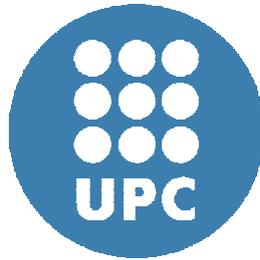


ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author

TESIS



Departament d'Enginyeria Elèctrica

Doctorat en Enginyeria Elèctrica

**Modelización de los sistemas de electrificación ferroviaria,
en corriente alterna y continua, con sistemas recuperadores
de energía para el estudio de la eficiencia energética.**

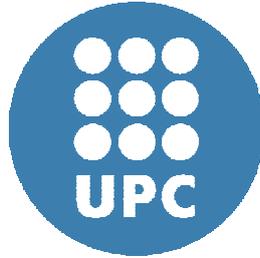
Autor: Sergi Ratés Palau

Director: Joan Rull Duran

Barcelona, Enero 2012

TESIS

Presentada para obtener el título de Doctor por la:



Universitat Politècnica de Catalunya

Departament d'Enginyeria Elèctrica

Doctorat en Enginyeria Elèctrica

**Modelización de los sistemas de electrificación ferroviaria,
en corriente alterna y continua, con sistemas recuperadores
de energía para el estudio de la eficiencia energética.**

Autor: Sergi Ratés Palau

Director: Joan Rull Duran

Barcelona, Enero 2012

RESUMEN

Esta tesis consiste en el desarrollo de una modelización detallada de los sistemas de electrificación ferroviaria con sistemas recuperadores de energía que permita el análisis de cualquier sistema habitual de electrificación ferroviaria, tanto desde un punto de vista puramente de diseño, como desde un punto de vista de eficiencia energética.

Así, después de analizar los distintos sistemas ferroviarios existentes, se desarrolla la modelización de los elementos simples agrupados en cuatro categorías: línea de contacto y circuitos de retorno, elementos fijos, elementos móviles y sistemas de acumulación de energía. A partir de estas modelizaciones se construyen los sistemas completos, para concluir con la metodología para la formulación y resolución numérica de los sistemas de ecuaciones matriciales no lineales de los sistemas completos.

Por último se muestra la estructura del programa Rsim, que se ha desarrollado íntegramente como parte del presente trabajo, y para concluir con dos ejemplos de aplicación: el primero sobre una línea electrificada en corriente alterna, y el segundo sobre una línea metropolitana electrificada en corriente continua.

Palabras claves: electrificación en corriente continua, electrificación en corriente alterna, modelización ferroviaria, eficiencia energética, subestaciones reversibles, acumuladores de energía, desequilibrios, potencial de carril, corrientes vagabundas.

ABSTRAC

A detail modelling of railway electrical system with energy storages devices is developed in this thesis in order to analyze most of the implemented railway electrical system. The modelling has been realized from a point of view the design of them as from a point of view of purely energetic efficiency.

In this way, after analyzing of the electric railway systems, it has been developed simple element models that have been grouped in four categories: contact line and return circuit, fix elements, mobile elements and energy recovery and storages devices. The complete systems are built from the simple element models linked. The system of equations of the complete system is no linear, and it is solved means of numeric methods.

Then, it is shown the structure of Rsim software that has been developed completely as a part of this work, to conclude with two examples of the application of Rsim. The first example belongs to alternative current railway electrification and the second example is a direct current railway electrification.

Keywords: DC railway system, AC railway system, railway modeling, energetic efficiency, reverse substations, energy storage devices, unbalance, rail potential, stray currents.

*A la meva família, a la Roser la meva companya, als meus pares
Josep i Neus, i a la meva germana Gemma.*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero darle las gracias al Dr. Joan Rull i Duran, profesor del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la Universitat Politècnica de Catalunya, por sus valiosos consejos, ayuda y dedicación en la realización de la presente tesis.

En segundo lugar quisiera mostrar mi agradecimiento al Sr. Enric Domínguez i Saura, experto en electrificación y señalización ferroviaria y con una amplia experiencia profesional en este sector, desarrollada en Transports Metropolitans de Barcelona, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya y en estos últimos años en la sección de Instalaciones Ferroviarias de Sener; cuyos conocimientos y pasión por el sector ferroviario poco a poco me ha ido transmitiendo.

En tercer lugar, al Dr. Miquel Salichs i Vivancos, profesor del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la Universitat Politècnica de Catalunya, por su ayuda en la resolución de los sistemas de ecuaciones correspondientes a grandes redes eléctricas, a través de métodos avanzados de resolución numérica.

También a mis colegas Daniel, Pedro, Joaquim, Sonia, Guillem, Ernesto, Pere, Javier, Laura, Martí, Iván, Fernando, Joan, Ismael y Josep por la ayuda que me han dado para la realización de la presente tesis.

CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	8
CAPITULO 1. OBJETIVOS DE LA TESIS.....	10
1. Introducción.....	10
2. Estado de la técnica.....	13
3. Objetivos de la tesis.....	15
4. Estructura de la tesis.....	16
5. Bibliografía.....	18
CAPITULO 2. SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN.....	19
1. Introducción.....	19
2. Tipos de electrificación.....	20
2.1. Electrificación en corriente continua.....	21
2.2. Electrificación en corriente alterna.....	24
2.2.1.Electrificación a 16,7 Hz.....	24
2.2.2.Electrificación a 50 Hz.....	25
2.2.2.1. Alimentación simple (1x25 kV).....	26
2.2.2.2. Alimentación con transformadores Booster (BT).....	27
2.2.2.3. Alimentación a través de autotransformadores (2x25 kV)).....	27
3. La tracción eléctrica en el material móvil.....	29
3.1. Tracción con motores de corriente continua.....	29
3.1.1.Electrificación CC con motores CC.....	30
3.1.2.Electrificaciones CA con motores CC.....	31
3.2. Tracción con motores de corriente alterna.....	31
3.2.1.Electrificación CC con motores CA.....	33
3.2.2.Electrificación en CA con motores CA.....	33
4. El frenado regenerativo.....	35
4.1. Frenado regenerativo en sistemas de corriente alterna.....	35
4.1.1.Frenado regenerativo en la electrificación 25 kV 50 Hz.....	35
4.1.2.Frenado regenerativo en la electrificación 15 kV 16,7 Hz.....	36
4.2. Frenado regenerativo en sistemas de corriente continua.....	37
5. Sistemas de mejora de la eficiencia energética.....	38
5.1. Acumuladores de energía.....	38

5.1.1.Acumuladores de energía fijos.....	39
5.1.1.1. Sistemas con baterías.....	39
5.1.1.2. Supercondensadores	39
5.1.1.3. Acumuladores cinemáticos.....	40
5.1.1.4. SMES.....	41
5.1.2.Acumuladores embarcados	41
5.2. Subestaciones reversibles	41
6. Requerimientos eléctricos y de seguridad.....	43
6.1. Requerimientos eléctricos.....	43
6.1.1.Potencias demandadas e intensidades en los equipos fijos	43
6.1.2.Tensión en la línea de contacto	43
6.1.3.Intensidades en la línea de contacto.....	44
6.1.4.Potencial carril-tierra.	44
6.1.5.Desequilibrios	44
6.1.6.Intensidades de cortocircuito	45
6.2. Requerimientos de seguridad.....	45
6.2.1.Potencial del carril	45
6.2.2.Efectos de las corrientes vagabundas.....	46
7. Bibliografía	48
CAPITULO 3. MODELIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS SIMPLES	51
1. Introducción.....	51
2. Modelización de la línea de contacto.....	52
2.1. Modelización de la línea de contacto en electrificaciones de corriente alterna.....	52
2.1.1.Matriz de Impedancias [Z].....	54
2.1.1.1. Ecuaciones de Carson.....	54
2.1.1.2. Ecuaciones de Dubanton	56
2.1.1.3. Calculo de la matriz [Z].....	58
2.1.2.Matriz de Admitancias [Y].....	59
2.1.3.Cálculo de las impedancias con los conductores agrupados	60
2.1.3.1. Matriz de Impedancias [Z] con conductores agrupados	60
2.1.3.2. Matriz de admitancias [Y] con conductores agrupados.....	63
2.1.4.Matriz de admitancias de la línea de contacto	64
2.2. Modelización de la línea de contacto en corriente continua.....	65
2.2.1.Matriz de Resistencias [R].....	66
2.2.2.Matriz de conductancias [G].....	67
2.2.3.Cálculo de las impedancias con los conductores agrupados	67

2.2.3.1.	Matriz de Resistencias [R] con conductores agrupados	68
2.2.3.2.	Matrices de conductancias [G] con conductores agrupados	69
2.2.4.	Matriz de admitancias de la línea de contacto	70
3.	Modelización de los elementos fijos	72
3.1.	Modelización de los elementos fijos en corriente alterna	72
3.1.1.	Modelo de la alimentación en alta tensión	72
3.1.2.	Modelo eléctrico de la subestación	73
3.1.2.1.	Modelización de la subestación en sistemas monotensión	73
3.1.2.2.	Modelización de la subestación en sistemas bitensión	74
3.1.3.	Modelo eléctrico de los centros de autotransformación	75
3.1.4.	Modelo eléctrico de los transformadores booster	75
3.2.	Modelización de los elementos fijos en corriente continua	76
3.2.1.	Modelo de la alimentación en alta tensión	76
3.2.2.	Modelo eléctrico de la subestación	78
3.2.2.1.	Subestaciones convencionales o rectificadoras	78
3.2.2.2.	Subestaciones reversibles	82
4.	Modelización del material rodante	86
4.1.	Modelización dinámica del tren	86
4.1.1.	Esfuerzos máximos de tracción y frenado	89
4.1.1.1.	Esfuerzo de tracción	89
4.1.1.2.	Esfuerzo de frenado	89
4.1.2.	La adherencia	90
4.1.3.	Perfil de velocidades de consigna	91
4.1.3.1.	Itinerario	92
4.1.3.2.	Velocidad máxima	92
4.1.3.3.	Aceleración y deceleración máximas	92
4.1.3.4.	Velocidad máxima de paso por curva	92
4.1.3.5.	Jerk máximo	93
4.1.4.	Procedimiento de cálculo del perfil de velocidades finales	94
4.1.5.	Potencia del material rodante	95
4.2.	Modelización eléctrica del tren	96
4.2.1.	Material móvil traccionando	96
4.2.2.	Material móvil regenerando	98
5.	Modelización sistemas de almacenamiento de energía	100
5.1.	Arquitectura del acumulador	100
5.2.	Modelización funcional del acumulador	102
5.2.1.	Modelización de la carga del acumulador	103

5.2.2.	Modelización de la descarga del acumulador	105
6.	Bibliografía	107
CAPITULO 4. MODELIZACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPLETOS		109
1.	Introducción	109
2.	Modelización del sistema completo	110
2.1.	Planteamiento de las ecuaciones de los elementos simples	110
2.2.	Planteamiento de las ecuaciones de los sistemas completos	112
2.3.	Resolución del sistema de ecuaciones	114
2.3.1.	Método de la Eliminación Gaussiana.....	114
2.3.2.	Método de la Factorización LU	115
2.4.	Modificación de la matriz de admitancias [Y]	116
2.4.1.	Incorporación de una rama pasiva entre dos nodos	116
2.4.2.	Eliminación de una rama pasiva entre dos nodos	117
2.4.3.	Incorporación o eliminación de más de una rama.....	117
2.5.	Cálculo del vector de corrientes entre dos nodos	117
2.6.	Cálculo de las intensidades de cortocircuito.....	118
2.7.	Cálculo de los desequilibrios	119
3.	Sistemas electrificados en corriente alterna	121
3.1.	Representación de una línea	121
3.2.	Planteamiento de las ecuaciones.....	123
3.3.	Algoritmo de resolución de las ecuaciones	124
4.	Sistemas electrificados en corriente continua	128
4.1.	Representación de una línea	128
4.2.	Planteamiento de las ecuaciones.....	129
4.3.	Algoritmo de resolución de las ecuaciones	131
5.	Modelización de las configuraciones especiales.....	135
5.1.	Líneas de doble vía.....	135
5.2.	Ramales.	137
5.3.	Puestas en paralelo de tramos con doble vía.	139
5.4.	Puesta a tierra del carril	140
6.	Influencia de la longitud de los elementos de la LAC y retornos	142
7.	Bibliografía	148
CAPITULO 5. SIMULACIÓN DE REDES FERROVIARIAS: PROGRAMA RSIM		150
1.	Introducción	150
2.	Estructura del simulador Rsim.....	151

2.1.	Módulo de entrada de datos.....	152
2.2.	Módulo de bloques de cálculo.....	152
2.2.1.	Movimiento del tren.....	153
2.2.2.	Horarios y malla de tráfico	153
2.2.3.	Verificación del movimiento seguro del tren	154
2.2.4.	Cálculo del flujo de cargas en electrificaciones en corriente continua	156
2.2.5.	Cálculo del flujo de cargas de electrificaciones en corriente alterna	156
2.3.	Módulo de presentación de resultados.....	157
3.	Interficie con el usuario	158
3.1.	Pantalla de inicio del programa Rsim.....	158
3.2.	Pantalla del bloque de cálculo del Movimiento del tren.....	158
3.3.	Horarios y malla de tráfico.	159
3.4.	Verificación del movimiento seguro del tren.	159
3.5.	Flujo de potencias para electrificaciones en corriente continua.	160
3.6.	Flujo de potencias para electrificaciones en corriente alterna.	160
4.	Resultados gráficos	162
5.	Bibliografía	165
CAPITULO 6. APLICACIÓN DEL PROGRAMA RSIM		166
1.	Introducción	166
2.	Aplicación sobre una línea electrificada en ca.....	167
2.1.	Datos de partida.....	167
2.1.1.	Trazado.....	167
2.1.2.	Material rodante	168
2.1.3.	Red de electrificación	170
2.1.4.	Itinerarios e intervalos de paso.....	171
2.2.	Escenarios estudiados	172
2.3.	Resultados.....	172
2.3.1.	Movimiento del tren.....	172
2.3.2.	Malla de tráfico	173
2.3.3.	Resultados del flujo de cargas.....	174
2.3.3.1.	Potencias en las subestaciones.....	174
2.3.3.2.	Tensiones entre el pantógrafo y el carril a lo largo del recorrido.....	175
2.3.3.3.	Tensión carril - tierra	176
2.3.3.4.	Desequilibrios.....	177
2.3.3.5.	Balance de energías.	178
2.4.	Conclusiones.....	179

3.	Aplicación sobre una línea electrificada en cc.....	181
3.1.	Datos de partida.....	181
3.1.1.	Trazado.....	181
3.1.2.	Material rodante.....	182
3.1.3.	Red de electrificación.....	184
3.1.4.	Itinerarios e intervalos de paso.....	185
3.2.	Escenarios estudiados.....	188
3.3.	Resultados.....	189
3.3.1.	Movimiento del tren.....	189
3.3.2.	Malla de tráfico.....	191
3.3.3.	Resultados del flujo de cargas.....	193
3.3.3.1.	Potencias en las subestaciones.....	193
3.3.3.2.	Tensiones entre el pantógrafo y el carril a lo largo de los itinerarios.....	194
3.3.3.3.	Tensiones carril – tierra y corrientes vagabundas.....	198
3.3.3.4.	Corrientes en los feeders de alimentación de las subestaciones.....	200
3.3.3.5.	Evolución de la potencia y energía en los acumuladores.....	202
3.3.3.6.	Balance de energías.....	203
3.4.	Conclusiones.....	205
3.4.1.	Frenado regenerativo.....	206
3.4.2.	Alimentación con vías unidas.....	206
3.4.3.	Subestaciones reversibles.....	207
3.4.4.	Acumuladores de energía.....	207
4.	Bibliografía.....	209
CAPITULO 7. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RSIM.....		210
1.	Introducción.....	210
2.	Datos generales de la línea.....	211
3.	Registro de medidas.....	213
4.	Comparación de los resultados.....	215
4.1.	Velocidad del tren.....	215
4.2.	Tensión pantógrafo - carril.....	216
4.3.	Potencias demandadas en las subestaciones.....	217
5.	conclusión.....	219
CAPITULO 8. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES.....		220
1.	Resumen.....	220
2.	Conclusiones.....	222

3.	Aportaciones de esta tesis	224
4.	Líneas futuras de investigación.....	226
LISTADO DE FIGURAS.....		227
LISTADO DE TABLAS		232

ABREVIATURAS

a_t	Aceleración tangencial sin compensar.
AT	Autotransformador.
ATC	Automatic train control.
ATP	Automatic train protection.
CA	Corriente alterna.
BT	Transformador Booster.
CC	Corriente continua.
C_{mg}	Coefficiente de masas giratorias.
CSI	Current source inverter.
E_{total}	Capacidad del acumulador.
E_{min}	Energía mínima remanente en el acumulador.
f	Frecuencia del sistema.
F_t	Esfuerzo de tracción o frenado.
F_{tmax}	Esfuerzo de tracción máximo en condiciones de adherencia
g	Aceleración de la gravedad.
GTO	Gate turn-off thyristor.
h	Peralte de la curva.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
k_f	Factor de túnel.
L	Longitud de la celda.
LAC	Línea aérea de contacto.
M	Masa del tren.
m_r	Masa del tren que apoya sobre cada rueda motriz
n	Número de ruedas motrices del tren
P_{ele}	Potencia eléctrica demandada por el tren.
P_{e-max}	Potencia máxima entregable en un instante por el acumulador.
PK	Punto kilométrico.
R	Radio de la curva
R_a	Resistencia al avance.
R_g	Resistencia debida a la gravedad.
R_c	Resistencia al paso por curva.
S	Potencia aparente.
SE	Subestación de tracción.
SMES	Superconducting magnetic energy storage.
t_c	Tiempo de carga del acumulador.
TGV	Train de grand vitesse.

U_n	Tensión nominal.
v	Velocidad del tren.
V_c	Tensión de consigna de carga del acumulador.
V_d	Tensión media a la salida del rectificador.
V_{d0}	Tensión media ideal a la salida del rectificador.
VSI	Voltage source inverter.
ZN	Zona neutra
α	Coefficiente de receptibilidad de la potencia regenerable.
η	Coefficiente de rendimiento en tracción.
η_r	Coefficiente de rendimiento en regeneración.
μ	Coefficiente de adherencia.
ρ	Resistividad del terreno.
[A]	Matriz de incidencias.
[C]	Matriz de capacidades.
[G]	Matriz de conductancias.
[I]	Vector de corrientes.
[J]	Vector de las excitaciones del sistema.
[L]	Matriz de inductancias.
[P]	Matriz de coeficientes de potenciales de Maxwell.
[Q]	Vector de cargas de los conductores de catenaria.
[R]	Matriz de resistencias.
[V]	Vector de tensiones de nodo.
[Y]	Matriz de admitancias.
[Z]	Matriz de impedancias

CAPITULO 1. OBJETIVOS DE LA TESIS

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo en paralelo de la electrificación ferroviaria en distintos países del mundo durante los últimos 100 años ha llevado a la coexistencia de diferentes sistemas de electrificación ferroviaria [7], con tensiones y frecuencias no coincidentes, justificados principalmente por el estado de la técnica en la época de su desarrollo. De este modo, pueden encontrarse actualmente en servicio tanto líneas ferroviarias electrificadas en corriente continua como líneas ferroviarias de corriente alterna monofásica.

Sistema		Países
CA	25 kV 50 Hz	Gran Bretaña, Francia, Finlandia, Dinamarca, Luxemburgo, Portugal, España
	15 kV 16,7 Hz	Alemania, Austria, Suiza, Suecia y Noruega
CC	3 kV	Bélgica, España, Italia
	1,5 kV	Francia, Holanda
	750 V	Gran Bretaña

Tabla 1. Sistemas de electrificación para líneas interurbanas en países del oeste de Europa

Las líneas ferroviarias urbanas y suburbanas suelen estar electrificadas en corriente continua entre 600 V y 1500 V, y en algunos países hasta 3000 V donde se incluirían también las líneas interurbanas. La ventaja inicial de esta electrificación era la simplicidad de los equipos embarcados en los trenes, con motores en corriente continua con control de velocidad a través de resistencias. Hoy en día se sigue utilizando la electrificación en corriente continua combinada con modernos equipos de electrónica de potencia.

La electrificación en corriente alterna es la más habitual para las líneas de alta velocidad y también para el transporte de mercancías, pues la utilización de tensiones más elevadas repercute en unas intensidades menores y unas pérdidas en la catenaria más reducidas, así como en un menor número de subestaciones frente a la electrificación en corriente continua.

En la electrificación en corriente alterna se utilizan equipos de características similares a las redes eléctricas de distribución de energía. Sin embargo la electrificación con corriente alterna trifásica, que a priori sería el sistema más eficiente de transmisión de energía, tiene el inconveniente de la complejidad de la toma de la energía por parte del tren, y únicamente algunas líneas ferroviarias de montaña de principios del siglo XX en Suiza, Italia y Estados Unidos utilizaron este tipo de electrificación.

En la primera mitad del siglo XX, apareció la electrificación monofásica en corriente alterna a baja frecuencia, que combinaba las ventajas de la transmisión en alta tensión con motores conmutados. Así en algunas zonas de Europa la electrificación en 15 kV y 16,7 Hz está aún muy extendida a pesar que se necesita convertidores de frecuencia o estaciones generadores especiales.

Actualmente la electrificación en corriente alterna más habitual se realiza a 25 kV a frecuencia industrial. La primera línea de este tipo se realizó a mediados de los años 50 en Francia. En este sistema la eficiencia de la transmisión de energía a tensiones elevadas va acompañada de la compatibilidad con las redes eléctricas al utilizarse la misma frecuencia.

Así, a finales del siglo XX la longitud total de líneas electrificadas en el mundo superaba los 180.000 km, y los distintos sistemas empleados se repartían de la siguiente forma [8]:

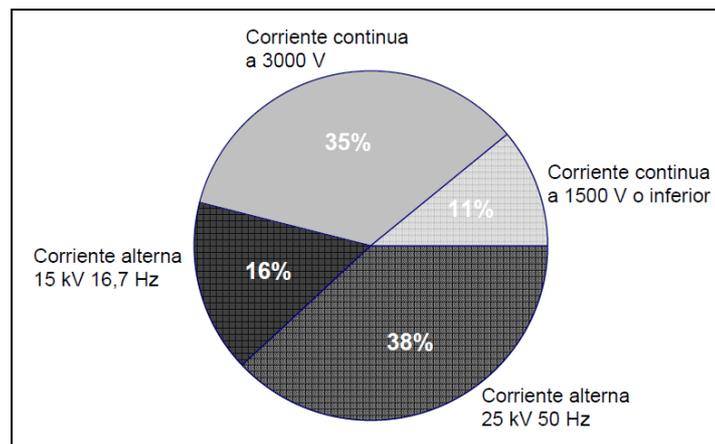


Figura 1. Reparto por sistemas de las líneas electrificadas a finales del siglo XX

Respecto a los parámetros de diseño de estos sistemas de electrificación, en todas las alternativas es necesario que la tensión de entrada en el material rodante se encuentra dentro de un rango aceptable para que éste pueda funcionar satisfactoriamente. Del mismo modo las corrientes y potencias resultantes deben ser admisibles por los distintos elementos existentes en las redes de electrificación.

Otro punto importante es la problemática con respecto a la seguridad eléctrica en las instalaciones fijas de estos sistemas, pues como cualquier instalación eléctrica es preciso adoptar una serie de medidas de protección. Dentro de este punto destacaría el riesgo del potencial de carril tanto en sistemas electrificados en corriente alterna como en continua, como los efectos de las corrientes vagabundas producidas por los sistemas electrificados en corriente continua.

Por último, en todos estos sistemas de electrificación se realiza un alto consumo de energía, que con la utilización parcial o total de la energía de frenado puede conseguirse un ahorro considerable. Esta utilización de la energía de frenado vendrá condicionada, en primer lugar por las características de los convertidores utilizados en la tracción y en segundo lugar por el sistema de electrificación. En general las líneas electrificadas en corriente alterna serán mucho más receptivas a la energía de frenado que las líneas electrificadas en corriente continua.

Para el estudio de la eficiencia energética en los distintos sistemas ferroviarios será preciso contemplar en su modelización las particularidades de cada uno, para conseguir unos resultados satisfactorios.

2. ESTADO DE LA TÉCNICA

La modelización de los sistemas eléctricos ha sufrido un gran avance en las últimas décadas con el desarrollo de la simulación por computador. Así, existen numerosos programas de cálculo de redes eléctricas, tanto para su estudio en régimen nominal como en régimen transitorio. En particular, sobre las líneas ferroviarias se han desarrollado diversos programas de simulación en régimen estacionario para la determinación de las tensiones, intensidades y potencias. Estos programas suelen estar focalizados sobre un sistema de electrificación en concreto y principalmente hacia el diseño del sistema, y no tanto hacia el estudio de la seguridad eléctrica o de su eficiencia energética.

Entre los simuladores eléctricos comerciales de redes ferroviarias se destacan los siguientes:

- El programa **TracFeed** [5] fue desarrollado a principios de los años 90 por la compañía Adtranz y la administración ferroviaria sueca Banverket. Actualmente el programa es utilizado por la compañía BBrail y las administraciones ferroviarias Jernbanverket y Banverket. Existe muy poca información publicada sobre su modelización y metodología.
- El programa **Sitras Sidytrac** [9] desarrollado por Siemens, para el diseño y cálculo de sistemas ferroviarios de corriente continua y corriente alterna.
- El programa **Opentrack** [12], que fue desarrollado a mediados de los 90 como un proyecto de investigación de los Ferrocarriles Federales Suizos, es una herramienta de diseño de sistemas ferroviarios orientada hacia la determinación de horarios y verificación de los sistemas de señalización. OpenTrack es utilizado por empresas ferroviarias, empresas de suministros ferroviarios, consultoras y universidades de diversos países.
- El programa **SimuX** [3] es un simulador de sistemas ferroviarios electrificados exclusivamente en corriente continua desarrollado en la Universidad Técnica de Estambul (Turquía), que permite obtener resultados energéticos teniendo en cuenta el frenado regenerativo y valores de los potenciales del carril a lo largo del trazado.

A parte de estos programas destacados anteriormente, también existen otros programas pertenecientes a distintas consultorías dentro del ámbito ferroviario, entre los que se puede destacar:

- El programa **Stelec** [13] desarrollado internamente en la consultaría Sener para el diseño de líneas ferroviarias.
- El programa **Idom-REPS** [11] desarrollado por la consultaría Idom en colaboración con CITCEA-UPC para uso en proyectos de electrificación ferroviaria.
- Los programas **Elbas-Sinanet y Elbas-webanet** [10] desarrollados por la consultoría Kema para la simulación de redes ferroviarias de corriente alterna y corriente continua respectivamente.

Pero en general, la modelización utilizada, tanto en los simuladores comerciales como los de consultorías ferroviarias, no suele publicarse en ningún medio de difusión técnica, lo que puede repercutir que en ocasiones se utilicen modelizaciones con un alto grado de simplificación que pueden afectar sensiblemente sobre los resultados que obtienen.

Por otra parte, en los últimos años con el gran desarrollo de la alta velocidad en algunos países de Europa se han redactado diversas tesis doctorales [4] [6] sobre la modelización eléctrica de este tipo de líneas. Para analizar los resultados obtenidos por la modelización desarrollada se suele implementar sobre un simulador, entre los que se puede destacar:

- Simulador **Simalim AC** [1] se basa en una modelización detallada de las redes de corriente alterna. En el cálculo de las prestaciones del material rodante en un instante se tienen en cuenta su dependencia con respecto a la tensión pantógrafo – carril de rodadura en la posición donde se encuentra el tren.
- Simulador **Silvia** [2] se basa en una modelización simplificada de las redes de corriente alterna. El modelo propuesto está orientado hacia la formulación del problema de la optimización. Una de las principales hipótesis que se realizan para determinar el modelo simplificado es la suposición de un potencial de carril nulo en toda la línea.

3. OBJETIVOS DE LA TESIS

El objetivo principal de este trabajo titulado “Modelización de las redes de electrificación ferroviaria en corriente alterna y continua con sistemas de recuperación de energía” consiste en el desarrollo de una modelización detallada de los sistemas de electrificación ferroviaria que permita:

- En primer lugar el estudio de todos los sistemas de electrificación ferroviaria habituales, con el análisis de las distintas configuraciones, equipos, montajes, etc. Esto significa que la modelización de los sistemas deberá ser lo suficientemente versátil y amplia para poder incluir las distintas tipologías de redes y los diferentes elementos que puedan darse. Por otra parte es importante que la modelización de los sistemas de electrificación pueda abarcar sistemas multilínea, tal y como sucede en las líneas ferroviarias reales.
- En segundo lugar, el dimensionado eléctrico como herramienta importante en el diseño y optimización de los sistemas de electrificación ferroviaria. Los resultados obtenidos deberán tener la precisión suficiente para la verificación del cumplimiento de los requisitos eléctricos impuestos por las distintas normativas aplicables en este tipo de redes.
- Como complemento al punto anterior, y sobretodo en los sistemas electrificados en corriente continua, la modelización deberá permitir que se puedan obtener unos resultados con una precisión suficiente para la realización de estudios de seguridad eléctrica, en especial sobre los potenciales de carril y las corrientes vagabundas a lo largo de los trazados.
- La modelización debe facilitar la realización de estudios energéticos de los sistemas de electrificación estudiados, así es indispensable tener en cuenta los condicionantes del frenado regenerativo sobre el propio sistema, y la modelización de diferentes dispositivos de mejora de la eficiencia energética como pueden ser los sistemas recuperadores de energía.
- Por último, y de cara a la definición de los algoritmos y los procedimientos de resolución de las ecuaciones matriciales representativas de las modelizaciones es preciso que los tiempos de cálculo sean minimizados. Esto obligará a la utilización de métodos numéricos avanzados de resolución de sistemas no lineales.

4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se ha organizado en los siguientes capítulos:

- El segundo capítulo “Sistemas de electrificación”, quiere ser una descripción de las configuraciones de los distintos tipos de electrificación existentes y de los sistemas de tracción eléctrica utilizados en el material móvil con vistas a la modelización de estos sistemas. En el mismo capítulo se incluye el análisis del frenado regenerativo aspecto clave y complejo para una buena modelización de los sistemas ferroviarios. También se realiza una descripción de los principales sistemas para la mejora de la eficiencia energética utilizados en las líneas electrificadas en corriente continua. Por último, se analizan los principales requisitos eléctricos que deberán cumplir los sistemas ferroviarios electrificados.
- El tercer capítulo “Modelización de los elementos de la red”, consiste en el desarrollo de los distintos modelos eléctricos de los componentes pertenecientes a los sistemas de electrificación indicados en el capítulo segundo. Para ello se ha subdividido el capítulo en cuatro grandes grupos: la modelización de las líneas de contacto y de los circuitos de retorno, la modelización de los elementos fijos, la modelización de los elementos móviles y, por último, la modelización de los sistemas de almacenamiento de energía.
- En el cuarto capítulo “Modelización de los sistemas completos”, se presenta la modelización de las redes completas a partir del ensamblaje de los elementos simples vistos en el capítulo tercero. También se abarcan los planteamientos de los sistemas de ecuaciones matriciales y los métodos avanzados de resolución numérica.
- En el quinto capítulo “Simulación de redes ferroviarias: programa Rsim”, se presenta la simulación de las redes ferroviarias, de acuerdo con las modelizaciones y procedimientos desarrollados en los capítulos tercero y cuarto. En concreto se presenta el simulador Rsim que se ha desarrollado íntegramente como parte de este trabajo.
- En el sexto capítulo “Aplicación del programa Rsim”, se presentan dos estudios sobre líneas electrificadas en corriente alterna y en corriente continua.

- En el séptimo capítulo “Validación de los resultados de Rsim” se muestra una comparativa de los resultados obtenidos con el programa Rsim con medidas reales efectuadas en una línea interurbana electrificada en corriente continua.

- Finalmente, en el octavo capítulo se exponen las conclusiones y las aportaciones originales de esta tesis, y se sugieren algunas líneas futuras de investigación para otros estudios.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] FAYET Pierre. Modélisation des réseaux électriques ferroviaires alimentés en courant alternatif. Thèse Doctoral. École Centrale de Lyon, 2008.
- [2] PILO, Eduardo. Diseño óptimo de la electrificación de ferrocarriles de alta velocidad. Tesis Doctoral. Universidad Pontificia Comillas (Madrid), 2003.
- [3] SÖYLEMEZ, M. T, AÇIKBAŞ S. Multi-train Simulation of DC Rail Traction Power Systems with Regenerative Braking. Int. Conf. on Comp. Aided Design, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Transit Systems (COMPRAIL 2004).
- [4] KREUAWAN, Sangkla. Modelling and optimal design in railway applications. These Doctoral. École Centrale de Lille, 2008.
- [5] HÖGSKOLA, Mälardalens. Evaluation of Peak relations in TracFeed. Master Degree Thesis. Department of computer science and electronics, 2008.
- [6] ABRAHAMSSON, Lars. Railway power supply models and methods for long-term investment analysis. Licentiate Thesis. Royal Institute of Technology. Stockholm (2008).
- [7] MANSELL David. The evolution of railway electrification. IEE Manchester Branch, October 2002.
- [8] KIEBLING, Friedrich, PUSCHMANN, Rainer, SCHMIEDER. Contact lines for electric railways: planning, design and implementation, pp 31 - 67, Siemens, 2001.
- [9] System design with Sitras Sidytrac. Simulation of AC and DC traction power supply. Technical Information.
- [10] Elbas-Sinanet and Elbas-Webanet. Simulation System for DC Railways of LRT and Long Distance Transport – Integrated Traction Simulation and Network Calculation Software. Technical Information about Special Software of the ELBAS GmbH.
- [11] ALONSO D, RULL J, COVES J, PIERNAU R. Railway Electric Power Simulator (REPS): IX International Conference “Modern Electric Traction”. (MET2009) Gdansk (Polonia) 2009.
- [12] Opentrack. Simulation of Railway Networks. Technical Information.
- [13] Software de simulación de redes ferroviarias de tracción eléctrica Stelec. Información técnica.

CAPITULO 2. SISTEMAS DE ELECTRIFICACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo en primer lugar se realiza una descripción de las configuraciones de los distintos tipos de electrificación existentes junto con los principales sistemas de tracción eléctrica utilizados en el material móvil que reflejan el estado de la técnica durante la época de su desarrollo. A continuación una descripción del frenado regenerativo y de los principales sistemas de la mejora de la eficiencia energética utilizados en las líneas electrificadas en corriente continua, y por último se resume los requerimientos eléctricos que influyen en el dimensionado y en la seguridad de las líneas ferroviarias.

2. TIPOS DE ELECTRIFICACIÓN

La primera línea ferroviaria electrificada entre Berlín y Spandau fue inaugurada en 1881, utilizando una tensión de 180 V en corriente continua. Esta tensión era suministrada al tren a través de dos conductores aéreos suspendidos. Pero poco después, en 1889 fue desarrollado un sistema con un solo conductor suspendido y con el retorno a través de los carriles.

Las primeras líneas electrificadas utilizaban la corriente continua junto con motores serie en los trenes, sin embargo, este sistema tenía la desventaja que los trenes tenían que ser alimentados con un nivel de tensión de electrificación bajo, lo que repercutía en unas prestaciones reducidas y unos conductores con secciones elevadas. Pero ya en esta primera época se realizaron algunos esfuerzos para introducir la corriente alterna en el sistema de electrificación, tanto en modo monofásico como trifásico. También se estudió la posibilidad de independizar la tensión de electrificación de la tensión de utilización, con una transformación a bordo de los trenes.

Algunos años después, y en algunos países se implementó la electrificación en corriente alterna a baja frecuencia y distinta a la utilizada en las redes públicas, pues permitía la utilización de motores de tracción simples. La electrificación a la frecuencia de 16,7 Hz se utilizó en diversas líneas en Alemania, y hacia 1912 se adoptó la electrificación a 15 kV y 16,7 Hz como un estándar en Alemania y países cercanos.

El desarrollo y la aplicación de la electrónica de potencia permitieron la utilización de la frecuencia industrial en los sistemas electrificados en corriente alterna. Así, hoy los nuevos sistemas de electrificación en corriente alterna operan habitualmente a las frecuencias de 50 o 60 Hz, dependiendo de los países.

Así pues, hace aproximadamente unos 30 años se inició una nueva época en los sistemas de electrificación, al romperse la independencia de la tensión de los motores de tracción con la tensión de electrificación de la línea. Independiente del sistema de electrificación, se utilizan los motores de tracción trifásicos en los trenes.

En los próximos apartados se realiza una descripción de las configuraciones de los sistemas de electrificación que se utilizan actualmente.

2.1. Electrificación en corriente continua

El sistema de electrificación en corriente continua es el más antiguo, y existe desde los inicios de la electrificación ferroviaria.

Las redes trifásicas, con tensiones habitualmente dentro del rango 6 a 45 kV, suministran la energía a las subestaciones de tracción, las cuales transforman y rectifican la tensión alterna trifásica a tensión continua y conectan con la línea de contacto y el retorno.

Las líneas metropolitanas suelen estar electrificadas con tensiones de hasta 1500 V [23], para evitar el riesgo del contacto con tensiones más altas. Mientras que las líneas interurbanas o regionales pueden alcanzar tensiones de hasta 3000 V.

La línea de contacto puede estar formada por una catenaria o por un tercer carril colocado sobre aisladores a poca altura para tensiones inferiores a 1000 V, mientras que para tensiones superiores siempre se realiza mediante una catenaria. El retorno de la corriente, salvo excepciones, se realiza a través de los propios carriles de rodadura.

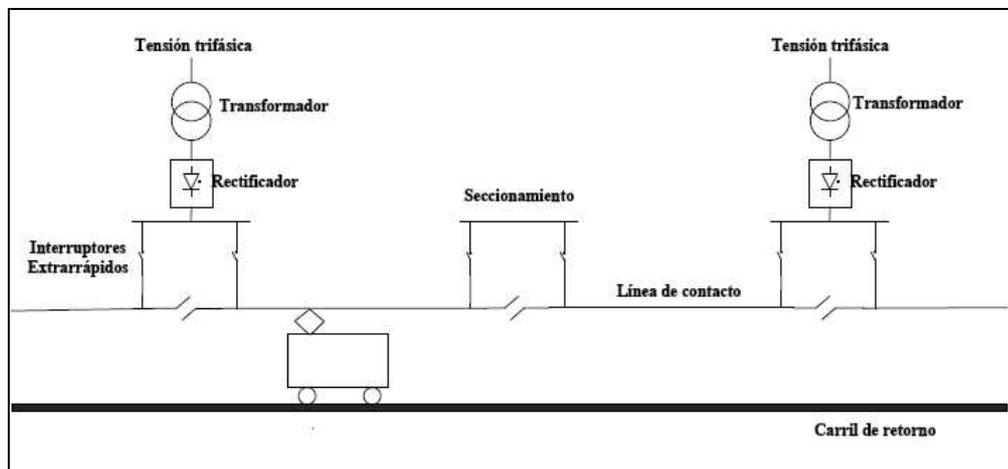


Figura 2. Esquema general de la electrificación en corriente continua

En el esquema general mostrado se observa que los principales componentes de este sistema de electrificación son los grupos transformadores-rectificadores, la línea de contacto y el retorno. Las subestaciones de tracción inyectan la corriente en unos puntos determinados. Para separar la alimentación que procede de otras subestaciones existen seccionadores que permiten aislar el tramo en caso de fallo o mantener la continuidad durante las labores de mantenimiento. Normalmente la energía consumida por un tren procede de dos o más subestaciones.

En general, la rectificación se realiza a través de rectificadores trifásicos de onda completa [23], en montajes de 6, 12 y 24 pulsos principalmente, siendo los dos primeros los más habituales.

Los rectificadores de 6 pulsos o hexafásicos se conectan con transformadores trifásicos de dos arrollamientos. Cada diodo conduce la corriente total durante un tercio de ciclo.

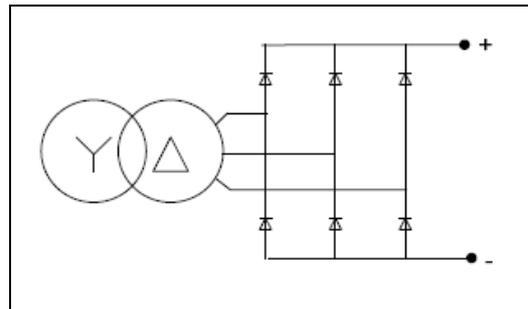


Figura 3. Rectificación de 6 pulsos

Para mejorar las tasas de armónicos en el sistema de alimentación de corriente alterna y la ondulación en la tensión de salida de los rectificadores de 6 pulsos, se emplean rectificadores de 12 pulsos, que están basados en agrupaciones de dos rectificadores de 6 pulsos. Estas agrupaciones a parte de reducir la ondulación de la tensión de salida y la tasa de armónicos, también permiten conseguir una tensión o una intensidad más elevada. La entrada trifásica de cada rectificador se puede conectar con un transformador de dos secundarios en montaje estrella y triángulo, o simplemente con dos transformadores independientes, suministrando dos tensiones trifásicas desfasadas un ángulo de $\pi/6$, y formando una tensión rectificadora de 12 pulsos o dodecafásica.

Así, dependiendo de la conexión de las salidas de los rectificadores de 6 pulsos, pueden existir dos tipos de asociaciones:

- Asociación en serie, con lo que se consigue una tensión rectificadora de doce pulsos y una tensión de salida más elevada.
- Asociación en paralelo, con lo que se consigue una tensión rectificadora de doce pulsos y que se utiliza para conseguir intensidades más altas.

