y las instalaciones fijas
- ETCS, que es el sistema de señalización y control de tráfico.

Es decir, este sistema está compuesto por un sistema ASFA. Además posee un sistema de comunicación como el de los móviles, basado en el sistema estándar GSM (Global System for Mobile), es decir este sistema permite realizar la comunicación del tren con los dispositivos electrónicos utilizados hoy en día, como el ordenador, el teléfono móvil o una Tablet. Esto permite obtener una mayor información acerca del estado de la vía. Este sistema de transmisión de datos posee un estándar de comunicación de segunda generación (2G).

El sistema ETCS es el encargado de controlar los trenes, y se han dispuesto los tres niveles siguientes:

- ETCS nivel 1. Dicho nivel realiza las labores de control y regulación como el sistema ASFA descrito en el apartado anterior.
- ETCS nivel 2. Consiste en la superposición del sistema ETCS nivel 1 con un elemento de señalización dispuesto en cabina mediante el RBC (Radio Block Center), que es el encargado de determinar y transmitir una descripción de la vía y autoriza los movimientos de cada tren, mediante el sistema de comunicación GSM-R
- ETCS nivel 3. Aparte de incluir los niveles anteriores, adicionalmente posee una función de la determinación activa de la distancia entre los trenes, ya que permite la comunicación entre los trenes mediante el RBC con el sistema de comunicación GSM-R.

7.2.3.- Sistema PZA / INDUSI

El sistema PZB es derivado del sistema INDUSI, y significa protección inductiva de la señal. Este sistema está basado en las señales que inducen las bobinas y la reacción que se produce sobre un imán, que están dispuestas en la vía y en el tren. El tren posee bobina, mientras que la vía posee un circuito pasivo resonante (una bobina variable).

El principio de funcionamiento sería el siguiente:

- En el caso de que la señal correspondiente indique el estado de vía libre (continuación de la marcha del tren), el circuito de la vía no se activa, por lo tanto cuando pase el tren con su bobina no se acoplarán magnéticamente y no se modificará ninguna señal.
- En el caso de que la señal correspondiente indique la imposibilidad de la marcha del tren, el circuito resonante en la vía se activará, provocando al paso del tren un acoplamiento magnético producido por la resonancia, ya que la bobina del tren emite una frecuencia que entra en resonancia con el circuito colocado en la vía, disminuyendo la tensión de la bobina en el tren, que a su vez activará las acciones pertinentes establecidas en el protocolo de actuación y seguridad ante una modificación de los parámetros normales de la bobina del tren, por ejemplo la activación del freno

de emergencia. El circuito resonante dispuesto en la vía no necesita alimentación eléctrica.

7.2.4.- Sistema CROCODILE

El sistema CROCODILE es un dispositivo que permite la repetición de señales en cabina, y consiste en una barra ondulada de dos metros de longitud aproximadamente situada entre los carriles que entra en contacto con un colector de escobillas instaladas en el tren, tal que como se muestra en las siguientes imágenes:



Ilustración 7.5.- Barra ondulada del sistema CROCODILE



Ilustración 7.6.- Colector de escobillas del sistema CROCODILE

El principio de funcionamiento de este sistema sería el siguiente: cuando el sistema se activa por algún problema, la barra adquiere una tensión de ∓ 20 V de corriente continua, que es recogida por el tren a su paso, en el que se recibe una señal en cabina de freno que si no se obedece provoca la activación del freno automático de emergencia.

7.2.5.- Sistema EIDOS

El sistema EIDOS (Equipamiento Informático Destinado a la Orientación y Seguridad) está destinado a reforzar las labores de control ante la posibilidad de un incendio próximo a la vía por la que debe circular el tren.

El sistema EIDOS está constituido por 2 tipos de dispositivos:

- WSN (Wireless Sensor Network). Es una red de sensores dispuestos en zonas concretas de las vías del tren en las que

exista un riesgo alto de incendio. Los tipos de sensores que posee este dispositivo están destinados a captar, medir y procesar periódicamente una serie de magnitudes físicas tales como la temperatura, la humedad, presión, etc. Además de estar dotados de un receptor GPS, de forma que se permite conocer la posición de cada dispositivo.

- UMPCS's (Ultra Mobile PC's). Es un dispositivo móvil inalámbrico dispuesto en la cabina del maquinista, y es el encargado de captar, analizar y reproducir la información generada y transmitida por parte de los WSN.

El esquema gráfico de este sistema sería el siguiente:

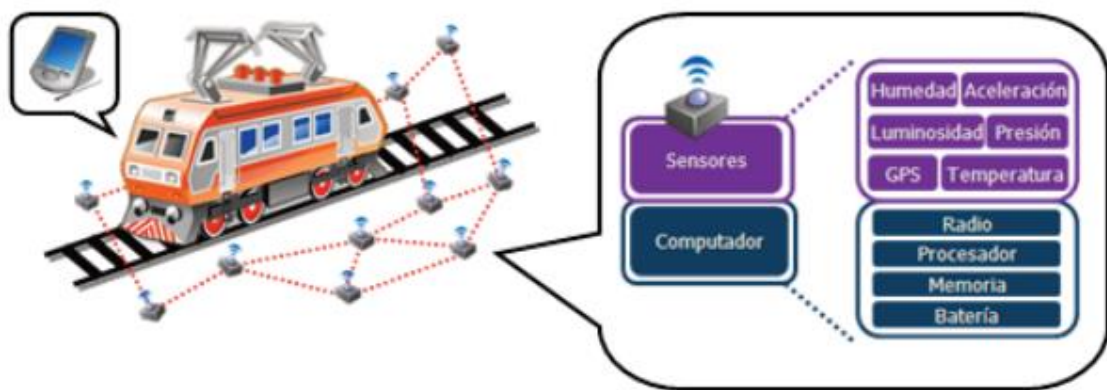


Ilustración 7.7.- Esquema general del sistema EIDOS

Con el conjunto de señales e información obtenida se actuará según el protocolo de seguridad y control establecido.

CAPÍTULO 8:

NUEVOS DESARROLLOS

CAPÍTULO 8.- NUEVOS DESARROLLOS

	<i>Página</i>
8.1.- Introducción	204
8.2.- Proyectos de Eficiencia Energética.....	204
8.2.1.- FreeDRIVE: Circulación de Vehículos sin Catenaria.....	204
8.2.2.- EVODRIVE y Ferrolinera: Aprovechamiento de la Energía Cinética	205
8.3.- Proyecto de Investigación en Infraestructura y Máquinas de Tracción. HYPERLOOP: El Transporte del Futuro	207
8.4.- Nuevos Desarrollos en Infraestructura. FACTS en la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria	212
8.5.- Nuevos Interruptores Automáticos Extrarrápidos FKS II.....	215
8.6.- Tendencias en el Sector y Líneas de Investigación	216

8.1.- Introducción

Este capítulo tiene como objetivo mostrar los nuevos desarrollos más relevantes en el sector, así como las líneas y proyectos de investigación que se están realizando en la actualidad. Para ello se va a realizar una descripción sobre el fundamento teórico de cada una de ellas en los siguientes apartados.