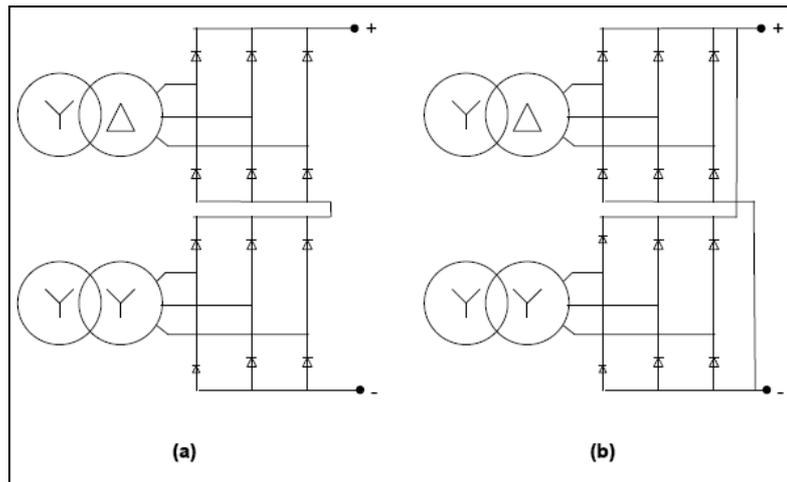


Figura 4. Rectificación de 12 pulsos: (a) asociación en serie (b) asociación en paralelo

En las últimas décadas para mejorar la eficiencia energética de los sistemas electrificados en corriente continua se han introducido trenes con frenado regenerativo. Estos trenes van provistos de un convertidor de energía cinética a energía eléctrica que durante las deceleraciones devuelve energía a la línea de contacto. Sin embargo y como se verá posteriormente con más detalle, esta energía sólo podrá ser utilizable si existen otros trenes cercanos demandantes de energía en el mismo instante. Esta situación puede mejorarse dotando a las subestaciones de reversibilidad, es decir de poder exportar la energía sobrante, que no es consumida por otros trenes, a la red de corriente alterna. También permiten mejorar la eficiencia energética los sistemas de almacenamiento de energía.

Las subestaciones reversibles están equipadas con inversores que en la práctica pueden adoptar distintas arquitecturas. Generalmente estas subestaciones están constituidas por un grupo rectificador convencional y un inversor controlado en antiparalelo. El inversor sólo se activa cuando existe un sobrante de energía.

El potencial del carril y las corrientes vagabundas son dos parámetros importantes en líneas donde se utiliza los carriles de rodadura como los conductores de la intensidad de retorno. El potencial máximo del carril está directamente relacionado con la tensión de contacto. Cuando los trenes se desplazan por la línea, el potencial del carril va variando, de forma que los potenciales más elevados ocurren en diferentes localizaciones y en distintos instantes.

Por otra parte, la existencia de una tensión en el carril de rodadura distinta al potencial de tierra es el origen de las corrientes vagabundas, que no es más que una porción de las intensidades de retorno que no circulan por el carril de rodadura, sino por caminos paralelos como pueden ser las estructuras metálicas paralelas y cercanas a la línea. Estas corrientes vagabundas son generadoras de corrosión electrolítica en estas estructuras metálicas. El nivel de corrosión dependerá de las distintas estrategias de puesta a tierra del carril de rodadura y de sus niveles de aislamiento.

Así será básico que la modelización de estos sistemas permita el estudio tanto del potencial del carril como de las corrientes vagabundas con sus distintas estrategias constructivas.

2.2. Electrificación en corriente alterna

Mientras que la electrificación con frecuencias reducidas requiere de redes de generación especiales, los sistemas a frecuencia industrial pueden alimentarse directamente desde las redes eléctricas de distribución o transmisión de energía habituales.

2.2.1. Electrificación a 16,7 Hz

Los sistemas de electrificación a 16,7 Hz aparecieron en Alemania en la primera mitad del siglo XX, posteriormente se extendió a Austria, Suiza, Noruega y Suecia.

La tensión monofásica 15 kV a frecuencia 16,7 Hz [16] se obtiene a partir de generadores monofásicos, que suelen montarse combinados con motores trifásicos de 50 Hz, formando un convertidor rotativo. Al acoplar un motor trifásico y un generador monofásico es como si el generador monofásico girara a un tercio de la velocidad del motor trifásico de 50 Hz, con lo que la frecuencia de la red monofásica será un tercio de 50 Hz, es decir 16,7 Hz.

Dependiendo de las tipologías de las máquinas eléctricas empleadas, podrán ser convertidores rígidos o elásticos.

La alimentación a las subestaciones de tracción se pueden realizar de forma centralizada a través de redes monofásicas, pudiendo elevarse a una tensión mayor, e instalándose en las subestaciones de tracción transformadores monofásicos reductores, o mediante generación descentralizada.

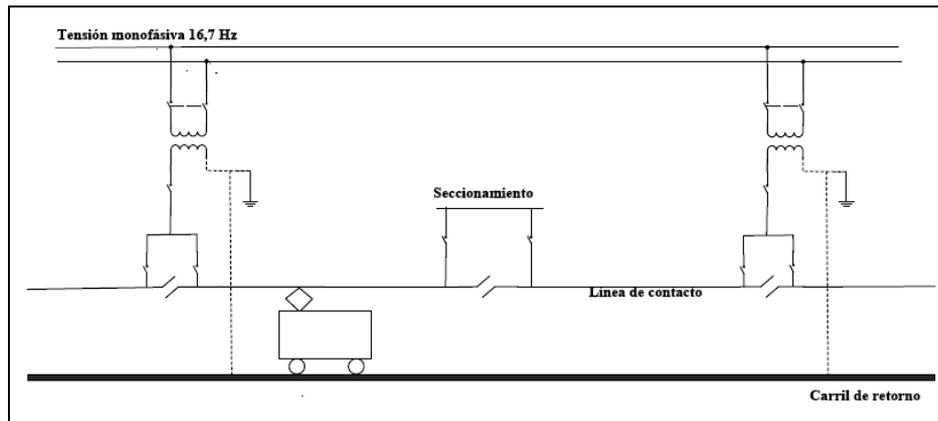


Figura 5. Esquema del sistema de 15 kV a 16,7 Hz

Las subestaciones de tracción se conectan en paralelo con las subestaciones adyacentes formando un esquema similar a la electrificación en corriente continua.

2.2.2. Electrificación a 50 Hz

La primera experiencia sobre la electrificación a 50 Hz se realizó en Höllentalbahn (Alemania) aproximadamente en 1940. Pero hay que esperar hasta principios de los años 80 para el desarrollo de las líneas de trenes de alta velocidad con la inauguración línea París – Lyon (Francia).

La energía requerida para los sistemas de electrificación monofásicos a 25 kV y 50 Hz [17] se obtiene de las redes trifásicas de distribución o transmisión de energía. La demanda de energía monofásica sobre la red trifásica causa desequilibrios en la tensión y la corriente en la red trifásica. Estas tensiones desequilibradas pueden provocar serios efectos sobre el resto de consumidores. Así, para minimizar estos efectos existen unos valores máximos permitidos sobre el desequilibrio provocado por las subestaciones de tracción monofásicas.

En la práctica, se realiza una permutación en las fases de la red trifásica en las distintas alimentaciones monofásicas de las subestaciones de una línea. Sin embargo, esta permutación comprometerá la operación de la línea, pues será necesario incorporar separaciones de fases en los límites de alimentación de cada subestación.

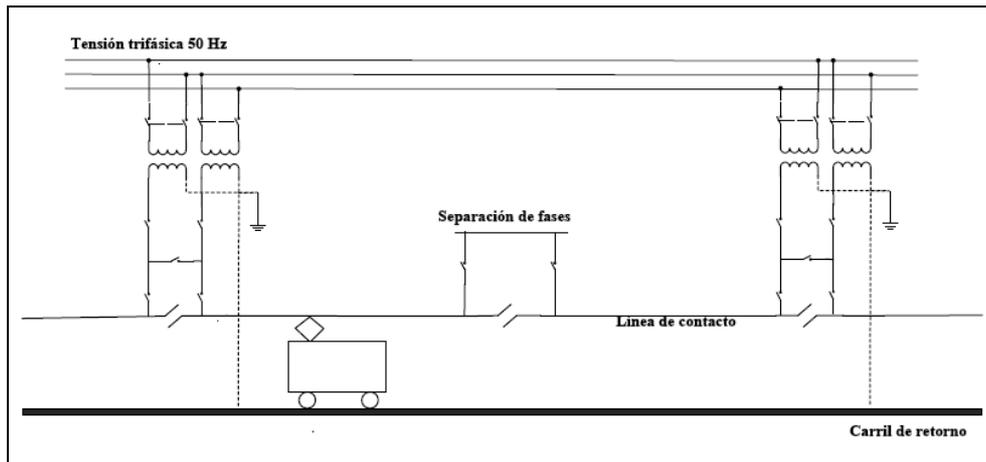


Figura 6. Esquema de la alimentación en el sistema de 25 kV a 50 Hz

Dentro de los sistemas electrificados en corriente alterna a frecuencia industrial el 1x25 kV fue el predominante en sus inicios y poco a poco ha sido sustituido por el sistema 2x25 kV que actualmente es el más común en las líneas de alta velocidad en Europa.

2.2.2.1. Alimentación simple (1x25 kV)

La primera línea con el sistema simple de 1x25 kV se realizó en el año 1981 en la línea de alta velocidad Paris - Lión.

La alimentación simple es la más sencilla y consiste en la conexión directa de los bornes del secundario del transformador a la catenaria y al carril en cada subestación. Pero este sistema presenta una impedancia alta de la línea, que ocasiona unas pérdidas elevadas y una tensión carril-tierra también elevada. Otros de los puntos negativos del sistema son las interferencias electromagnéticas sobre circuitos de telecomunicaciones.

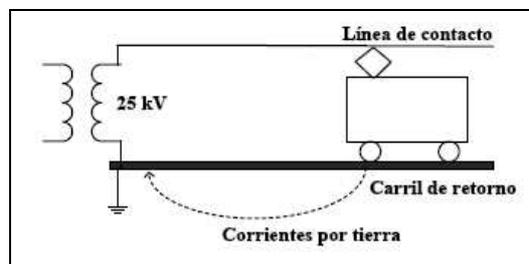


Figura 7. Esquema de la alimentación en 1x25 kV

Para minimizar los inconvenientes de la alimentación simple se ha desarrollado la alimentación con transformadores Booster (BT) y especialmente con autotransformadores (AT).

2.2.2.2. Alimentación con transformadores Booster (BT)

La alimentación con transformadores booster (BT) se utilizó en primer lugar en la línea Tokaido Shinkansen (Japón) en 1964, instalándose estos BT en la catenaria con intervalos entre 3 o 4 km. El primario del transformador se conecta en un seccionamiento de la catenaria, mientras que el secundario en una sección aislada del carril de retorno. La relación de transformación es la unidad. De esta manera, la corriente de retorno que circula por tierra es forzada hacia los carriles de retorno para igualar los amperios-vuelta del primario.

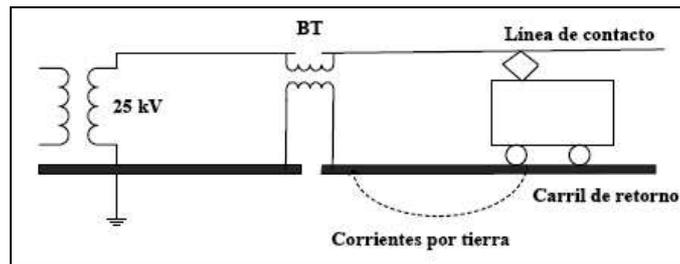


Figura 8. Esquema de la alimentación con BT

2.2.2.3. Alimentación a través de autotransformadores (2x25 kV)

Los autotransformadores (AT) permiten que la tensión suministrada por la subestación sea el doble que la suministrada al tren. Los autotransformadores suelen instalarse cada 10 km a lo largo de la línea.

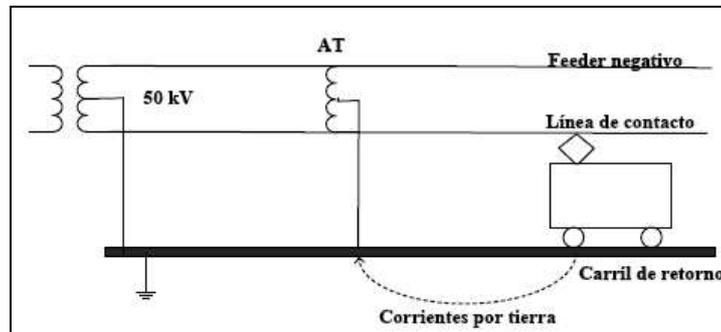


Figura 9. Esquema de la alimentación con AT

Los autotransformadores se conectan entre la catenaria y un conductor auxiliar, denominado feeder negativo, y con el carril conectado en el punto medio.

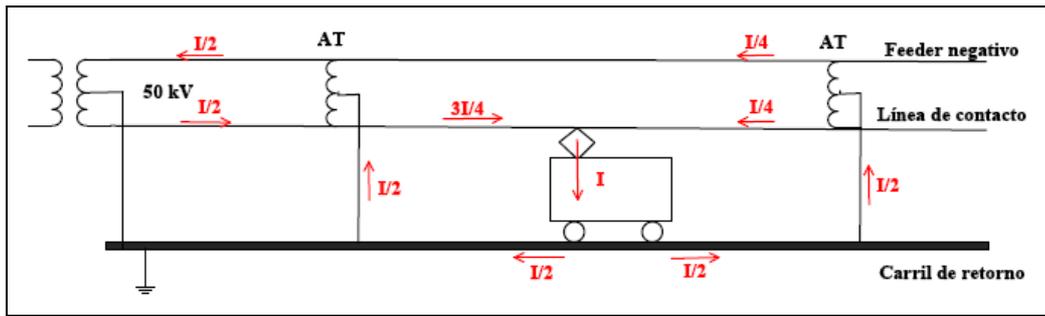


Figura 10. Esquema del principio de funcionamiento del sistema 2x25 kV

La corriente consumida por el tren procede de dos AT adyacentes. Esta corriente es aproximadamente el doble de la suministrada por la subestación, pues la corriente consumida por el tren que circula por los carriles de retorno entra en los arrollamientos de los AT adyacentes y aproximadamente la mitad retorna a la catenaria para mantener el balance de amperios-vuelta.

3. LA TRACCIÓN ELÉCTRICA EN EL MATERIAL MÓVIL

Los trenes de las primeras líneas ferroviarias electrificadas utilizaban motores de corriente continua, que permitían una regulación sencilla de la velocidad a base de resistencias, posteriormente se continuó utilizando este mismo tipo de motor pero controlado con ciertos dispositivos de electrónica de potencia hasta prácticamente 1980, cuando se extendió la utilización del motor de corriente alterna con inversor.

La propulsión con motores de inducción fue debida a los importantes avances en semiconductores de alta potencia junto con la tecnología del control por microprocesador. Así la utilización de los motores de corriente continua prácticamente desapareció con la excepción de los habituales reemplazos en unidades existentes. En estos primeros años de utilización de los motores de inducción se utilizaba el control deslizamiento - frecuencia [41] hasta prácticamente la primera mitad de los años 90, que es cuando aparecen los primeros trenes con motores de inducción con convertidores controlados a partir del control vectorial.

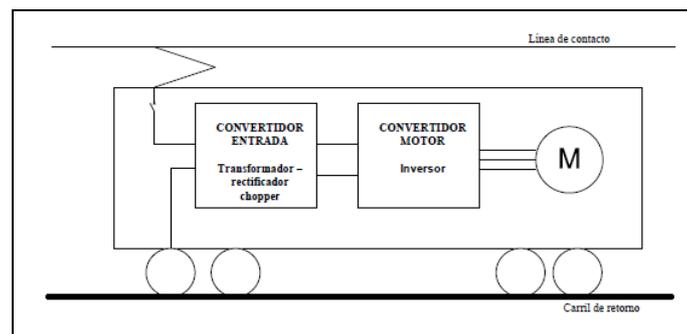


Figura 11. Esquema general del sistema de tracción de un tren actual

3.1. Tracción con motores de corriente continua

A pesar que los nuevos trenes van provistos de motores trifásicos de corriente alterna, todavía una buena parte de los trenes actualmente en servicio utilizan motores de corriente continua con colector.

Así hasta hace unas décadas los trenes provistos de motores de corriente continua se utilizaban tanto en sistemas electrificados en corriente continua como en corriente alterna.

3.1.1. Electrificación CC con motores CC

Durante algunos años, estos motores tanto en montaje serie como con excitación independiente se controlaban a través de resistencias variables [14] de forma que se reducía su valor para aumentar la tensión aplicada al motor para acelerar y se aumentaba para frenar. Este tipo de control se llama control reostático. Este sistema presentaba varios problemas, como su baja eficiencia, o como también el riesgo de incendio cuando las resistencias se calentaban.

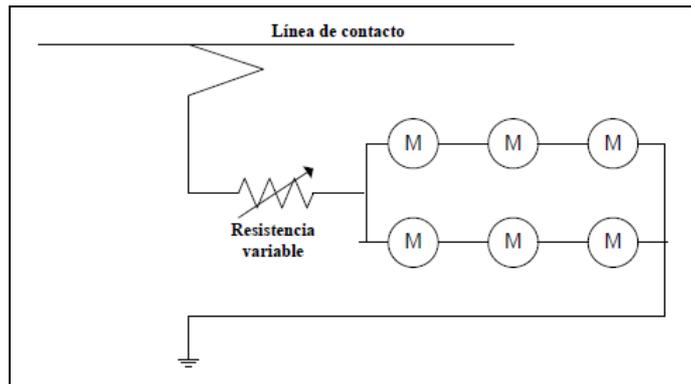


Figura 12. Control reostático

Para solucionar estos problemas, alrededor de 1970 se desarrolló el convertidor continua – continua o también llamado *chopper*, tanto para motores en montaje serie como con excitación independiente. Aunque sólo el montaje con excitación independiente permitía el frenado regenerativo.

Los *choppers* [15] han sido utilizados de una manera generalizada en la tracción de líneas metropolitanas y tranviarias. El *chopper* representado en el esquema siguiente permite la motorización y el frenado regenerativo.

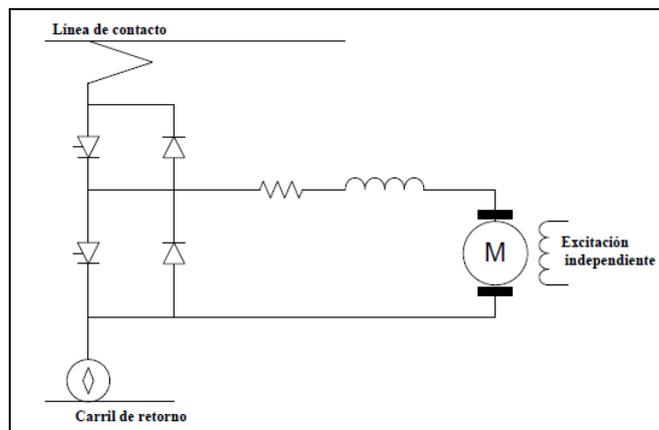


Figura 13. Chopper CC/CC

Durante el frenado regenerativo, el motor actúa como un generador retornando la energía hacia la catenaria, trabajando el *chopper* como un convertidor elevador.

3.1.2. Electrificaciones CA con motores CC

A partir de 1950 se utilizaron los motores con excitación independiente con rectificadores controlados basados en tiristores en trenes que circulaban en líneas electrificadas en corriente alterna [34]. El sistema más utilizado fue el rectificador semicontrolado que tenía como principal ventaja la utilización de la mitad de tiristores que un rectificador controlado, desafortunadamente este tipo de rectificador no permitía el frenado regenerativo.

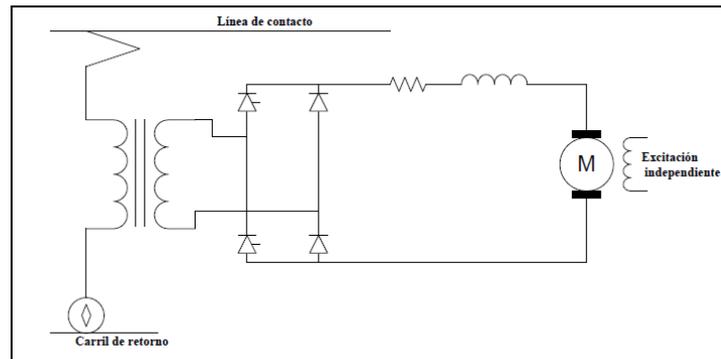


Figura 14. Rectificador semi-controlado

3.2. Tracción con motores de corriente alterna

A inicios del siglo XX ya se conocían las ventajas de los motores de corriente alterna como la característica par-velocidad, la ausencia de conmutadores, su mayor ligereza y robustez, o la capacidad inherente para la regeneración, que hacía de los motores trifásicos de inducción ideales para los sistemas de tracción ferroviaria. Así se fabricaron algunas locomotoras con motores de inducción cuyo control de velocidad se realizaba a partir del cambio de polos o de la variación de las resistencias rotóricas, y siempre en sistemas electrificados en corriente alterna trifásica. Pero el principal problema era el poder alimentar un motor trifásico a partir de una electrificación en corriente continua, o de corriente alterna monofásica, y efectuar un control total de la velocidad a partir de las variaciones tanto de la tensión del estator como, sobretodo, de su frecuencia.

Así, no fue hasta mediados de los años 70, cuando se desarrolló el inversor como fuente de corriente (CSI), con los tiristores de alta capacidad, que más tarde se sustituirían por los GTO. Y a mediados de los años 90 con la aparición de los IGBT, se desarrolló el inversor como fuente de tensión (VSI), que hoy es el estándar en inversores de tracción.

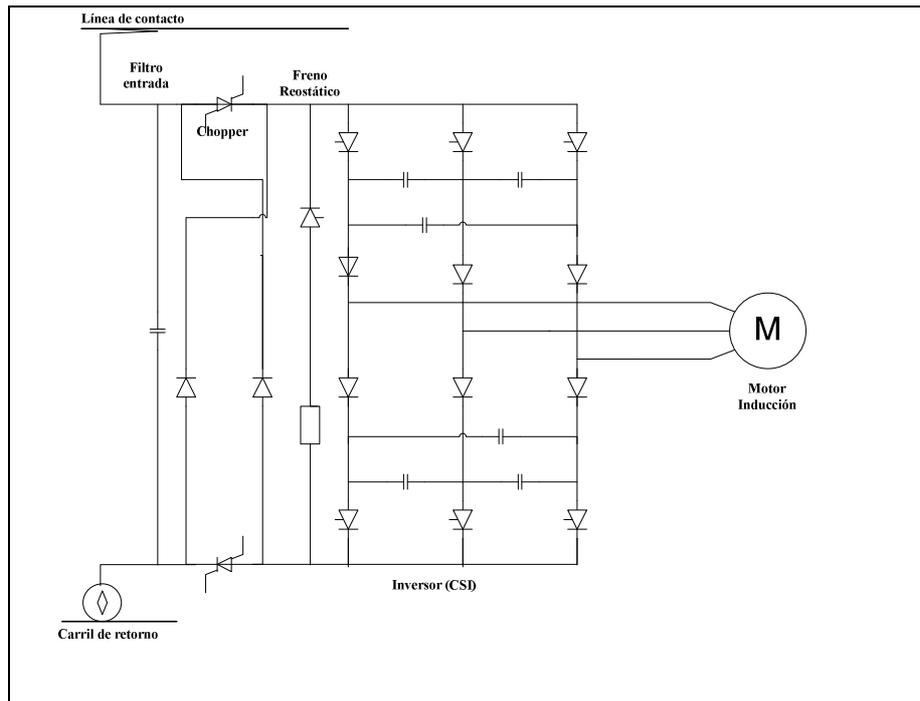


Figura 15. Inversor CSI

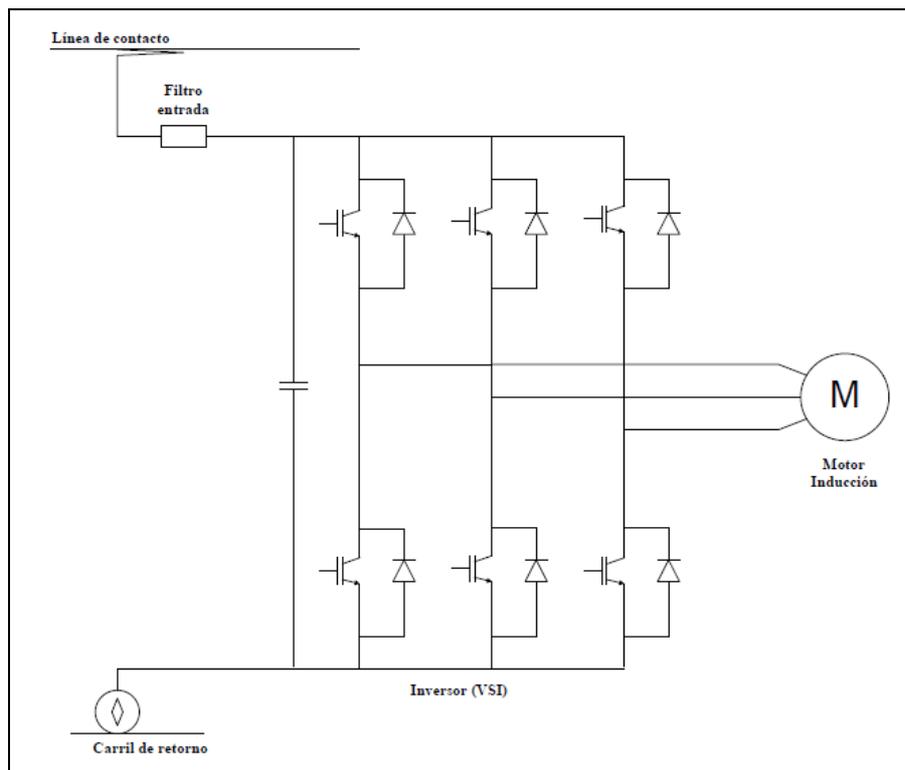


Figura 16. Inversor VSI

También en los últimos años se han realizado algunos diseños empleando motores síncronos con imanes permanentes [38] [39] [40], que quizás sea el estándar en los próximos años.

3.2.1. Electrificación CC con motores CA

Los inversores con motores trifásicos alimentados desde líneas electrificadas en corriente continua, pueden ser tanto CSI como VSI. El inversor VSI permite variar la tensión y la frecuencia (VVVF), lo cual no suele ser necesario, excepto en electrificaciones con tensiones de 3 kV.

Los inversores CSI siempre requieren de un *chopper* previo al inversor para mantener la corriente constante.

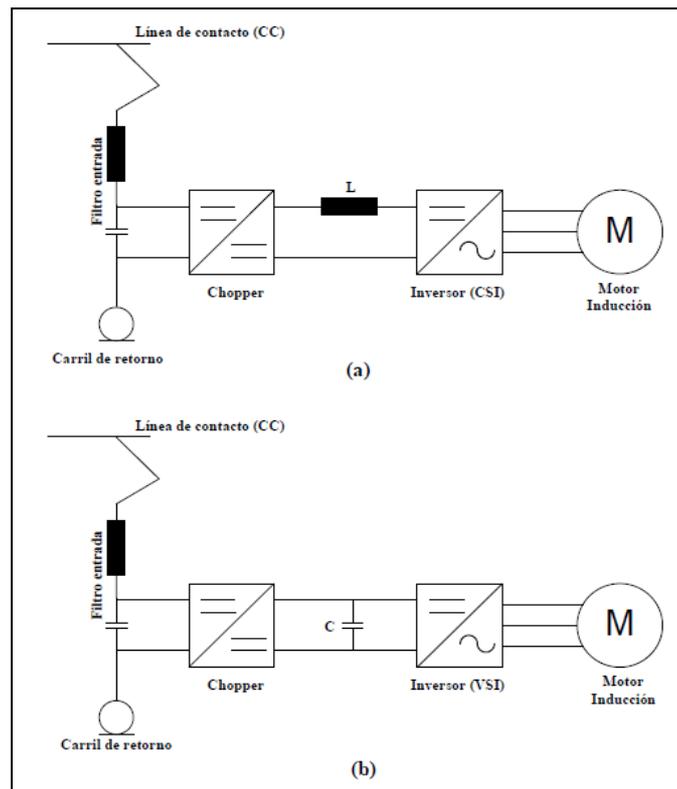


Figura 17. (a) CSI y (b) VSI

3.2.2. Electrificación en CA con motores CA

Los convertidores para líneas electrificadas en corriente alterna fueron desarrollados con posterioridad a los utilizados para la tracción en electrificaciones en corriente continua.

A diferencia de la electrificación en corriente continua, en este caso es necesario un convertidor de línea para rectificar la entrada al VSI. Los primeros desarrollos utilizaban rectificadores con control de fase que solo permitían el frenado reostático, más tarde se utilizaron convertidores de cuatro cuadrantes que permitían también el frenado regenerativo y mantener el factor de potencia cercano a la unidad.

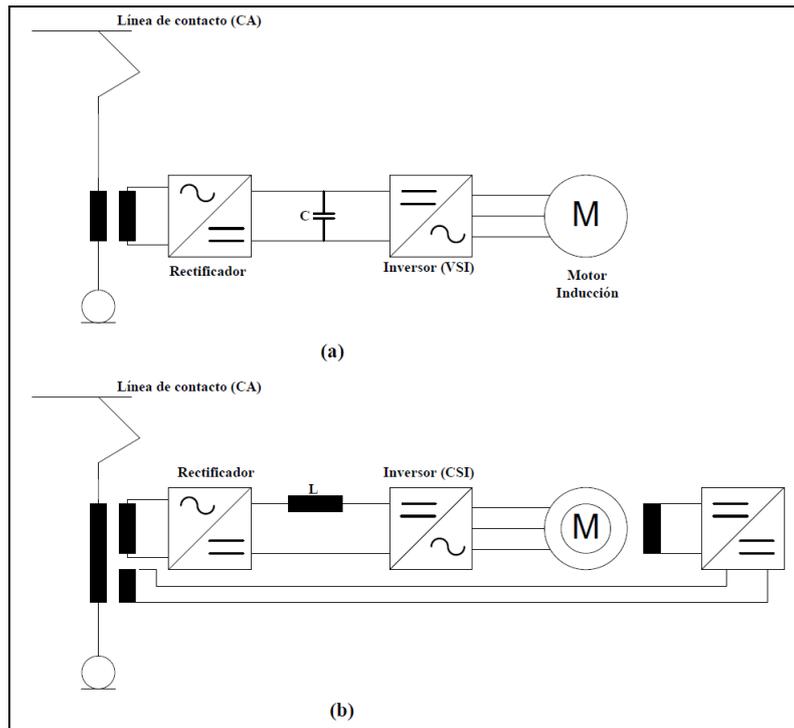


Figura 18. (a) VSI y (b) CSI

Un desarrollo especial con CSI se realizó en Francia para el TGV Atlántico con motores trifásicos síncronos.

4. EL FRENADO REGENERATIVO

El frenado regenerativo puede implementarse en cualquier sistema de electrificación siempre que este provisto de unos trenes y una infraestructura adecuados. Desde el punto de vista energético, los trenes deberían tener la capacidad de convertir la energía cinética del movimiento del tren en energía eléctrica e inyectarla en el sistema de electrificación actuando como generadores cuando frenan [35]. Como se ha indicado anteriormente, casi sin excepción, los trenes modernos van provistos de este frenado regenerativo. Sin embargo el sistema de electrificación no siempre es capaz de aceptar esta energía procedente del frenado regenerativo.

Debido a requisitos de seguridad, los trenes aparte del freno regenerativo, disponen de otros frenos adicionales, como frenos mecánicos o disipativos. Cuando el tren tiene que frenar, inicialmente aplicará frenos regenerativos, y si necesita más fuerza de frenado utilizará los frenos adicionales. Por otra parte, si la tensión entre el pantógrafo y la catenaria se interrumpe, el frenado regenerativo resultaría imposible.

La energía eléctrica recuperada por el frenado regenerativo en primer lugar se utilizará para dar energía a los propios sistemas auxiliares del tren, y si hay energía sobrante se inyectará en la catenaria para la tracción de otros trenes cercanos.

A continuación se analiza la influencia del sistema de electrificación sobre el frenado regenerativo.

4.1. Frenado regenerativo en sistemas de corriente alterna

Aunque el comportamiento es muy similar, se analizan independientemente los sistemas electrificados a frecuencia industrial (50 Hz) y a frecuencia reducida (16,7 Hz).

4.1.1. Frenado regenerativo en la electrificación 25 kV 50 Hz

Como se ha descrito en el punto 2.2.2 de este mismo capítulo, en general cada sección se alimenta desde una subestación, normalmente equipada con dos transformadores, con cada uno dando alimentación a la mitad de la sección. Las dos secciones operan normalmente de forma independiente. La alimentación de la subestación se realiza con una tensión alterna monofásica que procede de un sistema trifásico.

La potencia que proviene del frenado regenerativo puede ser introducida en el sistema trifásico si no es consumida por otros trenes que se encuentran en la misma sección. Si no existen trenes en la misma

sección o estos no requieren potencia, la potencia será transferida directamente a la red trifásica de alta tensión. Desde este punto de vista los sistemas en corriente alterna son siempre receptivos de la potencia regenerada con la única restricción de los límites de tensión del sistema de electrificación.

Cuando un tren empieza a regenerar, la tensión de la catenaria aumenta. La normativa establece como límite de tensión de 29 kV. Si la tensión de la catenaria alcanza este valor, el tren deberá dejar de utilizar el frenado regenerativo.

Tipo de electrificación	U_n (V)	U_{max1} (V)	U_{max2} (V)	U_{min1} (V)	U_{min2} (V)
CC 600 V	600	720	770	400	-
CC 750 V	750	900	950	500	-
CC 1,5 kV	1.500	1.800	1.950	1.000	-
CC 3,0 kV	3.000	3.600	3.900	2.000	-
CA 15 kV 16,7 Hz	15.000	17.250	18.000	12.000	11.000
CA 25 kV 50 Hz	25.000	27.500	29.000	19.000	17.500

Tabla 2. Tensiones máximas y mínimas según la norma EN 50.163

En la tabla anterior:

- U_n : tensión nominal.
- U_{max1} : Tensión máxima permanente.
- U_{max2} : Tensión máxima no permanente, con una duración máxima de 5 minutos.
- U_{min1} : Tensión mínima permanente.
- U_{min2} : Tensión mínima no permanente, con una duración máxima de 5 minutos.

4.1.2. Frenado regenerativo en la electrificación 15 kV 16,7 Hz

A diferencia de la electrificación en 25 kV 50 Hz, tal y como se ha indicado en el punto 2.2.1 en la electrificación 15 kV 16,7 Hz cada sección puede ser alimentada por varias subestaciones de tracción. La potencia que demanda un tren puede proceder de diversas subestaciones, estas subestaciones son alimentadas por una red monofásica de alta tensión.

La potencia que proviene del frenado regenerativo puede ser transferida a la red de alimentación de las subestaciones si no es consumida por otros trenes. Así las únicas restricciones para aceptar la potencia regenerada serán también los límites de tensión del sistema de electrificación.

Cuando un tren empieza a regenerar, la tensión de la catenaria aumenta. La normativa establece en este caso un límite de tensión de 18 kV. Así, si la tensión de la catenaria alcanzase este valor, el tren debería dejar de utilizar el frenado regenerativo.

4.2. Frenado regenerativo en sistemas de corriente continua

En la electrificación en corriente continua cada sección es alimentada por varias subestaciones de tracción según se ha indicado en el punto 2.1. Por lo tanto, la potencia que demanda un tren puede proceder de diversas subestaciones. Como se ha visto anteriormente, la alimentación de las subestaciones de tracción en corriente continua procede de redes trifásicas de media o alta tensión.

Las subestaciones de tracción convencionales no pueden transferir la energía sobrante a la red de alimentación de corriente alterna. Estas subestaciones convencionales están provistas de rectificadores no controlados a base de diodos que no permiten invertir la potencia desde la red de corriente continua hacia la red de corriente alterna. Así la aceptación de la potencia regenerada depende de la disponibilidad de otros trenes de consumir esta potencia. Si no hay otros trenes demandantes de potencia, la tensión en la línea de contacto en el tren regenerado aumentará, y cuando supere la tensión máxima admisible por el sistema no podrá utilizar el frenado regenerativo [36]. En la práctica, cuando la tensión en la línea de contacto está próxima al valor máximo, el control del tren desviará la potencia hacia unas resistencias embarcadas, lo que constituye el frenado reostático.

En sistemas receptivos, una gran parte de la potencia puede ser exportada al sistema de electrificación y consumida por otros trenes sin alcanzarse la tensión máxima, mientras que en sistemas no receptivos solo una pequeña parte de esta potencia puede ser reaprovechada, y la mayor parte de ella será “quemada” en las resistencias embarcadas, pues se alcanzará enseguida la tensión máxima de la línea de contacto.

5. SISTEMAS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

En líneas metropolitanas electrificadas en corriente continua, con aceleraciones y deceleraciones constantes, aproximadamente el 90% de la energía consumida por un tren se destina a la tracción, y el restante 10% se consume en los sistemas auxiliares. Dependiendo de las condiciones de la línea, casi un 40% de la energía demandada para tracción podría ser retornada al sistema durante el frenado [37] [20]. En sistemas electrificados en corriente continua convencionales si esta energía no es consumida por otros trenes que se encuentran acelerando en el mismo instante, será convertida en calor a través del frenado reostático.

Como se ha indicado en el apartado anterior, las subestaciones de tracción convencionales en la electrificación en corriente continua utilizan rectificadores basados en diodos que no pueden enviar a la red de corriente alterna la energía regenerada sobrante en la red de continua. Por lo que es necesario limitar la energía regenerada para evitar tensiones elevadas en el tren que está regenerando. De esta forma se pierde una parte importante de la potencial energía que se pudiera regenerar en el sistema.

Así en los últimos años, para los sistemas electrificados en corriente continua se han desarrollado una serie de medidas para aumentar su eficiencia energética. Estas medidas pueden clasificarse en tres grupos:

- Disminución de la resistencia de la línea de contacto, ya sea mediante *feeders* de acompañamiento adicionales, o en líneas de vía doble con alimentaciones unificadas de las dos vías. La unificación de la alimentación de las vías es una técnica que se aplica habitualmente en las instalaciones tranviarias, dado que normalmente no está previsto la operación en vía única.
- Sistemas acumuladores de energía, tanto fijos como embarcados.
- Subestaciones provistas de inversores.

En los siguientes subapartados se analizan con más detalle los dos últimos.

5.1. Acumuladores de energía

Los acumuladores de energía pueden estar localizados en emplazamientos fijos, como podrían ser en las subestaciones, o embarcados en los propios trenes. En ambos casos pueden utilizarse con varios objetivos:

- Como ahorro energético, almacenando la energía procedente del frenado regenerativo para ser entregada en las aceleraciones.
- Para optimizar la eficiencia energética reduciendo la potencia suministrada por las subestaciones.

- Estabilizar la tensión de la línea de contacto, entregando la energía almacenada a la línea de contacto para disminuir las caídas de tensión.
- Regularizar los picos de demanda con la disminución de la potencia requerida durante las aceleraciones.

A continuación se realiza una descripción de estos sistemas según su localización fija o embarcada.

5.1.1. Acumuladores de energía fijos

El metro de Londres fue una de las primeras líneas metropolitanas con acumuladores fijos. Los acumuladores instalados eran del tipo cinemático. Más recientemente, en Colonia (Alemania) se han instalado acumuladores estáticos basados en supercondensadores.

Las tecnologías más habituales empleadas para el almacenamiento de energía son las siguientes:

- Baterías.
- Condensadores de doble capa o supercondensadores.
- Acumuladores cinemáticos.
- SMES.

En todos los casos se requieren convertidores bidireccionales, generalmente CC-CC, que permitan tanto la carga como la descarga del acumulador dependiendo de las condiciones de la línea de contacto.

5.1.1.1. Sistemas con baterías

Las baterías han sido utilizadas durante años, y siguen utilizándose en los sistemas eléctricos como acumuladores de energía. Últimamente se han desarrollado nuevas baterías como las de Li-Ion con unas mayores prestaciones.

Sus mayores problemas, al estar basadas en reacciones químicas, son su corta duración y que no permiten potencias altas. Por otro lado, también es crítico su impacto ambiental.

5.1.1.2. Supercondensadores

Los supercondensadores son acumuladores en los que, a diferencia de las baterías, no tiene lugar ninguna reacción química. Los supercondensadores presentan una mayor densidad de energía que los condensadores electrolíticos debido a la presencia de una alta superficie de contacto en los electrodos.

Los supercondensadores se caracterizan por una larga duración (aproximadamente 10 años), una alta eficiencia (95%), una fácil instalación, y la posibilidad de poder trabajar en entornos diversos. Su mayor atractivo radica en el número de ciclos de cargas y descargas con respecto a las baterías tradicionales.

El esquema de conexión del acumulador se muestra en la siguiente figura:

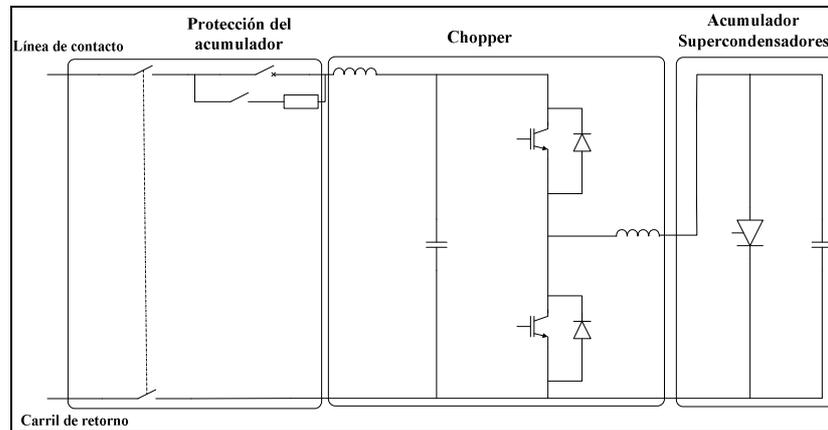


Figura 19. Esquema de la conexión del acumulador

El acumulador puede conectarse directamente a la línea de contacto o en las barras de continua de la subestación a través, en ambos casos, de la unidad de entrada o de protección. Esta unidad está formada por un seccionador y un interruptor extrarrápido y la unidad de precarga. La conexión entre la unidad de entrada y los supercondensadores se realiza con un *chopper* de dos cuadrantes similar a los *choppers* utilizados en la tracción eléctrica.

5.1.1.3. Acumuladores cinemáticos

El acumulador cinemático es un acumulador electro-mecánico que consiste esencialmente de un volante de inercia acoplado a una máquina eléctrica. También es necesario un convertidor que permita el enlace entre la línea de contacto y la máquina eléctrica. La máquina eléctrica podrá trabajar como motor, para acelerar el volante de inercia y aumentar la energía almacenada, o como generador para frenar el volante y entregar la energía a la línea de contacto.

Tradicionalmente, los acumuladores cinemáticos se han diseñado de baja velocidad (inferior a 10.000 rpm) constituidos por volantes de inercia de acero [19], y actualmente se están desarrollando volantes de inercia de alta velocidad (mayor 20.000 rpm) con volantes de inercia de fibra de carbono y provistos de cojinetes magnéticos [42].

Las ventajas principales de los acumuladores cinemáticas son su alta densidad de potencia, el bajo mantenimiento, su larga duración (alrededor de 20 años) y su bajo impacto ambiental.

5.1.1.4. SMES

Los acumuladores SMES o *Superconducting Magnetic Energy Storage* almacenan la energía en un campo magnético generado por una corriente continua que circula por una bobina superconductora con una resistencia prácticamente nula.

En los últimos años [21] [22] se ha realizado un gran esfuerzo para su aplicación en sistemas eléctricos, pero uno de sus mayores problemas es mantener la bobina a unas bajas temperaturas para que mantenga las características superconductoras.

5.1.2. Acumuladores embarcados

Las tecnologías utilizadas para estos acumuladores son similares a las fijas, pero en este caso un factor clave es su peso. Para algunas aplicaciones se han utilizado históricamente baterías, pero en los últimos años éstas han quedado relegadas por la aparición de los supercondensadores.

Algunos fabricantes han optado por soluciones híbridas [18] entre baterías y supercondensadores, pero estos desarrollos han ido casi siempre dirigidos hacia la operación sin catenaria.

5.2. Subestaciones reversibles

Las subestaciones reversibles permiten evitar la tensión excesiva en el frenado regenerativo y a la vez aumentar la receptibilidad de la energía regenerativa en el sistema. La energía sobrante procedente de la regeneración, a través de las subestaciones reversibles, puede inyectarse en la red de corriente alterna.

La configuración más habitual está compuesta por un rectificador no controlado en antiparalelo con un inversor. El rectificador no controlado suministra la energía al sistema de tracción, mientras que el inversor extrae la energía sobrante del sistema en corriente continua y la dirige hacia la red de corriente alterna [43] [44].

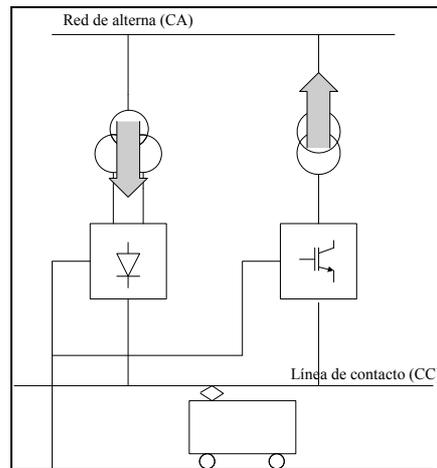


Figura 20. Esquema de la subestación reversible

Así pues, pueden distinguirse tres modos de operación:

- Modo rectificación: en este modo el rectificador suministra potencia a la red de continua, así la tensión de la línea de contacto será menor que la tensión de vacío del rectificador, debido principalmente a la caída de tensión en la reactancia del transformador.
- Modo recirculación: cuando una pequeña corriente recircula entre el rectificador y el inversor al encontrarse en paralelo. Este modo suaviza el cambio entre el modo rectificación y el modo inversión.
- Modo inversión: cuando la tensión de la línea de contacto es mayor que la tensión de operación del inversor, el convertidor habilita el paso de la energía sobrante de la red de continua a la red de alterna. El control de estos inversores permite generalmente dos modos de actuación: tensión constante o corriente constante.

6. REQUERIMIENTOS ELÉCTRICOS Y DE SEGURIDAD

6.1. Requerimientos eléctricos

Las características de la corriente y la tensión nominal son determinantes en los requerimientos eléctricos de una línea ferroviaria. También es primordial limitar la corriente transportada por la línea de contacto. De este modo la tensión de la línea de contacto tiene que estar comprendida dentro de unos límites en cualquier circunstancia de operación.

Así los parámetros principales que es preciso controlar son:

- Las potencias demandadas y las intensidades en los equipos, de acuerdo con las sobrecargas admisibles.
- La tensión a lo largo de la línea de contacto.
- Las intensidades transportadas por la línea de contacto.
- Los potenciales carril-tierra.
- Los desequilibrios sobre redes trifásicas en las electrificaciones en corriente alterna con transformadores monofásicos.
- Las intensidades de cortocircuito.

6.1.1. Potencias demandadas e intensidades en los equipos fijos

Una de las características de la alimentación a los sistemas de electrificación es la importante variación de las potencias demandadas y sus correspondientes intensidades dentro de intervalos de tiempo relativamente reducidos.

De este modo, la mayoría de normas internacionales que definen las solicitudes de los equipos fijos presentes en los sistemas de electrificación ferroviaria definen una serie de clases de servicio en función de la aplicación ferroviaria. Así, por ejemplo la norma EN 50.329 define las clases de servicio para los transformadores de tracción, y en la norma EN 50.328 para los convertidores electrónicos de potencia de las subestaciones.

6.1.2. Tensión en la línea de contacto

Para que el material rodante presente en los sistemas de electrificación pueda funcionar satisfactoriamente es preciso que la tensión entre la línea de contacto y el retorno se encuentre dentro de unos márgenes a lo

largo del trazado. En la norma EN 50.163 se definen las tensiones máximas y mínimas en los sistemas de electrificación en función de la tensión nominal de la línea.

6.1.3. Intensidades en la línea de contacto.

La intensidad transportada por cada uno de los conductores que forman la línea de contacto y el circuito de retorno no pueden superar unos valores máximos definidos a partir de las características de los conductores y su montaje. Esta intensidad máxima admisible viene fijada por el calor máximo que puede evacuar el conductor dependiendo de las condiciones de evacuación por convención o radicación.

En la práctica, como la intensidad que circula por el conductor varía en función del tiempo, suele relacionarse la intensidad máxima admisible por el conductor con I_{RMS} :

$$I_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \cdot \sum_{k=1}^m I_k^2 \cdot t_k \right)}$$

Siendo:

- T el periodo de tiempo considerado.
- I_k intensidad en el instante k .
- t_k duración del instante k .

6.1.4. Potencial carril-tierra.

El potencial del carril respecto a tierra es una consecuencia de la circulación de la intensidad de retorno por el propio carril. Este potencial está relacionado con los requerimientos de seguridad que se indicarán en el siguiente apartado.

6.1.5. Desequilibrios

La alimentación de los trenes en los sistemas de electrificación en CA a frecuencia industrial se realiza en corriente alterna monofásica. Las subestaciones de tracción, sin embargo, se alimentan a partir de la red trifásica de alta tensión. Las cargas monofásicas introducen desequilibrios en la red trifásica de alta tensión. Las compañías eléctricas en la mayoría de países fijan unos valores máximos correspondientes a los desequilibrios que pueden generar los abonados, normalmente se definen varios valores en función de su duración.

Con el objetivo de reducir, en la medida de lo posible, los desequilibrios introducidos en la red trifásica de alta tensión, la alimentación a las subestaciones de tracción se hace a través de diferentes fases

eléctricas. Esto implica que los tramos de catenaria abastecidos por cada uno de los transformadores de tracción estarán alimentados también por fases eléctricas diferentes. De forma que las zonas de transición entre tramos de catenarias alimentados por transformadores de tracción diferentes han de ser convenientemente aisladas para que no se produzca un cortocircuito entre fases. Esta función la desempeñan las zonas neutras de catenaria [45].

El desequilibrio de tensiones en un nodo de la red se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$D = \frac{U_2}{U_1} \times 100$$

Siendo:

- D es el desequilibrio en %.
- U_1 es la componente directa de la tensión en el nodo, en V.
- U_2 es la componente inversa de la tensión en el nodo, en V.

6.1.6. Intensidades de cortocircuito

En los sistemas de electrificación ferroviaria es preciso disponer de unas protecciones contra cortocircuitos que aseguren unos poderes de corte y unos tiempos de actuación suficientemente bajos para que permitan salvaguardar los propios equipos y la seguridad de las personas [46] [47].

De cara a las protecciones, es primordial distinguir las corrientes de arranque de los trenes de los cortocircuitos lejanos.

6.2. Requerimientos de seguridad

6.2.1. Potencial del carril

En cuanto a los requerimientos de seguridad, destaca la protección contra el riesgo eléctrico causado por el potencial del carril.

En la mayoría de los sistemas de electrificación, los carriles de rodadura se utilizan también como circuito de retorno de la corriente hacia la subestación [26]. Cuando los trenes se mueven, ocasiona un potencial del carril respecto a tierra debido a la transmisión de la corriente. A la altura de los trenes y de las subestaciones es donde se alcanzan unos valores de potencial más elevados. De este modo, los valores máximos de potencial del carril alcanzables por un sistema de electrificación están regulados por

normativas internacionales [24]. Los valores permitidos del potencial del carril y de las tensiones de contacto permisibles en electrificaciones en corriente continua y en corriente alterna son distintos, y son función de la duración según establece la norma EN 50.122-1.

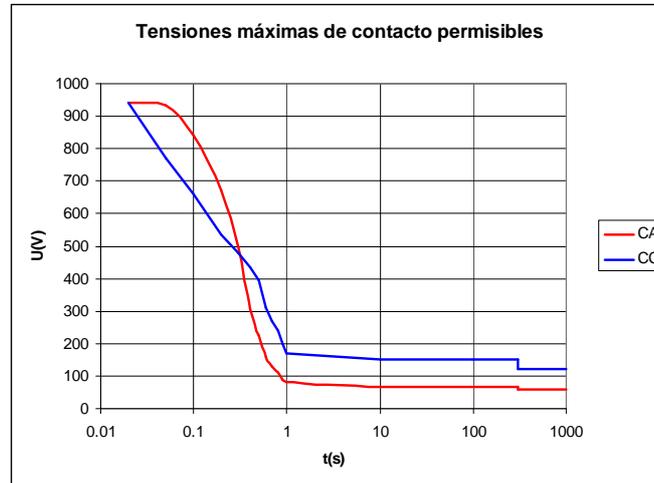


Figura 21. Tensiones máximas de contacto permisibles en sistemas de tracción CA y CC

De este modo es necesario la existencia de unas medidas de protección para prevenir el riesgo del potencial del carril [25], y más si se tiene en cuenta que los montajes de los carriles de rodadura en las líneas actuales suelen ejecutarse aislados.

Así, mientras que en los sistemas de electrificación en corriente alterna es habitual una conexión periódica del carril a tierra, en los sistemas electrificados en corriente continua [30] se suele mantener aislado, pues este potencial del carril es el causante de las corrientes vagabundas, que producen efectos de corrosión en las estructuras metálicas que atraviesan.

6.2.2. Efectos de las corrientes vagabundas

En sistemas electrificados en corriente continua, las corrientes vagabundas [27] pueden causar corrosión en los servicios soterrados y en las estructuras sin una protección controlada.

En las líneas electrificadas en corriente continua el suministro de corriente desde el polo positivo del rectificador hacia el tren se realiza a través de la catenaria o de un tercer carril, como estos sistemas están bien aislados de tierra las corrientes de fuga son mínimas. Por el contrario, la corriente retorno desde el tren hasta el polo negativo del rectificador transcurre a través de los carriles de rodadura. El aislamiento respecto a tierra de estos carriles de rodadura dependerá en gran medida de su montaje, ya sea sobre

balastro, placa o embutida, pero en cualquier caso los valores de aislamiento estarán por muy debajo de los de la catenaria.

En la tabla siguiente se muestran los valores máximos de conductancia del carril de acuerdo con la norma EN 50.122-2.

Sistema de tracción	Aire libre (S/km)	Túnel (S/km)
Ferrocarril	0,5	0,5
Sistema de transporte masivo en formación abierta	0,5	0,1
Sistema de transporte masivo en formación cerrada	2,5	-

Tabla 3. Valores recomendados de conductancia por unidad de longitud.

El nivel de corrientes vagabundas generadas dependerá del grado de aislamiento del carril con respecto a tierra. Pero el gran problema de la circulación de corrientes vagabundas por el terreno es el riesgo de corrosión en los servicios adyacentes [28]. Las corrientes vagabundas pueden penetrar en los servicios a través de cualquier canalización o estructura metálicas en contacto con el terreno. El principal efecto de las corrientes vagabundas es la corrosión electrolítica en el punto donde la corriente sale del metal de la estructura o conducto volviendo al terreno [32].

Así, los problemas derivados de la corrosión originada por la circulación de corrientes vagabundas pueden ser por ejemplo:

- Daños o degradación de las estructuras metálicas de los viaductos.
- Fugas de líquidos en conducciones soterradas.
- Explosión de gases.
- Daños en instalaciones eléctricas o de telecomunicaciones ajenas a la línea ferroviaria.

Existen una serie de medidas que permiten minimizar la circulación de corrientes vagabundas [29], como por ejemplo:

- La reducción de la resistencia lineal del circuito de retorno, con uniones entre tramos de carril soldadas, conexiones entre vías cada cierta distancia, etc.
- Aumento del aislamiento de carril respecto a tierra.
- Instalando sistemas colectores de corrientes vagabundas a través de recorridos controlados.
- Sistema de vigilancia del aislamiento del carril.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [14] ALLENBACH, Jean-Marh, CHAPAS, Pierre, COMTE, Michel, KALLER, Roger. Traction Électrique, pp 59 - 182. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- [15] HILL R. J. Electric railway traction, Power Engineering Journal, 1994.
- [16] KIEBLING, Friedrich, PUSCHMANN, Rainer, SCHMIEDER. Contact lines for electric railways: planning, design and implementation, pp 31 - 67, Siemens. 2001.
- [17] OURA Yasu, MOCHINAGA Yoshifuni, NAGASAWA Hiroki. Railway Electric Power Feeding Systems. Railway Technology Today 3 edited by Kanji Wako. June 1998.
- [18] RUFER, Alfred. Energy storage for railway systems, energy recovery and vehicle autonomy in Europe. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland IEEE 2010.
- [19] New York subway tries out flywheel energy storage. Railway Gazette International, vol. 216, pp. 777 - 797. 1975.
- [20] RATÉS, S y RULL, J. Simulador Rsim: Aplicación al estudio de la eficiencia energética en líneas ferroviarias metropolitanas. III Jornadas Técnicas. Estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. Junio 2010.
- [21] HSU, C, LEE, J. Superconducting magnetic energy storage for power system applications. Industry Applications IEEE, vol. 29, pp. 990 - 996, 1993.
- [22] SCHOTTLER, R.. CONEY R.G. Commercial application experiences with SMES. Power Engineering Journal. vol. 13, pp. 149 - 152, 1999.
- [23] WHITE Roger D. DC electrification supply system design. IEEE Xplore. 2007.
- [24] LEE Chien-Hsing. Safety Assessment of Bulk and Traction Supply Substations in Taipei Rail Transit Systems. IEEE transactions on power delivery, vol. 19, no. 3, July 2004.
- [25] LEE C. H. Lee and MELIOPOULOS A. P. S., Comparison of touch and step voltages between IEEE Std. 80 and IEC 479-1. Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Dist., vol. 146, no. 6, pp. 593-601, Nov. 1999.
- [26] JACIMOVIC S. D. Maximum permissible values of step and touch voltages with special consideration to electrified railroads. IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-20, pp. 935-941, July/Aug. 1984.
- [27] BARLO T. J., ZDUNEK A. D., and JOHNSON R. N. Stray current corrosion in electrified rail systems. Proposal of the Basic Industrial Research Laboratory, pp. 93-127, Jul. 1993.
- [28] COTTON I., CHARALAMBOUS C., AYLOTT P., and ERNST P. Stray current control in DC mass transit systems. IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 54, no. 2, pp. 722-730, Mar. 2005.
- [29] LIU Y. C. and CHEN J. F. Control scheme for reducing rail potential and stray current in MRT systems. In Proc. Inst. Elect. Eng., Electric Power Appl., May 2005, vol. 152, no. 3, pp. 612-618.

- [30] PAUL D. DC traction power system grounding. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 3, pp. 818–824, May/June 2002.
- [31] Bahra and R. B. Catlow, “Control of stray currents for dc traction systems,” in *Inst. Elect. Eng. Int. Conf. Electric Railways in a United Europe*, 1995, pp. 136–142.
- [32] K. D. Pham and R. S. Thomas, “Analysis of stray current, track-to-earth potentials & substation negative grounding in DC traction electrification system,” in *Proc. IEEE/ASME Joint Conf.*, Toronto, ON, Canada, Apr. 2001, pp. 141–160.
- [33] BONNETT Clifford F. *Practical Railway Engineering*. 2nd Edition, pp 121-130. Imperial College Press. 2005.
- [34] HATA Hiroshi. What drives electric multiple units?. *Railway Technology Today* 4. Japan Railway & Transport Review 17. September 1998.
- [35] BOCHARNIKOV Y.V., TOBIAS A.M., ROBERTS C., HILLMANSEN S. and GOODMAN C.J.. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 1, No. 5, September 2007.
- [36] ADINOLFI, A., LAMEDICA, R., MODESTO,C., PRUDENZI, A., and VIMERCATI, S. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line. *IEEE Trans. Power Deliv.*,1998, 13, (4), pp. 1536–15423.
- [37] Review of the discount for using regenerative braking. A Report for the Office of Rail Regulations. AEA TECHNOLOGY, 27 June 2005.
- [38] LASKARIS, K.I and KLADAS, A.G. High torque Internal Permanent Magnet wheel motor for electric traction applications. *Fac. of Electr. & Comput. Eng., Nat. Tech. Univ. of Athens*, Athens. September 2008.
- [39] MITRAC. Permanent Magnet Motor. Bombardier Transportation. Technical information.
- [40] Alstom makes advances in traction power: Alstom Transport has successfully completed a prototype development programme for permanent magnet motors for railway traction applications. *International Railway Journal*, April, 2004.
- [41] YANO M and IWAHORI M. Transition from slip-frequency control to vector control for induction motor drives of traction applications in Japan. *JIEE Annual Meeting* 2002.
- [42] WILLIAMSON CH. Kinetic traction systems: next generation flywheel for rail transport. *Kinetic Traction Systems*. 2011.
- [43] CHENG P, HOU Ch and LI J. Design of an Auxiliary Converter for the Diode Rectifier and the Analysis of the Circulating Current. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 4, July 2008.
- [44] TZENG Y, WU R, and CHEN N. Electric Network Solutions of DC Transit Systems with Inverting Substations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 47, No. 4, November 1998.

- [45] SHAHNIA F and ESMAEILZADEH R. Voltage unbalance problems and solutions for electrified railway systems. Conf. on Electrical Engineering, Tehran, 2005.
- [46] KNIGHTS D. C. Protection for DC Substations and AC Track Feeder Stations. Rail Safety and Standards Board, London.
- [47] ZAMORA I, FERNANDEZ E, TORRES E and MAZON A.J. Influence of Faults in Electric Railway Systems. Department of Electrical Engineering. University of the Basque Country. The Institution of Electrical Engineers 2004.

CAPITULO 3. MODELIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS SIMPLES

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los distintos modelos eléctricos de los elementos simples pertenecientes a los sistemas de electrificación comentados en el capítulo 2.

Estos elementos se han clasificado en cuatro grandes grupos:

- La línea de contacto, que incluiría también el circuito de retorno.
- Los elementos fijos, como las alimentaciones en alta tensión, subestaciones de tracción, etc.
- El material rodante.
- Los sistemas de almacenamiento de energía.

De cara a la obtención de unos resultados satisfactorios cuando se analice una línea completa, es importante que estos modelos tengan un nivel de precisión adecuada y homogénea.

2. MODELIZACIÓN DE LA LÍNEA DE CONTACTO

Para la modelización de la línea de contacto y circuito de retorno de los sistemas de electrificación en corriente alterna y en corriente continua se utilizarán los modelos matemáticos que representan el comportamiento de las líneas de transmisión aérea en estado estacionario [73]. En este capítulo cuando se indica línea de contacto se incluye la catenaria propiamente, o tercer carril, y el circuito de retorno.

Para el caso particular de la electrificación en corriente alterna, se realiza la distinción entre sistemas monotensión, que se pueden modelizar por dos conjuntos de conductores con dos tensiones distintas (fase y retorno), y los sistemas bitensión, con tres tensiones diferentes (fase positiva, fase negativa y retorno).

2.1. Modelización de la línea de contacto en electrificaciones de corriente alterna

La modelización de la línea de contacto en corriente alterna puede realizarse a partir del cálculo de los parámetros eléctricos por unidad de longitud del circuito equivalente de la línea.

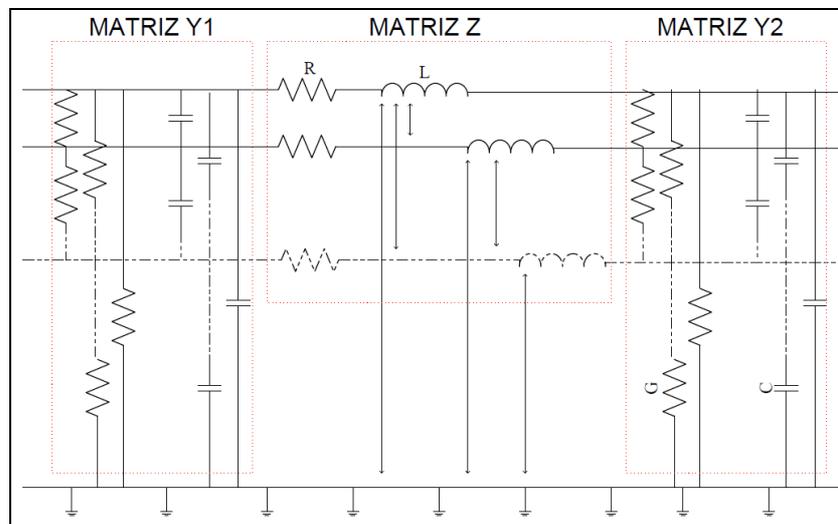


Figura 22. Modelo de una línea eléctrica

Visto a nivel de las matrices que intervienen por cada unidad de longitud:

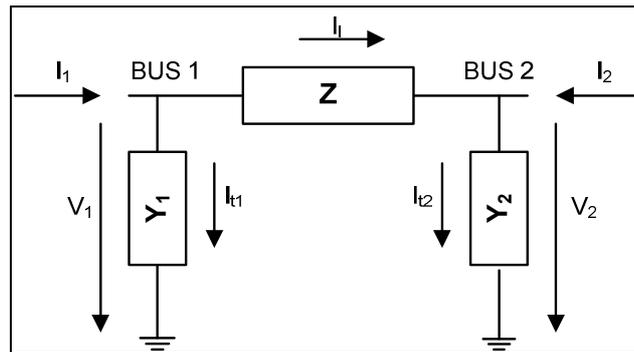


Figura 23. Circuito equivalente

Las ecuaciones para un tramo de línea delimitado por dos conjuntos de nodos, que ahora en adelante se denominarán buses, son:

$$[V_1] - [V_2] = [Z] \cdot [I_l]$$

$$[I_{t1}] = [Y_1] \cdot [V_1]$$

$$[I_{t2}] = [Y_2] \cdot [V_2]$$

$$[I_1] = [I_l] + [I_{t1}]$$

$$[I_2] = -[I_l] + [I_{t2}]$$

Donde:

- $[V_1]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 1, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[V_2]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 2, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[Z]$: es la matriz de impedancias entre los buses 1 y 2, de dimensión (n x n), donde n es el número de conductores físicos. En $[Z]$ se incluyen los efectos de las resistencias de los conductores, las inductancias y los acoplamientos magnéticos entre conductores.
- $[Y_1]$ y $[Y_2]$: son las matrices de admitancias en los buses 1 y 2 respectivamente, de dimensión (n x n), donde n es el número de conductores físicos. En $[Y]$ se incluyen los efectos de las conductancias y capacidades.
- $[I_l]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de impedancias $[Z]$ entre los buses 1 y 2, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_{t1}]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de admitancias $[Y_1]$ entre el bus 1 y tierra, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_{t2}]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de admitancias $[Y_2]$ entre el bus 2 y tierra, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_1]$ y $[I_2]$: son los vectores de corrientes en los buses 1 y 2 respectivamente, con un número de filas igual al número de conductores físicos.

2.1.1. Matriz de Impedancias [Z]

Para el cálculo de la matriz de impedancias [Z] es indispensable tener en cuenta el efecto de la circulación de corrientes por tierra, así en la literatura técnica es posible encontrar principalmente los siguientes métodos de cálculo:

- Ecuaciones de Carson.
- Ecuaciones de Dubanton.

2.1.1.1. Ecuaciones de Carson

Las ecuaciones de Carson [51] permiten calcular los términos de la matriz de impedancias de línea, añadiendo unas correcciones para tener en cuenta el efecto de la circulación de corriente por tierra.

En las ecuaciones de Carson se ha supuesto que la tierra es una superficie uniforme, plana, sólida e infinita con una resistividad constante. Los efectos en las puestas a tierra de los extremos de la línea no son tenidos en cuenta.

En la siguiente figura se muestran los términos que intervienen en las fórmulas de Carson:

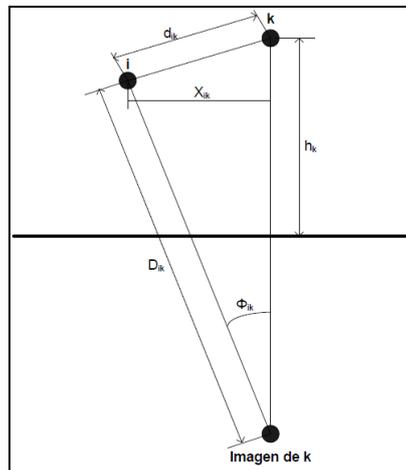


Figura 24. Términos de las fórmulas de Carson

Los términos de la diagonal principal, expresados en Ω/m , son los siguientes:

$$Z_{ii} = R_{i,interna} + \Delta R_{ii} + j \cdot \left[\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) + X_{i,interna} + \Delta X_{ii} \right]$$

Donde:

- r_i es el radio del conductor i (m).
- ω que es igual a $2\pi f$, donde f es la frecuencia del sistema (Hz).
- $R_{i,interna}$ es la resistencia interna del conductor i (Ω/m).
- $X_{i,interna}$ es la reactancia interna del conductor i (Ω/m).
- ΔR_{ii} y ΔX_{ii} son las correcciones de Carson para el término Z_{ii} (Ω/m).

Los términos que no pertenecen a la diagonal principal, expresados en Ω/m , son los siguientes:

$$Z_{ik} = \Delta R_{ik} + j \cdot \left[\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) + X_{i,interna} + \Delta X_{ik} \right]$$

Donde:

- D_{ik} es la distancia entre el conductor i y la imagen del conductor k (m).
- d_{ik} es la distancia entre el conductor i y el conductor k (m).
- ΔR_{ik} y ΔX_{ik} son las correcciones de Carson para el término Z_{ik} (Ω/m).

Para calcular los términos de Carson ΔR_{ik} y ΔX_{ik} primero es necesario calcular el coeficiente a , siendo:

$$a = 4\pi\sqrt{5} \cdot 10^{-4} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{f}{\rho}}$$

Donde:

- $D = 2 \times h_i$ si $i = k$ (términos de la diagonal principal) y $D = D_{ik}$ en caso contrario.
- ρ es la resistividad del terreno (Ωm).
- f es la frecuencia del sistema (Hz).

Si el valor de a es inferior o igual a 5, los términos de Carson ΔR_{ik} y ΔX_{ik} se calculan del siguiente modo:

$$\Delta R_{ik} = 8\pi f \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{\pi}{8} - b_1 \cdot a \cdot \cos \phi_{ik} + b_2 \cdot \{c_2 - \ln(a)\} \cdot a^2 \cdot \cos 2\phi_{ik} + \phi_{ik} \cdot a^2 \cdot \sin 2\phi_{ik} + \dots \right]$$

$$\left[\dots + b_3 \cdot a^3 \cdot \cos 3\phi_{ik} - d_4 \cdot a^4 \cdot \cos 4\phi_{ik} - b_5 \cdot a^5 \cdot \cos 5\phi_{ik} + \dots \right]$$

$$\Delta X_{ik} = 8\pi f \cdot 10^{-7} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (0.6159315 - \ln(a)) + b_1 \cdot a \cdot \cos \phi_{ik} - d_2 \cdot a^2 \cdot \cos 2\phi_{ik} + \dots \right]$$

$$\left[\dots + b_3 \cdot a^3 \cdot \cos 3\phi_{ik} - b_4 \left(\{c_4 - \ln(a)\} \cdot a^4 \cdot \cos 4\phi_{ik} + \phi_{ik} \cdot a^4 \cdot \sin 4\phi_{ik} \right) + b_5 \cdot a^5 \cdot \cos 5\phi_{ik} + \dots \right]$$

Donde:

- f es la frecuencia del sistema (Hz).
- ϕ_{ik} es el ángulo que forman la recta que une el conductor i con la imagen del conductor k y la recta que une el conductor k con la imagen del conductor k . Y vale 0 cuando $i = k$.
- b_i, c_i y d_i son coeficientes según la tabla siguiente:

i	1	2	3	4	5
b_i	0.23570226	0.0625	0.015713484	0.002604167	-0.000448957
c_i	0	1.3659315	0	1.782598167	0
d_i	0.185120122	0.049087385	0.012341341	0.002045308	-0.00035261

Tabla 4. Valores de los coeficientes b_i, c_i y d_i .

Si el valor de a es superior a 5, los términos de Carson ΔR_{ik} y ΔX_{ik} entonces:

$$\Delta R_{ik} = \frac{8\pi f \cdot 10^{-7}}{\sqrt{2}} \cdot \left[\frac{\cos \phi_{ik}}{a} - \frac{\sqrt{2} \cos \phi_{ik}}{a^2} + \frac{\cos 3\phi_{ik}}{a^3} + \frac{3 \cos 5\phi_{ik}}{a^5} - \frac{45 \cos 7\phi_{ik}}{a^7} \right]$$

$$\Delta X_{ik} = \frac{8\pi f \cdot 10^{-7}}{\sqrt{2}} \cdot \left[\frac{\cos \phi_{ik}}{a} - \frac{\cos 3\phi_{ik}}{a^3} + \frac{3 \cos 5\phi_{ik}}{a^5} + \frac{45 \cos 7\phi_{ik}}{a^7} \right]$$

2.1.1.2. Ecuaciones de Dubanton

Las ecuaciones de Dubanton [64] permiten calcular, de una manera más directa, los términos de la matriz de impedancias $[Z]$, teniendo en cuenta también el efecto de la circulación de corriente por tierra [56] [57]. En la siguiente figura se muestran los términos que intervienen en las fórmulas:

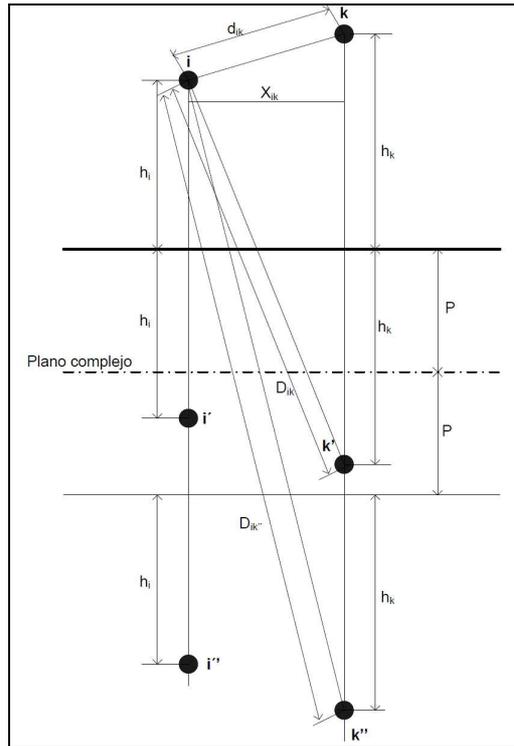


Figura 25. Términos de las fórmulas de Dubanton

$$Z_{ii} = R_{i,interna} + j \cdot \left[\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{2(h_i + p)}{r_i} \right) + X_{i,interna} \right]$$

$$Z_{ik} = j \cdot \left[\omega \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_k + 2p)^2 + x_{ik}^2}}{d_{ik}} \right) \right]$$

Donde:

- r_i es el radio del conductor i (m).
- $R_{i,interna}$ es la resistencia interna del conductor i (Ω/m).
- $X_{i,interna}$ es la reactancia interna del conductor i (Ω/m).
- La penetración en el plano complejo:

$$p = \sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu_0}}$$

2.1.1.3. *Calculo de la matriz [Z]*

Las caídas de tensión longitudinales, por unidad de longitud pueden expresarse como:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_{p1} \\ \dots \\ \Delta V_{pn} \\ \Delta V_{n1} \\ \dots \\ \Delta V_{mn} \\ \Delta V_{r1} \\ \dots \\ \Delta V_{rn} \end{pmatrix} = [Z] \cdot \begin{pmatrix} I_{p1} \\ \dots \\ I_{pn} \\ I_{n1} \\ \dots \\ I_{mn} \\ I_{r1} \\ \dots \\ I_{rn} \end{pmatrix}$$

Descomponiendo la matriz [Z]:

$$[Z] = [R] + j\omega \cdot [L]$$

Donde [R] es la matriz correspondiente a las resistencias efectivas por unidad de longitud de los conductores, es decir:

$$[R] = \begin{pmatrix} R_{p1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & R_{pn} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R_{n1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & R_{mn} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & R_{r1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & R_m \end{pmatrix}.$$

Y la matriz [L] corresponde a los coeficientes de autoinducción y acoplamiento entre conductores obtenida a partir de las fórmulas de Carson o Dubanton, y por lo tanto:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{p1p1} & L_{p1p2} & \dots & L_{p1pn-1} & L_{p1pn} & L_{p1n1} & \dots & L_{p1nn-1} & L_{p1nm} & L_{p1r1} & \dots & L_{p1rn-1} & L_{p1rn} \\ L_{p2p1} & L_{p2p2} & \dots & L_{p2pn-1} & L_{p2pn} & L_{p2n1} & \dots & L_{p2nn-1} & L_{p2nm} & L_{p2r1} & \dots & L_{p2rn-1} & L_{p2rn} \\ \dots & \dots \\ L_{pn-1p1} & L_{pn-1p2} & \dots & L_{pn-1pn-1} & L_{pn-1pn} & L_{pn-1n1} & \dots \\ L_{ppp1} & L_{ppp2} & \dots & L_{pppn-1} & L_{pppn} & L_{ppn1} & \dots \\ L_{n1p1} & L_{n1p2} & \dots & L_{n1pn-1} & L_{n1pn} & L_{n1n1} & \dots \\ \dots & \dots \\ L_{nn-1p1} & L_{nn-1p2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{nn-1nn-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{nnp1} & L_{nnp2} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & L_{nnnn} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{r1p1} & L_{r1p2} & \dots & L_{r1r1} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ L_{rn-1p1} & L_{rn-1p2} & \dots & L_{rn-1rn-1} & L_{rn-1rn} \\ L_{rnp1} & L_{rnp2} & \dots & L_{rn-1rn} & L_{rnm} \end{bmatrix}$$

2.1.2. Matriz de Admitancias [Y]

La tensión de los conductores en función de su carga se expresa mediante:

$$[V] = [P] \cdot [Q]$$

Donde:

- [V]: es el vector de tensiones en los conductores de la catenaria (V).
- [P]: es la matriz de coeficientes de potenciales de Maxwell (m/F).
- [Q]: es el vector de cargas de los conductores de la catenaria (C/m).

Los elementos de la matriz [P] pueden calcularse con las siguientes expresiones:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}$$

Donde ϵ_0 es la permeabilidad eléctrica en el vacío.

La matriz [C] de capacidades puede calcularse como:

$$[C] = [P]^{-1}$$

La matriz de admitancias de la línea, por unidad de longitud, puede obtenerse a partir de:

$$[Y_1] = [Y_2] = [G] + j \cdot 2\pi f \cdot [C]$$

Donde $[G]$ es la matriz de conductancias.

2.1.3. Cálculo de las impedancias con los conductores agrupados

En los puntos anteriores se ha visto que el modelo de una línea de contacto de n conductores a través de matrices de impedancias y admitancias de dimensión $n \times n$, pero dado que los conductores pertenecientes a un mismo potencial están conectados cada muy poca distancia, es posible realizar el estudio mediante un modelo de conductores agrupados. Así, mediante este modelo simplificado, se puede sustituir cada uno de los grupos de conductores por un único conductor equivalente, que tendrá la misma caída de tensión y cuya corriente será la suma de las corrientes de los conductores que forman el grupo.

Así, el número de conductores agrupados será:

	Sistema monotensión	Sistema bitensión
Vía única	N=2 Positivo y Retorno	N=3 Positivo, Negativo y Retorno
Vía doble	N=4 Vía 1: Positivo y Retorno Vía 2: Positivo y Retorno	N=6 Vía 1: Positivo, Negativo y Retorno Vía 2: Positivo, Negativo y Retorno

Tabla 5. Número de conductores en función del sistema y número de vías.

2.1.3.1. Matriz de Impedancias $[Z]$ con conductores agrupados

Los conductores de cada grupo trabajan en paralelo, y por lo tanto el sistema se puede simplificar si se considera que su caída de tensión es igual:

$$\begin{aligned} \Delta V_{p1} &= \Delta V_{p2} = \dots = \Delta V_{pn} \\ &\dots \dots \dots \\ \Delta V_{n1} &= \Delta V_{n2} = \dots = \Delta V_{nm} \\ \Delta V_{r1} &= \Delta V_{r2} = \dots = \Delta V_{rm} \end{aligned}$$

Y también se repartirán la corriente total del grupo:

$$\begin{aligned}
 I_p &= I_{p1} + I_{p2} + \dots + I_{pn} \\
 &\dots \\
 I_n &= I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nm} \\
 &\dots \\
 I_r &= I_{r1} + I_{r2} + \dots + I_{rm}
 \end{aligned}$$

Restando las filas correspondientes:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_{p1} \\ \dots \\ \Delta V_{pn} \\ \Delta V_{n1} \\ \dots \\ \Delta V_{mn} \\ \Delta V_{r1} \\ \dots \\ \Delta V_{rn} \end{pmatrix} = [Z] \cdot \begin{pmatrix} I_{p1} \\ \dots \\ I_{pn} \\ I_{n1} \\ \dots \\ I_{mn} \\ I_{r1} \\ \dots \\ I_{rn} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \Delta V_p \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_n \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = [Z'] \cdot \begin{pmatrix} I_{p1} \\ \dots \\ I_{pn} \\ I_{n1} \\ \dots \\ I_{mn} \\ I_{r1} \\ \dots \\ I_{rn} \end{pmatrix}$$

Y si se representa en función de las corrientes de grupo:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_p \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_n \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = [Z'] \cdot \begin{pmatrix} 1 & \dots & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & -1 \\ \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_p \\ \dots \\ I_{pn} \\ I_n \\ \dots \\ I_{mn} \\ I_r \\ \dots \\ I_{rn} \end{pmatrix}$$

Operando el producto matricial, y reordenando las ecuaciones de forma que resten primero las caídas de tensión no nulas, se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_p \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_n \\ 0 \\ 0 \\ \Delta V_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = [Z''] \cdot \begin{pmatrix} I_p \\ \dots \\ I_{pn} \\ I_n \\ \dots \\ I_{nn} \\ I_r \\ \dots \\ I_m \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \Delta V_p \\ \Delta V_n \\ \Delta V_t \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} = [Z'''] \cdot \begin{pmatrix} I_p \\ I_n \\ I_t \\ \dots \\ I_{pn} \\ \dots \\ I_m \\ \dots \\ I_m \end{pmatrix}$$

Por último, si se simplifica la matriz de impedancias mediante la reducción de Kron.

$$\left| \begin{array}{cc|c} [a_{11}] & [a_{12}] & [I_{grupo}] \\ [a_{21}] & [a_{22}] & [I_{conduc-1}] \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} [\Delta V_{grupo}] \\ 0 \end{array} \right|$$

Se pueden obtener las impedancias longitudinales para cada grupo:

$$[a_{11}] \cdot [I_{grupo}] + [a_{12}] \cdot [I_{conduc-1}] = [\Delta V_{grupo}] \Rightarrow ([a_{11}] - [a_{12}] \cdot [a_{22}]^{-1} \cdot [a_{21}]) \cdot [I_{grupo}] = [\Delta V_{grupo}]$$

$$[a_{21}] \cdot [I_{grupo}] + [a_{22}] \cdot [I_{conduc-1}] = [0] \Rightarrow [I_{conduc-1}] = -[a_{22}]^{-1} \cdot [a_{21}] \cdot [I_{grupo}]$$

Y por lo tanto:

$$[Z_{grupo}] = [a_{11}] - [a_{12}] \cdot [a_{22}]^{-1} \cdot [a_{21}]$$

Así, las matrices [Z] para cada uno de los sistemas de electrificación serán:

Nº Vías	Sistema monotensión	Sistema bitensión
1	$[Z] = \begin{vmatrix} Z_{pp} & Z_{pr} \\ Z_{rp} & Z_{rr} \end{vmatrix}$	$[Z] = \begin{vmatrix} Z_{pp} & Z_{pn} & Z_{pr} \\ Z_{np} & Z_{nn} & Z_{nr} \\ Z_{rp} & Z_{rn} & Z_{rr} \end{vmatrix}$
2	$[Z] = \begin{vmatrix} Z_{p1p1} & Z_{p1p2} & Z_{p1r1} & Z_{p1r2} \\ Z_{p2p1} & Z_{p2p2} & Z_{p2r1} & Z_{p2r2} \\ Z_{r1p1} & Z_{r1p2} & Z_{r1r1} & Z_{r1r2} \\ Z_{r2p1} & Z_{r2p2} & Z_{r2r1} & Z_{r2r2} \end{vmatrix}$	$[Z] = \begin{vmatrix} Z_{p1p1} & Z_{p1p2} & Z_{p1n1} & Z_{p1n2} & Z_{p1r1} & Z_{p1r2} \\ Z_{p2p1} & Z_{p2p2} & Z_{p2n1} & Z_{p2n2} & Z_{p2r1} & Z_{p2r2} \\ Z_{n1p1} & Z_{n1p2} & Z_{n1n1} & Z_{n1n2} & Z_{n1r1} & Z_{n1r2} \\ Z_{n2p1} & Z_{n2p2} & Z_{n2n1} & Z_{n2n2} & Z_{n2r1} & Z_{n2r2} \\ Z_{r1p1} & Z_{r1p2} & Z_{r1n1} & Z_{r1n2} & Z_{r1r1} & Z_{r1r2} \\ Z_{r2p1} & Z_{r2p2} & Z_{r2n1} & Z_{r2n2} & Z_{r2r1} & Z_{r2r2} \end{vmatrix}$

Tabla 6. Matrices [Z].