8.2.- Proyectos de Eficiencia Energética

En este apartado se muestran los proyectos más relevantes en cuanto a eficiencia energética se refiere. La eficiencia energética se considera hoy en día como una parte fundamental que todo desarrollo tecnológico debe tener, debido a la necesidad de optimizar el consumo de los recursos naturales que disponemos y aprovecharlos sacando el máximo rendimiento posible.

8.2.1.- FreeDRIVE: Circulación de Vehículos sin Catenaria

Es un proyecto desarrollado por la compañía 'CAF Power & Automation' que consiste en la circulación de las unidades de tracción sin la alimentación continua desde la catenaria mediante un sistema de acumulación de energía a bordo de la unidad de tracción.

Este proyecto propone la disposición de supercondensadores y baterías que darán suministro energético a los motores durante el trayecto. Estas baterías y supercondensadores serán cargados durante el estacionamiento en las cocheras, las paradas en las estaciones y el freno del vehículo en paradas y descensos en los desniveles.

Las características principales que ofrece este sistema son las siguientes:

- Los vehículos pueden circular en tramos donde no exista catenaria (Hasta 1400 metros).
- Se disminuye el impacto visual de la infraestructura.
- Se abarata el coste de la infraestructura.
- El ahorro energético estimado es del 30 % aproximadamente.

De forma gráfica, el funcionamiento de este proyecto se muestra en la siguiente imagen:

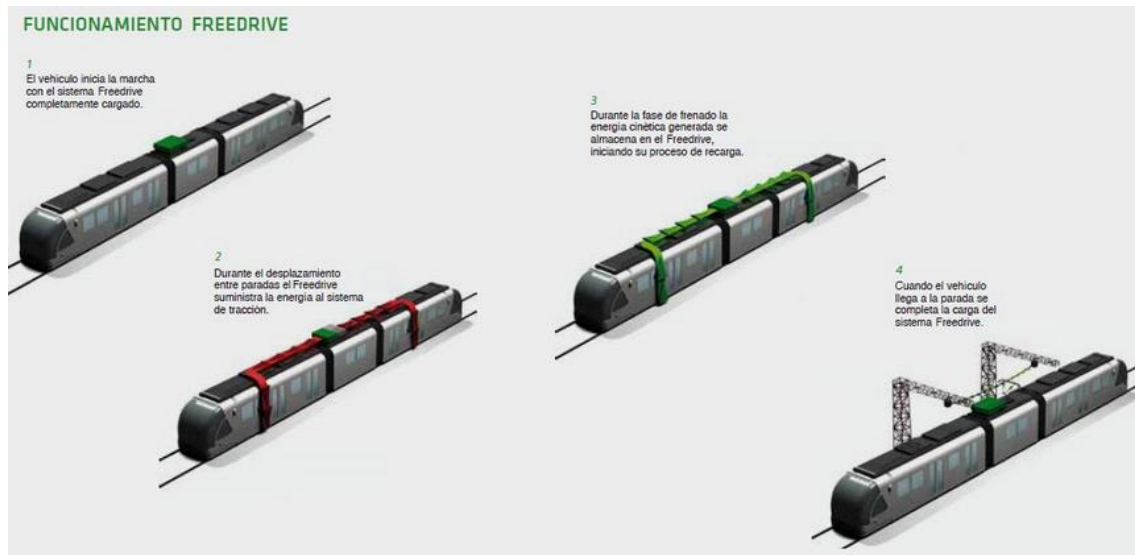


Ilustración 8.1.- Principio de funcionamiento de la tecnología FreeDRIVE

Esta tecnología tiene como referencia de implantación al 'Mass Rapid Transport Bureau' de Taiwan, el tranvía de Zaragoza y el 'TUSSMAN' de Sevilla.

8.2.2.- EVODRIVE y Ferrolinera: Aprovechamiento de la Energía Cinética

Los proyectos de investigación de EVODRIVE y la Ferrolinera están desarrollados por las empresas 'CAF Power & Automation' y la administradora de la infraestructura ferroviaria ADIF respectivamente.

El proyecto EVODRIVE consiste en la disposición de supercondensadores y baterías a bordo de la unidad de tracción de la unidad de tracción para almacenar la energía generada en el frenado de la unidad de tracción para posteriormente suministrar dicha energía a los motores y no tener que abastecerse de la catenaria para reducir el consumo de la unidad de tracción. Para ello, a bordo de la unidad de tracción se ha de disponer un sistema de acumulación (baterías, supercondensadores, etc.), un convertidor DC / DC que se encargue de la gestión del nivel de carga y descarga de las baterías y supercondensadores y elementos electrónicos de control para gestionar de una forma óptima el flujo de energía.

El proyecto de la 'Ferrolinera' tiene como objetivo aprovechar la energía eléctrica generada del frenado de la unidad de tracción para autoabastecer a la misma y reducir su consumo, así como dar servicio a un punto de recarga de vehículos eléctricos que están dispuestos en las proximidades del trazado ferroviario. Para ello, este sistema está formado por un convertidor a bordo de la unidad de tracción, un sistema de acumulación como en el proyecto anterior, los puntos de recarga y un volante de inercia que sirve de apoyo para abastecer a las unidades de tracción así como los puntos de recarga. Como parte de este proyecto también está incluido el de dotar a las instalaciones de los puntos de recarga con paneles solares para que dicho punto sea de abastecimiento de energía renovable únicamente.

El principio de funcionamiento de este sistema está basado en dos etapas, una primera etapa de carga donde la energía generada del frenado de las unidades de tracción se aprovecha para recargar las baterías internas del propio tren, así como el de accionar un volante de inercia que posee un motor de una potencia nominal de 350 kW y una velocidad nominal de 6500 r.p.m. Cuando el motor del volante de inercia alcance su velocidad nominal deja de abastecerse de la catenaria y se mantiene en movimiento a la espera de la etapa de descarga. Esta etapa queda reflejada en la siguiente imagen:



Ilustración 8.2.- Etapa de carga en el proyecto de las Ferrolineras

En la etapa de descarga, el volante de inercia que estaba funcionando como motor, ahora se comporta como generador y comienza a abastecer de energía eléctrica tanto a la catenaria como al punto de recarga hasta que se gasta la energía almacenada. Esta etapa queda representada en la siguiente imagen:

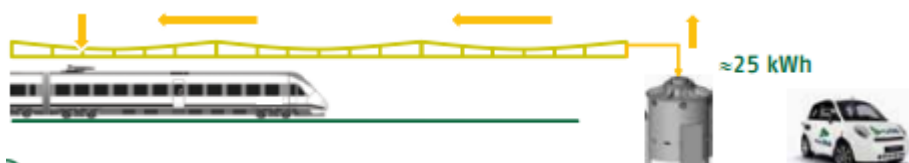


Ilustración 8.3.- Etapa de descarga en el proyecto de las Ferrolineras

De forma esquemática, el proyecto de la Ferrolinera queda representado en la siguiente imagen:

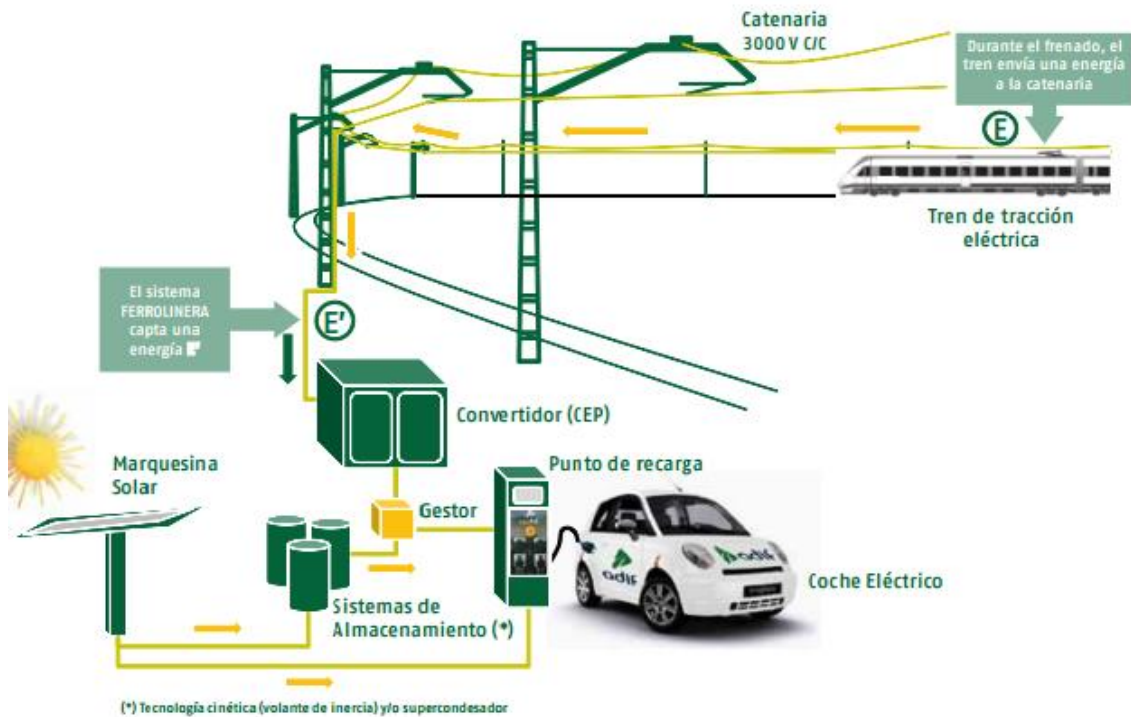


Ilustración 8.4.- Esquema general del funcionamiento del proyecto de las Ferrolineras

8.3.- Proyecto de Investigación en Infraestructura y Máquinas de Tracción. HYPERLOOP: El Transporte del Futuro

Ha sido presentado recientemente un proyecto que llevaba muchos años como concepto y es el Hyperloop. Gracias a las compañías americanas CROQDSTORM y TESLA MOTOR se ha financiado un proyecto de implantación de este método de tracción novedoso para el trazado ferroviaria desde Los Ángeles hasta San Francisco.



Ilustración 8.5.- Trazada ferroviario desde San Francisco a los Ángeles. Hyperloop

Este sistema revoluciona el mundo del transporte civil, y su funcionamiento consiste en un tubo, que hace de vía de la cápsula que circula por su interior, que está relleno de aire a baja presión y realiza su movimiento gracias a la levitación magnética originado por un motor línea, donde el estator se encuentra alojado en la cápsula en forma de cuchillas, y el rotor está dispuesto dentro del tubo. El rendimiento de este material rodante se ve aumentado por la levitación generada por un compresor que contiene a bordo que hace que la cápsula se desplace verticalmente de la superestructura.

Según el informe emitido por estas compañías, se calcula que las cápsulas pueden alcanzar una velocidad de 1.220 km / h, número de mach 0,91 a 20 °C. Haciendo un cálculo estimado, si se realizase un tramo recto desde Madrid a Barcelona con este sistema, la cápsula tardaría en recorrer este trayecto en tan solo media hora.

La cápsula se ha proyectado para que tenga una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

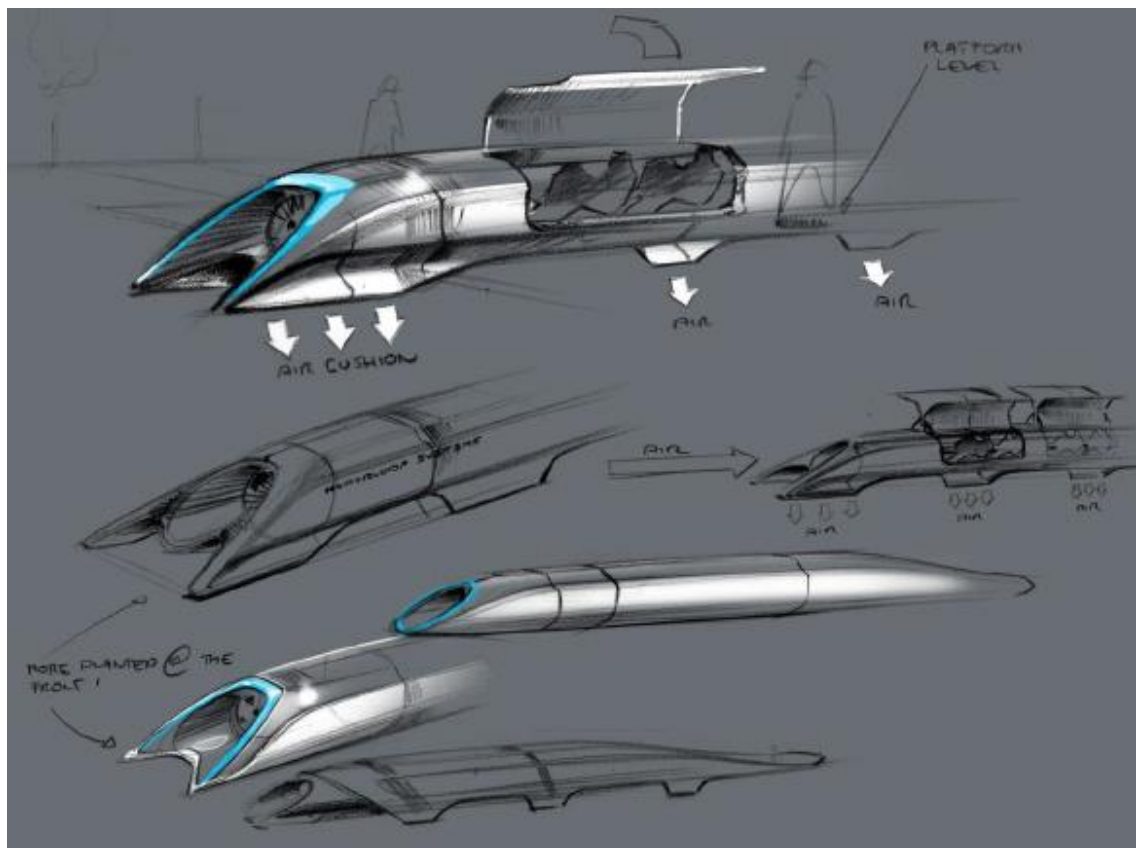


Ilustración 8.6.- Diseño de las cápsulas en el sistema Hyperloop

Se han proyectado dos tipos de cápsulas, una puede albergar hasta 28 pasajeros, con un equipaje de mano, y otra de tres cápsulas que podrá albergar hasta 84 pasajeros.