2.1.3.2. Matriz de admitancias [Y] con conductores agrupados

La corriente que deriva por las admitancias en el bus i se puede expresar como:

$$[Y_i] \cdot \begin{pmatrix} V_{p1} \\ \dots \\ V_{pn} \\ V_{n1} \\ \dots \\ V_{nn} \\ V_{r1} \\ \dots \\ V_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{t-p1} \\ \dots \\ I_{t-pn} \\ I_{t-n1} \\ \dots \\ I_{t-nn} \\ I_{t-r1} \\ \dots \\ I_{t-rm} \end{pmatrix}$$

Imponiendo la condición de que todos los conductores en un bus con igual nivel de tensión tienen la misma tensión:

$$\begin{pmatrix} Y_{p1p1} & \dots & Y_{p1pn} & Y_{p1n1} & \dots & Y_{p1nn} & Y_{p1r1} & \dots & Y_{p1rn} \\ \dots & \dots \\ Y_{pnp1} & \dots & Y_{pnpn} & Y_{pnn1} & \dots & Y_{pnnn} & Y_{pnr1} & \dots & Y_{pnrn} \\ Y_{n1p1} & \dots & Y_{n1pn} & Y_{n1n1} & \dots & Y_{n1nn} & Y_{n1r1} & \dots & Y_{n1rn} \\ \dots & \dots \\ Y_{nnp1} & \dots & Y_{nnpn} & Y_{nnn1} & \dots & Y_{nnnn} & Y_{nnr1} & \dots & Y_{nnrn} \\ Y_{r1p1} & \dots & Y_{r1pn} & Y_{r1n1} & \dots & Y_{r1nn} & Y_{r1r1} & \dots & Y_{r1rn} \\ \dots & \dots \\ Y_{rnp1} & \dots & Y_{rnpn} & Y_{rnn1} & \dots & Y_{rnnn} & Y_{rnr1} & \dots & Y_{rnrn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_p \\ \dots \\ V_p \\ V_n \\ \dots \\ V_n \\ V_r \\ \dots \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{t-p1} \\ \dots \\ I_{t-pn} \\ I_{t-n1} \\ \dots \\ I_{t-nn} \\ I_{t-r1} \\ \dots \\ I_{t-rm} \end{pmatrix}$$

Que coincide con:

$$\begin{pmatrix} \sum_{pn} Y_{p1,i} & \sum_{nn} Y_{p1,i} & \sum_m Y_{p1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{pn} Y_{pn,i} & \sum_{nn} Y_{pn,i} & \sum_m Y_{pn,i} \\ \sum_{pn} Y_{n1,i} & \sum_{nn} Y_{n1,i} & \sum_m Y_{n1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{pn} Y_{nn,i} & \sum_{nn} Y_{nn,i} & \sum_m Y_{nn,i} \\ \sum_{pn} Y_{r1,i} & \sum_{nn} Y_{r1,i} & \sum_m Y_{r1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{pn} Y_{rn,i} & \sum_{nn} Y_{rn,i} & \sum_m Y_{rn,i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_p \\ V_n \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{t-p1} \\ \dots \\ I_{t-pn} \\ I_{t-n1} \\ \dots \\ I_{t-nn} \\ I_{t-r1} \\ \dots \\ I_{t-rm} \end{pmatrix}$$

Agrupando las corrientes de todos los nodos que forman un bus, se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \sum_{pn} \sum_{pn} Y_{k,i} & \sum_{pn} \sum_{nn} Y_{k,i} & \sum_{pn} \sum_{rn} Y_{k,i} \\ \sum_{nn} \sum_{pn} Y_{k,i} & \sum_{nn} \sum_{nn} Y_{k,i} & \sum_{nn} \sum_{rn} Y_{k,i} \\ \sum_{rn} \sum_{pn} Y_{k,i} & \sum_{rn} \sum_{nn} Y_{k,i} & \sum_{rn} \sum_{rn} Y_{k,i} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_p \\ V_n \\ V_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{t-p} \\ I_{t-n} \\ I_{t-r} \end{pmatrix}$$

Por lo tanto se ha obtenido la matriz de admitancias con conductores agrupados.

Así, las matrices $[Y_i]$ para cada uno de los sistemas de electrificación serán:

Vía	Sistema monotensión	Sistema bitensión
Única	$[Y_i] = \begin{pmatrix} Y_{pp} & Y_{pr} \\ Y_{rp} & Y_{rr} \end{pmatrix}$	$[Y_i] = \begin{pmatrix} Y_{pp} & Y_{pn} & Y_{pr} \\ Y_{np} & Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rp} & Y_{rn} & Y_{rr} \end{pmatrix}$
Doble	$[Y_i] = \begin{pmatrix} Y_{p1p1} & Y_{p1p2} & Y_{p1r1} & Y_{p1r2} \\ Y_{p2p1} & Y_{p2p2} & Y_{p2r1} & Y_{p2r2} \\ Y_{r1p1} & Y_{r1p2} & Y_{r1r1} & Y_{r1r2} \\ Y_{r2p1} & Y_{r2p2} & Y_{r2r1} & Y_{r2r2} \end{pmatrix}$	$[Y_i] = \begin{pmatrix} Y_{p1p1} & Y_{p1p2} & Y_{p1n1} & Y_{p1n2} & Y_{p1r1} & Y_{p1r2} \\ Y_{p2p1} & Y_{p2p2} & Y_{p2n1} & Y_{p2n2} & Y_{p2r1} & Y_{p2r2} \\ Y_{n1p1} & Y_{n1p2} & Y_{n1n1} & Y_{n1n2} & Y_{n1r1} & Y_{n1r2} \\ Y_{n2p1} & Y_{n2p2} & Y_{n2n1} & Y_{n2n2} & Y_{n2r1} & Y_{n2r2} \\ Y_{r1p1} & Y_{r1p2} & Y_{r1n1} & Y_{r1n2} & Y_{r1r1} & Y_{r1r2} \\ Y_{r2p1} & Y_{r2p2} & Y_{r2n1} & Y_{r2n2} & Y_{r2r1} & Y_{r2r2} \end{pmatrix}$

Tabla 7. Matriz $[Y]$.

2.1.4. Matriz de admitancias de la línea de contacto

Como se ha indicado anteriormente, las ecuaciones de la línea serán:

$$[V_1] - [V_2] = [Z] \cdot [I_l]$$

$$[I_{t1}] = [Y_1] \cdot [V_1]$$

$$[I_{t2}] = [Y_2] \cdot [V_2]$$

$$[I] = [I_l] + [I_{t1}]$$

Operando estas ecuaciones, y si la matriz $[Z]$ no es singular, entonces fácilmente se puede obtener la expresión de la matriz de admitancias por unidad de longitud de la línea de contacto, con las intensidades de nodo en función de las tensiones de nodo.

$$\begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y_1] & -[Z]^{-1} \\ -[Z]^{-1} & [Z]^{-1} + [Y_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix}$$

Donde:

- $[V_1]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 1, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.
- $[V_2]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 2, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.
- $[Z]$: es la matriz de impedancias entre los buses 1 y 2, de dimensión (nxn), donde n es el número de conductores agrupados, cuyo cálculo se ha desarrollado en el apartado 2.1.3.1.
- $[Y_1]$ y $[Y_2]$: son las matrices de admitancias en los buses 1 y 2 respectivamente, de dimensión (nxn), donde n es el número de conductores agrupados, cuyo cálculo se ha desarrollado en el apartado 2.1.3.2.
- $[I_1]$ y $[I_2]$: son los vectores de corrientes en los buses 1 y 2 respectivamente, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.

2.2. Modelización de la línea de contacto en corriente continua

Para la modelización de la línea de contacto en corriente continua se partirá del mismo circuito equivalente de la línea, pero con la particularidad de que no es necesario tener en cuenta ahora ni las inductancias, ni las capacidades, y ni los acoplamientos magnéticos y capacitivos entre conductores como sucede en la electrificación en corriente alterna.

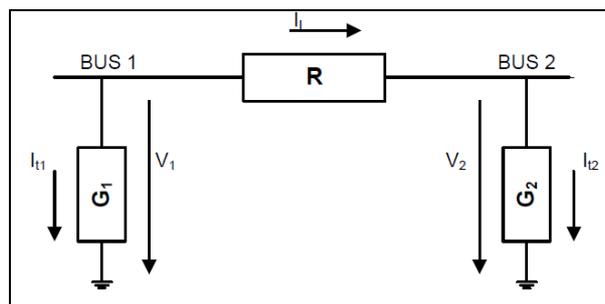


Figura 26. Circuito equivalente de la línea de contacto en CC

Las ecuaciones de la línea serán:

$$[V_1] - [V_2] = [R] \cdot [I_1]$$

$$[I_{t1}] = [G_1] \cdot [V_1]$$

$$[I_{t2}] = [G_2] \cdot [V_2]$$

$$[I_1] = [I_l] + [I_{t1}]$$

$$[I_2] = -[I_l] + [I_{t2}]$$

Donde:

- $[V_1]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 1, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[V_2]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 2, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[R]$: es la matriz de resistencias longitudinales de los conductores entre los buses 1 y 2, de dimensión (nxn) , donde n es el número de conductores físicos.
- $[G_1]$ y $[G_2]$: son las matrices de conductancias en los buses 1 y 2 respectivamente, de dimensión (nxn) , donde n es el número de conductores físicos.
- $[I_l]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de resistencias longitudinales $[R]$ entre los buses 1 y 2, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_{t1}]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de conductancias $[G_1]$ entre el bus 1 y tierra, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_{t2}]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de conductancias $[G_2]$ entre el bus 2 y tierra, con un número de filas igual al número de conductores físicos.
- $[I_1]$ y $[I_2]$: son los vectores de corrientes en los buses 1 y 2 respectivamente, con un número de filas igual al número de conductores físicos.

2.2.1. Matriz de Resistencias $[R]$

La matriz $[R]$ está formada por las resistencias efectivas por unidad de longitud de los conductores, es decir:

$$[R] = \begin{pmatrix} R_{p1} & .. & 0 & 0 & 0 & 0 \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. \\ 0 & .. & R_{pm} & 0 & .. & 0 \\ 0 & .. & 0 & R_{n1} & .. & 0 \\ .. & .. & .. & .. & .. & .. \\ 0 & .. & .. & 0 & .. & R_m \end{pmatrix}.$$

Las caídas de tensión longitudinales, por unidad de longitud pueden expresarse como:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_{p1} \\ \dots \\ \Delta V_{pm} \\ \Delta V_{n1} \\ \dots \\ \Delta V_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{p1} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & R_{pm} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & R_{n1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & R_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{p1} \\ \dots \\ I_{pm} \\ I_{n1} \\ \dots \\ I_{nn} \end{pmatrix}$$

2.2.2. Matriz de conductancias [G]

[G] es la matriz de conductancias.

$$[G] = \begin{pmatrix} G_{p1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & G_{pm} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & G_{n1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & G_{nn} \end{pmatrix}$$

2.2.3. Cálculo de las impedancias con los conductores agrupados

Del mismo modo que sucedía en las líneas de contacto en corriente alterna, en las líneas en corriente continua, es posible realizar el estudio mediante un modelo de conductores agrupados. Así, mediante este modelo simplificado, se puede sustituir cada uno de los grupos de conductores por un único conductor equivalente, que tendrá la misma caída de tensión y cuya corriente será la suma de las corrientes de los conductores.

El cable de guarda para la puesta a tierra de protección de los postes de catenaria no se considerará en la modelización si no forma parte del circuito de retorno.

Así, el número de conductores será:

Vía única	N=2 Positivo y Negativo
Vía doble	N=4 Vía 1: Positivo y Negativo Vía 2: Positivo y Negativo

Tabla 8. Número de conductores en función del número de vías.

2.2.3.1. Matriz de Resistencias [R] con conductores agrupados

Los conductores de cada grupo trabajan en paralelo, y por lo tanto el sistema se puede simplificar si se considera que su caída de tensión es igual:

$$\begin{aligned} \Delta V_{p1} = \Delta V_{p2} = \dots = \Delta V_{pm} = \Delta V_p \\ \dots \\ \Delta V_{n1} = \Delta V_{n2} = \dots = \Delta V_{nm} = \Delta V_n \end{aligned}$$

Y también se repartirán la corriente total del grupo:

$$\begin{aligned} I_p = I_{p1} + I_{p2} + \dots + I_{pm} = \sum_m^1 I_{pi} \\ \dots \\ I_n = I_{n1} + I_{n2} + \dots + I_{nm} = \sum_n^1 I_{ni} \end{aligned}$$

Así pues:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_p \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = [R'] \cdot \begin{bmatrix} \sum_m^1 I_{pi} \\ \sum_n^1 I_{ni} \end{bmatrix}$$

Y siendo [R']:

$$[R'] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sum_m^1 \frac{1}{R_{pi}}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sum_n^1 \frac{1}{R_{ni}}} \end{bmatrix}$$

Así, las matrices [R] con los conductores agrupados serán:

Vía	Matriz [R]
1	$[R] = \begin{vmatrix} R_p & 0 \\ 0 & R_n \end{vmatrix}$
2	$[R] = \begin{vmatrix} R_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{p2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{n1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{n2} \end{vmatrix}$

Tabla 9. Matrices [R] en función del número de vías.

2.2.3.2. Matrices de conductancias [G] con conductores agrupados

La corriente que deriva por las conductancias en el bus *i* se puede expresar como:

$$[G_i] \cdot \begin{vmatrix} V_{p1} \\ \dots \\ V_{pm} \\ V_{n1} \\ \dots \\ V_{nm} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{t-p1} \\ \dots \\ I_{t-pm} \\ I_{t-n1} \\ \dots \\ I_{t-nm} \end{vmatrix}$$

Imponiendo la condición de que todos los conductores en un bus con igual nivel de tensión tienen la misma tensión:

$$\begin{vmatrix} G_{p1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & G_{pm} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & G_{n1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \dots & G_{nm} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_p \\ \dots \\ V_p \\ V_n \\ \dots \\ V_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{t-p1} \\ \dots \\ I_{t-pm} \\ I_{t-n1} \\ \dots \\ I_{t-nm} \end{vmatrix}$$

Y que la suma de las corrientes de cada conductor que pertenece a un grupo serán la corriente total del grupo:

$$\begin{vmatrix} \sum_m^1 G_{pi} & 0 \\ 0 & \sum_n^1 G_{ni} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_p \\ V_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_{t-p} \\ I_{t-n} \end{vmatrix}$$

Entonces, la matriz G dependiendo del número de vías será:

Vía	Matriz [G]
Única	$[G_i] = \begin{vmatrix} G_{pp} & 0 \\ 0 & G_{nn} \end{vmatrix}$
Doble	$[G_i] = \begin{vmatrix} G_{p1p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_{p2p2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{n1n1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{n2n2} \end{vmatrix}$

Tabla 10. Matrices [G] en función del número de vías.

2.2.4. Matriz de admitancias de la línea de contacto

Como se ha indicado anteriormente, las ecuaciones de la línea serán:

$$[V_1] - [V_2] = [R] \cdot [I_l]$$

$$[I_{t1}] = [G_1] \cdot [V_1]$$

$$[I_{t2}] = [G_2] \cdot [V_2]$$

$$[I_1] = [I_l] + [I_{t1}]$$

$$[I_2] = -[I_l] + [I_{t2}]$$

Operando estas ecuaciones, se puede obtener la expresión de la matriz de admitancias por unidad de longitud de la línea de contacto, con las intensidades de nodo en función de las tensiones de nodo.

$$\begin{vmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} [R]^{-1} + [G_1] & -[R]^{-1} \\ -[R]^{-1} & [R]^{-1} + [G_2] \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{vmatrix}$$

Donde:

- $[V_1]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 1, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.
- $[V_2]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus 2, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.
- $[R]$: es la matriz de resistencias entre los buses 1 y 2, de dimensión (nxn), donde n es el número de conductores agrupados, cuyo cálculo se ha desarrollado en el apartado 2.2.3.1.
- $[G_1]$ y $[G_2]$: son las matrices de conductancias en los buses 1 y 2 respectivamente, de dimensión (nxn), donde n es el número de conductores agrupados, cuyo cálculo se ha desarrollado en el apartado 2.2.3.2.

- $[I_1]$ y $[I_2]$: son los vectores de corrientes en los buses 1 y 2 respectivamente, con un número de filas igual al número de conductores agrupados.

3. MODELIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS FIJOS

3.1. Modelización de los elementos fijos en corriente alterna

Los elementos fijos que se pueden encontrar en los distintos sistemas de electrificación en corriente alterna son los siguientes:

- Alimentación a las subestaciones de tracción.
- Subestaciones, que pueden pertenecer a sistemas monotensión o bitensión.
- Centros de autotransformación que se encuentran en los sistemas bitensión.
- Transformadores Booster en algunos sistemas monotensión.

3.1.1. Modelo de la alimentación en alta tensión

La red de alta tensión que alimenta a las subestaciones de tracción se puede modelar a partir de su equivalente Thévenin en el punto de conexión. Si la tensión equivalente Thévenin es V_{TH} y la impedancia equivalente Thévenin es Z_{TH} . Entonces:

$$J = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}}$$

Y Z_{TH} será la impedancia entre los nodos $AT1$ y $AT2$.

Así, su modelización en su equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente independiente (J) en paralelo con la impedancia (Z_{TH}).

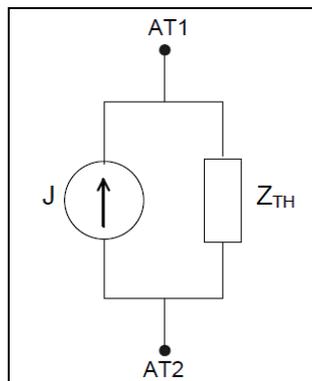


Figura 27. Alimentación en alta tensión con su equivalente Norton

3.1.2. Modelo eléctrico de la subestación

De cara al cálculo de los flujos de potencia, únicamente es necesario modelizar los transformadores de las subestaciones. En este estudio se modelizarán las subestaciones de tracción con transformadores monofásicos, siendo la configuración más utilizada en las líneas de alta velocidad europeas, frente a otras configuraciones como las conexiones V-V, Scott, Le Blanc o Woodbridge [66] [67].

Para la modelización de la subestación también se realiza la distinción entre los dos sistemas de electrificación en corriente alterna.

3.1.2.1. Modelización de la subestación en sistemas monotensión

El esquema equivalente del transformador [72] puede observarse en la siguiente figura:

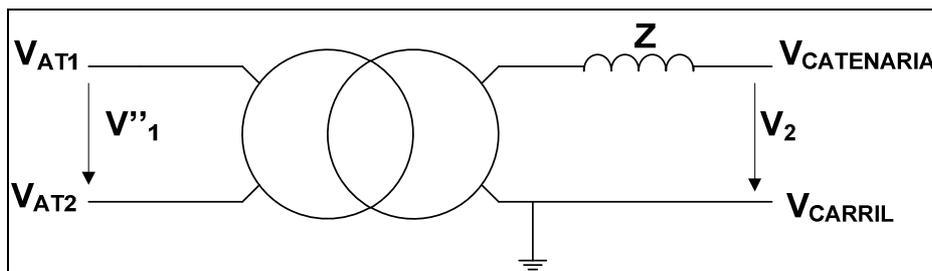


Figura 28. Esquema equivalente del transformador

En magnitudes por unidad, si:

$$z = r + jx_{cc}$$

Entonces la matriz de admitancias del transformador $[Y_t]$ será:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = [Y_t] \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

Por último, la matriz de admitancias de la subestación $[Y_{SE}]$ puede obtenerse como:

$$[Y_{SE}] = [A_{SE}] \cdot [Y_t] \cdot [A_{SE}^t]$$

Donde la matriz $[A_{SE}]$ es la matriz de incidencias de rama, con un número de columnas igual al de ramas, y de filas igual al de nodos. Y con todos sus valores cero exceptuando los nodos origen y final de rama, con valor +1 en el nodo origen y -1 en el nodo final.

$$[Y_{SE}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot [Y_t] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

A partir de las expresiones anteriores, puede obtenerse fácilmente la matriz de admitancias de la subestación:

$$\begin{bmatrix} I_{AT1} \\ I_{AT2} \\ I_{CATENARIA} \\ I_{CARRIL} \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AT1} \\ V_{AT2} \\ V_{CATENARIA} \\ V_{CARRIL} \end{bmatrix}$$

3.1.2.2. Modelización de la subestación en sistemas bitensión

El esquema equivalente del transformador más habitual en este sistema puede observarse en la siguiente figura:

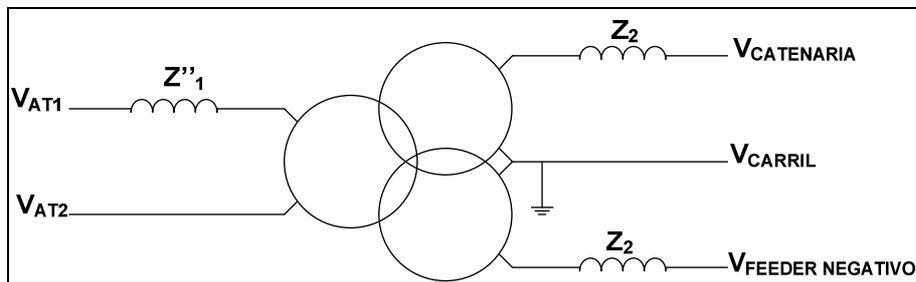


Figura 29. Esquema equivalente del transformador

En magnitudes por unidad, se pueden plantear estas dos ecuaciones matriciales:

$$\begin{bmatrix} I_{AT1} \\ I_{CATENARIA} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_1} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AT1} - V_{AT2} \\ V_{CATENARIA} - V_{FEEDER_NEGATIVO} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{CATENARIA} \\ I_{CARRIL} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{CATENARIA} - V_{FEEDER_NEGATIVO} \\ V_{CARRIL} - V_{FEEDER_NEGATIVO} \end{bmatrix}$$

Operando las dos ecuaciones, se puede obtener directamente la matriz de admitancias siguiente:

$$\begin{pmatrix} I_{AT1} \\ I_{AT2} \\ I_{CATENARIA} \\ I_{FEEDER_NEGATIVO} \\ I_{CARRIL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & 0 \\ -\frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} & 0 \\ \frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & -\frac{2}{z_2} \\ \frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} & -\frac{1}{z_1} & \frac{1}{z_1} & -\frac{2}{z_2} \\ 0 & 0 & -\frac{2}{z_2} & -\frac{2}{z_2} & \frac{4}{z_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{AT1} \\ V_{AT2} \\ V_{CATENARIA} \\ V_{FEEDER_NEGATIVO} \\ V_{CARRIL} \end{pmatrix}$$

3.1.3. Modelo eléctrico de los centros de autotransformación

El esquema equivalente del autotransformador puede observarse en la siguiente figura:

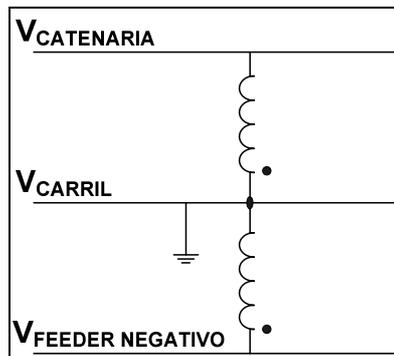


Figura 30. Esquema equivalente del autotransformador

En magnitudes por unidad, se pueden plantear la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} I_{CATENARIA} \\ I_{CARRIL} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{AT}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{CATENARIA} - V_{FEEDER_NEGATIVO} \\ V_{CARRIL} - V_{FEEDER_NEGATIVO} \end{bmatrix}$$

A partir de la expresión anterior, puede obtenerse matriz de admitancias:

$$\begin{pmatrix} I_{CATENARIA} \\ I_{FEEDER_NEGATIVO} \\ I_{CARRIL} \end{pmatrix} = \frac{1}{z_{AT}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -2 \\ -2 & -2 & 4 \end{vmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_{CATENARIA} \\ V_{FEEDER_NEGATIVO} \\ V_{CARRIL} \end{pmatrix}$$

3.1.4. Modelo eléctrico de los transformadores booster

El esquema equivalente de los transformadores Booster puede observarse en la siguiente figura:

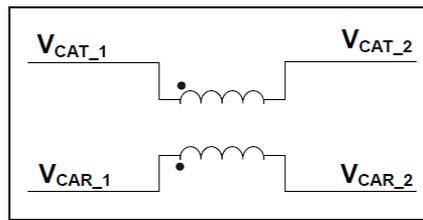


Figura 31. Esquema equivalente del transformador booster

En magnitudes por unidad, se pueden plantear la ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} I_{CATENARIA} \\ I_{CARRIL} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{BT}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{CAT_1} - V_{CAT_2} \\ V_{CAR_1} - V_{CAR_2} \end{bmatrix}$$

A partir de la expresión anterior, se obtiene la matriz de admitancias:

$$\begin{bmatrix} I_{CATENARIA} \\ I_{CARRIL} \end{bmatrix} = \frac{1}{z_{BT}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{CAT_1} \\ V_{CAT_2} \\ V_{CAR_1} \\ V_{CAR_2} \end{bmatrix}$$

3.2. Modelización de los elementos fijos en corriente continua

La tensión trifásica procedente de las líneas de distribución de energía es rectificadas para obtener la tensión de los sistemas de electrificación en corriente continua, así los elementos fijos que se pueden encontrar en los distintos sistemas de electrificación en corriente continua son los siguientes:

- Alimentación trifásica a las subestaciones de tracción.
- Subestaciones de tracción, que pueden ser rectificadoras o reversibles.

3.2.1. Modelo de la alimentación en alta tensión

La red de alta tensión que alimenta a las subestación de tracción se puede modelar a partir de su equivalente Thévenin en el punto de conexión. Pero es preciso modelarla vista desde la red de continua. Así, la resistencia de Thévenin de la red de corriente continua, puede calcularse a partir de la impedancia Thévenin de la red de corriente alterna teniendo en cuenta que las resistencias de la red de corriente alterna se verán multiplicadas por un factor k_1 y las inductancias por un factor de k_2 . Estos factores k_1 y k_2 dependerán de la tipología del convertidor. Así:

$$R_{TH} = k_1 \cdot X_{red} + k_2 \cdot R_{red}$$

Con:

- R_{TH} es la resistencia Thévenin de la red de alterna vista desde la red de continua (Ω).
- X_{red} es la inductancia Thévenin de la red de corriente alterna referida al secundario de transformador (Ω).
- R_{red} es la resistencia Thévenin de la red de corriente alterna referida al secundario de transformador (Ω).

La tensión V_{TH} está relacionada con la tensión de línea del lado de alterna a través de un factor que depende también del tipo de rectificación.

$$V_{TH} = k_3 \cdot V_{ac}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de k_1 , k_2 y k_3 para los tipos más habituales de rectificación:

Rectificador	k_1	k_2	k_3
6 pulsos	$3/\pi$	2	1,35
12 pulsos (agrupación serie)	$6/\pi$	4	2,70
12 pulsos (agrupación paralelo)	$3/2\pi$	1	1,35

Tabla 11. Valores de los coeficientes k_1 , k_2 y k_3 .

Si la tensión equivalente Thévenin es V_{TH} y la resistencia equivalente Thévenin es R_{TH} . Entonces:

$$J = \frac{V_{TH}}{R_{TH}}$$

Y R_{TH} será la resistencia entre los nodos $AT1$ y $AT2$.

Así, su modelización en su circuito equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente independiente (J) en paralelo con una resistencia (R_{TH}):

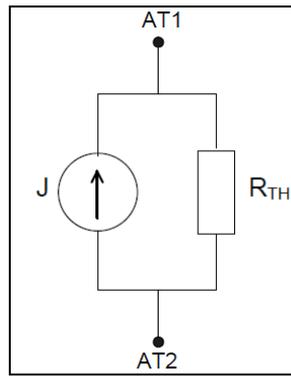


Figura 32. Modelo de la alimentación a la subestación visto desde CC

3.2.2. Modelo eléctrico de la subestación

Las subestaciones de corriente continua pueden dividirse en dos tipos:

- Subestaciones convencionales o rectificadoras, que son aquellas en que el flujo de potencia es unidireccional. En este caso el sentido de la potencia será siempre de la red de corriente alterna a la red de corriente continua. Así, estas subestaciones tendrán dos modelos distintos: uno correspondiente al modo de conducción y otro al modo de bloqueo.
- Subestaciones reversibles, que son aquellas que el flujo de potencia es bidireccional, desde la red de corriente alterna a la red de corriente continua, o viceversa.

3.2.2.1. Subestaciones convencionales o rectificadoras

El esquema equivalente de la subestación convencional puede observarse en la siguiente figura:

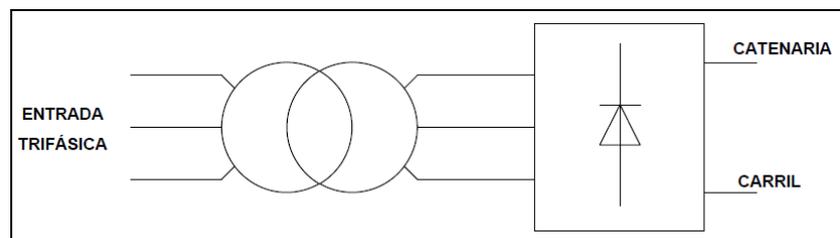


Figura 33. Esquema equivalente de la subestación rectificadora

Los rectificadores utilizados para la alimentación de potencia de tracción son normalmente rectificadores trifásicos no controlados en montajes de puente completo de seis o doce pulsos y conectados cada uno individualmente a un transformador con alimentación en corriente alterna trifásica.

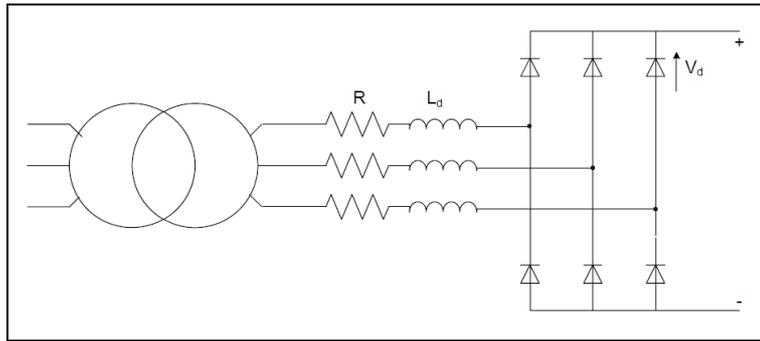


Figura 34. Esquema de un rectificador hexafásico

Idealmente, la forma de la onda de la tensión rectificada de un rectificador de seis pulsos o hexafásico consiste en una onda de seis segmentos por ciclo de la frecuencia de línea, con cada segmento perteneciendo a una de las seis combinaciones de las ondas de tensión alterna, de forma que cada diodo conduce 120°.

Así, la tensión rectificada será:

$$v_d = \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \cos \omega t \quad -\frac{1}{6}\pi < \omega t < \frac{1}{6}\pi$$

Donde V_{CA} es el valor eficaz de la tensión de línea.

Entonces el valor medio V_{d0} sería:

$$V_{d0} = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} \cdot V_{CA} \cdot \cos \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{CA} = 1,35 \cdot V_{CA}$$

Si se tiene en cuenta las caídas de tensión en la conmutación debida a la reactancia de dispersión del transformador (L_d) y en la resistencia de los devanados (R), ambas referidas al secundario del transformador, y en los diodos, entonces el valor medio de la tensión rectificada será [50] [48]:

$$V_d = V_{d0} - \Delta V_c - \Delta V_R - \Delta V_d = 1,35 \cdot V_{CA} - \frac{3}{\pi} \cdot \omega \cdot L_d \cdot I - 2 \cdot R \cdot I - \Delta V_d$$

Donde:

- V_d es la tensión media a la salida del rectificador (V).
- V_{d0} es la tensión media ideal (V).
- ΔV_c es la caída de tensión debida a la reactancia de dispersión del transformador (V).
- ΔV_R es la caída de tensión en las resistencias de los devanados del transformador (V).
- ΔV_d es la caída de tensión en los diodos (V).

- ωL_d es la reactancia de dispersión del transformador referida al secundario del transformador (Ω).
- I es la intensidad en la red de continua (A).
- R es la resistencia de los arrollamientos del transformador referida al secundario del transformador (Ω).

La caída de tensión en los diodos corresponde a dos veces la tensión de codo del diodo.

Los rectificadores de doce pulsos requieren de transformadores provistos de dos arrollamientos secundarios con montajes Y y D, o de dos transformadores separados con diferentes grupos vectores.

La expresión anterior para un rectificador de 12 pulsos en asociación paralelo:

$$V_d = 1,35 \cdot V_{CA} - \frac{3}{2\pi} \cdot X_d \cdot I - R \cdot I$$

Y en asociación serie:

$$V_d = 2,70 \cdot V_{CA} - \frac{6}{\pi} \cdot X_d \cdot I - 4 \cdot R \cdot I$$

Como se ha indicado en el punto anterior, las subestaciones convencionales o rectificadoras se modelarán de dos formas distintas:

- En modo conducción ($I > 0$), con el flujo de potencia desde la red de corriente alterna a la red de corriente continua.
- En modo bloqueo ($I = 0$), sin trasvase de energía entre redes. En este modo la subestación se comportará como un circuito abierto.

Modelización en modo conducción:

La modelización de las subestaciones convencionales en modo de conducción ($I > 0$) se realiza por su dipolo equivalente de Thévenin [68]. Así pues, el esquema será el siguiente:

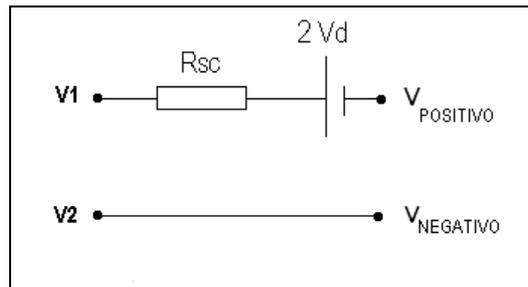


Figura 35. Modelo de la subestación convencional en modo conducción

Siendo:

- R_{sc} es la resistencia vista desde el lado de continua correspondiente al grupo transformador-rectificador (Ω).
- V_d es la caída de tensión en el diodo, su valor suele estar comprendido entre 1,5 y 3 V, y no suele tenerse en cuenta en los modelos.

Como se ha visto anteriormente en los rectificadores de 6 pulsos, la resistencia R_{sc} se puede calcular a partir de la inductancia del transformador teniendo en cuenta que al estar situada en la red de corriente alterna se verá multiplicada por factor de $3/\pi$. Así:

$$R_{sc} = \frac{3}{\pi} \cdot X_{tr}$$

La impedancia del transformador del grupo rectificador será:

$$X_{tr} \cong \frac{U_{2n}^2}{S_n} \cdot \epsilon_{cc}$$

Entonces la matriz de admitancias $[Y_t]$ será:

$$[Y_t] = \frac{1}{R_{sc}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{vmatrix}$$

Por último, la matriz de admitancias de la subestación $[Y_{SE}]$ puede obtenerse como:

$$[Y_{SE}] = [A_{SE}] \cdot [Y_t] \cdot [A_{SE}^t]$$

Donde la matriz $[A_{SE}]$ es la matriz de incidencias de rama, con un número de columnas igual al de ramas, y de filas igual al de nodos. Y con todos sus valores cero exceptuando los nodos origen y final de rama, con valor +1 en el nodo origen y -1 en nodo final.

$$[Y_{SE}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot [Y_t] \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

A partir de las expresiones anteriores, puede obtenerse la matriz de admitancias de la subestación:

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_{POSITIVO} \\ I_{NEGATIVO} \end{vmatrix} = \frac{1}{R_{sc}} \cdot \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_{POSITIVO} \\ V_{NEGATIVO} \end{vmatrix}$$

Modelización en modo bloqueo:

La modelización de las subestaciones convencionales en modo bloqueo ($I = 0$) se comporta simplemente como un interruptor abierto, es decir $R_{sc} = \infty$.

3.2.2.2. *Subestaciones reversibles*

Como se indicó en el capítulo anterior, existen distintas tipologías de subestaciones reversibles, en este apartado se muestra la modelización formada por un convertidor CC/AC, conectado a la línea de contacto en paralelo con el rectificador de la subestación. Dicho sistema se encarga de monitorizar en todo momento el estado de la línea de contacto, y en caso de que exista energía a recuperar, convierte ésta en energía alterna que inyecta en la red trifásica general.

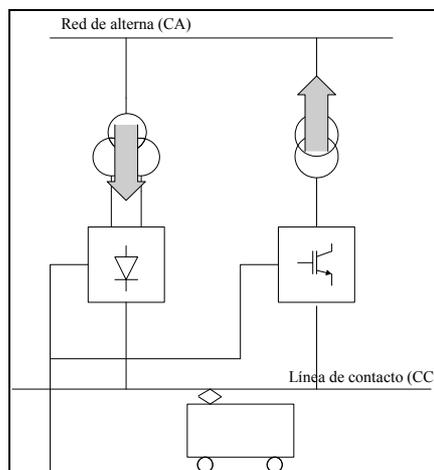


Figura 36. Esquema de la subestación reversible

Así, las subestaciones reversibles tendrán tres modos de funcionamiento:

- En modo rectificación ($I_{dc} > 0$), la tensión de la línea de contacto es menor que la tensión de vacío del rectificador, así el flujo de potencia va desde la red de corriente alterna a la red de corriente continua, en este caso sólo operará el rectificador no controlado.
- En modo recirculación de corriente ($I_{dc} \approx 0$), la corriente circula entre el rectificador y el inversor que operan en antiparalelo. Este modo permite el cambio de modo inversión a rectificación, o al revés, de una forma más suave.
- En modo inversión ($I_{dc} < 0$), la tensión de la línea de contacto es mayor que la tensión de inicio de operación del inversor, así el flujo de potencia irá desde la red de corriente continua a la red de corriente alterna, operando sólo el inversor.

Los primeros convertidores CC/CA utilizados en líneas metropolitanas en los años 90 estaban constituidos por inversores formados por tiristores [58][59]. Al tratarse de dispositivos con conmutación con la frecuencia de la red, no permitían el control del factor de potencia y presentaban un contenido armónico relativamente elevado.

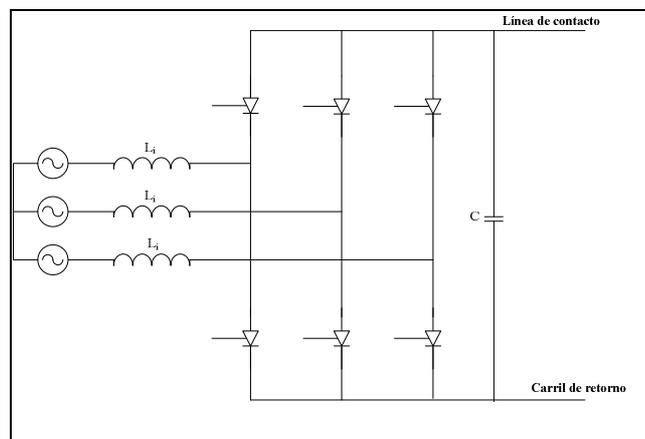


Figura 37. Esquema del inversor con tiristores

En la actualidad los inversores utilizados están constituidos por IGBT con un control PWM [69] [70] que igualmente absorbe la energía sobrante del frenado regenerativo y reducen la fluctuación de la tensión en la línea de contacto, pero con un factor de potencia controlable y un bajo contenido armónico. En la siguiente figura se muestra el esquema de estos inversores con IGBT.

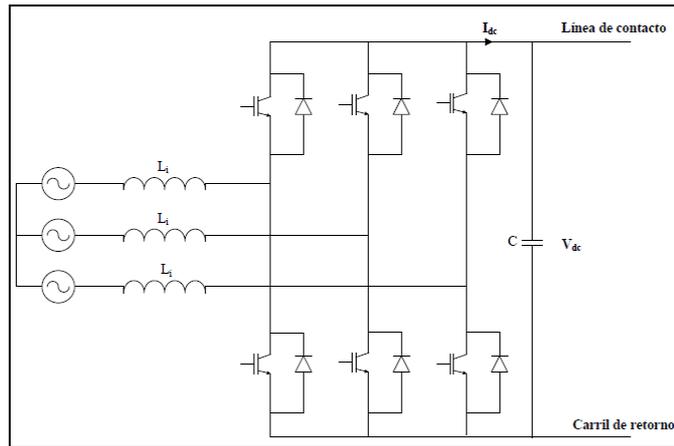


Figura 38. Esquema del inversor con IGBTs

La característica de funcionamiento de la subestación reversible [60] [71] será la siguiente:

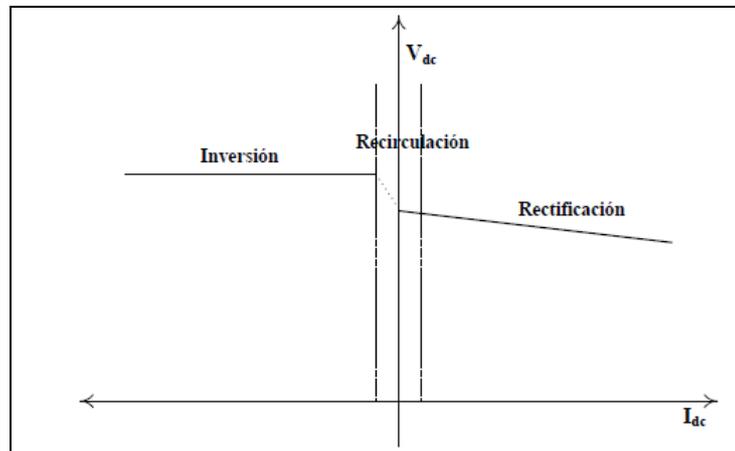


Figura 39. Característica I_{dc} y V_{dc} de la subestación reversible

En la figura anterior, el control del inversor está en el modo de tensión constante. También existe un segundo modo de funcionamiento, menos utilizado, basado en mantener la corriente constante y suele emplearse para limitar la corriente en los IGBT cuando la potencia que fluye a través del inversor se encuentra próxima o supera la potencia nominal del convertidor.

Modelización en modo rectificación:

Para la tipología considerada, la modelización de las subestaciones reversibles en modo rectificación será coincidente con la modelización de las subestaciones convencionales en modo conducción, pues durante este modo está operando únicamente el rectificador.

Modelización en modo inversión:

La modelización de las subestaciones reversibles en modo inversión dependerá del control elegido, así si el inversor trabaja en modo tensión constante, se comportará como una fuente de tensión de corriente continua, mientras que si su modo de control es a corriente constante, su modelo se realizará a través de una fuente de corriente continua.

4. MODELIZACIÓN DEL MATERIAL RODANTE

A diferencia del resto de los elementos del sistema de electrificación, los trenes tienen la particularidad de ser móviles en el transcurso del tiempo. Así es este apartado se tratarán dos aspectos principales:

- La modelización dinámica del material rodante, a partir de las ecuaciones fundamentales de la dinámica.
- La modelización eléctrica del tren.

4.1. Modelización dinámica del tren

El objetivo de la modelización dinámica del tren es calcular, para cada instante de tiempo, su posición, su velocidad, así como sus correspondientes esfuerzos de tracción y de frenado.

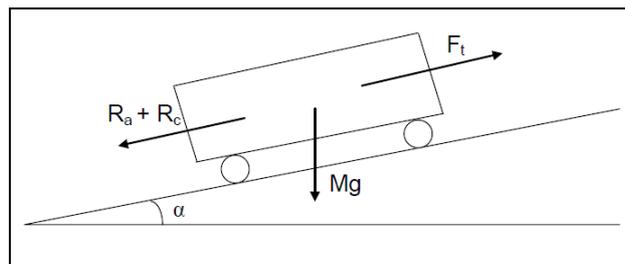


Figura 40. Fuerzas y resistencias a la tracción en un tren

Partiendo de la ecuación de la dinámica:

$$C_{mg} \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} = F_t - R_a - R_g - R_c$$

Donde:

- C_{mg} es el coeficiente de masas giratorias, que tiene en cuenta la inercia de las masas en rotación en el tren.
- M es la masa del tren (kg).
- v es la velocidad del tren (m/s).
- t es el tiempo (s).
- F_t es la fuerza que realiza el tren, que tendrá un valor positivo si el tren tracciona, negativo si frena, o nulo si circula en deriva (N).
- R_a es la resistencia al avance (N).
- R_g es la resistencia debida a la gravedad (N).

- R_c es la resistencia al paso por curva (N).

La resistencia al avance depende de cada tipo de tren, dado que influyen su forma, su sección, su longitud, su masa, y lógicamente la velocidad a la que circula el tren. En la resistencia al avance se incluye la resistencia aerodinámica, a la rodadura y a los rozamientos internos. Su expresión más habitual [49] es la siguiente:

$$R_a = k_f \cdot a \cdot v^2 + b \cdot v + c$$

Donde:

- R_a es la resistencia al avance (N).
- k_f es el factor de túnel.
- v es la velocidad del tren (m/s).
- a, b, c son coeficientes empíricos que dependen de la geometría del tren.

La resistencia debida al peso es la fuerza longitudinal debida a la gravedad, y su expresión es la siguiente:

$$R_g = M \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Siendo:

- R_g es la resistencia debida al peso (N).
- M es la masa del tren (kg).
- g es la aceleración de la gravedad (m/s²).
- α es el ángulo que forma el plano del trazado con el plano horizontal.

Por último, la resistencia al avance debido a la curva consiste en la resistencia sobre el tren por el efecto del rozamiento de las ruedas sobre el carril. Su expresión empírica es la siguiente [53]:

$$R_c = M \cdot \frac{K}{R}$$

Donde:

- R_c es la resistencia al paso por curva (N).
- M es la masa del tren (kg).
- K es una constante que depende del ancho de vía.
- R es el radio de la curva (m).

En la siguiente tabla se muestran los valores de K para diferentes anchos de vía:

Ancho de vía (mm)	K
1.668 (Ibérico)	800
1.435 (UIC)	750
1.000	530
750	400
600	325

Tabla 12. Valores K en función del ancho de vía.

Así, si se sustituye R_a , R_g y R_c por las expresiones anteriores, y:

$$M' = C_{mrt} \cdot M$$

Se obtiene una ecuación diferencial de la siguiente forma:

$$M' \cdot \frac{dv}{dt} = F_t + A_1 + A_2 \cdot v + A_3 \cdot v^2$$

Donde:

$$A_1 = -M \cdot g \cdot \sin \alpha - M \cdot \frac{K}{R} - c$$

$$A_2 = -b$$

$$A_3 = -k_f \cdot a$$

Separando las variables:

$$M' \cdot \frac{dv}{F_t + A_1 + A_2 \cdot v + A_3 \cdot v^2} = dt$$

Con lo que se obtiene una ecuación diferencial de primer orden separable, dicha ecuación se puede resolver fácilmente de forma numérica entre los instantes 1 y 2.

$$\int_{v_1}^{v_2} \frac{M'}{F_t + A_1 + A_2 \cdot v + A_3 \cdot v^2} \cdot dv = \int_{t_1}^{t_2} dt$$

Con la expresión anterior, partiendo de t_1 y v_1 , y de los valores de consigna t_2 y v_2 , se puede calcular el esfuerzo de tracción, pero teniendo en cuenta que el valor obtenido de F_t deberá estar siempre comprendido entre los valores de esfuerzos máximos de tracción y frenado. Como se verá a continuación, los valores máximos del esfuerzo de tracción y de frenado serán función de la velocidad y de la tensión entre la línea de contacto y el carril, así como también de la adherencia entre la rueda y el carril.

4.1.1. Esfuerzos máximos de tracción y frenado

Los esfuerzos de tracción y de frenado son las fuerzas producidas por el propio tren para aumentar o disminuir su velocidad, así el esfuerzo de tracción es la resultante de las fuerzas de las distintas unidades motrices en sentido de la marcha que se opone a las resistencias al avance, mientras que el esfuerzo de frenado es la resultante de las fuerzas de los distintos frenos del tren con el fin de disminuir su velocidad.

En cada instante el tren puede encontrarse en una de las siguientes situaciones:

- $F_t > 0$, tren traccionando, siendo el esfuerzo de tracción positivo y el de frenado nulo.
- $F_t < 0$, tren frenando, siendo el esfuerzo de tracción nulo y el de frenado positivo.
- $F_t = 0$, tren en deriva, y tanto el esfuerzo de tracción como de frenado son nulos.

4.1.1.1. Esfuerzo de tracción

El esfuerzo de tracción se transmite a través de los ejes motrices del tren, y es controlable ya sea por el conductor o por el sistema de control del tren en el caso de incorporar un sistema de conducción automática.

Como se ha indicado anteriormente, el esfuerzo de tracción es diferente para cada tipo de tren, y su valor máximo es función de la velocidad y de la tensión existente entre la línea de contacto y el carril.

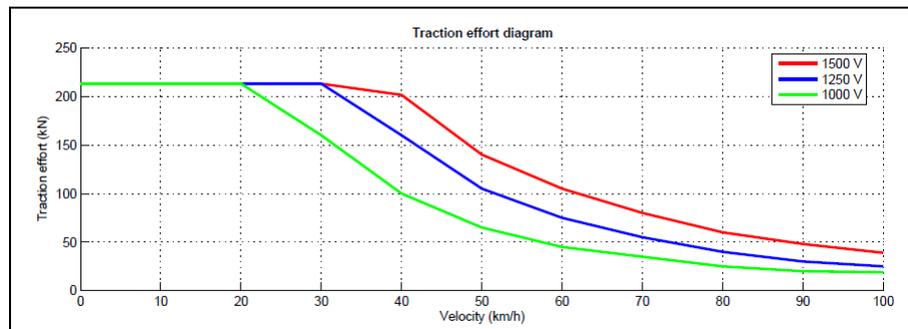


Figura 41. Gráfica del esfuerzo máximo de tracción (velocidad y tensión)

4.1.1.2. Esfuerzo de frenado

Los trenes emplean distintos tipos de frenado para disminuir la velocidad de circulación, pudiéndose clasificar en dos grupos:

- Frenos mecánicos basados principalmente en la adherencia entre rueda y carril.

- Frenos regenerativos, en que una parte de la energía cinética del tren se transforma en energía eléctrica, la cual será total o parcialmente inyectada en el sistema de electrificación.

En este caso los valores máximos de frenado del tren dependerán del tipo de tren y de su velocidad, correspondiendo a una combinación de los distintos tipos de frenos con los que está equipado el tren.

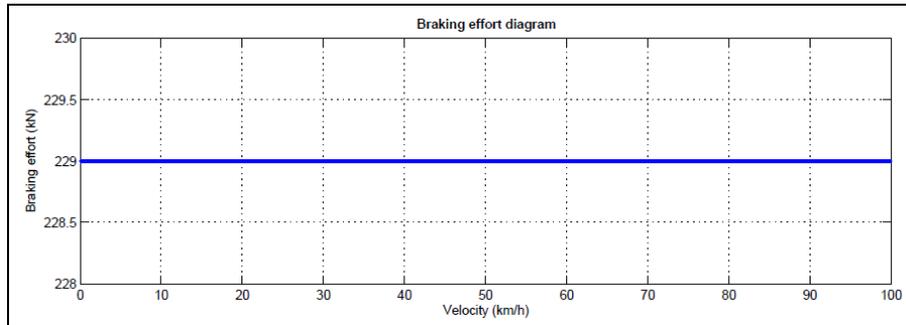


Figura 42. Gráfica del esfuerzo máximo de frenado

4.1.2. La adherencia

Exceptuando en los ferrocarriles cremallera, en el resto de ferrocarriles la fuerza de tracción es transmitida a través del contacto de la rueda con el carril. La fuerza máxima transmisible a la llanta está limitada por la adherencia rueda-carril. La adherencia de la rueda sobre el carril depende del peso que apoya sobre la rueda motriz. Así, el esfuerzo máximo que se le puede aplicar a una rueda motriz en condiciones de adherencia será:

$$F_{t\max} = n \cdot m_r \cdot g \cdot \mu$$

Donde:

- $F_{t\max}$ es el esfuerzo de tracción máximo en condiciones de adherencia (N).
- n es el número de ruedas motrices del tren.
- m_r es la masa del tren que apoya sobre la rueda motriz (kg).
- g es la aceleración de la gravedad (m/s²).
- μ es el coeficiente de adherencia.

El coeficiente de adherencia no es constante, pues depende de factores como el estado del carril, la superficie de contacto, la velocidad del tren, la humedad, etc. El valor máximo del coeficiente de adherencia está alrededor de 0,4, pero éste decrece significativamente al aumentar la velocidad.

Un fenómeno similar de pérdida de adherencia puede ocurrir durante el frenado, pero en general es menos crítico ya que habitualmente los trenes disponen de más ejes que frenan que motorizan, De este modo, el esfuerzo de frenado puede ser mayor que el de tracción.

4.1.3. Perfil de velocidades de consigna

El perfil de velocidades de consigna corresponde para cada instante las velocidades objetivo del tren, sin tener en cuenta las limitaciones propias del tren en relación a los esfuerzos máximos de tracción y frenado.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo el perfil de velocidades de consigna:

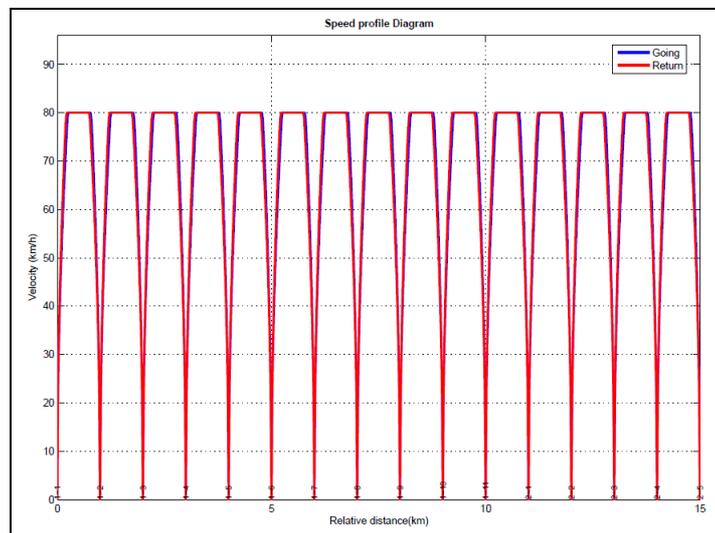


Figura 43. Gráfica de las velocidades de consigna

Este perfil de velocidades se obtiene a partir de condicionantes tanto externos como internos del tren:

- Itinerario: estaciones, tiempos de parada, etc.
- Velocidad máxima de la línea, o del tramo.
- Aceleración y deceleración máximas.
- Velocidad máxima de paso por curva.
- Limitación del jerk.

4.1.3.1. Itinerario

El itinerario corresponde al recorrido que efectúa el tren entre dos puntos, y comprende la relación de estaciones y tiempos de estacionamiento en cada una.

Punto kilométrico	Estación	Tiempo estacionamiento
Pk_inicio	Estación inicial	T0
Pk1	Estación 1	T1
Pk2	Estación 2	T2
.....
Pk_final	Estación final	Tf

Tabla 13. Datos relativos a un itinerario.

4.1.3.2. Velocidad máxima

La velocidad máxima a la que puede circular el tren está en función de la línea y del propio tren. También podrán existir limitaciones de velocidad parciales en algunos tramos debidas a otras causas como el paso por túneles, viaductos, estaciones sin parada, etc.

4.1.3.3. Aceleración y deceleración máximas

La aceleración y deceleración máximas serán también función del material rodante.

Se definen dos tipos de deceleración:

- Deceleración máxima de emergencia: es la que corresponde al máximo esfuerzo de frenado, y sólo se utiliza cuando existe la necesidad de una frenada urgente debido a situación especial, y podría ocasionar molestias en los viajeros.
- Deceleración máxima de servicio: es la deceleración máxima empleada normalmente para disminuir la velocidad.

4.1.3.4. Velocidad máxima de paso por curva

La velocidad máxima de paso de curva está relacionada con la aceleración tangencial sin compensar, que es la aceleración transversal hacia el exterior de la curva que queda al peraltar una vía cuando se circula por ella a una velocidad v , y tiene la siguiente expresión:

$$a_t = \frac{v^2}{R} - \frac{h \cdot g}{s}$$

Donde:

- a_t es la aceleración tangencial sin compensar (m/s^2).
- v es la velocidad del tren (m/s).
- R es el radio de la curva (m).
- h es el peralte de la curva (mm).
- g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).
- s es la distancia entre los carriles de una vía más el ancho de cabeza de carril (mm).

Así, una vez fijada la aceleración máxima tangencial sin compensar, la velocidad máxima del paso de curva se obtendrá de la siguiente expresión:

$$v_{\max} = \sqrt{R \cdot \left(a_{t\max} + \frac{h \cdot g}{s} \right)}$$

Se suele limitar la aceleración sin compensar, tanto en líneas convencionales como en líneas de alta velocidad, en un valor de $0,65 \text{ m/s}^2$.

4.1.3.5. Jerk máximo

Los sistemas de control modernos de velocidad de los trenes no realizan aceleraciones constantes hasta que se alcance la velocidad establecida (rampa de velocidad), pues esto supondría unos valores altos de jerk o de sacudida con la incomodidad que conllevaría en los viajeros.

Así, en muchos controles existe la posibilidad de limitar el valor del jerk, lo que hace que el perfil de la aceleración no sea una constante, sino que tenga forma trapezoidal, mejorando notablemente el confort de los viajeros del tren.

$$\text{Jerk} = \frac{da}{dt} \leq \text{Jerk}_{\max}$$

Donde:

- Jerk es el jerk o sacudida en un instante concreto (m/s^3).
- da/dt es la derivada de la aceleración (m/s^2).
- Jerk_{\max} es el jerk máximo permitido (m/s^3).

4.1.4. Procedimiento de cálculo del perfil de velocidades finales

En la siguiente figura se muestra el procedimiento de cálculo del perfil de velocidades y los esfuerzos de tracción finales.

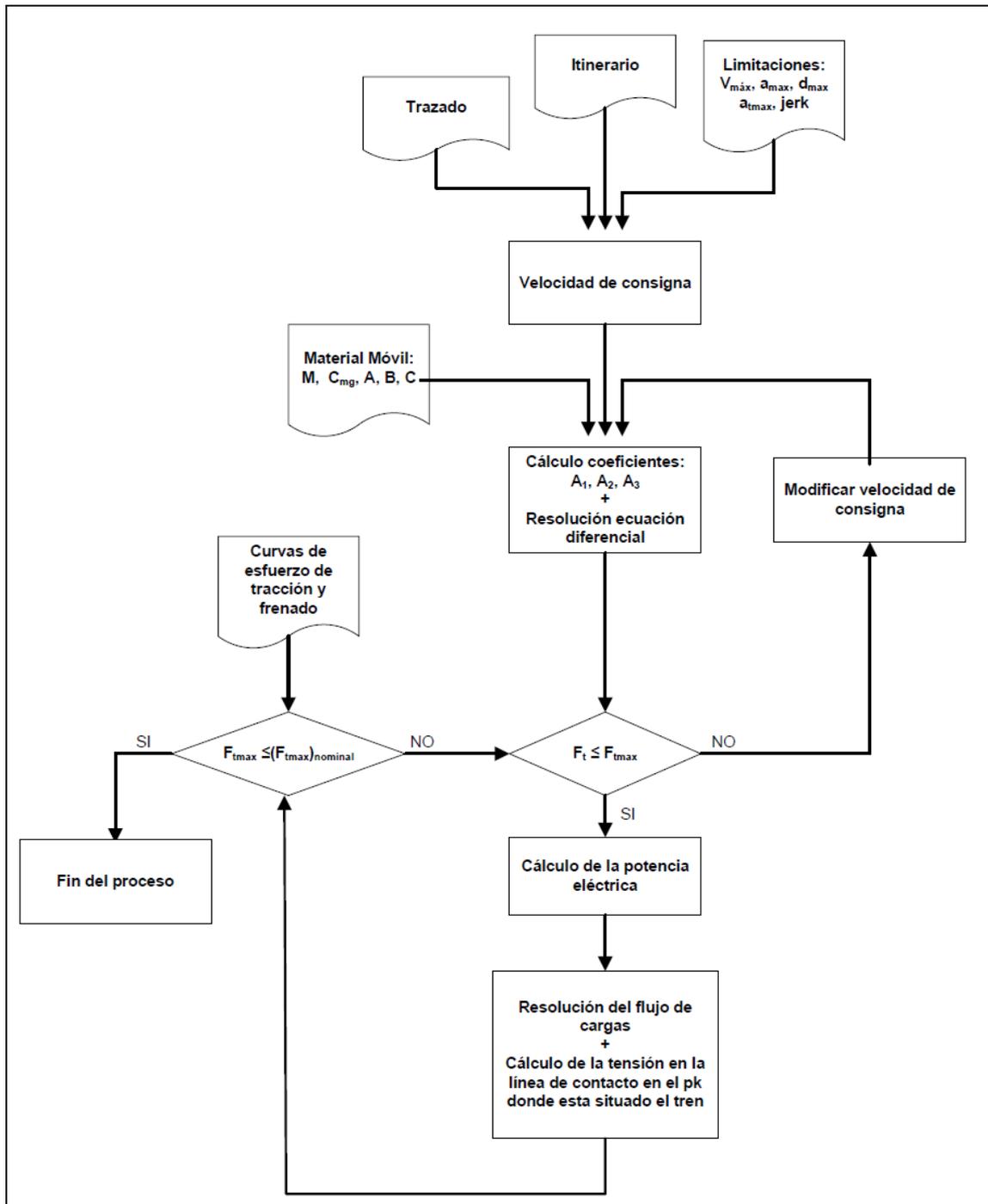


Figura 44. Procedimiento de cálculo de la velocidad y esfuerzo de tracción final

Los valores del esfuerzo máximo dependen de la velocidad de tren y de la tensión en la línea de contacto. Como en un primer cálculo la tensión en la línea de contacto no se conoce, se determinará el perfil de velocidades y esfuerzos de tracción a partir de las prestaciones nominales del tren, y una vez calculada la tensión en la línea de contacto se repetirá el cálculo anterior, hasta que las prestaciones del tren coincidan con las reales.

4.1.5. Potencia del material rodante

Una vez determinado el perfil de velocidades finales y los esfuerzos de tracción del material rodante se puede calcular la potencia demandada / entregada por el tren como:

Si $F_t > 0$, entonces:

$$P_{elec} = \frac{F_t \cdot v}{\eta}$$

Donde:

- P_{elec} es la potencia eléctrica demandada por el tren (W).
- F_t es el esfuerzo de tracción (N).
- v es la velocidad del tren (m/s).
- η es el coeficiente de rendimiento en tracción.

Si $F_t < 0$, entonces:

$$P_{elec} = F_t \cdot v \cdot \eta_r$$

Donde:

- P_{elec} es la máxima potencia eléctrica entregable por el tren (W).
- F_t es el esfuerzo de tracción (N).
- v es la velocidad del tren (m/s).
- η_r es el coeficiente de rendimiento en regeneración.

Si $F_t = 0$, entonces el tren circularía en deriva siendo la potencia de tracción demandada nula.

A partir de la curva del factor de potencia en función de la potencia activa del tren puede obtenerse la potencia eléctrica aparente:

$$S = \frac{P_{elec}}{\cos \varphi}$$

Por último, la potencia total del tren será la potencia eléctrica calculada según las expresiones anteriores más la potencia consumida en los sistemas auxiliares del tren:

$$S_{tren} = S_{elec} + S_{aux}$$

4.2. Modelización eléctrica del tren.

Siempre que el esfuerzo de tracción del tren se encuentre en su rango admisible, y gracias a los dispositivos electrónicos de potencia embarcados, los trenes pueden modelarse como cargas del tipo de potencia constante. En esta situación la corriente varía de forma inversamente proporcional a la tensión de la catenaria en el pk donde está situado el tren en un instante.

También es importante destacar que el material móvil tendrá dos comportamientos completamente distintos:

- Material móvil traccionando: se comportará como un consumo en el sistema.
- Material móvil frenando: si utiliza frenos regenerativos, se comportará como un generador. Como se verá en el capítulo 4, la utilización de los frenos regenerativos vendrá condicionada por la tensión máxima en el punto donde está situado el tren.

4.2.1. Material móvil traccionando

Si S es la potencia demandada por el tren, y está conectado entre los nodos 1 y 2, entonces:

$$S_{trac} = U \cdot I^* \Rightarrow I = \left(\frac{S_{trac}}{U} \right)^* = \left(\frac{S_{trac}}{V_1 - V_2} \right)^*$$

Siendo S también función de la tensión entre la línea de contacto y el carril, debido a las limitaciones en el esfuerzo de tracción.

Así, su modelización en su equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente controlada por la tensión entre los nodos V_1 y V_2 :

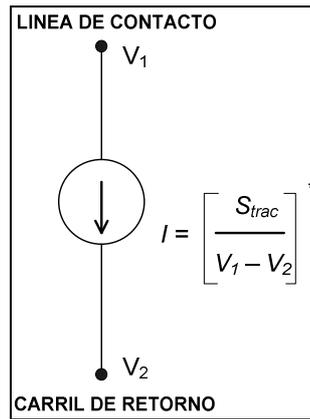


Figura 45. Tren con su equivalente Norton traccionando

En el siguiente diagrama se muestra el procedimiento de cálculo de la tensión entre los dos nodos en el que se encuentre el tren traccionando:

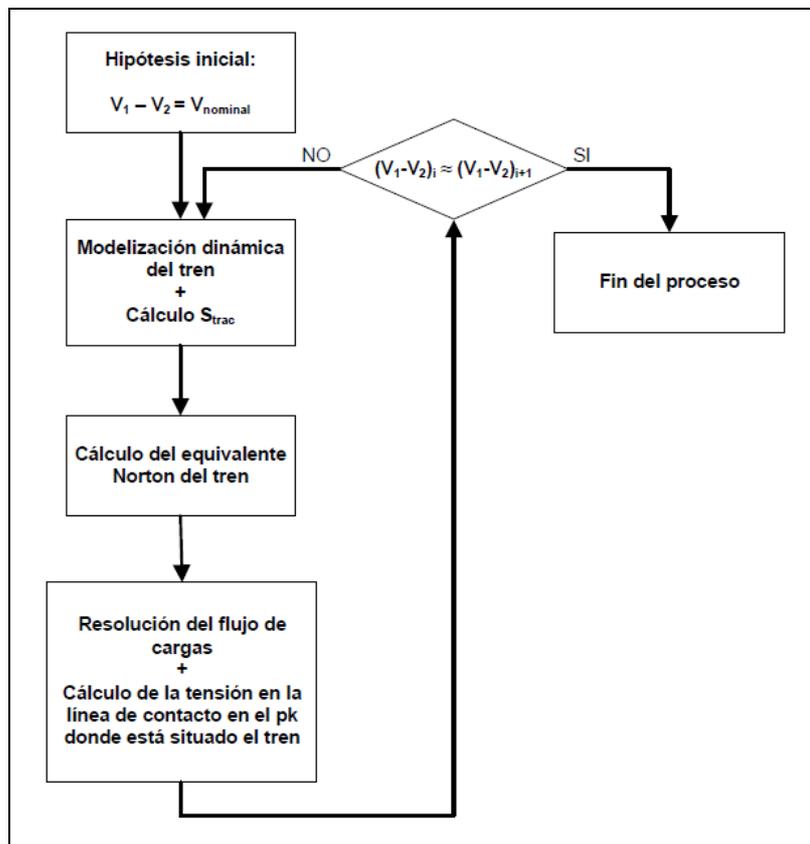


Figura 46. Diagrama para el cálculo de la tensión en el tren traccionando

4.2.2. Material móvil regenerando

En el apartado 4 del capítulo se ha indicado que si las características del material móvil y del sistema de electrificación permiten el frenado regenerativo, cuando un tren frena se obtiene una potencia que inicialmente irá destinada a alimentar los servicios auxiliares del tren, y su sobrante será potencialmente entregable al sistema de electrificación. Como se verá en las siguientes ecuaciones, a través de la variable de control α se determina los porcentajes de potencia que se entregan al sistema de electrificación o se derivan hacia las resistencias reostáticas embarcadas en el propio tren en cada instante.

Si S es la potencia máxima regenerable por el tren, y está conectado entre los nodos 1 y 2, entonces:

$$S_{reg_max} = U \cdot I^* \Rightarrow I = \left(\frac{S_{reg_max}}{U} \right)^* = \left(\frac{S_{reg_max}}{V_1 - V_2} \right)^*$$

Así la potencia regenerable por el tren será:

$$S_{reg} = \alpha \cdot U \cdot I^* \Rightarrow I = \left(\frac{\alpha \cdot S_{reg_max}}{U} \right)^* = \left(\frac{\alpha \cdot S_{reg_max}}{V_1 - V_2} \right)^*$$

Donde α será el coeficiente de receptibilidad de la potencia regenerable, con valores comprendidos entre 1 y 0. 1 cuando la receptibilidad es máxima y 0 cuando es nula.

Así, su modelización en su equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente controlada por el coeficiente de receptibilidad y la tensión entre los nodos V_1 y V_2 :

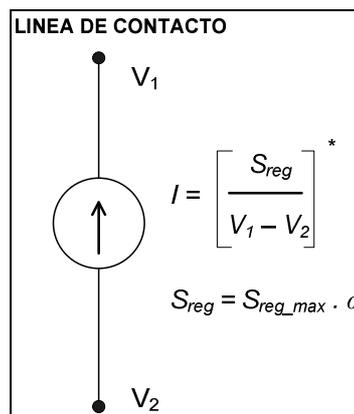


Figura 47. Tren con su equivalente Norton regenerando

En el siguiente diagrama se muestra el procedimiento de cálculo de la tensión entre los dos nodos en el que se encuentre el tren regenerando:

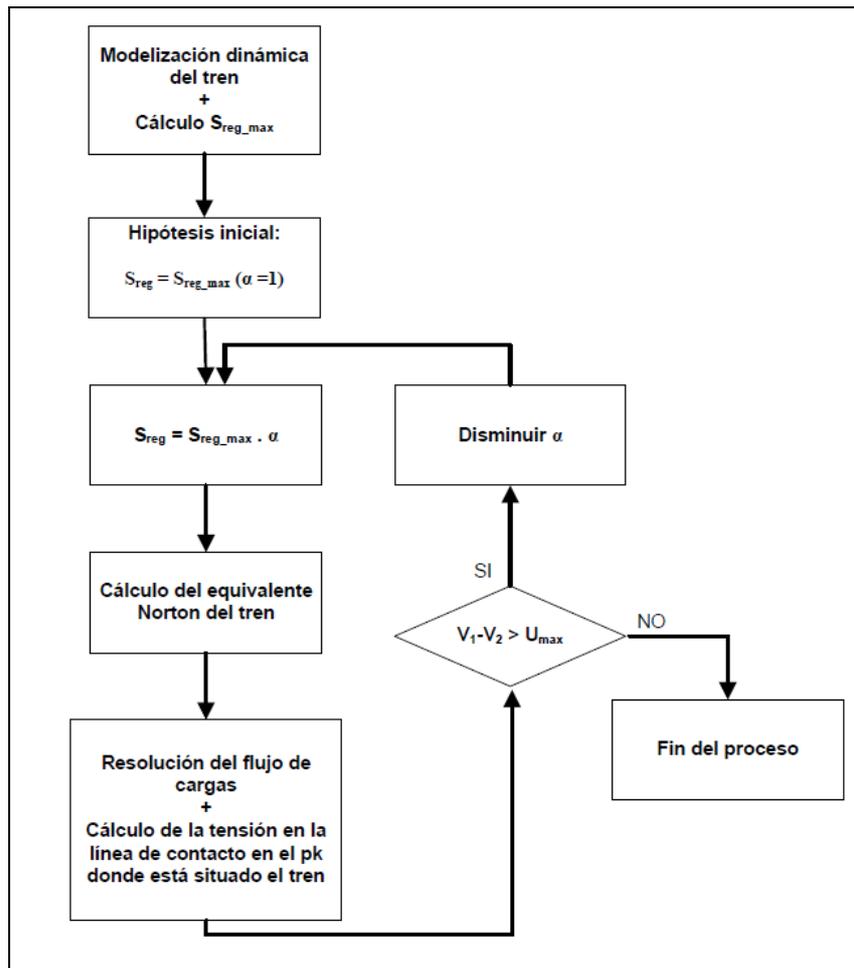


Figura 48. Diagrama para el cálculo de la tensión en el tren regenerando

El valor del coeficiente α se determina por aproximaciones sucesivas, tomando como valor inicial la unidad. Si la diferencia entre la tensión de catenaria (V_1) y el carril (V_2) donde está situado el tren que regenera es mayor que U_{max} , se disminuirá sucesivamente el coeficiente α , hasta alcanzar que $V_1 - V_2$ sea aproximadamente igual a U_{max} . Para aumentar la velocidad de la convergencia del sistema no lineal se emplea un método matemático acelerador de la convergencia, de forma que la disminución del coeficiente α no se realiza de forma lineal, si no que es función de la diferencia entre $U_{max} - (V_1 - V_2)$, así:

$$\Delta\alpha = f(U_{max} - [V_1 - V_2])$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i - \Delta\alpha$$

De esta forma se consigue disminuir el número de iteraciones necesarias para determinar el coeficiente de receptibilidad α .

5. MODELIZACIÓN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

5.1. Arquitectura del acumulador

En el capítulo anterior se ha visto que existen distintas tecnologías que pueden utilizarse como sistemas de almacenamiento de energía, como supercondensadores, volantes de inercia, baterías, etc

Para el desarrollo teórico del modelo [62] se utilizará el acumulador con supercondensadores, pero como se verá posteriormente el modelo funcional podrá utilizarse con cualquier tecnología.

En la siguiente figura se muestra el esquema del sistema de almacenamiento, formado por el filtro de entrada, un convertidor CC/CC de dos cuadrantes y los supercondensadores.

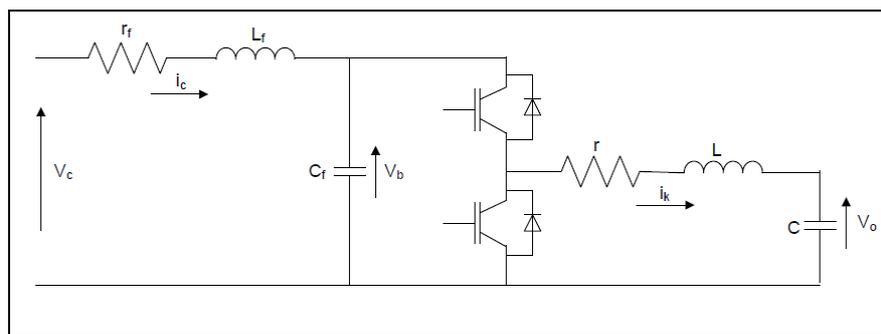


Figura 49. Esquema eléctrico del acumulador.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico del acumulador son las siguientes:

$$L_f \cdot \frac{di_c}{dt} = -r_f \cdot i_c - V_b + V_c$$

$$C_f \cdot \frac{dV_b}{dt} = i_c - \alpha \cdot i_k$$

$$L \cdot \frac{di_k}{dt} = -r \cdot i_k + \alpha \cdot V_b - V_o$$

$$C \cdot \frac{dV_o}{dt} = i_k$$

Las variables de estado del sistema son i_c , V_b , i_k y V_o . La variable de control α toma valores en el conjunto $\{0,1\}$ y representa la acción de los interruptores.

Como en el modelo del acumulador se tendrán en cuenta únicamente los puntos de equilibrio, se supondrá que todas las derivadas son nulas, dado lugar al siguiente sistema de ecuaciones:

$$0 = -r_f \cdot i_c - V_b + V_c$$

$$0 = i_c - \alpha \cdot i_k$$

$$0 = -r \cdot i_k + \alpha \cdot V_b - V_o$$

$$0 = i_k$$

Es decir:

$$0 = -V_b + V_c$$

$$0 = \alpha \cdot V_b - V_o$$

Dado que α es la variable de control, su valor será:

$$\alpha = \frac{V_o}{V_b}$$

Así en el punto de equilibrio del sistema se cumplirá:

$$i_k = 0$$

$$i_c = 0$$

$$V_b = V_c$$

$$V_o = \alpha \cdot V_b$$

Por lo tanto se puede conseguir el equilibrio del sistema fijando la tensión del supercondensador en el intervalo $\{0, V_c\}$. Y la cantidad de energía almacenada en estado estacionario por el acumulador será:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (\alpha \cdot V_c)^2$$

Así, se podrá almacenar cualquier cantidad de energía siempre que esté por debajo de:

$$E_{\max} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_b^2$$

5.2. Modelización funcional del acumulador

Los parámetros principales que rigen el funcionamiento de estos acumuladores son los siguientes:

- La cantidad de energía almacenada o capacidad del acumulador (E_{total}), que es la máxima energía que puede acumular el sistema (Wh).
- Energía mínima remanente (E_{min}) es la energía almacenada en el acumulador pero que no es descargable (Wh).
- La potencia máxima entregable (P_{e-max}) en un instante dado (W).
- El tiempo de carga (t_c) (s)
- El rendimiento (η) es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la que el acumulador entrega durante la descarga.
- Número máximo de recargas o vida del acumulador.
- Tensión objetivo (V_{obj}), es el valor de la tensión deseada entre la línea de contacto y el carril.
- Consigna de descarga (V_d), que es el valor de la tensión entre la línea de contacto y el carril a partir de la cual el acumulador entregará energía al sistema, lógicamente será inferior a la tensión objetivo.
- Consigna de carga (V_c), que es el valor de la tensión entre la línea de contacto y el carril a partir de la cual el acumulador almacenará energía procedente del sistema, en la práctica este valor será superior a la tensión en vacío de los rectificadores de la línea.

Los parámetros anteriores son los que intervendrán en la modelización de estos sistemas, con la particularidad de que se considerará un acumulador ideal con un número de recargas ilimitado.

En un instante, se definirá como energía disponible en el acumulador la diferencia entre la energía total (capacidad) y la energía recargable:

$$E_{disp}(t) = E_{total}(t) - E_{carg}(t)$$

En la siguiente tabla se indican las ecuaciones que definen la funcionalidad del acumulador entre los instantes t_1 y t_2 :

	Carga	Descarga
Tensión inicial línea de contacto – carril (V_{cat})	$V_{cat}(t_1) \geq V_c$	$V_{cat}(t_1) \leq V_d$
Tensión final línea de contacto – carril (V_{cat})	$V_c \geq V_{cat}(t_2) \geq V_{obj}$	$V_d \leq V_{cat}(t_2) \leq V_{obj}$
Máxima energía recargable en el instante t_1	$E_{carg}(t_1)$	--
Máxima energía descargable en el instante t_1	--	$E_{disp}(t_1)$
Energía recargada en t_1	$E = \eta \cdot P \cdot (t_2 - t_1)$ $P \leq \frac{E_{total}(t_1)}{t_c}$ $E \leq E_{carg}(t_1)$	--
Energía descargada en t_1	--	$E = \eta \cdot P \cdot (t_2 - t_1)$ $P \leq P_{e-max}$ $E \leq E_{disp}(t_1)$ $E > E_{min}$
Energía final en t_2	$E_{disp}(t_2) = E_{disp}(t_1) + E$	$E_{disp}(t_2) = E_{disp}(t_1) - E$

Tabla 14. Ecuaciones que definen la funcionalidad del acumulador

5.2.1. Modelización de la carga del acumulador

A partir de la energía cargada por el acumulador, se puede calcular la potencia media demandada al sistema de electrificación con destino al acumulador.

$$P = \frac{E}{\eta \cdot \Delta t}$$

Y la intensidad, considerando un factor de potencia unitario:

$$I = \frac{P}{V}$$

Así, en este caso también su modelización en el equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente controlada por la tensión entre los nodos de conexión del acumulador.

A continuación se muestra el proceso de carga del acumulador:

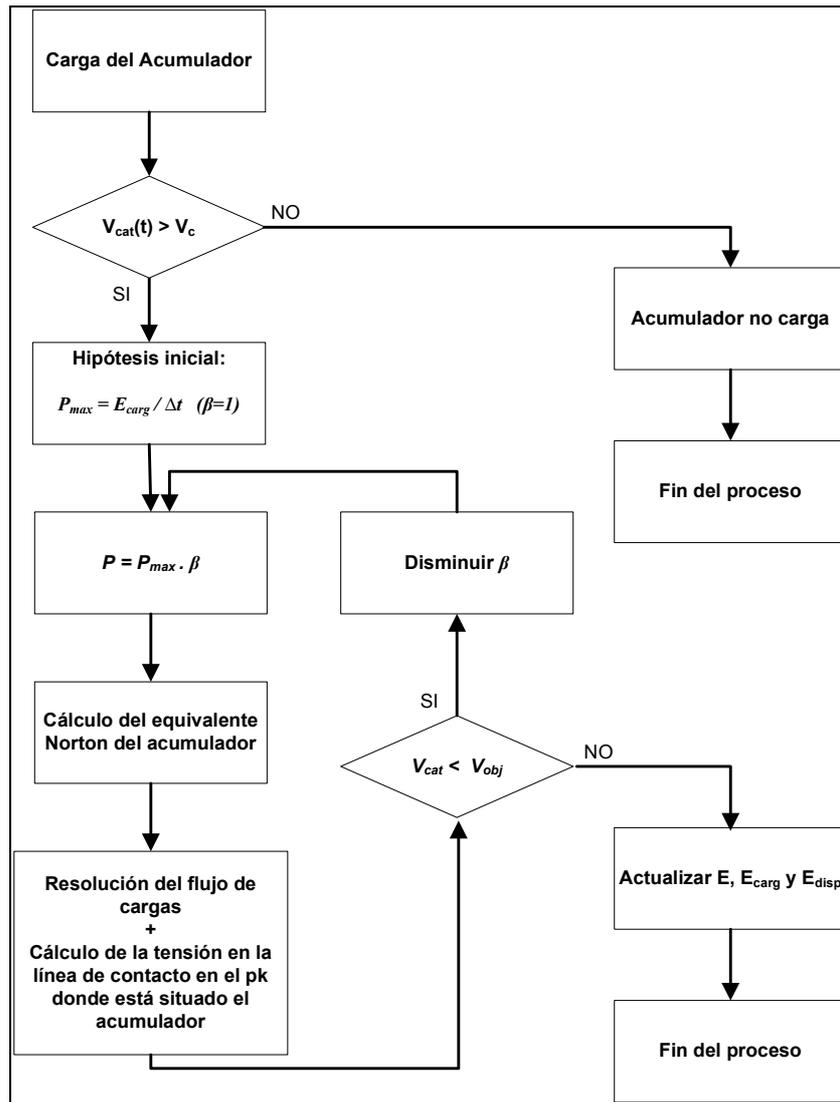


Figura 50. Diagrama del proceso de carga del acumulador.