Cada cápsula cuenta con un compresor y una zona de baterías que llegará a pesar unos 1.500 kg y una autonomía de 45 minutos. Un esquema general de los elementos a bordo de la cápsula es el que se muestra en la siguiente imagen:

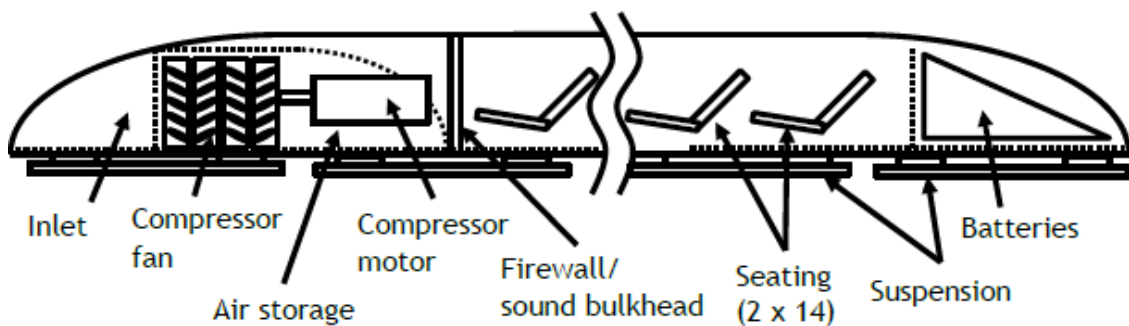


Ilustración 8.7.- Elementos a bordo de la cápsula del sistema Hyperloop

TESLA MOTORS S.L. ha provisto a esta ha provisto a estas dos cápsulas con dos motores eléctricos lineales con potencias de 100 kW (134 CV) y 285 kW (382 CV). La forma del motor eléctrico se muestra en la siguiente imagen:

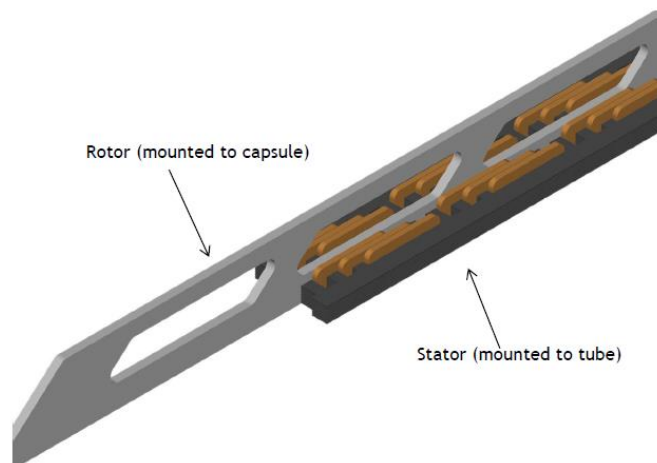


Ilustración 8.8.- Forma del motor eléctrico lineal del sistema Hyperloop

Las dimensiones, y distancias, características que tendrá este motor se muestra en la siguiente imagen:

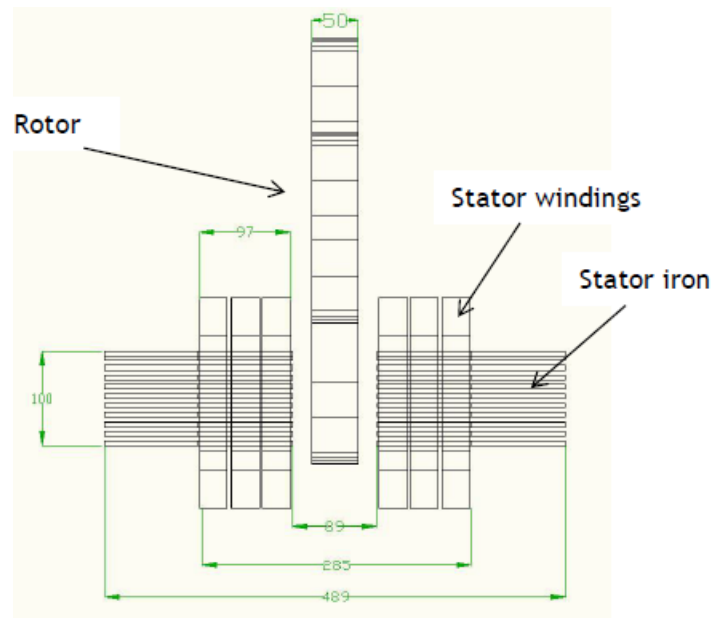


Ilustración 8.9.- Detalle de las distancias existentes del entrehierro en el motor lineal del sistema Hyperloop

La superestructura cuenta con unas estructuras de hormigón en forma de pilote que darán soporte a los tubos que contendrán a las cápsulas. Además, está proyectado que sobre los tubos se dispongan de paneles fotovoltaicos para recargar el material rodante. La forma que tendrá estas estructuras de hormigón se muestran en la siguiente imagen:

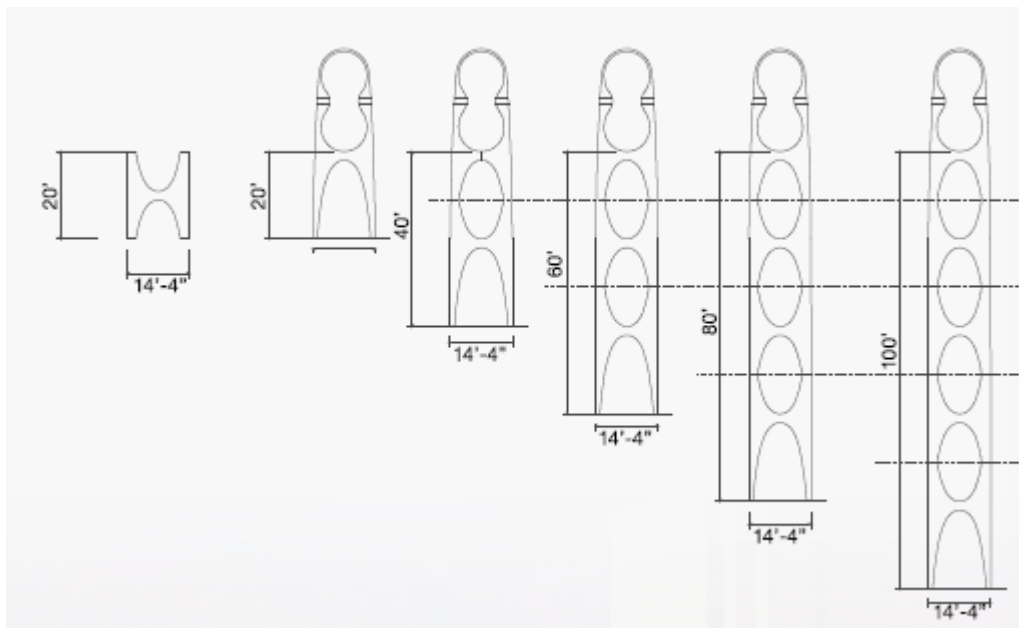


Ilustración 8.10.- Estructuras de hormigón en el sistema Hyperloop

El conjunto de la superestructura tendrá una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:

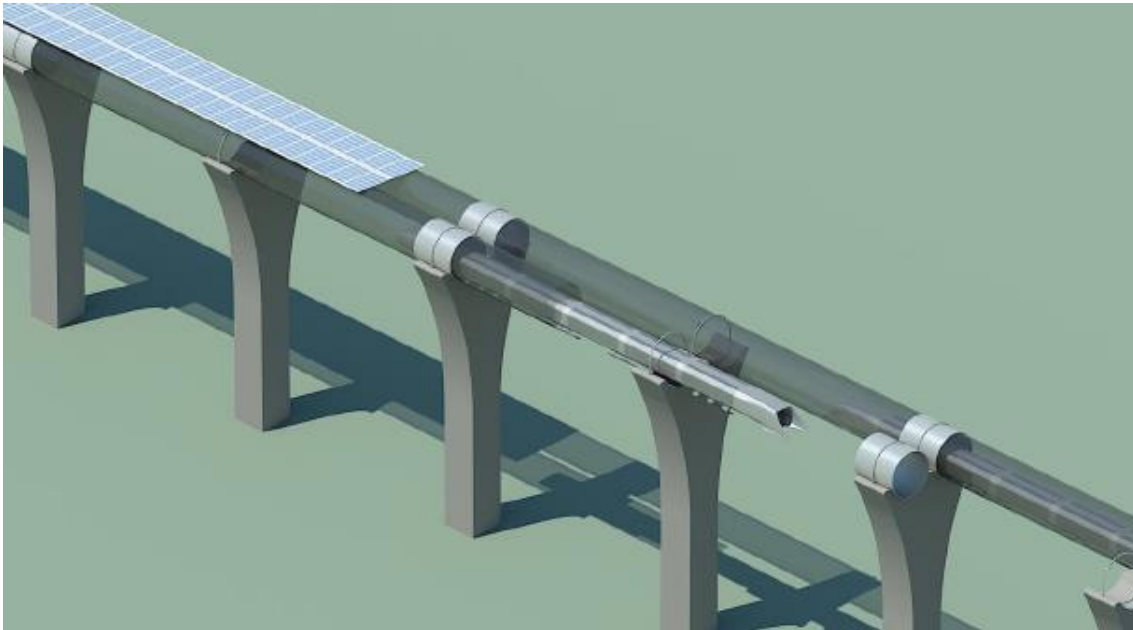


Ilustración 8.11.- Superestructura del sistema Hyperloop

La forma que tendrá el circuito eléctrico de este sistema se muestra en la siguiente imagen:

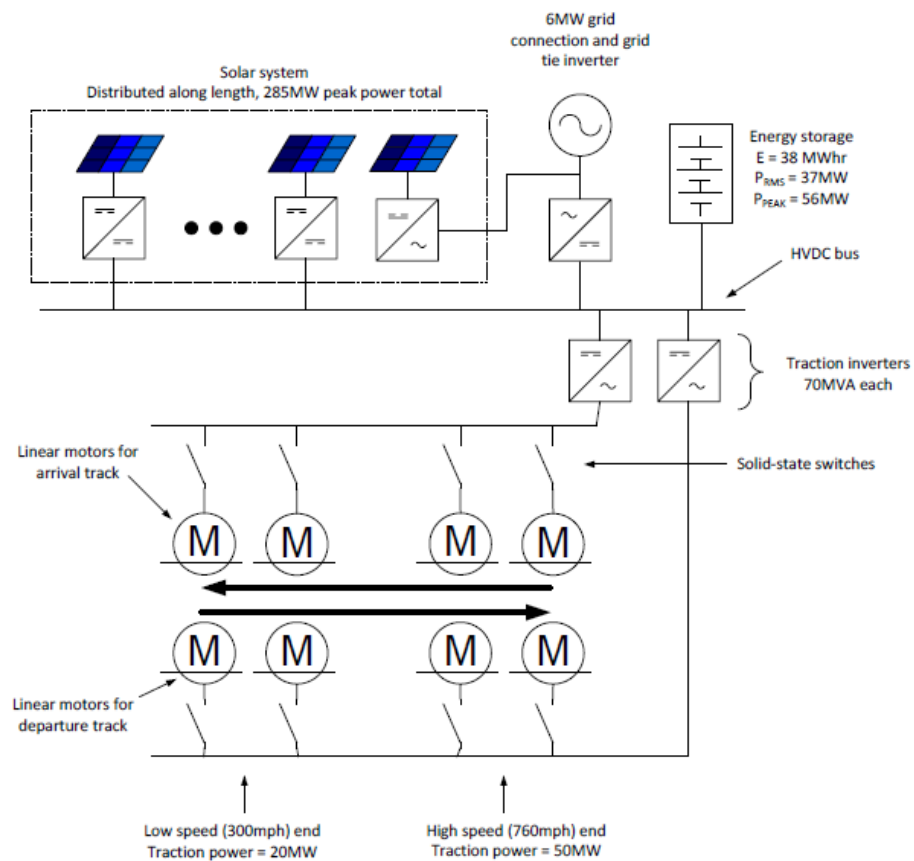


Ilustración 8.12.- Circuito eléctrico del sistema Hyperloop

En la imagen anterior se observa como los motores lineales son alimentados a través de un convertidor, al que le llega la energía eléctrica procedente de centrales eléctricas, los paneles fotovoltaicos dispuestos en la superestructura y el conjunto de baterías a bordo de la cápsula.

Hasta la fecha, el tren de levitación magnética había sido la unidad de tracción que podía alcanzar las mayores velocidad, pero tenía no podía alcanzar más velocidad debido a la carga resistiva del aire. Por este motivo, han ideado un sistema de vacío dentro del tubo para eliminar esas pérdidas originadas por el rozamiento del aire, y para ello han seccionado el tubo en tramos donde existen diferentes presiones, por ejemplo, con la cápsula lleva a una estación, esta se encuentra a presión atmosférica, pero cuando comienza la marcha va pasando por unos tramos que van modificando su presión a su paso para acelerar esta unidad de tracción. El funcionamiento de este sistema de vacío se muestra en la siguiente imagen:

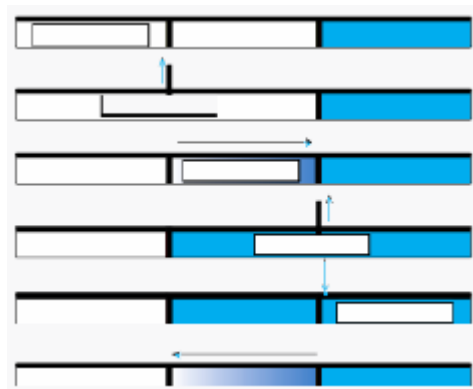


Ilustración 8.13.- Sistema de vacío para el lanzamiento del sistema Hyperloop

8.4.- Nuevos Desarrollos en Infraestructura. FACTS en la Red Eléctrica de Tracción Ferroviaria

Hoy en día los medios de transporte son cada vez más rápidos y fiables en cada uno de los medios de transporte existentes. Mostrando una especial atención en la tracción eléctrica ferroviaria, se van implantando nuevos modelos de material rodante que proporcionan una mayor velocidad de transporte, esto implica una mayor demanda de potencia por parte de la unidad de tracción.