El valor del coeficiente β se determina por aproximaciones sucesivas, tomando como valor inicial la unidad. Si la tensión V_{cat} donde está situado el acumulador es menor que V_{obj} , es necesario disminuir la potencia que se va acumular, es decir es necesario disminuir β . De este modo, se disminuirá sucesivamente el coeficiente β , hasta alcanzar que V_{cat} sea aproximadamente igual a V_{obj} . Para aumentar la velocidad de la convergencia del sistema no lineal se emplea un método matemático acelerador de la convergencia, de forma que la disminución del coeficiente β no se realiza de forma lineal, si no que es función de la diferencia entre $V_{cat} - V_{obj}$, así:

$$\Delta\beta = f(V_{cat} - V_{obj})$$

$$\beta_{i+1} = \beta_i - \Delta\beta$$

De esta forma se consigue disminuir el número de iteraciones necesarias para determinar el coeficiente β .

5.2.2. Modelización de la descarga del acumulador

A partir de la energía descargada por el acumulador, se puede calcular la potencia media entregada al sistema de electrificación:

$$P = \frac{E}{\eta \cdot \Delta t}$$

Y la intensidad:

$$I = \frac{P}{V}$$

Así, su modelización en su equivalente Norton puede realizarse como una fuente de corriente controlada por la tensión entre los nodos de conexión del acumulador.

A continuación se muestra el proceso de descarga del acumulador:

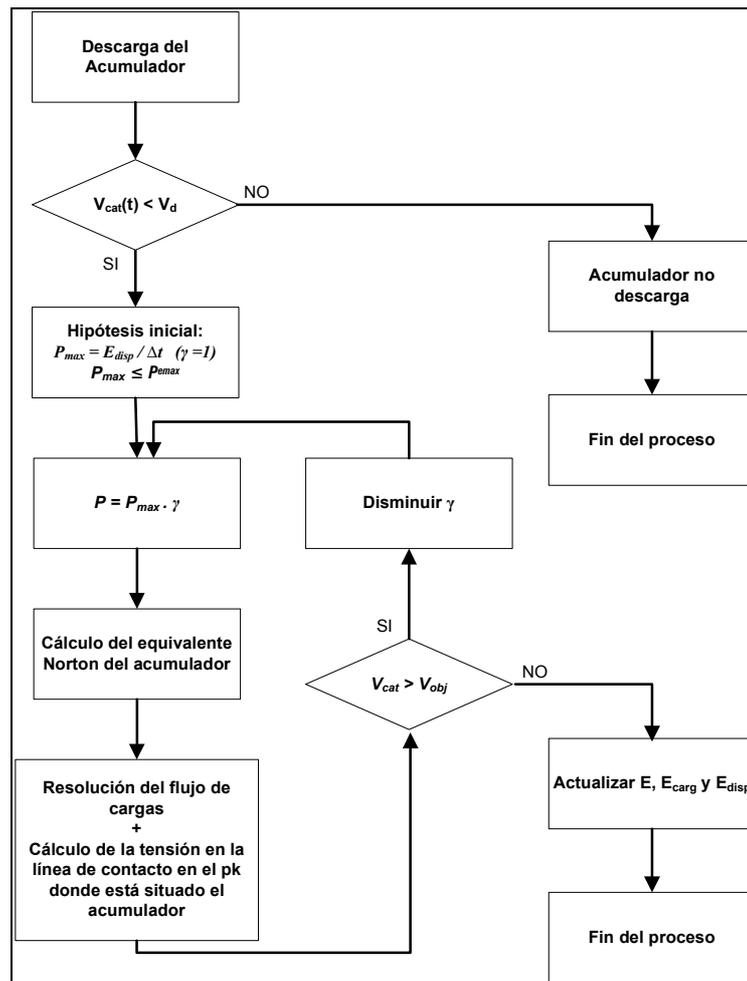


Figura 51. Diagrama del proceso de descarga del acumulador.

El valor del coeficiente γ se determina por aproximaciones sucesivas, tomando como valor inicial la unidad. Si la tensión V_{cat} donde está situado el acumulador es mayor que V_{obj} , es necesario disminuir la potencia que se va descargar, es decir es necesario disminuir γ . De este modo, se disminuirá sucesivamente el coeficiente γ , hasta alcanzar que V_{cat} sea aproximadamente igual a V_{obj} . Para aumentar la velocidad de la convergencia del sistema no lineal se emplea un método matemático acelerador de la convergencia similar al proceso de carga del acumulador, de forma que la disminución del coeficiente γ no se realiza de forma lineal, si no que es función de la diferencia entre $V_{obj} - V_{cat}$.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [48] MOHAN, Ned, UNDELAND, Tore M., ROBBINS, William P., Power Electronics. Converters, Applications and Design, Third edition, pp 79 - 120. Wiley, 2009.
- [49] ALLENBACH, Jean-Marh, CHAPAS, Pierre, COMTE, Michel, KALLER, Roger Traction Électrique, pp 39 - 55. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2008.
- [50] GUALDA, Juan A., MARTINEZ, Salvador, MARTINEZ Pedro M. Electrónica Industrial: Técnicas de potencia, pp 266 - 299. Marcombo, 1992.
- [51] CARSON J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System technology, Vol 5. pp 539 – 554. October 1926.
- [52] RULL, Joan. Transparencias del curso “Subministrament d’energia als sistemes ferroviaris”, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009-2010.
- [53] GARCÍA Alberto. Dinámica de los trenes de alta velocidad, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, febrero 2005.
- [54] RUFER Alfred. Energy Storage for Railway Systems, energy recovery and Vehicle autonomy in Europe. Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (Switzerland). International Power Electronics Conference (2010).
- [55] CHYMER, Martyn, RENFREW Alasdair and BARNES Mike. Energy storage in railway Systems. University of Manchester UK. School of Electrical and Electronic Engineering (2006).
- [56] DOMMEL, H. W. Overhead line parameters from Handbook of formulas and computer programs," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. 104, pp. 366-372, Apr. 1985.
- [57] GRANT, I. and CLAYTON R. Transmission line optimization. IEEE Trans. Power Delivery, vol. 2, pp. 520-526, Apr. 1987.
- [58] YII-SHEN Tzeng, RUAY-NAN Wu and NANMING Chen. Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations. IEEE Transactions on vehicular technology, vol 47, nº 4, November 1998.
- [59] SUZUKI T, TECH B. DC power-supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes. IEE PROC., Vol 129, Pt B., No 1, January 1982.
- [60] CHANG HAN BAE. Simulation modelling Practice and Theory. Korea Railroad Research Institute, pp 829-838. 2009.
- [61] DER MINASSIANS A, and GHAREHPETIAN G.B. Decoupled AC/DC load flow for Monte Carlo simulation of metro power system. Iranian Journal of Science & Technology, Vol 28, Nº B3. 2004.
- [62] BATTISTELLI L, CICCARELLI F, LAURIA D and PROTO D. Optimal design of DC electrified railway stationary storage system. IEEE 2009.

- [63] BOCHARNIKOV Y.V., TOBIAS A.M., ROBERTS C., HILLMANSEN S. and GOODMAN C.J.. Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways. IET Electr. Power Appl., Vol. 1, No. 5, September 2007.
- [64] DUBANTON C. Calcul approché des paramètres primaires et secondaires d'une ligne de transport. Valeurs homopolaires. E. D. F., Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches No. 1, serie B, 1969.
- [65] DÉRI A and TEVAN G. Mathematical verification of Dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation. Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik) Volume 63, Numbers 4-5, 191-198.
- [66] KIEBLING, Friedrich, PUSCHMANN, Rainer, SCHMIEDER. Contact lines for electric railways: planning, design and implementation, pp 40 - 43, Siemens, 2001.
- [67] CHAPMAN, S.J. Electric Machinery Fundamentals. Third edition, pp 127 - 134. Mc Graw Hill. 2003.
- [68] THÉVENIN L. Extension de la loi d'Ohm aux circuits électromoteurs complexes. Annales Télégraphiques (Troisième série), vol. 10, pages 222–224. 1883.
- [69] PO-TAI CHENG, CHUNG-CHUAN HOU and JIAN-SHEN LI. Design of an Auxiliary Converter for the Diode Rectifier and the Analysis of the Circulating Current. IEEE transactions on power electronics, vol. 23, no. 4, July 2008.
- [70] NOMURA J, KATAOKA A and INAGAKI A. Development of a Hybrid Inverter and a Hybrid Converter for an electric railway. Power Electronics Equipment Dept, Toshiba Mitsubishi Electric Industrial system Corporation. IEEE 2007.
- [71] BAEL C H, HAN M S, KIM Y K, CHOI C Y and JANG S J. Simulation Study of Regenerative Inverter for DC Traction Substation. Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea. 2007.
- [72] Von Meier Alexandra. Electric Power Systems: A conceptual introduction. IEEE Press. Wiley – Interscience, pages 168 - 175. 2006.
- [73] CHECA Luis María. Líneas de transporte de energía. Marcombo Boixareu Editores, páginas 26 – 28. 1988.

CAPITULO 4. MODELIZACIÓN DE LOS SISTEMAS COMPLETOS

1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo 2 se ha presentado la arquitectura de los principales sistemas de electrificación ferroviaria, tanto en corriente continua como en corriente alterna, mientras que en el capítulo 3 se han presentado los modelos de los elementos simples existentes en los distintos sistemas de electrificación ferroviaria.

En este cuarto capítulo se presenta la modelización de las redes completas a partir del ensamblaje de los elementos simples vistos en el capítulo 3.

2. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO

2.1. Planteamiento de las ecuaciones de los elementos simples

Para el planteamiento de las ecuaciones de los elementos simples se utilizará el método de los nodos, en concreto ‘Modified Nodal Analysis’ (MNA).

El método MNA fue formulado a mediados de los años 70 [83], y es extensamente utilizado en programas de simulación para la resolución de sistemas eléctricos de potencia. MNA es una extensión del método de los nodos clásico [84] que permite el estudio de circuitos eléctricos con acoplamientos entre ramas o con fuentes de tensión controladas.

La formulación matricial del método MNA es la siguiente [77]:

$$\left[\begin{array}{c|c} Y_N & A_T \\ \hline A_T^t & -Z_T \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} V \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_N \\ U_T \end{bmatrix}$$

Donde:

- Y_N es la submatriz de admitancias de las ramas del sistema con equivalente Norton.
- A_T es la submatriz de incidencias de las ramas del sistema sin equivalente Norton.
- Z_T es la submatriz de impedancias de las ramas sin equivalente Norton, como por ejemplo ramas con acoplamientos magnéticos o capacitivos.
- V es el subvector de las tensiones de nodo.
- I_T es el subvector de corrientes de las ramas sin equivalente Norton.
- J_N es el subvector de las excitaciones pertenecientes a las ramas con equivalente Norton.
- U_T es el subvector de las diferencias de potencial en los extremos de las ramas sin equivalente Norton.

Así, el sistema anterior puede desarrollarse en las dos siguientes ecuaciones matriciales:

$$[Y_N] \cdot [V] + [A_T] \cdot [I_T] = [J_N]$$

$$[A_T^t] \cdot [V] - [Z_T] \cdot [I_T] = [U_T]$$

Si la matriz $[Z_T]$ no es singular, entonces existirá la matriz $[Z_T]^{-1}$. Y multiplicando la segunda ecuación matricial anterior por $[Z_T]^{-1}$.

$$[Z_T]^{-1} \cdot [A_T^t] \cdot [V] - [Z_T]^{-1} \cdot [Z_T] \cdot [I_T] = [Z_T]^{-1} \cdot [U_T]$$

Que puede simplificarse en:

$$[I_T] = [Z_T]^{-1} \cdot [A_T^t] \cdot [V] - [Z_T]^{-1} \cdot [U_T]$$

Que sustituyendo $[I_T]$ en la primera ecuación matricial, se obtiene:

$$[Y_N] \cdot [V] + [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [A_T^t] \cdot [V] - [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [U_T] = [J_N]$$

Es decir:

$$[Y_N] \cdot [V] + [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [A_T^t] \cdot [V] = [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [U_T] + [J_N]$$

Y como:

$$\begin{aligned} [Y_T] &= [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [A_T^t] \\ [J_T] &= [A_T] \cdot [Z_T]^{-1} \cdot [U_T] \end{aligned}$$

Se obtiene finalmente:

$$[Y_N] \cdot [V] + [Y_T] \cdot [V] = [J_T] + [J_N]$$

Que es equivalente a:

$$\{ [Y_N] + [Y_T] \} \cdot [V] = [J_T] + [J_N]$$

Es decir:

$$[Y] \cdot [V] = [J]$$

Donde:

- $[Y] = [Y_N] + [Y_T]$: es la matriz de admitancias del elemento simple.
- $[V]$: es el vector de las tensiones de nodo, entre los cuales esta conectado el elemento simple.
- $[J] = [J_T] + [J_N]$: es el vector de las excitaciones del elemento simple.

En el capítulo 3 se ha desarrollado el cálculo de las matrices de admitancias $[Y]$ de los distintos elementos simples existentes en las redes ferroviarias, tanto en electrificaciones en corriente continua como en corriente alterna.

2.2. Planteamiento de las ecuaciones de los sistemas completos

Si se analiza el circuito siguiente formado por dos elementos simples a partir de los dos sistemas ecuaciones matriciales vistas en el capítulo anterior.

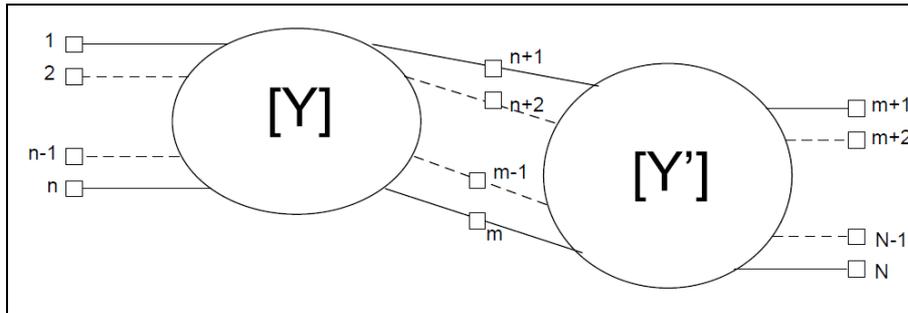


Figura 52. Unión de dos elementos simples

Para el primer circuito se puede plantear la siguiente ecuación matricial:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & \dots & y_{1n} & | & y_{1n+1} & \dots & y_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & \dots & y_{nm} & | & y_{nn+1} & \dots & y_{nm} \\ \hline y_{n+11} & \dots & y_{n+1n} & | & y_{n+1n+1} & \dots & y_{n+1m} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ y_{m1} & \dots & y_{mm} & | & y_{mn+1} & \dots & y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_n \\ V_{n+1} \\ \dots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 \\ \dots \\ J_n \\ J_{n+1} \\ \dots \\ J_m \end{bmatrix}$$

Y para el segundo circuito:

$$\begin{bmatrix} y'_{n+1n+1} & \dots & y'_{n+1m} & | & y'_{n+1m+1} & \dots & y'_{n+1N} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ y'_{nm+1} & \dots & y'_{nm} & | & y'_{mm+1} & \dots & y'_{mN} \\ \hline y'_{m+1n+1} & \dots & y'_{m+1m} & | & y'_{m+1m+1} & \dots & y'_{m+1N} \\ \dots & \dots & \dots & | & \dots & \dots & \dots \\ y'_{Nn+1} & \dots & y'_{Nm} & | & y'_{Nm+1} & \dots & y'_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ \dots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J'_{n+1} \\ \dots \\ J'_m \\ J'_{m+1} \\ \dots \\ J'_N \end{bmatrix}$$

A partir de las dos ecuaciones matriciales se puede obtener la ecuación matricial del sistema completo, es decir:

2.3. Resolución del sistema de ecuaciones

En el apartado anterior se ha obtenido la ecuación del sistema completo. En una primera aproximación se supondrá que se trata de un sistema lineal, pero como se verá posteriormente debido a la existencia de algunos elementos no lineales, el sistema de ecuaciones se transformará en un sistema no lineal.

Así, la resolución del sistema sería:

$$[V] = [Y]^{-1} \cdot [J]$$

Calcular la matriz inversa de $[Y]$, para multiplicarla a continuación por el vector $[J]$ es una forma de obtener el vector de tensiones de nodo, sin embargo, existen métodos mucho más eficientes de resolver este tipo de sistemas [74]. De hecho prácticamente todos los simuladores de circuitos eléctricos utilizan métodos directos para obtener el vector de tensiones de nodo [86]. Los algoritmos más habituales para obtener el vector de tensiones de nodo son la eliminación Gaussiana [85] y la Factorización LU [87] [88] [89].

La utilización de un método de resolución de los sistemas de ecuaciones lineales óptimo será clave para la resolución de los sistemas no lineales, pues como se verá posteriormente, la resolución de los sistemas no lineales se basará en la resolución sucesiva de sistemas linealizados.

2.3.1. Método de la Eliminación Gaussiana

En algebra lineal, la eliminación Gaussiana es un algoritmo para la resolución de sistemas lineales de ecuaciones y para el cálculo de la matriz inversa de una matriz cuadrada invertible.

A través operaciones sencillas de columnas se consigue la reducción de la matriz inicial a una matriz triangular. Así, el vector de las tensiones de nodo se obtiene mediante la reducción del sistema inicial, por otro equivalente a través de una sucesión de pasos en él que el sistema transformado tiene cada vez una incógnita menos que la anterior, resultando finalmente una matriz resultante de forma escalonada.

El tiempo de computación para resolver un sistema de n ecuaciones aplicando el algoritmo de la Eliminación Gaussiana es proporcional a:

$$t_c = k \left(\frac{n^4}{3} + \frac{n^3}{2} \right)$$

2.3.2. Método de la Factorización LU

En el álgebra lineal, la factorización o descomposición LU (del inglés Lower-Upper) es una forma de factorización de una matriz como el producto de una matriz triangular inferior y una superior.

Esta descomposición se usa en el análisis numérico para resolver sistemas de ecuaciones (más eficientemente) o encontrar las matrices inversas.

Este método se basa en la factorización de la matriz $[Y]$ por el producto de una matriz triangular inferior $[L]$ y una triangular superior $[U]$:

$$[Y] = [L] \cdot [U] = \begin{bmatrix} & 0 \\ L & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix}$$

Así, el sistema quedará como:

$$[L] \cdot [U] \cdot [V] = [J]$$

Si:

$$[X] = [U] \cdot [V]$$

Se obtiene:

$$[L] \cdot [X] = [J]$$

Al ser $[L]$ una matriz triangular, el sistema se puede resolver muy fácilmente, obteniéndose el vector $[X]$, y posteriormente $[V]$ a partir de la ecuación matricial siguiente, donde $[U]$ también es una matriz triangular.

$$[U] \cdot [V] = [X]$$

El tiempo de computación para resolver un sistema de n ecuaciones aplicando el algoritmo de la descomposición LU es proporcional a:

$$t_c = k \left(\frac{4n^3}{3} \right)$$

Así, el ratio entre los tiempos de computación para la aplicación del algoritmo de la eliminación Gaussiana respecto a la aplicación del algoritmo de la descomposición LU es $n/4$.

2.4. Modificación de la matriz de admitancias $[Y]$

Hasta ahora se ha considerado el análisis de una red ferroviaria con una tipología dada por unos elementos invariantes para el cálculo de la matriz de admitancias. En la práctica, algunos elementos de la red, como por ejemplo las subestaciones en corriente continua, presentan dos modelos distintos dependiendo de las condiciones de funcionamiento, con implicaciones directas sobre la matriz de admitancias $[Y]$.

Para evitar tener que volver a resolver de nuevo el sistema de ecuaciones matriciales cuando la tipología de la red ha variado, a través de la aplicación de la fórmula de Woodbury [90], se puede calcular el nuevo sistema de ecuaciones a partir de los resultados obtenidos inicialmente.

2.4.1. Incorporación de una rama pasiva entre dos nodos

Dada la red original con los nodos k y m no conectados, si se supone que el sistema siguiente se ha resuelto [74], entonces:

$$[Y] \cdot [V] = [J] \rightarrow [V] = [Y]^{-1} \cdot [J]$$

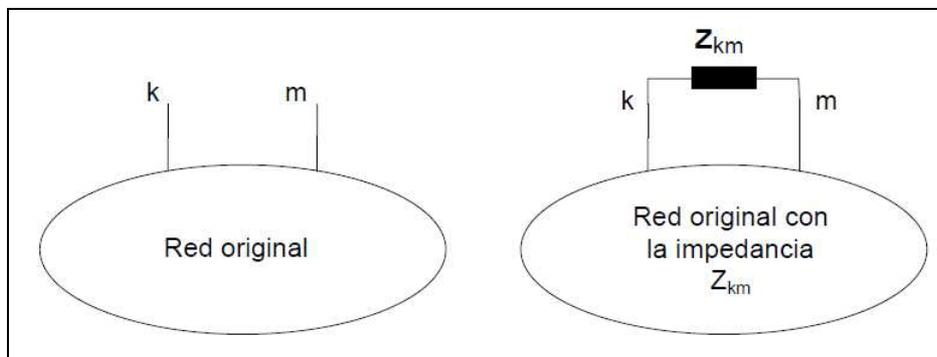


Figura 53. Red con una nueva rama entre los nodos k y m .

Así, la variación de la matriz de admitancias $[Y]$ será:

$$[Y] = [Y] + [\delta Y] = [Y] + y_{km} \cdot [A] \cdot [A]^T$$

Donde $[A]$ es la matriz de incidencias de la rama k - m . Si se aplica la fórmula de Woodbury, entonces:

$$[V] + [\delta V] = ([Y] + [\delta Y])^{-1} \cdot [J] = ([Y] + y_{km} \cdot [A] \cdot [A]^T)^{-1} \cdot [J]$$

Multiplicando, se obtiene:

$$[V] + [\delta V] = [Y]^{-1} \cdot [J] - [Y]^{-1} \cdot [A] \cdot (z_{km} + [A]^T \cdot [Y]^{-1} \cdot [A])^{-1} \cdot [A]^T \cdot [Y]^{-1} \cdot [J]$$

Es decir:

$$[\delta V] = -[Y]^{-1} \cdot [A] \cdot (z_{km} + [A]^T \cdot [Y]^{-1} \cdot [A])^{-1} \cdot [A]^T \cdot [Y]^{-1} \cdot [J]$$

$$[\delta V] = -[Y]^{-1} \cdot [A] \cdot (z_{km} + [A]^T \cdot [Y]^{-1} \cdot [A])^{-1} \cdot [A]^T \cdot [V]$$

Así, a partir de los resultados de la red inicial se pueden obtener los nuevos resultados con la nueva red después de añadir la rama z_{km} entre los nudos k y m .

2.4.2. Eliminación de una rama pasiva entre dos nodos

Dada la red original con los nodos k y m conectados con una impedancia z_{km} , si se supone que en la red final se ha eliminado la impedancia z_{km} . El vector de tensiones de nodo del nuevo sistema se obtendría del inicial siguiendo el mismo desarrollo que el punto anterior, pero teniendo en cuenta que al eliminarse la rama se consideraría en las fórmulas anteriores la impedancia z_{km} con signo negativo.

2.4.3. Incorporación o eliminación de más de una rama

El cálculo del nuevo vector de tensiones de nodo puede obtenerse igualmente a partir de la red primitiva siguiendo el mismo procedimiento anterior. Así:

$$[Y] = [Y] + [\delta Y] = [Y] + [Z]^{-1} \cdot [A] \cdot [A]^T$$

Donde ahora $[Z]$ es la matriz de impedancias de las ramas que se añaden o eliminan de la red, y cuya dimensión será de $n \times n$, siendo n el número total de ramas que se incorporan o eliminan.

2.5. Cálculo del vector de corrientes entre dos nodos

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones matriciales y obtenido el vector de tensiones de nodo, la obtención de las corrientes longitudinales y transversales entre los nodos de los buses k y n se puede obtener directamente a través de las expresiones siguientes [75]:

$$[I_l] = [Z]^{-1} \cdot ([V_k] - [V_n])$$

$$[I_{tk}] = [Y_k] \cdot [V_k]$$

$$[I_m] = [Y_n] \cdot [V_n]$$

Donde:

- $[V_k]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus k .
- $[V_n]$: es el vector de tensiones de todos los nodos representados por el bus n .
- $[Z]$: es la matriz de impedancias entre los buses k y n .
- $[Y_k]$ y $[Y_n]$: son las matrices de admitancias en los buses k y n respectivamente.
- $[I]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de impedancias $[Z]$ entre los buses k y n .
- $[I_{tk}]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de admitancias $[Y_k]$ entre el bus k y tierra.
- $[I_m]$: es el vector de corrientes que circulan a través de la matriz de admitancias $[Y_n]$ entre el bus n y tierra.

2.6. Cálculo de las intensidades de cortocircuito.

Las intensidades de cortocircuito desde cualquier nodo del circuito a tierra, o entre dos nodos cualesquiera de la red pueden calcularse a partir del teorema de Thevenin [76].

La intensidad de cortocircuito será:

$$I_{cc} = \frac{U_{TH}}{Z_{TH}}$$

Donde:

- I_{cc} : es la intensidad de cortocircuito.
- U_{TH} : es la tensión Thevenin.
- Z_{TH} : es la impedancia Thevenin.

Para el cálculo de la tensión e impedancia Thevenin:

$$U_{TH} = [A]^T \cdot [Y^{-1}] \cdot [J]$$

$$Z_{TH} = [A]^T \cdot [Y^{-1}] \cdot [A]$$

Donde:

- $[A]$: es el vector de incidencias de la rama del cortocircuito.

- $[Y]$: es la matriz de admitancias del sistema.
- $[J]$: es el vector de las excitaciones del sistema.

Si $[Y^{-1}] = [Z]$, entonces:

- Si el cortocircuito es entre el nodo p y tierra: $Z_{TH}(p, tierra) = Z_{pp}$.
- Si el cortocircuito es entre el nodo p y el nodo q : $Z_{TH}(p, q) = Z_{pp} + Z_{qq} - Z_{pq} - Z_{qp}$

2.7. Cálculo de los desequilibrios

La alimentación de los sistemas de electrificación en corriente alterna a frecuencia industrial se realiza en corriente alterna monofásica. Sin embargo las subestaciones se alimentan de redes trifásicas de alta tensión. Para evitar que los desequilibrios introducidos en la red trifásica por los altos consumos de los trenes, las subestaciones de tracción suelen estar conectadas en redes con una potencia de cortocircuito elevada.

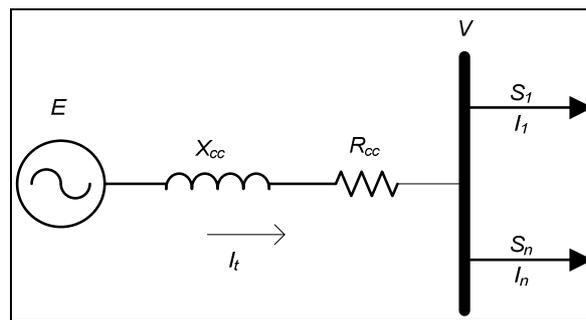


Figura 54. Esquema de la red de alta tensión.

Si en un mismo nodo se conectan diversas cargas monofásicas: S_1, S_2, \dots, S_n ; en una red con una potencia de cortocircuito S_{cc} , entonces, la impedancia de cortocircuito se obtiene como:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} = \frac{E^2}{S_{cc}}$$

Donde:

- E es la tensión del nudo *slack* de la red.
- Z_{cc} es la impedancia de cortocircuito de la red.
- S_{cc} es la potencia de cortocircuito de la red.

Y por lo tanto se pueden plantear las dos siguientes ecuaciones vectoriales:

$$[I_t] = [I_1] + [I_2] + \dots + [I_n] = \left(\frac{S_1}{V}\right)^* + \left(\frac{S_2}{V}\right)^* + \dots + \left(\frac{S_n}{V}\right)^*$$

$$[E] = [Z][I_t] + [V]$$

Donde:

- $[I_t]$ es el vector de corrientes, correspondiente a la suma de los consumos monofásicos.
- $[I_1], [I_2], \dots, [I_n]$ son los vectores de corriente de los consumos monofásicos.
- $[E]$ es el vector de las tensiones del nodo *slack*.
- $[Z]$ es la matriz de impedancias, con Z_{cc} en la diagonal, y los demás valores nulos.
- $[V]$ es el vector de las tensiones del nodo de conexión.

A partir de las ecuaciones anteriores, se determina el vector $[V]$.

Por último para determinar el desequilibrio, el vector $[V]$ se descompone en su componente directa V_1 e inversa V_2 a través de la transformada Fortescue [93].

Entonces, el desequilibrio de tensiones en el nodo se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$D = \frac{V_2}{V_1} \times 100$$

Siendo:

- D es el desequilibrio en %.
- V_1 es la componente directa de la tensión en el nodo.
- V_2 es la componente inversa de la tensión en el nodo.

3. SISTEMAS ELECTRIFICADOS EN CORRIENTE ALTERNA

3.1. Representación de una línea

En una línea electrificada en corriente alterna se pueden encontrar los siguientes elementos simples:

- Alimentaciones en alta tensión.
- Subestaciones de tracción.
- Catenaria y circuitos de retorno.
- Centros de autotransformación.
- Transformadores Booster.
- Conexiones auxiliares: puestas en paralelo, alimentaciones, etc
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Material rodante.

A continuación a través de un ejemplo se muestra el procedimiento para la modelización de una línea de 2x25 kV. La primera figura corresponde al esquema del tramo a modelizar, formado por una alimentación en alta tensión, una subestación, la línea de contacto mixta, los autotransformadores y por último un tren.

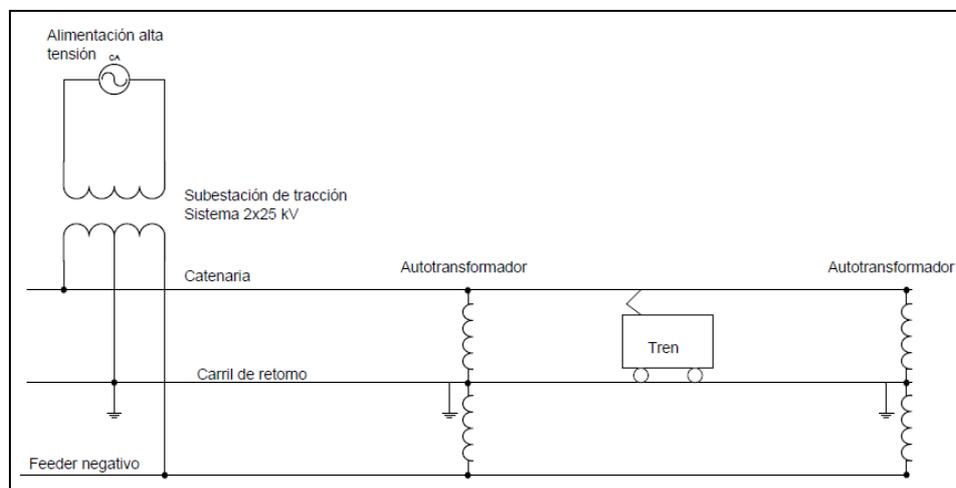


Figura 55. Esquema del tramo a modelizar.

A partir de la modelización de cada uno de los elementos simples anteriores, se construye la red completa.

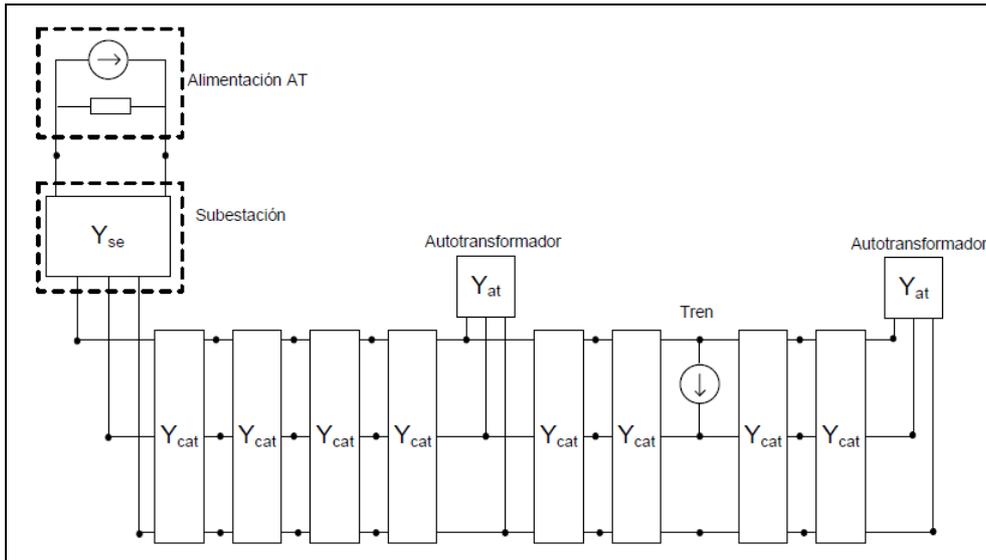


Figura 56. **Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.**

La línea de contacto se descompone en celdas finitas de una longitud determinada, la influencia de la longitud de estas celdas en los resultados obtenidos se presentará en este mismo capítulo más adelante.

El último paso consiste en numerar los nodos.

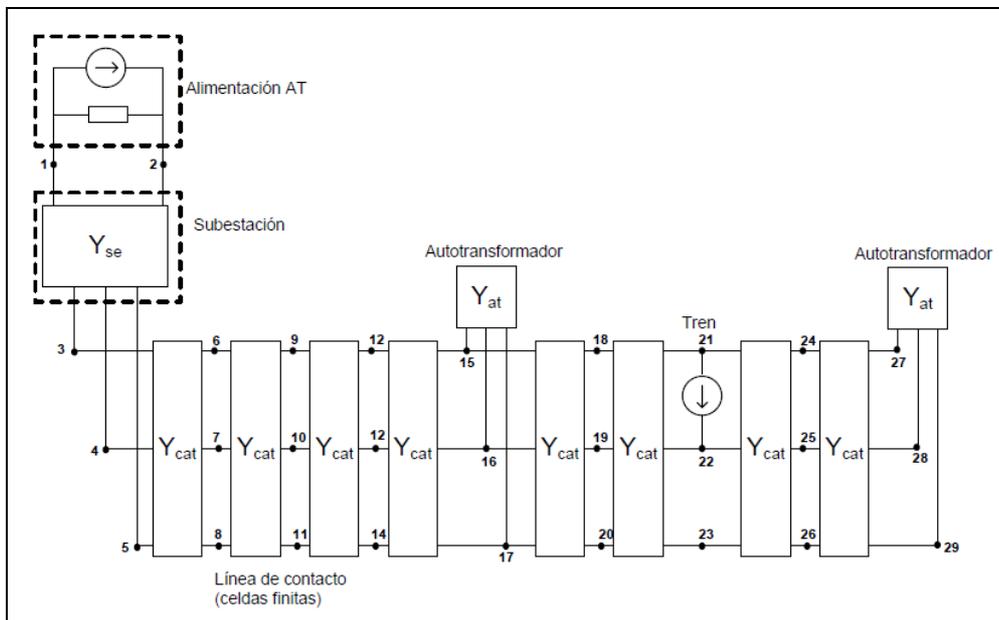


Figura 57. **Modelización del sistema completo: numeración de los nodos.**

3.2. Planteamiento de las ecuaciones

En la siguiente tabla se muestra los datos de partida para el cálculo de la matriz de admitancias $[Y]$ y el vector $[J]$.

Matriz de admitancias $[Y]$	Alimentaciones de alta tensión. Subestaciones de tracción. La catenaria y circuito de retorno. Centros de autotransformación. Transformadores Booster. Conexiones auxiliares.
Vector de excitaciones $[J]$	Alimentaciones de alta tensión. Material rodante. Sistemas de almacenamiento de energía.

Tabla 15. Datos de partida de $[Y]$ y $[J]$.

Siguiendo con el ejemplo anterior, en primer lugar se calcularía la matriz de admitancias $[Y]$ de la red completa, a partir de z_{th} de la alimentación en alta tensión, Y_{se} , Y_{at} y Y_{cat} .

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_{21,21} & y_{21,22} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & y_{22,21} & y_{22,22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & y_{29,29} \end{bmatrix}$$

Y el vector de excitaciones $[J]$, se obtiene a partir de la modelización de la alimentación en alta tensión y el tren.

$$\begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ y_{2,1} & y_{2,2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & y_{21,21} & y_{21,22} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & y_{22,21} & y_{22,22} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & y_{29,29} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_{21} \\ V_{22} \\ \dots \\ V_{29} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_{AT} \\ J_{AT} \\ 0 \\ -J_{tren} \\ J_{tren} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donde J_{tren} es una fuente de corriente controlada y dependerá de la tensión existente entre los nodos 21 y 22.

3.3. Algoritmo de resolución de las ecuaciones

Una vez planteado el sistema a través de sus ecuaciones matriciales:

$$[Y] \cdot [V] = [J]$$

Donde la matriz de admitancias es conocida y calculada según las expresiones indicadas en los apartados anteriores, $[V]$ es el vector de las tensiones de los nodos cuyos valores son desconocidos y $[J]$ es el vector de las excitaciones del sistema cuyos valores son los siguientes:

- Nodos con alimentación en alta tensión, como V_{TH} es conocido al tratarse del nodo *slack*.

$$J_{AT} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}}$$

- Nodos con trenes traccionando, en este caso V_1 y V_2 no son conocidos.

$$J_{tren} = \left(\frac{S}{V_1 - V_2} \right)^*$$

- Nodos con trenes regenerando, con α , V_1 y V_2 no conocidos.

$$J_{tren} = \left(\frac{\alpha \cdot S_{reg_{max}}}{V_1 - V_2} \right)^*$$

- Nodos con acumuladores, con P , V_1 y V_2 desconocidos.

$$J_{acumul} = \left(\frac{P}{V_1 - V_2} \right)^*$$

Como puede verse, el sistema de ecuaciones matriciales obtenido no es lineal puesto que no verifica el principio de la superposición. También existe la dificultad de que en los nodos donde hay trenes regenerando, la potencia inyectada estará limitada para que la tensión entre pantógrafo y el carril, ya que no puede superar la tensión máxima admisible del sistema de electrificación.

Así pues, para la resolución del sistema se propone un método iterativo, estimando inicialmente un vector de tensiones de nodo $[V]_i$, para resolver el sistema y obtener el vector de tensiones de nodo $[V]_{i+1}$, si la diferencia entre ambos vectores es mayor que un error ε , se volvería a repetir la resolución tomando ahora $[V]_{i+1}$ como el vector de tensiones de partida, obteniéndose $[V]_{i+2}$. Estas iteraciones se repetirían hasta que las diferencias entre las tensiones en los nodos supuestas y calculadas fuesen menores que un error admisible ε .

Así pues, los pasos a seguir para la resolución del sistema serían los siguientes:

1 → Cálculo de la matriz de admitancias global del sistema (Y) obtenida a partir de las matrices de admitancias de los elementos simples: subestación, catenaria por unidad de longitud, etc.

2 → Factorización LU de la matriz Y .

3 → Determinar los nodos en los que se sitúan los trenes a partir de la malla de tráfico.

4 → Calcular las J correspondientes a los trenes, a partir de una primera aproximación de las tensiones de los nodos $[V]_i$.

5 → Resolución del sistema de ecuaciones.

$$[Y] \cdot [V] = [L] \cdot [U] \cdot [V] = [J]$$

Primero, se resuelve fácilmente el sistema:

$$[L] \cdot [X] = [J]$$

Para obtener $[X]$, y después:

$$[U] \cdot [V] = [X]$$

Obteniendo finalmente el vector de tensiones de nodo $[V]_{i+1}$.

6 → Comparar las tensiones de nodo $[V]_i$ y $[V]_{i+1}$, si su diferencia no es menor que un error ε , entonces se repetiría el paso 4, calculando el vector $[J]$ a partir de $[V]_{i+1}$, y a continuación el paso 5, hasta que el error entre los vectores $[V]_i$ y $[V]_{i+1}$, sea menor que el error admisible.

7 → Dependiendo de las tensiones en los nodos de conexión de los acumuladores, activar la carga o descarga de energía acumulada, y por lo tanto actualizando el vector $[J]$.

8 → Verificar que la diferencia de potencial en los nodos en que están situados los trenes regenerando no supere su valor máximo normativo. En caso de que no se cumpla se volvería a recalcular los vectores $[J]$ correspondientes con potencias de regeneración admisibles.

9 → La última comprobación consiste en verificar las prestaciones de los distintos trenes que hay en la línea de acuerdo con la curva del esfuerzo de tracción en función de la tensión en el tren. En caso de que las suposiciones iniciales realizadas no fuesen correctas se repetiría el proceso desde el paso 3.