Por otro lado, el aumento el aumento del tráfico ferroviario afecta directamente a la calidad de la energía eléctrica. Como se ha comentado en capítulos anteriores, la tracción eléctrica ferroviaria introduce desequilibrios en la red eléctrica de compañía debido a que los sistemas de alimentación no son trifásicos. Es por esto que, cada vez más, existan mayores fluctuaciones en la red y la calidad de la energía eléctrica venga en detrimento.

Otro problema que afecta a la calidad de la energía es el tema de los armónicos. Actualmente los equipos electrónicos están cada vez más presentes en la red eléctrica.

Por estas razones se está desarrollando un sistema de transporte de energía eléctrica flexible conocido como **FACTs**.

Los FACTs son un conjunto de dispositivos formados por elementos de electrónica de alta potencia y dispositivos estáticos de control que permiten optimizar el flujo de la energía eléctrica. Estos dispositivos se denominan **SVC**.

El SVC es un dispositivo que se ha desarrollado recientemente y cuyo objetivo es el de compensar los desequilibrios originados por las cargas monofásicas y bifásicas a través de algoritmos de control. Este dispositivo está formado por tiristores, reactancias y resistencias que hace que la tensión de la catenaria se mantenga constante, y además, se encarga de filtrar las componentes armónicas.

El principio de funcionamiento consiste en una reactancia variable y un banco de condensadores variable, ambas controladas por tiristores, y dispuestas en paralelo antes de suministrar la energía a la subestación, haciendo que la componente fundamental se mantenga al nivel establecido por los tiristores, y las componentes armónicas desaparezcan. Cuando la corriente pasa a través de las reactancias, los tiristores se activan mediante el ángulo de disparo preestablecido, actuando como un controlador PI. Mientras que las baterías de condensadores tiene la función de corregir el factor de potencia.

El esquema eléctrico de funcionamiento se muestra en la siguiente imagen:

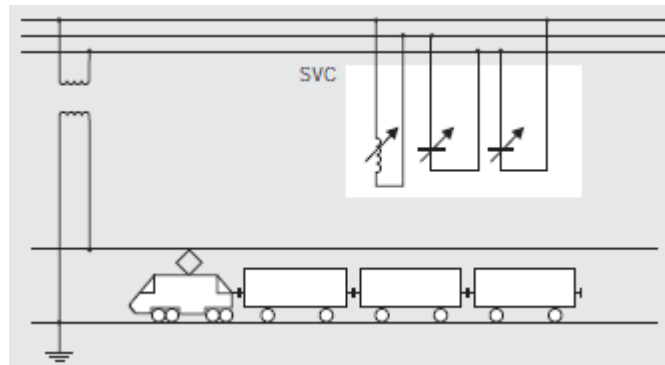


Ilustración 8.14.- Esquema eléctrico general del funcionamiento de los FACs

Los dispositivos SVC tienen un esquema eléctrico tal y como se muestra en la siguiente imagen:

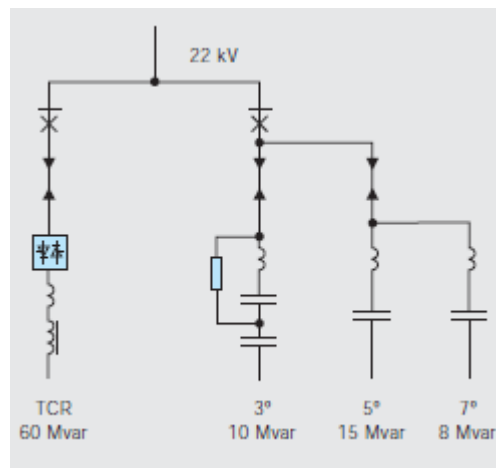


Ilustración 8.15.- Esquema eléctrico de un equipo SVC

Gracias a los desarrollos en la electrónica de potencia, los dispositivos SVC actuales (SVC light) tienen un esquema eléctrico tal y como se muestra en la siguiente imagen:

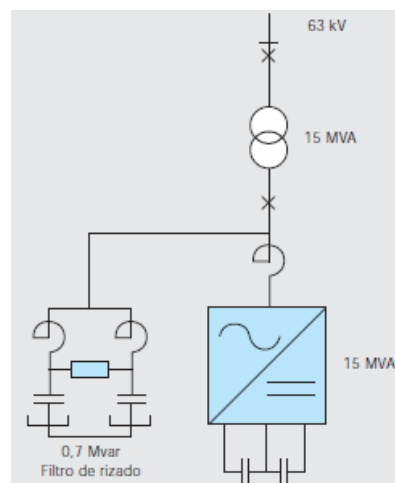


Ilustración 8.16.- Esquema eléctrico de un equipo SVC light

Su aspecto físico, dispuesto en una edificación en la red eléctrica, se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 8.17.-Equipo SVC light

Por ultimo comentar que gracias a este avance tecnológico, las nuevas subestaciones de tracción ferroviaria de nueva construcción que integren estos dispositivos se podrán alimentar a tensiones más bajas, como por ejemplo 132 kV, frente a los 220 kV o 400 kV de tensión de acometida de alimentación a las subestaciones, ya que este dispositivo estabiliza la tensión, y reduce los desequilibrios que empeoran la calidad de la energía eléctrica suministrada.

8.5.- Nuevos Interruptores Automáticos Extrarrápidos FKS II

Los interruptores automáticos extrarrápidos constituyen un elemento fundamental de protección de nuestro circuito eléctrico en nuestro sistema de tracción eléctrica.

Gracias a los nuevos desarrollos en componentes en electrónica de potencia, la compañía ABB ha diseñado un nuevo modelo de interruptor (de vacío) de intemperie para los sistemas eléctricos de alimentación a la tracción ferroviaria de corriente alterna 1 x 25 kV y 2 x 25 kV.

Los interruptores automáticos extrarrápidos FKS II que ha desarrollado el fabricante ABB tienen una forma tal y como se muestra en la siguiente imagen:



Ilustración 8.18.- Interruptor automático extrarrápido FKS II

El gran avance de este dispositivo radica en la disposición en él de un dispositivo electrónico accionado por un actuador magnético que hace la función de accionamiento del dispositivo, sustituyendo al tradicional accionamiento mecánico. Esto conlleva una reducción en su tamaño y su complejidad de fabricación, ya que se necesitan menos elementos para fabricarlos.

Esta reducción trae ventajas fundamentales como la reducción de las instalaciones eléctricas, y su fácil disposición en instalación ya existentes.

En relación a las protecciones eléctricas existe una tendencia en el sector de ir reduciendo los accionamientos mecánicos, e ir sustituyéndolos por accionamientos eléctricos y electrónicos para poder compactar las instalaciones y reducir así sus costes de instalación y mantenimiento.

8.6.- Tendencias en el Sector y Líneas de Investigación

Bajo este apartado se van a enumerar cada una de las tendencias y líneas de investigación que existen actualmente en el sector ferroviario, para ello se van a clasificar por temáticas como las propuestas en este documento.

La plataforma tecnológica española nos proporciona toda la información referente a esta temática, ya que es un organismo público que se encarga de recabar información acerca de los trabajos de investigación que están realizando las empresas españolas con otras empresas a nivel internacional, siendo lo expuesto en sus publicaciones toda la información actual acerca de los trabajos de investigación que se están llevando a cabo.