En la siguiente figura se muestra el algoritmo de resolución propuesto:

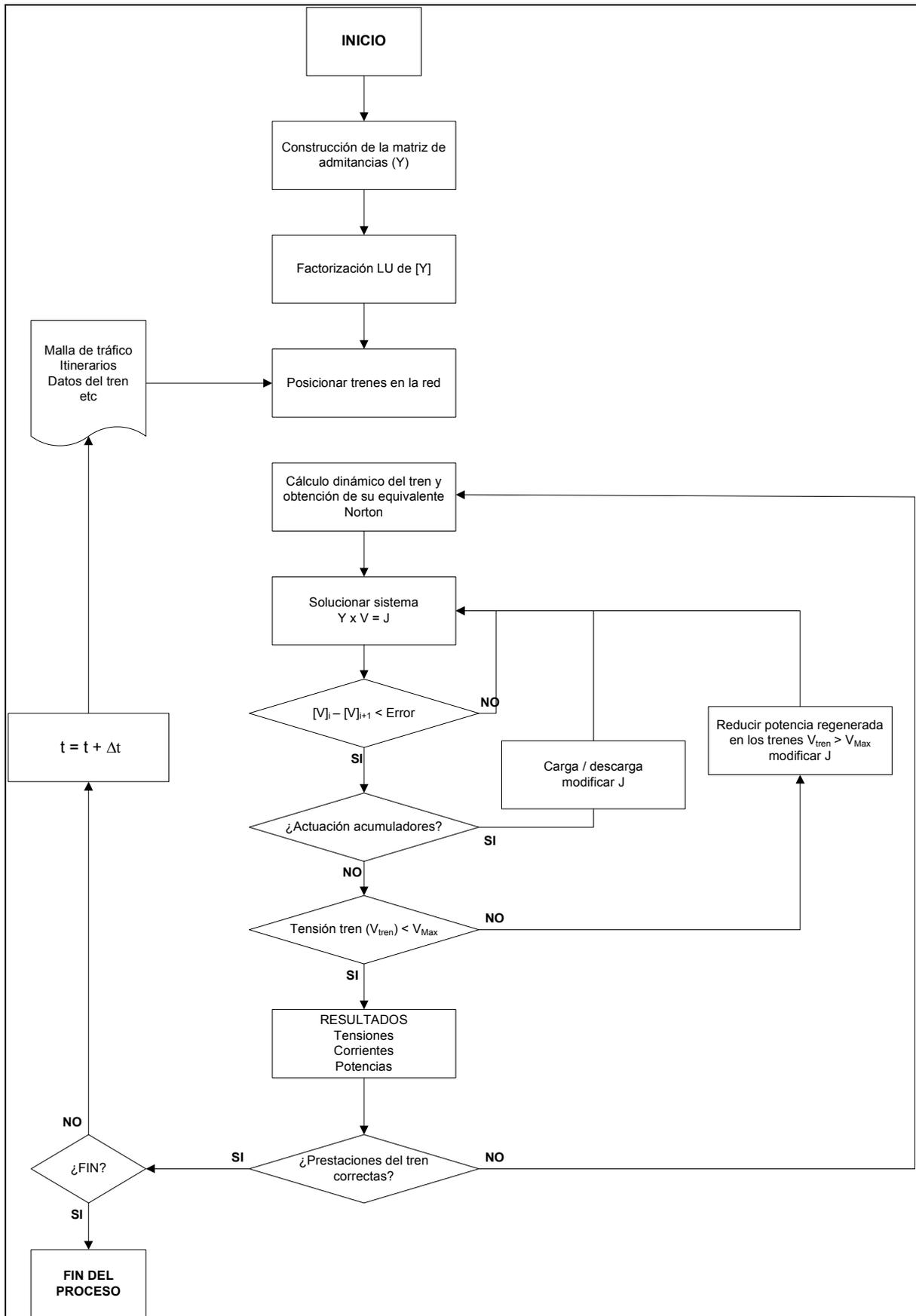


Figura 58. Algoritmo de resolución de una línea ferroviaria electrificada en corriente alterna

4. SISTEMAS ELECTRIFICADOS EN CORRIENTE CONTINUA

4.1. Representación de una línea

En las líneas electrificadas en corriente continua se pueden encontrar los siguientes elementos:

- Alimentaciones de alta tensión.
- Subestaciones de tracción, que podrán ser convencionales o reversibles.
- La línea de contacto y circuitos de retorno.
- Conexiones auxiliares: puestas en paralelo, alimentaciones, etc.
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Material rodante.

En este sistema de electrificación, las subestaciones de tracción, ya sean convencionales o reversibles, presentan dos modelizaciones diferentes, dependiendo de las condiciones de funcionamiento. Así las subestaciones convencionales tendrán una modelización en modo de conducción y otra para el modo de bloqueo, de la misma forma que la modelización en modo rectificación será distinta a la modelización en modo inversión en las subestaciones reversibles.

A continuación a través de un ejemplo, se muestra el procedimiento para la modelización de una línea ferroviaria electrificada en corriente continua.

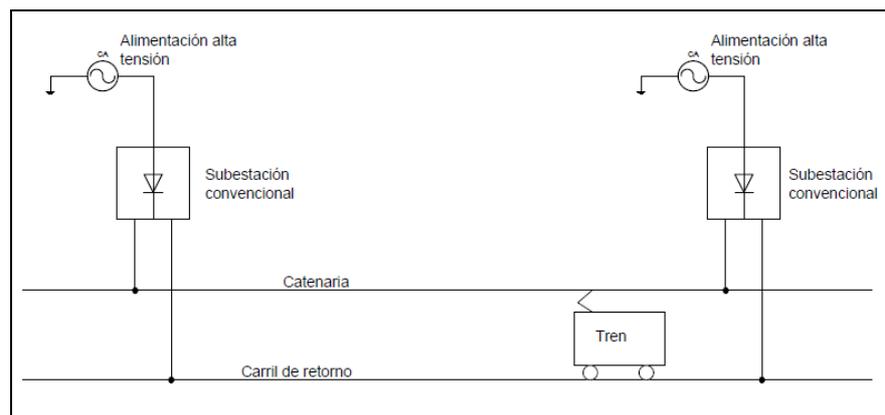


Figura 59. Esquema del tramo a modelizar.

A partir de la modelización de cada uno de los elementos simples anteriores, se construye la red completa.

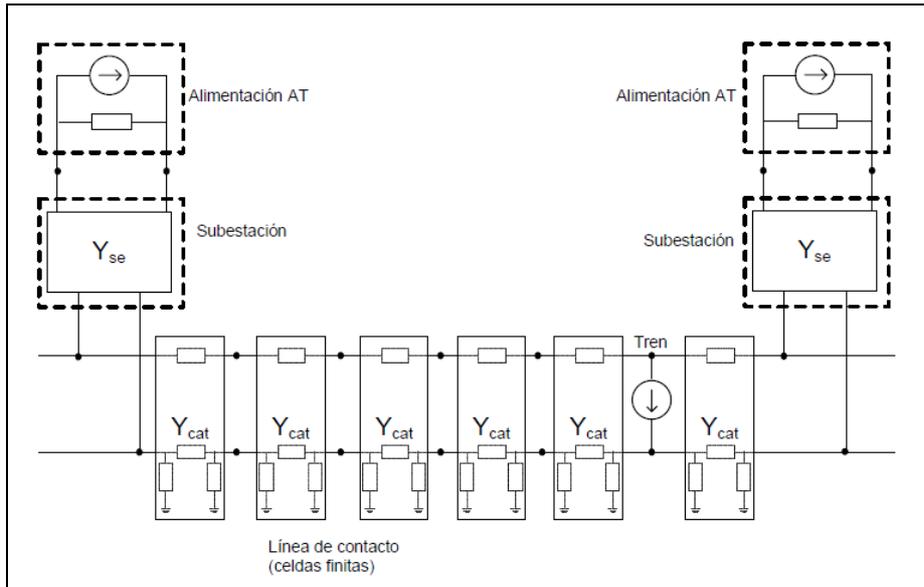


Figura 60. **Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.**

En este caso, también la línea de contacto se descompone en celdas finitas de una longitud determinada.

El último paso consiste en numerar los nodos.

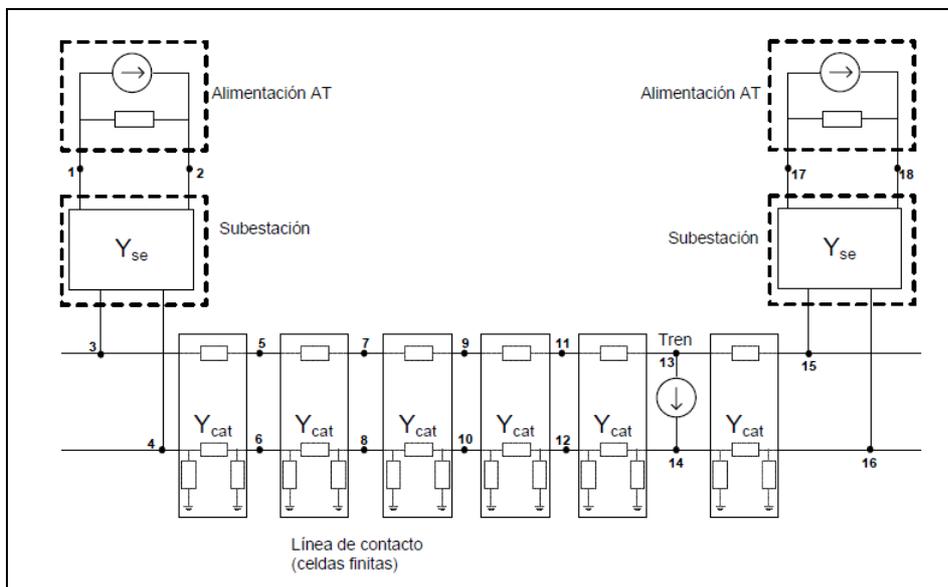


Figura 61. **Modelización del sistema completo: numeración de los nodos.**

4.2. Planteamiento de las ecuaciones

En la siguiente tabla se muestran los datos de partida para el cálculo de la matriz de admitancias $[Y]$ y el vector $[J]$.

Matriz de admitancias $[Y]$	Alimentaciones de alta tensión. Subestaciones de tracción. La catenaria. Conexiones auxiliares.
Vector de excitaciones $[J]$	Alimentaciones de alta tensión. Material rodante. Sistemas de almacenamiento de energía.

Tabla 16. Datos de partida para el cálculo de $[Y]$ y $[J]$

Siguiendo con el ejemplo anterior, en primer lugar se calcularía la matriz de admitancias $[Y]$ de la red completa, a partir de z_{th} de la alimentación en alta tensión, Y_{se} y Y_{cat} .

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{2,1} & y_{2,2} & y_{2,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_{3,1} & y_{3,2} & y_{3,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & y_{12,12} & 0 & y_{12,14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & y_{13,13} & 0 & y_{13,15} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & y_{14,12} & 0 & y_{14,14} & 0 & y_{14,16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & y_{15,13} & 0 & y_{15,15} & 0 & y_{15,17} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & y_{16,14} & 0 & y_{16,16} & y_{16,17} & y_{16,18} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & y_{17,15} & y_{17,16} & y_{17,17} & y_{17,18} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{18,16} & y_{18,17} & y_{18,18} \end{bmatrix}$$

Y el vector de excitaciones $[J]$, se obtiene a partir de la modelización de las alimentaciones en alta tensión y el tren.

$$\begin{bmatrix}
 y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 y_{2,1} & y_{2,2} & y_{2,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 y_{3,1} & y_{3,2} & y_{3,3} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \dots & \dots \\
 0 & 0 & 0 & \dots & y_{12,12} & 0 & y_{12,14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & y_{13,13} & 0 & y_{13,15} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & y_{14,12} & 0 & y_{14,14} & 0 & y_{14,16} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & y_{15,13} & 0 & y_{15,15} & 0 & y_{15,17} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & y_{16,14} & 0 & y_{16,16} & y_{16,17} & y_{16,18} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & y_{17,15} & y_{17,16} & y_{17,17} & y_{17,18} \\
 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & y_{18,16} & y_{18,17} & y_{18,18}
 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_{12} \\ V_{13} \\ V_{14} \\ V_{15} \\ V_{16} \\ V_{17} \\ V_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -J_{AT1} \\ J_{AT2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -J_{tren} \\ J_{tren} \\ 0 \\ 0 \\ -J_{AT2} \\ J_{AT2} \end{bmatrix}$$

Donde J_{tren} es una fuente de corriente controlada y dependerá de la tensión existente entre los nodos 13 y 14. Y las matrices de admitancias de la subestaciones dependerán del modo de funcionamiento de la subestación.

4.3. Algoritmo de resolución de las ecuaciones

Una vez planteado el sistema a través de sus ecuaciones matriciales:

$$[Y] \cdot [V] = [J]$$

Donde la matriz de admitancias es conocida y calculada según las expresiones indicadas en los apartados anteriores, $[V]$ es el vector de las tensiones de los nodos cuyos valores son desconocidos y $[J]$ es el vector de las excitaciones del sistema cuyos valores son los siguientes:

- Nodos con alimentación en alta tensión, como V_{TH} es conocido al tratarse del nodo slack.

$$J_{AT} = \frac{V_{TH}}{Z_{TH}}$$

- Nodos con trenes traccionando, con V_1 y V_2 no conocidos.

$$J_{tren} = \left(\frac{S}{V_1 - V_2} \right)^*$$

- Nodos con trenes regenerando, en este caso α , V_1 y V_2 no son conocidos.

$$J_{tren} = \left(\frac{\alpha \cdot S_{reg_{max}}}{V_1 - V_2} \right)^*$$

- Nodos con acumuladores, con P , V_1 y V_2 desconocidos.

$$J_{acumul} = \left(\frac{P}{V_1 - V_2} \right)^*$$

En este caso tampoco el sistema de ecuaciones matriciales obtenido es lineal, pues tampoco se verifica el principio de la superposición. También existe la dificultad de que en los nodos donde hay trenes regenerando, la potencia inyectada estará limitada para que la tensión entre pantógrafo y el carril, ya que no puede superar la tensión máxima admisible del sistema de electrificación.

Así pues, para la resolución del sistema se propone un método iterativo, estimando inicialmente un vector de tensiones de nodo $[V]_i$, para resolver el sistema y obtener el vector de tensiones de nodo $[V]_{i+1}$. Si la diferencia entre ambos vectores fuera mayor que un error ε , se volvería a repetir la resolución tomando ahora $[V]_{i+1}$ como el vector de tensiones de partida, obteniéndose $[V]_{i+2}$. Estas iteraciones se repetirían hasta que las diferencias entre las tensiones en los nodos supuestas y calculadas fuesen menores que un error admisible ε .

Así pues, los pasos a seguir para la resolución del sistema serían los siguientes:

- 1 → Cálculo de la matriz de admitancias global del sistema $[Y]$ obtenida a partir de las matrices de admitancias de los elementos simples: subestación, catenaria por unidad de longitud, etc.
- 2 → Factorización LU de la matriz $[Y]$.
- 3 → Determinar los nodos en los que se sitúan los trenes a partir de la malla de tráfico.
- 4 → Calcular las $[J]$ correspondientes a los trenes, a partir de una primera aproximación de las tensiones de los nodos $[V]_i$.
- 5 → Resolución del sistema de ecuaciones.

$$[Y] \cdot [V] = [L] \cdot [U] \cdot [V] = [J]$$

Primero, se resuelve el sistema:

$$[L] \cdot [X] = [J]$$

Para obtener $[X]$, y después:

$$[U] \cdot [V] = [X]$$

Obteniendo finalmente el vector de tensiones de nodo $[V]_{i+1}$.

6 → Comparar las tensiones de nodo $[V]_i$ y $[V]_{i+1}$, si su diferencia no es menor que un error ε , entonces se repetiría el paso 4, calculando el vector $[J]$ a partir de $[V]_{i+1}$, y a continuación el paso 5, hasta que el error entre los vectores $[V]_i$ y $[V]_{i+1}$, sea menor que el error admisible.

7 → Dependiendo de las tensiones en los nodos de conexión de los acumuladores, activar la carga o descarga de energía acumulada actualizando el vector $[J]$.

8 → Verificar que la diferencia de potencial en los nodos en que están situados los trenes regenerando no supere su valor máximo normativo. En caso de que no se cumpla se volvería a recalcular los vectores J correspondientes con potencias de regeneración admisibles.

9 → Verificar que las modelizaciones de los elementos con más de un modelo estén de acuerdo con el modo de funcionamiento resultante. En caso de que no se cumpla se volvería a recalcular la matriz $[Y]$ y los vectores $[J]$ correspondientes. Si es necesario modificar la matriz $[Y]$, como ya se ha detallado anteriormente, la nueva matriz de admitancias será:

$$[Y] = [Y] + [\delta Y] = [Y] + [Z]^{-1} \cdot [A] \cdot [A]^T$$

En la resolución matemática se han definido unas bandas de histéresis para evitar continuos cambios entre dos modelos, en los sistemas en que el resultado se encuentra entre dos modos de funcionamiento.

10 → La última comprobación consiste en verificar las prestaciones de los distintos trenes que hay en la línea de acuerdo con la curva del esfuerzo de tracción en función de la tensión en el tren. En caso de que las suposiciones iniciales realizadas no fuesen correctas se repetiría el proceso desde el paso 3.

En la siguiente figura se muestra el algoritmo de resolución propuesto:

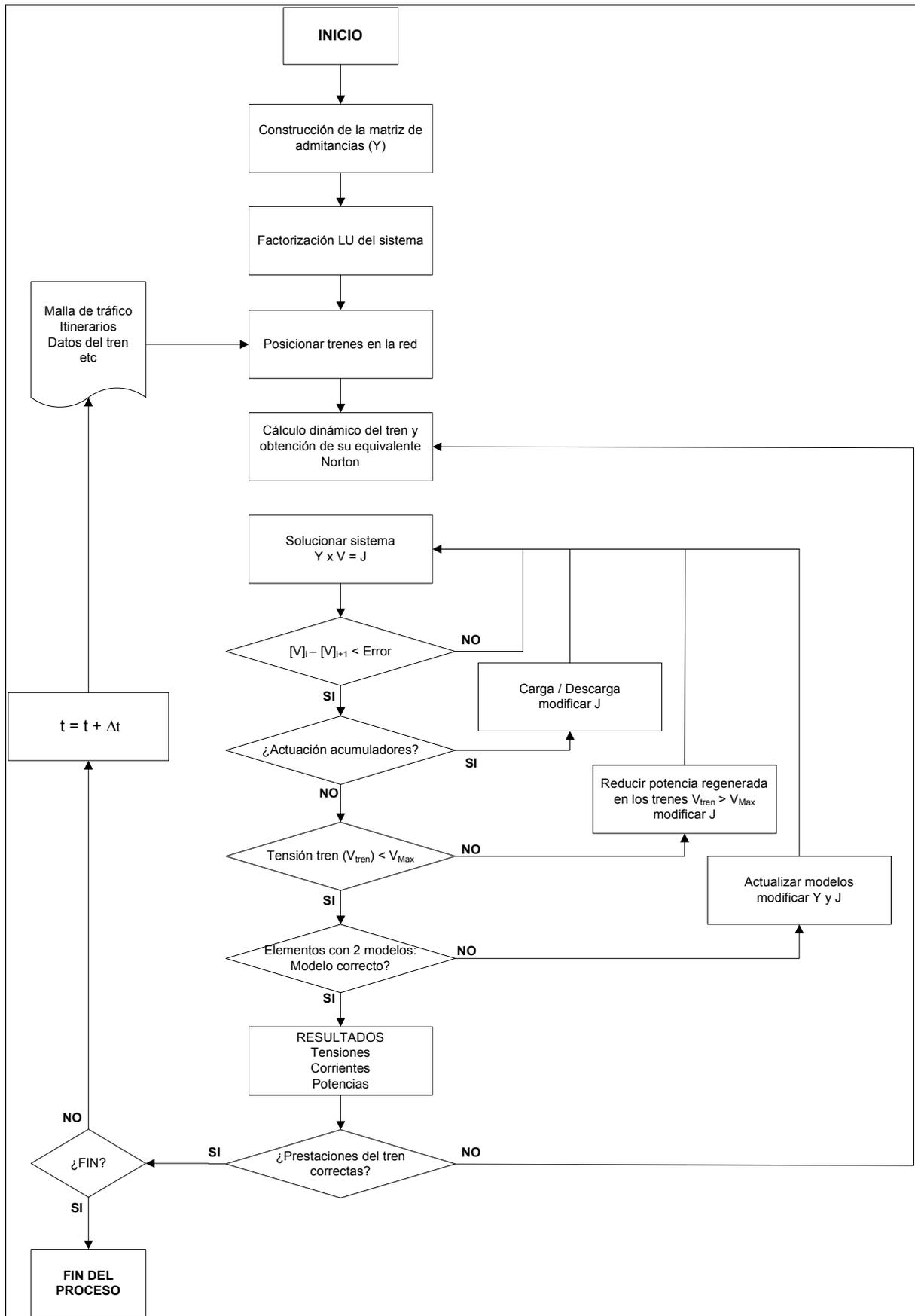


Figura 62. Algoritmo de resolución de una línea ferroviaria electrificada en corriente continua

5. MODELIZACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES ESPECIALES

Dentro de las configuraciones especiales se considerarán:

- Líneas con doble vía.
- Ramales.
- Puestas en paralelo de tramos con doble vía.
- Conexión del carril a tierra.

5.1. Líneas de doble vía

Para la modelización de las líneas de doble vía, tanto en corriente continua como en corriente alterna, se realizará siguiendo el mismo procedimiento que se ha presentado para las líneas de vía única. El único elemento que variará será la línea de contacto, pues la modelización incluirá tanto los conductores de la vía 1 como de la vía 2. El cálculo de las matrices de admitancias de las líneas de contacto para sistemas de doble vía se ha presentado en el capítulo 3.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de una línea electrificada en corriente alterna:

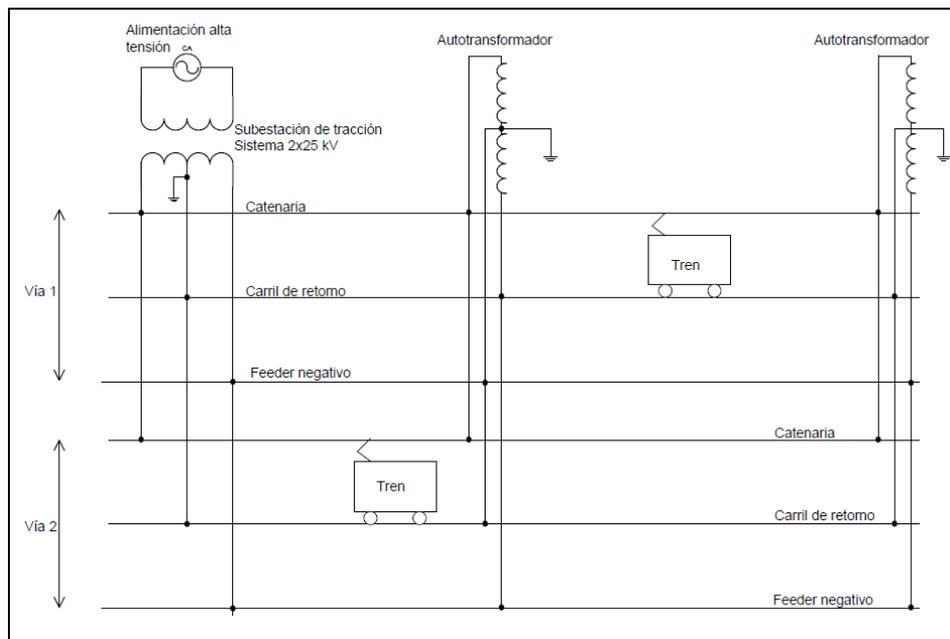


Figura 63. Esquema del tramo de doble vía a modelizar.

A partir de la modelización de cada uno de los elementos simples anteriores, se construye la red completa.

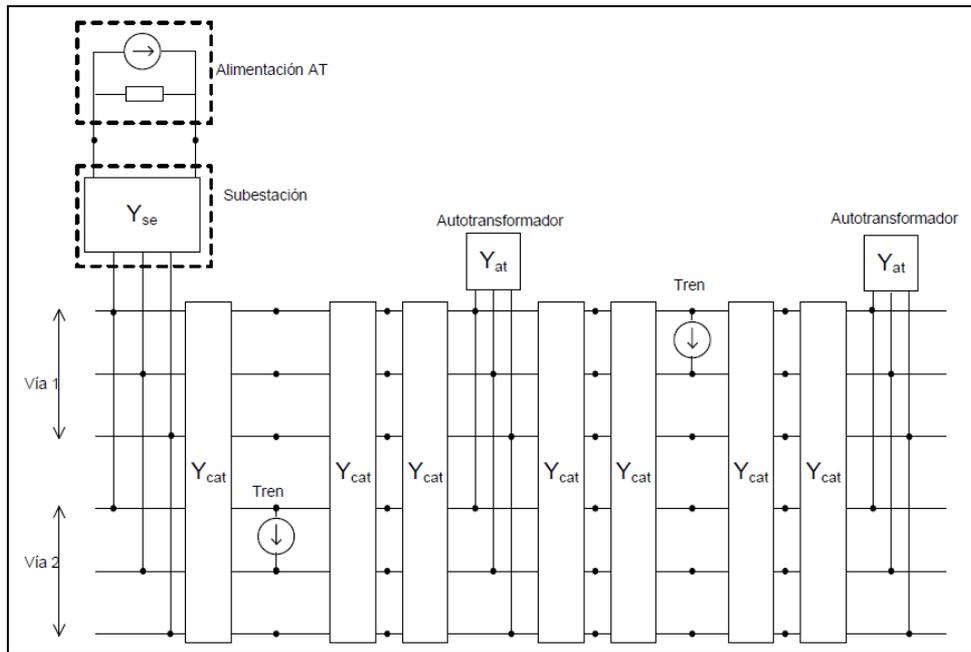


Figura 64. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.

Y para las líneas electrificadas en corriente continua, se seguiría el mismo procedimiento, tal y como se muestra en las dos figuras siguientes:

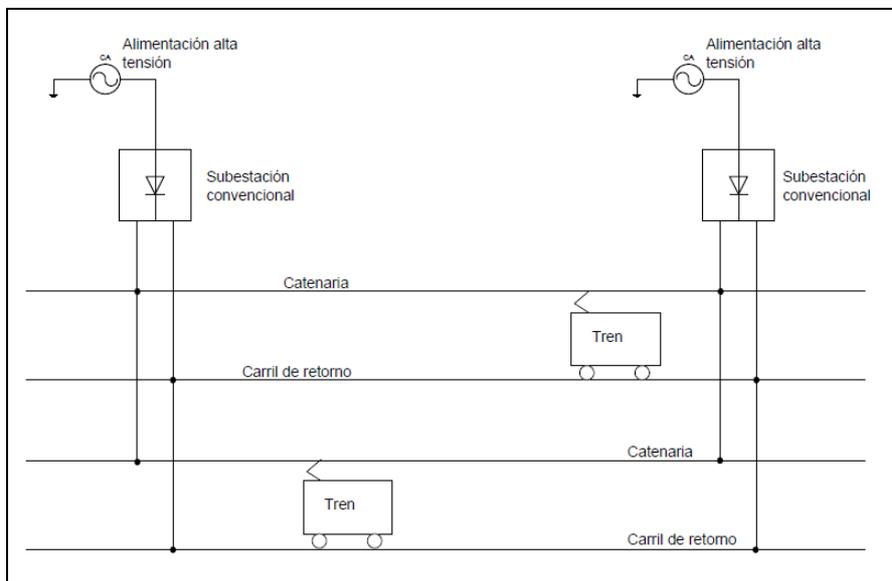


Figura 65. Esquema del tramo de doble vía a modelizar.

A partir de la modelización de cada uno de los elementos simples anteriores, se construye la red completa.

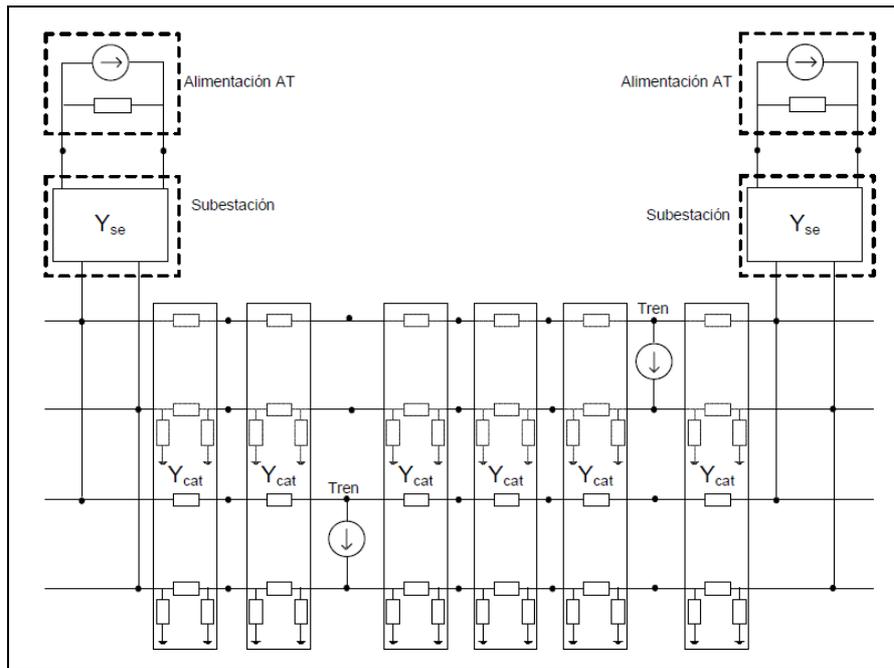


Figura 66. **Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.**

5.2. Ramales.

Para la modelización de las líneas con ramales, tanto en corriente continua como en corriente alterna, se seguirá el mismo procedimiento que se ha presentado para las líneas de vía única. El único punto que hay que tener en cuenta serán los nodos de la línea principal desde los cuales se conectarán los elementos de la catenaria y del carril con los del ramal.

En las dos figuras siguientes se muestra el ejemplo de una línea en vía única electrificada en corriente continua con un ramal, pero la metodología sería extensible para la electrificación en corriente alterna, y para líneas de doble vía, con uno o varios ramales.

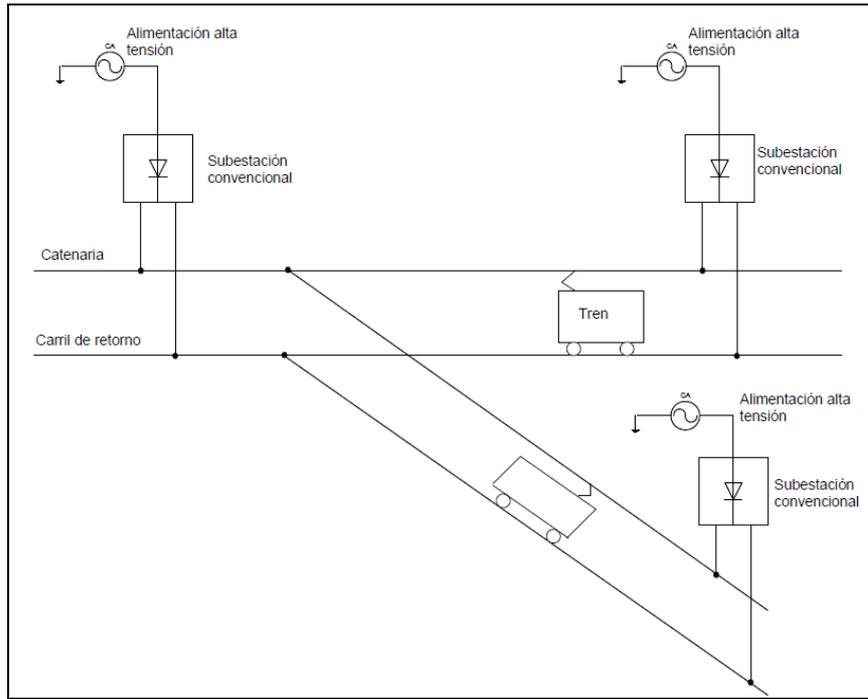


Figura 67. Esquema a modelizar del tramo de vía única con ramal.

Ahora también a partir de la modelización de cada uno de los elementos simples anteriores, se construye la red completa.

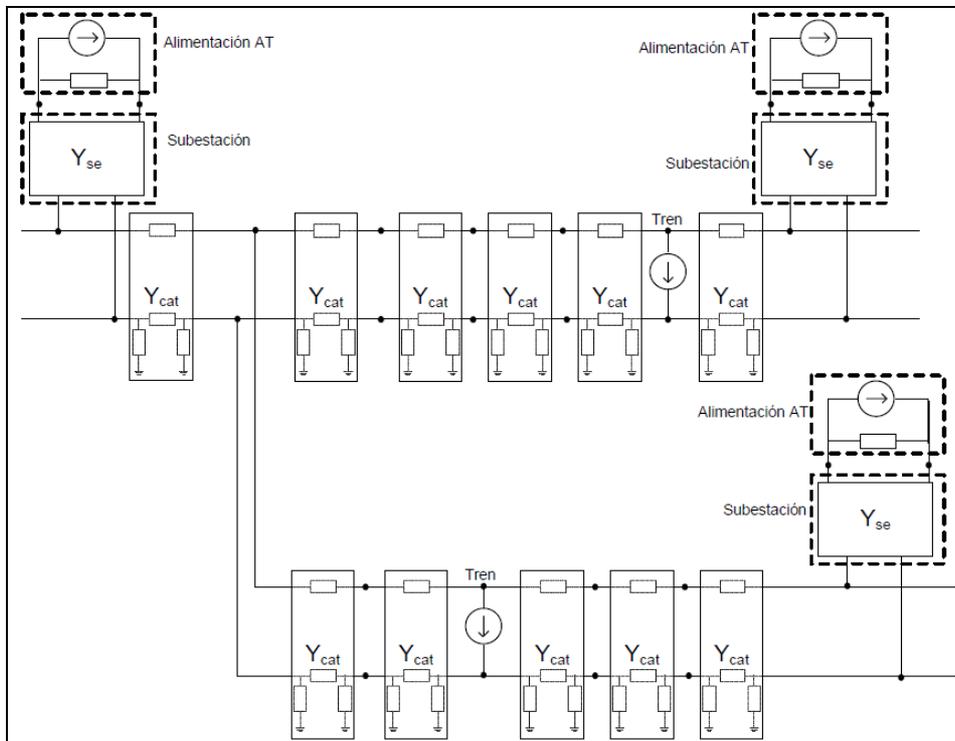


Figura 68. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.

5.3. Puestas en paralelo de tramos con doble vía.

La puesta en paralelo de un tramo en doble vía consiste en la unión de los conductores pertenecientes a la vía 1 con los de la vía 2. La puesta en paralelo puede ser únicamente a nivel de carriles de retorno, o también a nivel de línea de contacto.

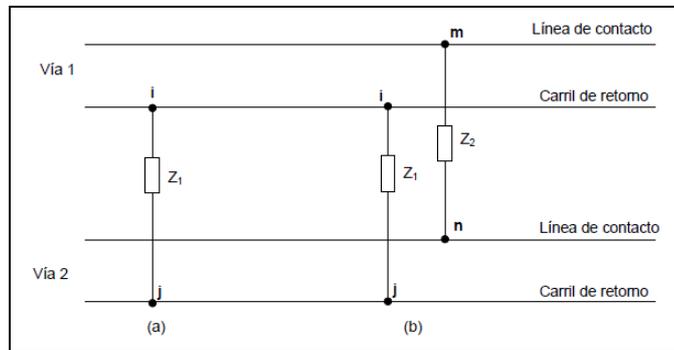


Figura 69. Puesta en paralelo: (a) carril de retorno y (b) carril de retorno y línea de contacto.

Estas conexiones quedarán reflejadas en la matriz de admitancias del sistema: si z_1 y z_2 son las impedancias correspondientes a la conexión, entonces para la puesta en paralelo de los carriles de retorno:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & y_{ii} + \frac{1}{z_1} & \dots & y_{ij} - \frac{1}{z_1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & y_{ji} - \frac{1}{z_1} & \dots & y_{jj} + \frac{1}{z_1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Y para la puesta en paralelo tanto del carril de retorno como de la línea de contacto:

$$[Y] = \begin{bmatrix} \dots & \dots \\ \dots & y_{ii} + \frac{1}{z_1} & \dots & y_{ij} - \frac{1}{z_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & y_{ji} - \frac{1}{z_1} & \dots & y_{jj} + \frac{1}{z_1} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & y_{mm} + \frac{1}{z_2} & \dots & y_{mn} - \frac{1}{z_2} & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & y_{nm} - \frac{1}{z_2} & \dots & y_{nn} + \frac{1}{z_2} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Es decir, se sumará el inverso de la impedancia de la puesta en paralelo en la diagonal correspondiente a los nodos de conexión $i-i$, $j-j$, $m-m$ y $n-n$, y con signo menos en las posiciones correspondientes a $i-j$, $j-i$, $m-n$ y $n-m$.

5.4. Puesta a tierra del carril

En algunas líneas ferroviarias se realiza una conexión a tierra cada cierta distancia del carril, especialmente en líneas electrificadas en corriente alterna [91].

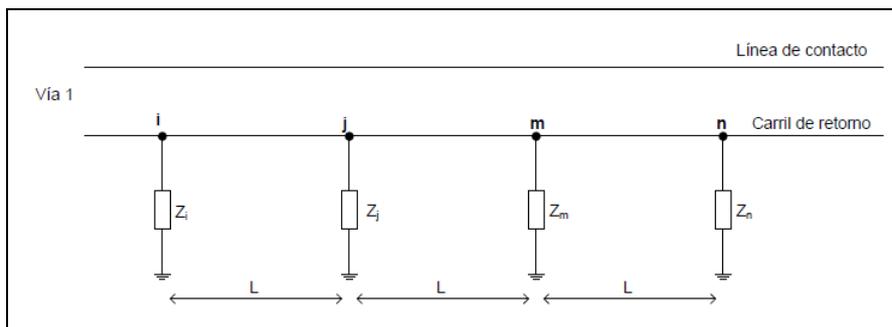


Figura 70. Puesta a tierra del carril de retorno.

Estas conexiones quedarán también reflejadas en la matriz de admitancias del sistema.

$$[Y] = \begin{bmatrix} \dots & \dots \\ \dots & y_{ii} + \frac{1}{z_i} & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & y_{jj} + \frac{1}{z_j} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & y_{mm} + \frac{1}{z_m} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & y_{nn} + \frac{1}{z_n} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Es decir, se sumará el inverso de la impedancia de la puesta en paralelo en la diagonal correspondiente a los nodos de la conexión de puesta a tierra.

6. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LOS ELEMENTOS DE LA LAC Y RETORNOS

En los apartados anteriores se ha indicado que para la modelización de las líneas de contacto y de los circuitos de retorno de los sistemas ferroviarios se dividirá en celdas finitas de una longitud (L) determinada. Esta longitud fijará la distancia entre dos nodos consecutivos. La definición de la longitud de las celdas tendrá su influencia en:

- La situación de los trenes sobre el circuito eléctrico, ya que la situación del tren obtenida a partir del cálculo dinámico se aproximará al nodo más cercano. Pero, es importante destacar que el cálculo dinámico el tren se ha modelado como si toda su masa estuviera situada en su centro de gravedad, cuando en realidad se trata de una masa distribuida entre los distintos coches que forma el convoy, y con diversos contactos con la catenaria y carril a lo largo de su longitud. Así, aunque la máxima desviación teórica respecto al cálculo dinámico del tren vendría dada por la mitad de la longitud L , la desviación real sobre el comportamiento del tren será mucho menor pues a lo largo de la longitud del convoy podrá tener tantos puntos de contacto con la catenaria como pantógrafos y tantos contactos con el circuito de retorno como ruedas, y todos estos contactos están, lógicamente, distribuidos a lo largo de la longitud del convoy y no centrados en su centro de gravedad.
- El estudio de los potenciales del carril y las corrientes circulantes por tierra. Debido a la conductancia existente entre el carril de rodadura y tierra se generan tanto el potencial de carril como las corrientes circulantes por tierra o vagabundas, cuya importancia es fundamental sobre todo en sistemas electrificados en corriente continua.
- La conductancia entre el carril y tierra suele encontrarse en un rango comprendido entre 1 - 10 S/km para carriles aislados, pero pueden alcanzarse valores tan bajos como 0.003 S/km para carriles de alto aislamiento. Una forma de representar la conductancia entre el carril y tierra, como se ha presentado en el capítulo 3, es a través de la división del carril en pequeños segmentos llamados celdas [92]. Así, cuanto más pequeño sea la longitud de cada celda mayor será la aproximación en la simulación.

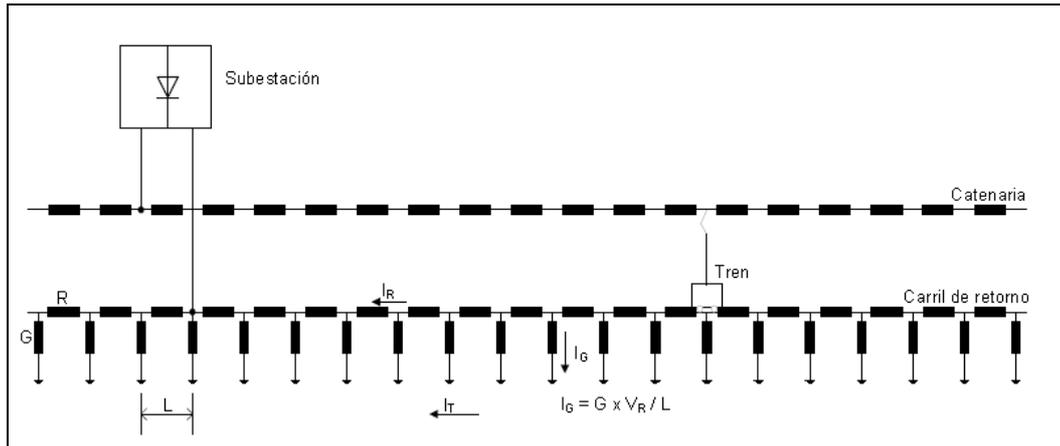


Figura 71. Longitud de la celda en un sistema de corriente continua

A continuación se muestran los resultados de las tensiones entre el carril y tierra obtenidos con el programa Rsim (que se presentará en el capítulo siguiente) sobre una línea electrificada 1500 V en corriente continua de aproximadamente 6 km de longitud, y variando la longitud de la celda.

Los datos principales de la línea ejemplo se muestra en la siguiente tabla:

Longitud	5,9 km
Velocidad máxima	80 km/h
Carril de rodadura:	UIC 54
Ancho	1435 mm
Radio de curvatura mínimo	250 m
Rampas máximas	42 ‰
Peralte máximo	140 mm

Tabla 17. Datos generales de la línea.

En la siguiente figura se muestra los perfiles de la línea metropolitana:

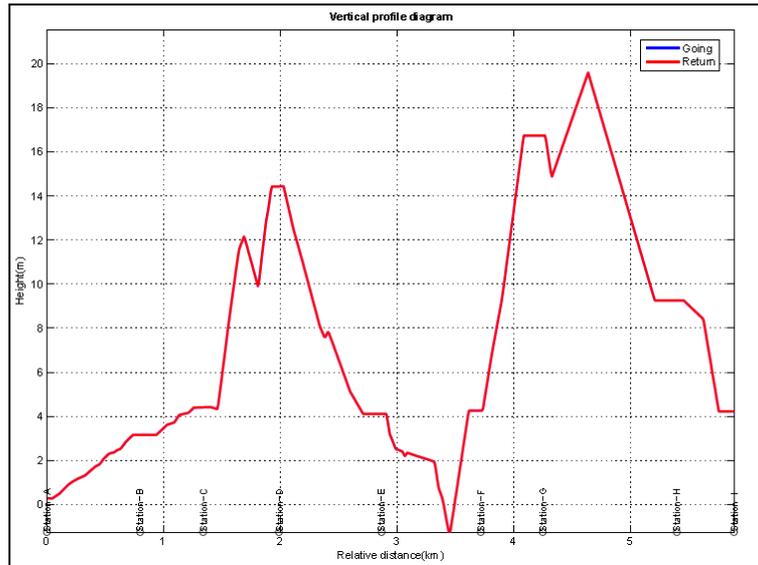


Figura 72. Trazado de la línea

El material móvil elegido para el estudio presenta las mismas características que las mostradas en la Tabla 33. El intervalo entre trenes es de 120 s. La línea esta electrificada a 1500 V, y está alimentada a través de 4 subestaciones de tracción.