Un tema fundamental considerado por todos los integrantes del sector ferroviario es la seguridad, ya que al ser un medio de transporte de personas masivo ha de ser fiable al cien por cien, para ello, las nuevas líneas de investigación y proyectos en desarrollo se enumeran a continuación:

- Normalización del sistema de seguridad ERTMS para solventar las diferencias entre versiones y mejorar la compatibilidad.
- Formalizar un laboratorio de referencia ERTMS, que este provisto del equipamiento necesario para llevar a cabo la normalización del sistema y servir de referente de los sistemas de seguridad ferroviaria.
- Incorporar las nuevas tecnologías desarrolladas como los nuevos sistemas de comunicación e interoperabilidad.
- Creación de un método común para cualificar los equipos a bordo del material rodante y las instalaciones.
- Desarrollo de un sistema de ayuda a la gestión y la seguridad en base a una herramienta de análisis de datos emitidos por los sistemas ERTMS.
- Desarrollo y estudios de viabilidad del sistema ETCS de nivel 3.
- Desarrollo de un sistema de seguridad que reduzca la aparición de errores debidos al factor humano según lo establecido por la ERRAC (The European Rail Research Advisory Council).

En cuanto al material rodante e infraestructura se refiere, las líneas de investigación que se están llevando a cabo son las siguientes:

- Mejora de los sistemas de comunicación y entretenimiento a bordo (LCD, DVD, Wifi, IP, etc.) y con el exterior (GSM – R, GPRS, EDGE o UMTS).
- Investigación e implementación de nuevos sistemas de frenado (frenos de fibra de carbono, frenos aerodinámicos, frenos de alta potencia, etc.) y optimización de los sistemas actuales.
- Desarrollo de los motores de tracción en lo referente a su disposición. Integración de los motores de tracción en el eje sin elementos de reductores.
- Desarrollo de las suspensiones inteligentes del material rodante.
- Investigación en nuevos componentes para las ruedas, y nuevos modelos.
- Desarrollo sobre la interacción del material rodante con la infraestructura a través de la compatibilidad electromagnética. La red ferroviaria inteligente.
- Investigación acerca de la adaptación del pantógrafo a distintas líneas.
- Desarrollo del sistema de alimentación por suelo APS.
- Investigación y perfeccionamiento sobre nuevos materiales rodantes alimentados con otras alternativas energéticas (biogás, hidrógeno, levitación magnética, sistemas híbridos).
- Investigación sobre los volantes de inercia y los supercapacitores como nuevos sistemas de almacenamiento de energía.
- Implementación de la sensorización on – board que consiste en dotar de sensores inteligentes al material rodante con fines de mantenimiento predictivo y de monitorización remota.
- Diseño de un detector de carril roto.
- Desarrollo del mantenimiento inteligente a través de nuevas tecnologías.
- Optimizar y analizar en profundidad la interacción catenaria rígida – pantógrafo.
- Desarrollo de vías de muy alta velocidad (350 km/h).

- Diseñar, construir e instalar equipos convertidores de muy alta potencia en las nuevas subestaciones desarrolladas para las vías de muy alta velocidad.
- Diseñar, construir e instalar equipos convertidores de muy alta potencia para conversiones de corriente continua a 3.000 V, a corriente alterna monofásica a 25.000 V.
- Desarrollo de las subestaciones de tracción de corriente continua reversibles para optimizar la tecnología del freno regenerativo.

En el informe de ADIF 2013 - 2014 sobre su actividad en I+D+i, el administrador está desarrollando los siguientes citados textualmente:

- Sistema avanzado de medición y predicción del viento lateral.
- Pantalla ferroviaria de triple función (viento, ruido y generadora de energía eléctrica).
- Corrientes inducidas para la inspección superficial de carriles.
- Integración de la monitorización de viaductos ferroviarios en el sistema de gestión y mantenimiento de infraestructuras.
- Investigación sobre la aplicación de las TIC a la innovación de las diferentes infraestructuras correspondientes a las instalaciones de electrificación y al suministro de energía.
- Seguimiento del comportamiento de secciones de vía de líneas ferroviarias de alta velocidad mediante técnicas de instrumentación.
- Comportamiento de estructuras de puente en líneas ferroviarias de alta velocidad.
- Puentes con dispositivos antisísmicos.
- Desarrollo de SW de cálculo de catenarias ferroviarias.
- Desarrollo de algoritmos de cálculo en 3D de la interacción dinámica entre pantógrafo y catenaria y su implementación en herramienta informática.
- Desarrollo de un sistema de auscultación de balizas ERTMS.
- Desarrollo de sistemas avanzados de interoperabilidad ferroviaria basados en tecnologías

- TIC mediante desarrollo del componente ERTMS.
- Investigación de técnicas avanzadas para la mejora de la explotación ferroviaria en zonas neutras de catenaria en líneas ferroviarias de alta velocidad.
- Desarrollo de la tecnología de telefonema digital para procesos de seguridad en la circulación.
- Estandarización y desarrollo del sistema LTE y convergencia IP para entornos ferroviarios.
- Posicionamiento de trenes mediante uso de satélites (proyecto europeo GRAIL-2).
- Interoperabilidad ferroviaria.
- Desarrollo de un primer prototipo de subestación de tracción de C/C reversible.
- Desarrollo de sistema de recarga de vehículos eléctricos desde la red eléctrica ferroviaria.
- Desarrollo de la primera red eléctrica inteligente ferroviaria.
- Seguimiento y asesoramiento geotécnico para el estudio de la instrumentación postconstructiva del Túnel de El Regajal.
- Utilización de nuevas técnicas para la comprobación del grado de compactación y del módulo de deformación del sub-balasto.
- Metodología racional para el análisis dinámico de líneas ferroviarias a corto-largo plazo.
- Investigación del sub-balasto bituminoso y optimización de los cambios de rigidez de vía en la instalación para infraestructuras ferroviarias del CEDEX.
- Estudios específicos para resolución de casos puntuales y realización de ensayos geotécnicos de laboratorio.
- Instrumentación permanente y seguimiento de la evolución del nuevo conjunto estructural del puente del Candí.
- Mejora ambiental de la red convencional de ferrocarriles gestionada por ADIF.
- Validación o redefinición de las medidas preventivas y correctoras de impactos ambientales implantadas en plataformas de líneas ferroviarias de alta velocidad.

- Uso de materiales elastómeros obtenidos a partir de neumáticos fuera de uso y resinas orgánicas, aplicados en el ámbito ferroviario (proyecto europeo RECYTRACK).
- Soluciones de mitigación de vibraciones inducidas por los trenes (proy. europeo RIVAS).
- El transporte ferroviario de mercancías sostenible (proyecto europeo SUSTRAIL).
- Detección de seguridad del posicionamiento de trenes en trayectos.
- Desarrollo de tecnologías de identificación y comunicaciones para la mejora de la información y seguridad a lo largo de la cadena logística.
- Investigación del efecto del cruce de un tren de alta velocidad con uno de mercancías.
- Transiciones dinámicas para vías de Alta Velocidad.
- Desarrollo de un balasto pesado reciclado a partir de hormigón de alta densidad para eliminar el vuelo del balasto.
- Desarrollo y aplicación de un nuevo material regulador de la fricción.
- Nuevo balasto de Altas Prestaciones con árido reciclado.
- Sistema de Gestión del Material Móvil.
- Desarrollo de un detector de rotura de carril.
- Gestión inteligente y sostenible de la energía para sistemas ferroviarios inteligente Europeos (proyecto europeo MERLIN).
- Aumento de la capacidad de las redes de ferrocarril a través de mejorar la infraestructura y el funcionamiento óptimo (proyecto europeo CAPACITY 4 RAIL)
- Desarrollo de sistemas inteligentes para el apoyo de toma de decisiones en el mantenimiento de infraestructuras ferroviarias (proyecto europeo OPTIRAIL).

CAPÍTULO 9:

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 9.- BIBLIOGRAFÍA

	<i>Página</i>
9.1.- Normativa	224
9.2.- Libros	224
9.3.- Artículos	225
9.4.- Proyectos.....	226
9.5.- Direcciones de internet.....	226

9.1.- Normativa

[1] Normativa ADIF: ET 03.359.101.7. Título: *Transformadores de potencia sumergidos en aceite de 3300 y 6600 kVA, para subestaciones de tracción de líneas convencionales.*

[2] Normativa ADIF: ET 03.359.121.5. Título: *Transformadores de potencia de tipo seco para subestaciones de tracción de 3,3 kV de CC.*

[3] Normativa ADIF: ET 03.359.116.5. Título: *Transformadores de alimentación a servicios auxiliares para subestaciones de tracción de 3,3 kV de CC.*

[4] Normativa ADIF: ET 03.359.115.7. Título: *Bobinas de alisamiento para subestaciones de tracción de corriente continua.*

[5] Normativa ADIF: ET 03.359.117.3. Título: *Transformadores para alimentación de servicios auxiliares de 25 kV.*

[6] Normativa ADIF: ET 03.359.504.2. Título: *Transformadores de potencia para subestaciones de tracción. Sistema 2 x 25 kV.*

9.2.- Libros

[7] Título: *Sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria.* Autores: Manuel Carmona Suárez y Jesús Montesinos Ortuño. Editorial: Formarail, S.L. Fecha de publicación: 2013. ISBN: 978-84-615-9536-5.

[8] Título: *Ingeniería ferroviaria.* Autores: Francisco Javier González y Julio Fuentes Losa. Editorial: UNED. Fecha de publicación: 2010. ISBN: 978-84-362-6074-8.

[9] Título: *Tecnología e ingeniería ferroviaria.* Autores: Juan Antonio Villaronte Fernández-Villa. Editorial: Delta Publicaciones. Fecha de publicación: 2012. ISBN: 978-84-92453-36-8.

[10] Título: *La tracción eléctrica en la alta velocidad ferroviaria (A.V.F.)*. Autores: *Alberto Faure Benito*. Editorial: *Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*. Fecha de publicación: 2004. ISBN: 84-380-0274-9.

[11] Título: *Infraestructuras ferroviarias*. Autores: *Andrés López Pita*. Editorial: *Ediciones UPC*. Fecha de publicación: 2010. ISBN: 978-84-9880-415-7.

[12] Título: *Máquinas eléctricas*. Autores: *Fraile Mora, Jesús*. Editorial: *Mc GrawHill*. Fecha de publicación: 2003. ISBN: 978-84-4816-112-5.

9.3.- Artículos

[13] Título: *Development of catenary and storage battery hybrid train system*. Autores: *Hiroshi Hirose, Kouji Yoshida, Kenichi Shibnuma*. IEE 978 – 1 – 4673 – 1372 – 8 /12/. Fecha de publicación: 2012.

[14] Título: *La connexion del ferrocarril. Convertidores de frecuencia para suministrar electricidad a los ferrocarriles*. Autores: *Gerhard Linhofer, Philippe Maibach y Kiklaus Umbricht*. Revista ABB. Fecha de publicación: 2008.

[15] Título: *Los ferrocarriles y el transporte*. Autores: *Peter Terwiesch, Clarissa Haller, Ron Popper, Axel Kuhr, Friedrich Pinnekamp y Andreas Moglestue*. Revista ABB. Fecha de publicación: 2010.

[16] Título: *Repaso general y perspectiva tecnológica futura de la infraestructura de tracción ferroviaria*. Autores: *José Conrado Martínez Acevedo*. Revista vía libre técnica. Fecha de publicación: 2010.

[17] Título: *Actividad I+D+i en ADIF*. Autores: *Subdirección de Innovación y Desarrollo Tecnológico*. Publicaciones de ADIF. Fecha de publicación: 2013.

[18] Título: *Agenda estratégica de investigación del sector ferroviario*. Autores: *Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española*. Fecha de publicación: 2008.

[19] Título: *Hyperloop. Transportation technologies*. Autores: *JumpStartFund*. Fecha de publicación: 2015.

[20] Título: *Railway technical handbood. Volume 2. Drive systems: traction motor and gearbox bearings, sensors, condition monitoring and services*. Autores: *SKF Group*. Fecha de publicación: 2012. ISBN: 978 – 91 – 978966 – 6 – 5.

[21] Título: *Conceptos ferroviarios*. Autores: *ADIF*. Fecha de publicación: 2007.

[22] Título: *Conceptos ferroviarios*. Autores: *ADIF*. Fecha de publicación: 2007.

[23] Título: *Catálogo de oferta tecnológica del sector ferroviario*. Autores: *Plataforma tecnológica ferroviaria Española*. Fecha de publicación: 2010.

[24] Título: *Informe anual 2014*. Autores: *Observatorio de transporte y la logística en España. Ministerio de fomento*. Fecha de publicación: 2015.

[25] Título: *Informe de la comisión técnico – científico para el estudio de mejoras en el sector ferroviario*. Autores: *Comisión técnico – científico para el estudio de mejoras en el sector ferroviario*. Fecha de publicación: 2014.

[26] Título: *Rail route 2050: the sustainable backbone of the single European transport area*. Autores: *Giorgio Travaini, Dennis Schut*. Fecha de publicación: 2014.

9.4.- Proyectos

[27] Título: *Proyecto constructivo de la nueva subestación eléctrica de tracción de Cardedeu*. Autores: *ADIF*. Fecha de publicación: 2009.

9.5.- Direcciones de internet

[28] IEEE Xplore: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

[29] Tendencias:

www.tendencias21.net/Tecnologias-revolucionarias-transformaran-el-sector-ferroviario-en-50-anos_a12231.html

[30] Enciclopedia ferroviaria: www.ferropedia.es

[31] IEC. Conceptos ferroviarios:

www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=811

[32] IEC. Conceptos ferroviarios:

www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=811

[33] Geotren: www.geotren.es

[34] Alstom. Sistemas ferroviarios:

www.alstom.com/microsites/transport/products-and-services/

[35] CAF: www.cafpower.com/es/

[36] ABB. Portal de ferrocarriles:

www.abb.es/industries/us/9AAC755933.aspx?country=ES&_ga=1.243058314.900350319.1434389716

[37] Siemens. Portal de ferrocarriles:

<http://w5.siemens.com/spain/web/es/ic/rail/Pages/Default.aspx>

[38] Sécheron: <http://es.secheron.com/>

[39] Vía libre. La revista del ferrocarril: www.vialibre-ffe.com/

[40] ADIF: www.adif.es/es_ES/index.shtml

[41] Ministerio de fomento. Transporte terrestre:

www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_TERRESTRE/