En las siguientes gráficas se muestra las tensiones carril – tierra variando la longitud de la celda:

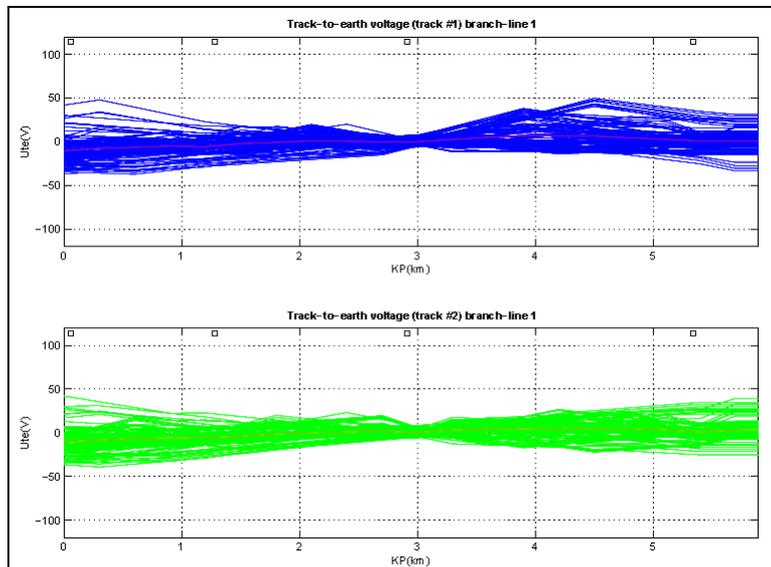


Figura 73. Tensiones carril – tierra con L = 300 m

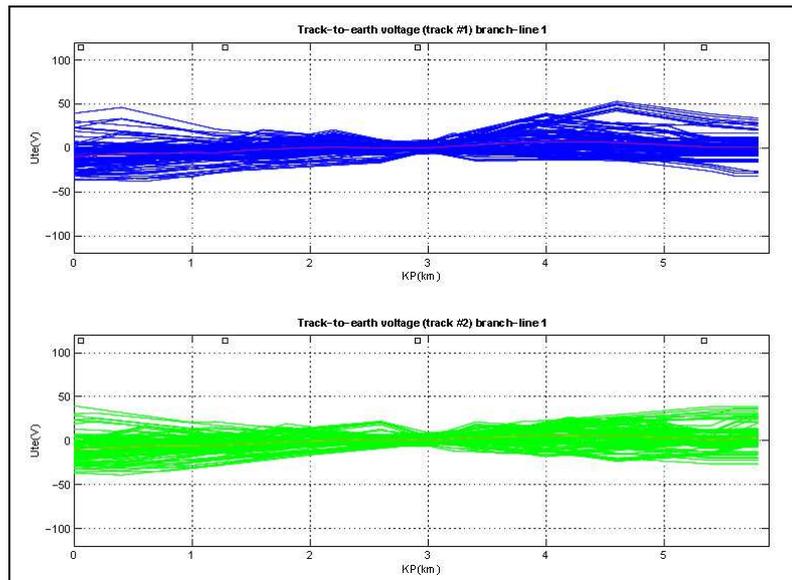


Figura 74. Tensiones carril – tierra con $L = 200$ m

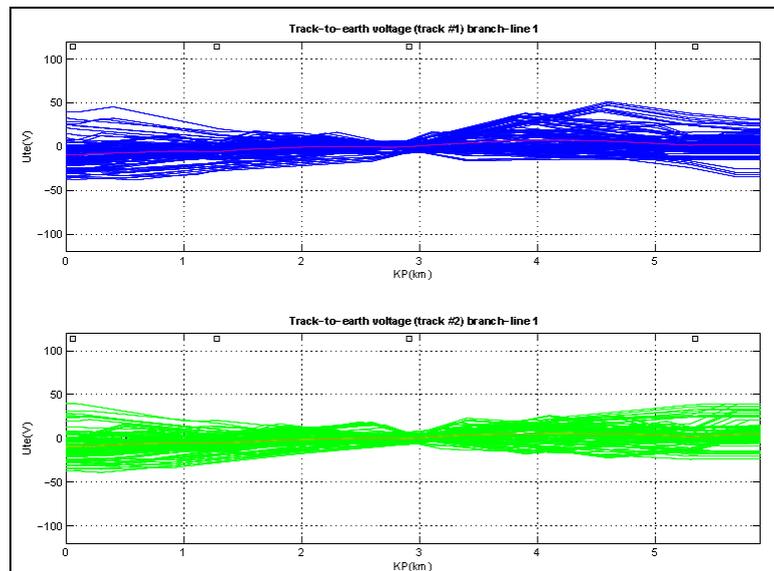


Figura 75. Tensiones carril – tierra con $L = 100$ m

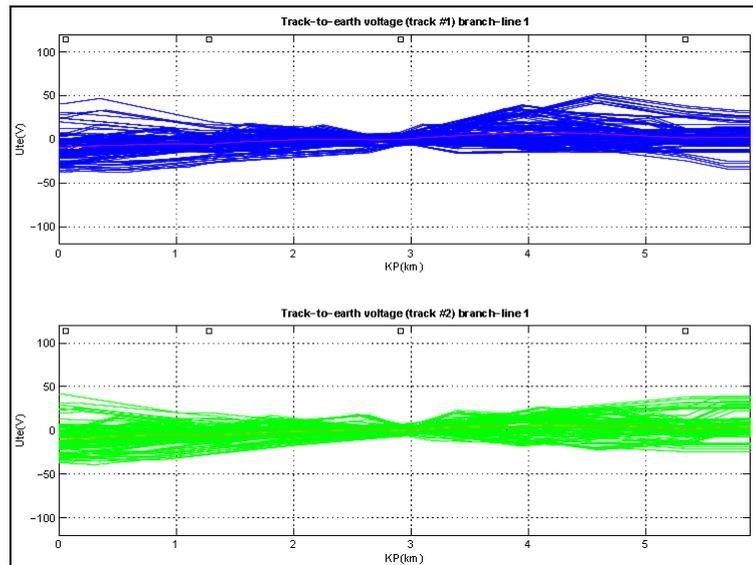


Figura 76. Tensiones carril – tierra con L = 50 m

Resumiendo los valores obtenidos en las siguientes tablas:

	TENSIONES CARRIL – TIERRA (V)		
Distancia de celda	Tensión máxima	Tensión mínima	Tensión media
L=300 m	49,72	-37,38	0,03
L=200 m	52,92	-38,02	0,09
L=100 m	52,31	-38,07	0,20
L=50 m	52,01	-38,22	0,22

Tabla 18. Resumen de datos obtenidos en vía 1 en función de L.

	TENSIONES CARRIL – TIERRA (V)		
Distancia de celda	Tensión máxima	Tensión mínima	Tensión media
L=300 m	41,88	-39,05	0,23
L=200 m	39,39	-39,21	0,18
L=100 m	39,74	-39,32	0,10
L=50 m	40,04	-39,42	0,09

Tabla 19. Resumen de datos obtenidos en vía 2 en función de L.

Como se puede comprobar, si bien se observan unas pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos con una distancia de celda de 300 y el resto, entre 100 y 50 m, se obtienen prácticamente los mismos resultados.

La aproximación de este método depende principalmente de los parámetros distribuidos de la línea, de la longitud de la celda, de las resistencias finales y del número de celdas. El error de cálculo aumenta con la

longitud de la celda, pues las variaciones de la corriente y del potencial en un tramo de línea son función del producto de la constante de propagación (γ) y la longitud de la línea (l). Si dicho producto es inferior a 0.1, la línea puede considerarse como corta, y entonces el efecto de la propagación es despreciable. Según [81] si la longitud de la celda es inferior que la longitud crítica, entonces los errores obtenidos en la modelización son inferiores a 1%.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [74] PILLAGE, Lawrence T., ROHRER, Ronald A., VISWESWARIAH, Chandramouli. Electronic circuit and system simulation methods, pp 47 -74. McGraw-Hill Inc, 1995.
- [75] RULL, Joan, Apuntes del curso "Operació i gestió dels sistemes elèctrics de potència en un entorn distribuït", Màster oficial d'Enginyeria en Energia Universitat Politècnica de Catalunya, 2009-2010.
- [76] SALICHS, M, Apuntes del curso "Electrotècnica avançada", Màster oficial d'Enginyeria en Energia, Universitat Politècnica de Catalunya, 2009-2010.
- [77] CHUA, L., O., DESOER C.A., KUH, E.S.; "Linear and nonlinear circuits"; pp 505 - 556. McGraw Hill series in electrical engineering, 1987.
- [78] YU J.G., GOODMAN M.A., "Modelling of Rail Potential Rise and Leakage Current in DC Rail Transit Systems" IEE Colloquium on Stray Current Effects of DC Railways and Tramways (1990).
- [79] CHYMER, Martyn, RENFREW Alasdair, BARNES Mike, HOLDEN John. Modelling Electrified Transit Systems. IEEE transactions on vehicular technology, vol. 59, n.º. 6, July 2010.
- [80] CAI Y., IRVING, M.R., CASE, S.H.. Modelling and numerical solution of multibranch DC rail traction power systems. IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 142, no 5, September 1995.
- [81] YU J G and GOODMAN C J. Modelling of rail potential rise and leakage current in DC rail transit systems. IEE Colloquium Dig., no. 129, pp. 1-6, 1990.
- [82] PHAM Kinh D., THOMAS Ralph S. and STINGER Walt E. Analysis of stray current, track-to-earth potentials & substation negative grounding in dc traction electrification system. IEEE/ASME Joint Rail Conference Toronto, Ontario, Canada April 17-19, 2001.
- [83] HO, RUEHLI, and BRENNAN. The Modified Nodal Approach to Network Analysis. Proc. 1974 Int. Symposium on Circuits and Systems, San Francisco. pp. 505-509. April 1974.
- [84] DIMO P. Nodal Analysis of Power Systems. Abacus Press Kent 1975.
- [85] ATKINSON, KENDALL A. An Introduction to Numerical Analysis (2nd ed.), New York: John Wiley & Sons. 1989.
- [86] GOLUB, GENE H., VAN LOAN and CHARLES F. Matrix Computations (3rd ed.), Baltimore: Johns Hopkins, 1996.
- [87] BUNCH J.R. and. HOPCROFT J.E, Triangular factorization and inversion by fast matrix multiplication, Mathematics of Computation, 28 (1974) 231-236.
- [88] OKUNEV P and JOHNSON, C. Necessary and sufficient conditions for existence of the LU Factorization of an arbitrary matrix. 1997.

- [89] WILLIAM F, TEUKOLSKY, S and VETTERLING W. "LU Decomposition and Its Applications", Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing (2nd ed.), Cambridge University Press, pp. 34–42. 1992.
- [90] WOODBURY M. Inverting modified matrices. Memorandum Rept. 42, Statistical Research Group, Princeton University, Princeton, NJ, 1950.
- [91] FAYET P, AURIOL P and CLERC G. Sensivity studies for AC railway networks design. International Conference on Power Systems Transients in Lyon, 2007.
- [92] HILL RJ and CAI Y. An efficient computational technique for DC rail traction power flow simulator incorporating track branches. Transactions on Modelling and Simulation vol 5, 1993 WIT Press.
- [93] FORTESCUE, C.L. "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks". Transactions of the AIEE, Part II, 37, 1918, p. 1127-1140.

CAPITULO 5. SIMULACIÓN DE REDES FERROVIARIAS: PROGRAMA RSIM

1. INTRODUCCIÓN

En este quinto capítulo se presenta la simulación de las redes ferroviarias, de acuerdo con las modelizaciones y procedimientos desarrollados en los capítulos 3 y 4. En concreto se presenta el simulador Rsim que se ha sido íntegramente desarrollado como parte de este trabajo.

2. ESTRUCTURA DEL SIMULADOR RSIM

Para la simulación de líneas ferroviarias de acuerdo con los modelos desarrollados en los capítulos anteriores se ha desarrollado el simulador Rsim. El simulador Rsim es una herramienta cuyo objetivo es facilitar la resolución de las problemáticas del dimensionado de cualquier sistema de electrificación ferroviaria, con especial interés en el estudio de la eficiencia energética y el ahorro energético.

El simulador Rsim se ha desarrollado bajo el entorno Matlab/Simulink [95] [97] [98], el cual incorpora multitud de soluciones para el tratamiento y resolución de sistemas matriciales.

La arquitectura de Rsim está dividida en tres módulos:

- Entrada de datos.
- Bloques de cálculo.
- Presentación de resultados.

En la siguiente figura se muestra la arquitectura del simulador Rsim:

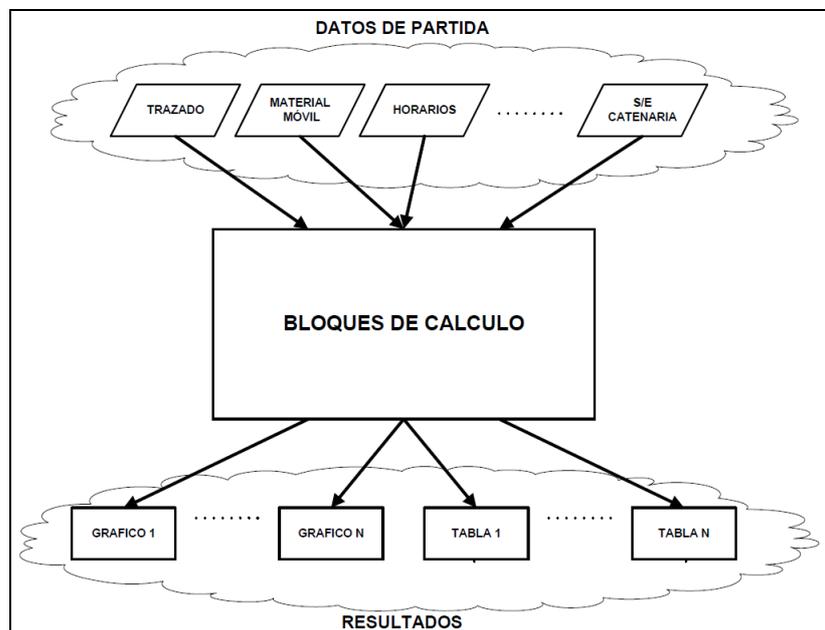


Figura 77. Estructura general del programa Rsim.

En los siguientes subapartados se verá con más detalle cada uno de estos tres módulos.

2.1. Módulo de entrada de datos

El módulo de entradas de datos comprende la lectura de los datos necesarios para la modelización del trazado, del material móvil, de los horarios y de la red de electrificación, así como la lista de consignas necesarias que definen los cálculos a realizar.

Los datos necesarios para las modelizaciones se definen a través de ficheros de entrada de datos del programa, mientras que las consignas se entrarán a través de las propias pantallas del programa. Las pantallas han sido desarrolladas a partir *Guides* [99] del entorno gráfico de Matlab.

Los datos para la modelización se han agrupado en los siguientes ficheros de entrada:

- Trazado de los itinerarios previstos: gradientes, radios de curvatura, peraltes, velocidades máximas, localización de túneles, etc.
- Listado de estaciones y tiempos de parada.
- Datos relativos al material móvil: composición, pesos, longitudes, velocidad máxima, factor de potencia, etc.
- Curvas de tracción para distintas tensiones, de frenado y de adherencia.
- Horarios.
- Datos relativos a las subestaciones de tracción, acumuladores de energía, líneas de contacto y retornos.
- Sistema de señalización y circuitos de vía.

2.2. Módulo de bloques de cálculo

En este módulo del programa Rsim es donde se realizan los distintos cálculos, con los procedimientos desarrollados los capítulos 3 y 4.

Los bloques de cálculo que forman este módulo son los siguientes:

- Movimiento del tren.
- Horarios y malla de tráfico.
- Verificación del movimiento seguro del tren.
- Flujo de cargas para los sistemas electrificados en corriente continua.
- Flujo de cargas para los sistemas electrificados en corriente alterna.

2.2.1. *Movimiento del tren*

En el módulo de cálculo del movimiento del tren se determinan, a partir de los datos de partida, el perfil de velocidades y la potencia instantánea a lo largo del trazado, ya sea demandada en las situaciones de tracción o potencialmente regenerable durante el frenado por el tren.

Estos cálculos se realizan en función de las características del tren y del itinerario previsto.

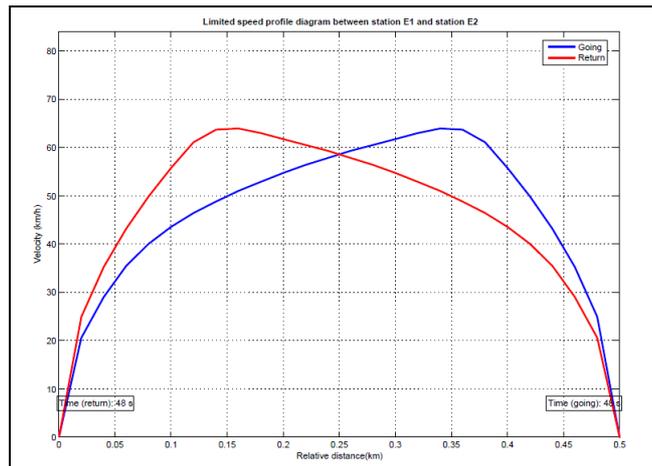


Figura 78. **Gráfico del perfil de velocidades.**

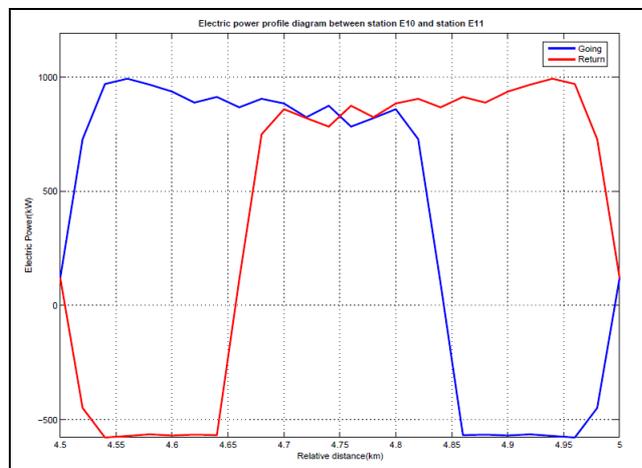


Figura 79. **Gráfico de la potencia demandada y potencialmente regenerable.**

2.2.2. *Horarios y malla de tráfico*

La malla de tráfico es el resultado de la superposición de cada uno de los itinerarios y trenes previstos, de acuerdo con los intervalos marcados por los horarios durante un tiempo determinado.

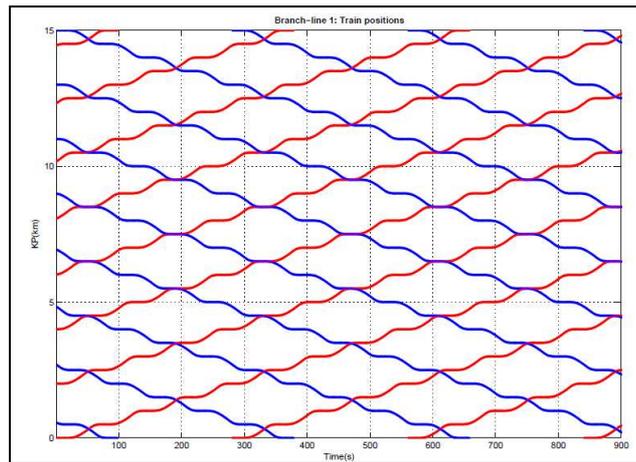


Figura 80. Gráfico de la malla de tráfico.

El ajuste de la malla de tráfico resultado de la dinámica del tren junto con las restricciones del sistema de electrificación con los horarios reales se realiza a partir de los tiempos de estacionamiento de los distintos trenes en cada una de las estaciones.

2.2.3. Verificación del movimiento seguro del tren

Una vez definida la malla de tráfico, es preciso verificar en un trayecto que la distancia entre dos trenes consecutivos que circulan por la misma vía sea segura de acuerdo con el sistema de señalización implementado [96]. Con este objetivo las líneas ferroviarias, independientemente del tipo de electrificación, están delimitadas por cantones para asegurar que el espacio entre trenes no pueda provocar ni alcances ni colisiones entre dos trenes consecutivos.

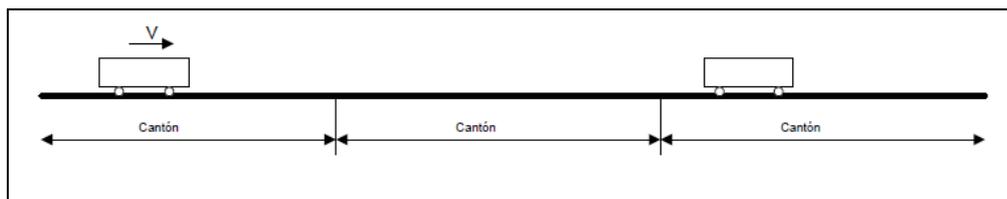


Figura 81. Delimitación en cantones de una línea ferroviaria.

En este bloque se permite definir tres niveles de sistemas de señalización [94].

- Nivel 1 (códigos de velocidad): En este nivel, entre dos trenes consecutivos siempre tiene que existir un cantón libre. También debe verificarse que la longitud del cantón sea superior a la distancia de frenado para la velocidad máxima permitida en el trayecto.

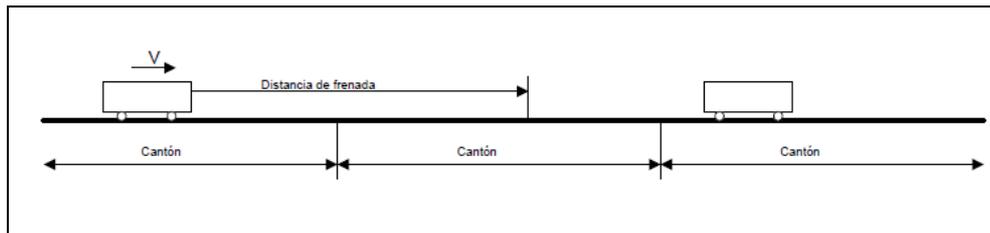


Figura 82. Nivel 1 (códigos de velocidad).

- Nivel 2 (distancia objetivo): En el nivel 2 se permite que dos trenes ocupen cantones consecutivos, siempre que la distancia de frenado no supere el límite del cantón donde se encuentra el tren precedente. Si la distancia de frenado supera el límite del cantón será necesario mantener un cantón libre entre los dos trenes.

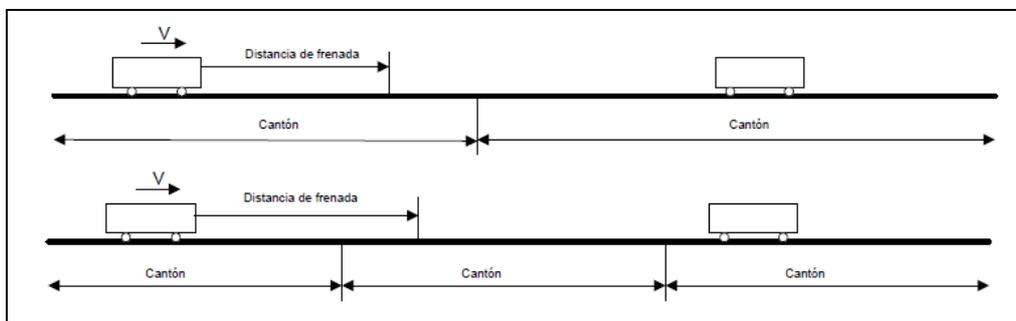


Figura 83. Nivel 2 (distancia objetivo).

- Nivel 3 (cantón móvil). En este nivel se permite que dos trenes puedan ocupar un mismo cantón, siempre y cuando la distancia de frenado sea inferior a la distancia existente entre trenes.

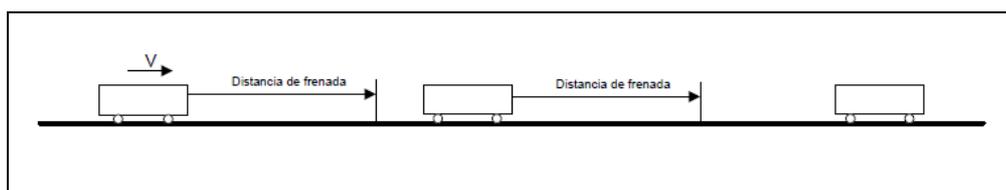


Figura 84. Nivel 3 (cantón móvil).

Este bloque de cálculo evalúa el movimiento de todos los trenes que interactúan en una malla de circulación determinada, detectado las situaciones en que la separación entre dos trenes consecutivos es inferior a la distancia de seguridad, de acuerdo con el nivel del sistema de señalización definido. En general, si se detectan estas situaciones no seguras será necesario aumentar el intervalo entre trenes.

2.2.4. Cálculo del flujo de cargas en electrificaciones en corriente continua

En este bloque de cálculo se determinan las tensiones en todos los nodos de la red en los instantes definidos por la malla de tráfico. A partir de las tensiones de los nodos, y con los procedimientos desarrollados en los capítulos 3 y 4 se determinan las potencias y las intensidades en todos los elementos de la red.

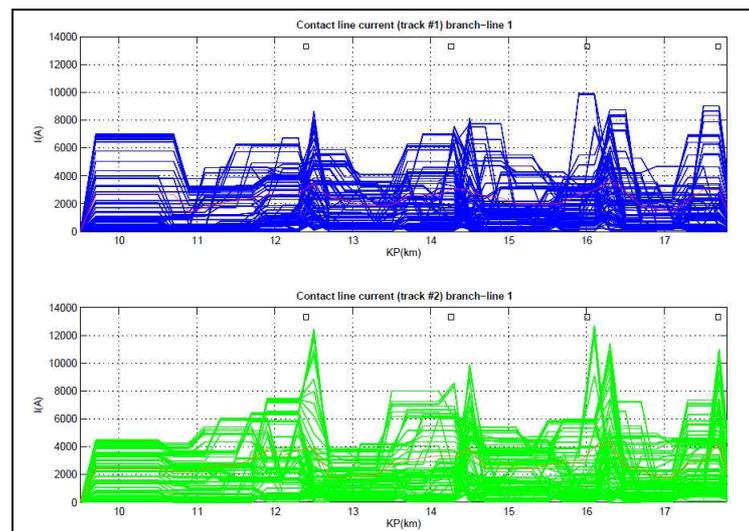


Figura 85. Intensidades en la línea de contacto.

2.2.5. Cálculo del flujo de cargas de electrificaciones en corriente alterna

Análogamente al bloque de cálculo para la electrificación en corriente continua, en este bloque de cálculo se determinan primero las tensiones en todos los nodos de la red en los instantes definidos por la malla de tráfico, y posteriormente con los procedimientos desarrollados en los capítulos anteriores se determinan las potencias y las intensidades en todos los elementos de la red.

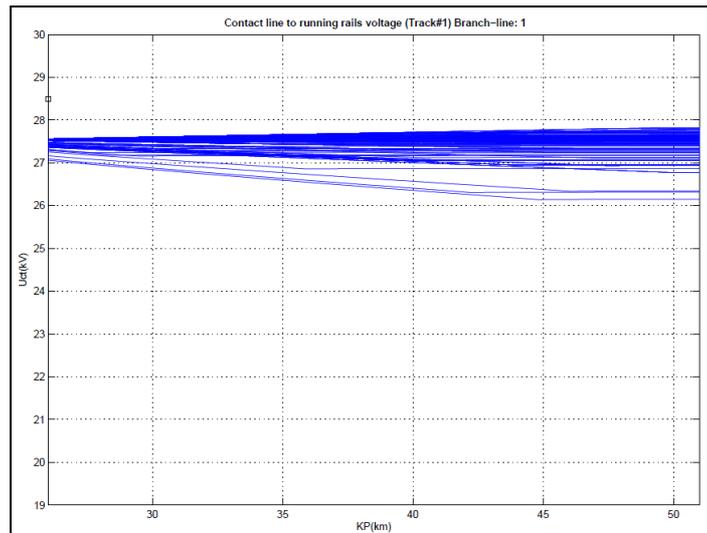


Figura 86. Tensión catenaria – carril a lo largo del sector.

2.3. Módulo de presentación de resultados

El tercer módulo del simulador Rsim corresponde a la presentación de los resultados. Los resultados obtenidos en las distintas simulaciones se presentan tanto en modo numérico como gráfico.

Los gráficos generados con el simulador se obtienen a partir de las funciones de gráficos de Matlab [100] [101].

Los resultados principales presentados son los siguientes:

- Perfil del trazado de cada itinerario.
- Curvas de tracción, frenado, adherencia y de resistencia al avance del material móvil.
- Velocidades y aceleraciones de consigna y finales.
- Potencias demandadas y potencialmente regenerables.
- Malla de tráfico.
- Potencias en las subestaciones y centros asociados.
- Tensiones y corrientes en los conductores: línea de contacto, carriles de rodadura, etc.
- Tensiones entre el pantógrafo y el carril a lo largo del recorrido.
- Evolución de la potencia y energía en los acumuladores.
- Balance de energías.

3. INTERFICIE CON EL USUARIO

3.1. Pantalla de inicio del programa Rsim.

A continuación se muestra la pantalla de inicio del programa. En ella se puede seleccionar el bloque de cálculo que se desea ejecutar.

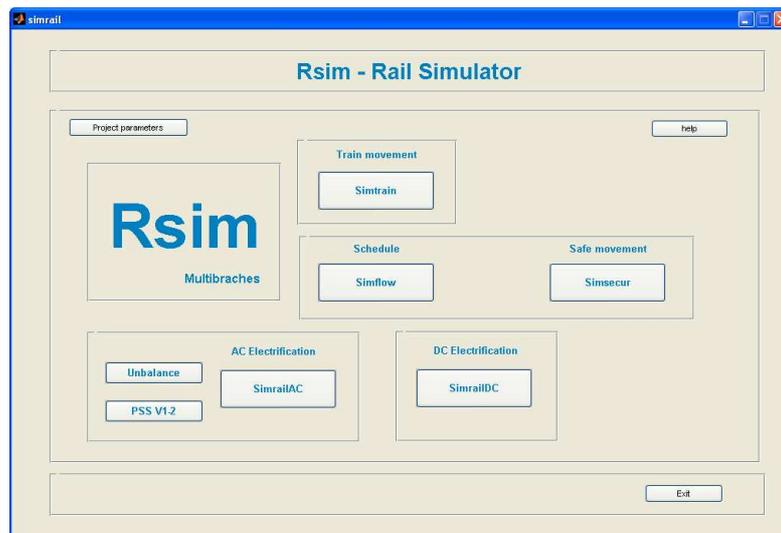


Figura 87. Pantalla de inicio del programa Rsim.

3.2. Pantalla del bloque de cálculo del Movimiento del tren.

En la pantalla del bloque de cálculo del movimiento del tren, se pueden editar los ficheros de datos, definir los parámetros del cálculo a realizar y los parámetros del acumulador embarcado (si existe).

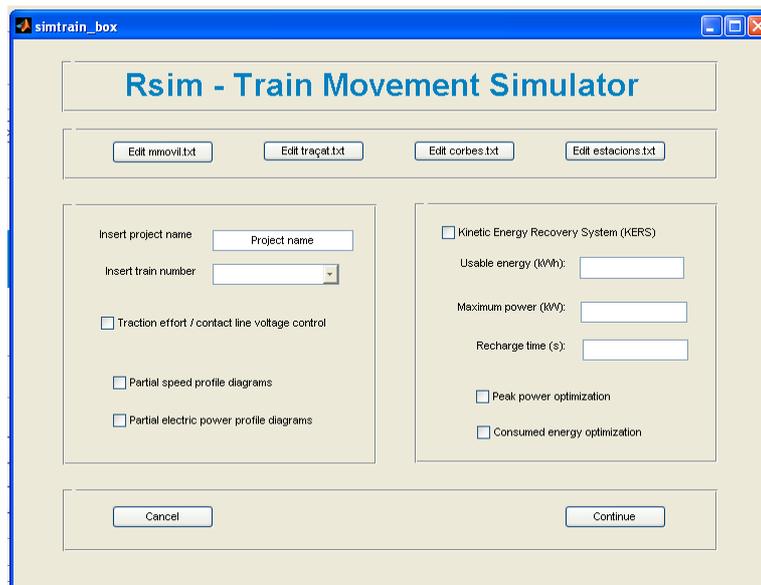


Figura 88. Pantalla del bloque de cálculo del movimiento del tren.

3.3. Horarios y malla de tráfico.

En la pantalla del bloque de cálculo de la malla de tráfico se puede editar el fichero de horarios y definir los parámetros del cálculo a realizar.

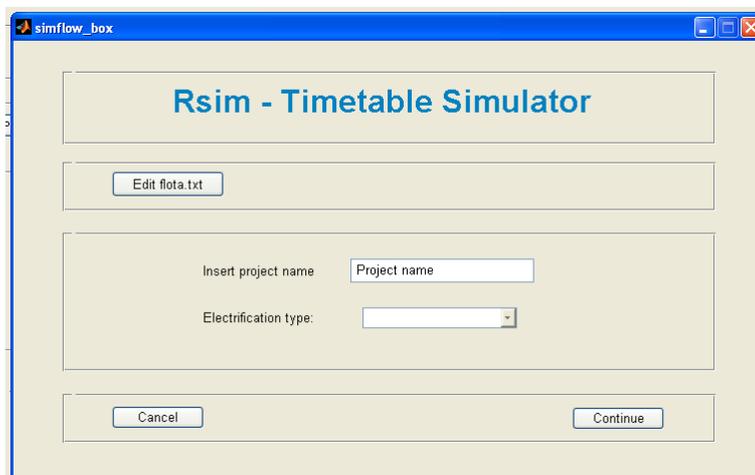


Figura 89. Pantalla del bloque de cálculo de la malla de tráfico.

3.4. Verificación del movimiento seguro del tren.

En la pantalla de este bloque de cálculo se puede editar el fichero de los cantones y definir los parámetros del cálculo a realizar.



Figura 90. Pantalla del bloque de cálculo del movimiento seguro del tren.

3.5. Flujo de potencias para electrificaciones en corriente continua.

En la pantalla de este bloque de cálculo se puede editar el fichero de los datos de las subestaciones, líneas de contacto, acumuladores fijos, etc y definir los parámetros del cálculo a realizar.



Figura 91. Pantalla del bloque de cálculo de la electrificación en corriente continua.

3.6. Flujo de potencias para electrificaciones en corriente alterna.

En la pantalla de este bloque de cálculo se pueden editar los ficheros de los datos de las subestaciones, centros de autotransformación, acumuladores fijos, etc y del fichero de los datos de catenaria, feeder negativo, carriles, etc, y definir los parámetros del cálculo a realizar.



Figura 92. Pantalla del bloque de cálculo de la electrificación en corriente alterna.

Dentro de este mismo bloque de cálculo existen dos bloques auxiliares para la determinación de los desequilibrios en las subestaciones y las tensiones en los extremos de las zonas neutras (ZN).

4. RESULTADOS GRÁFICOS

El programa Rsim genera automáticamente todos los gráficos seleccionados por el usuario.

En el próximo capítulo se mostrarán los resultados obtenidos en dos estudios realizados. A continuación se muestra a modo de ejemplo algunos resultados gráficos.

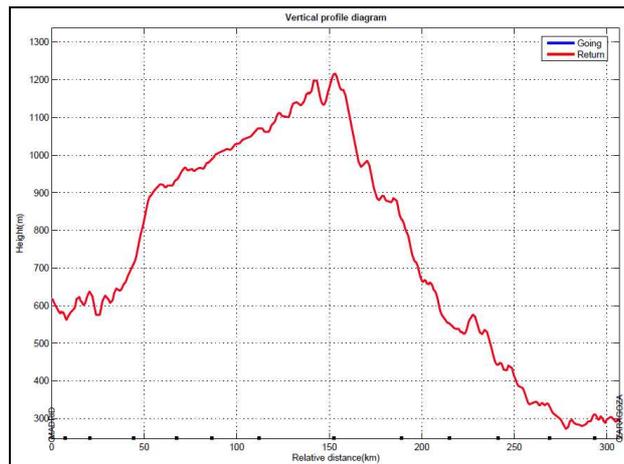


Figura 93. Ejemplo de gráfico del perfil del trazado.

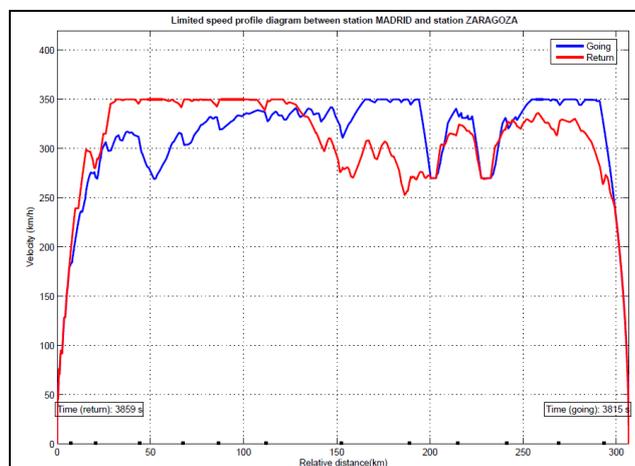


Figura 94. Ejemplo de gráfico del perfil de velocidades a lo largo del trazado.

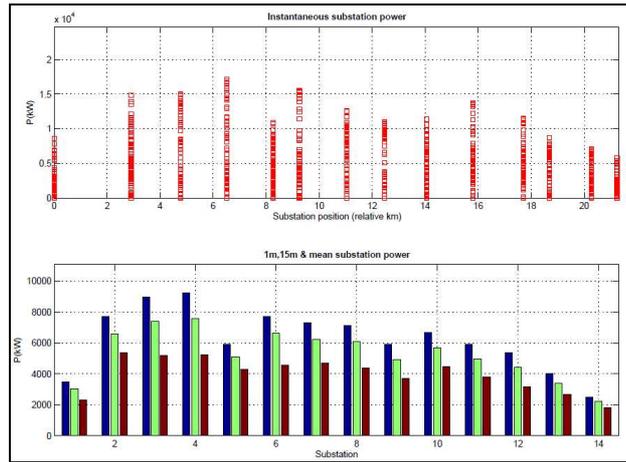


Figura 95. Ejemplo de gráfico de las potencias demandadas en las subestaciones de tracción.

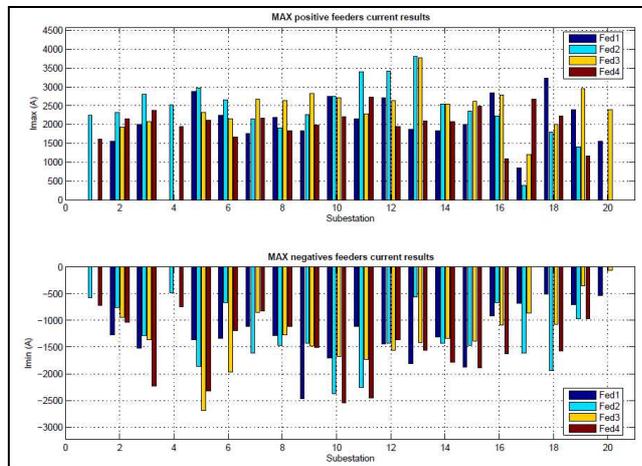


Figura 96. Ejemplo de gráfico de las corrientes máximas en los feeders de salida.

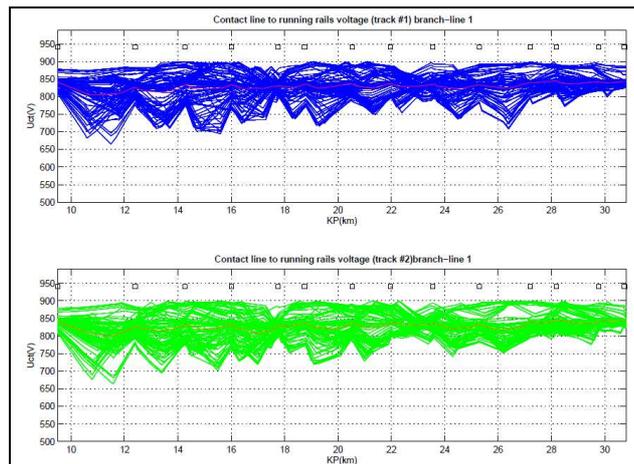


Figura 97. Ejemplo de gráfico de la distribución de la tensión catenaria - carril.

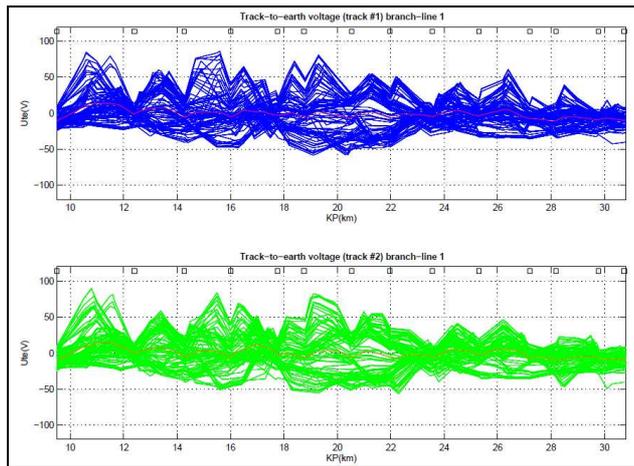


Figura 98. Ejemplo de gráfico de la distribución de la tensión carril – tierra.

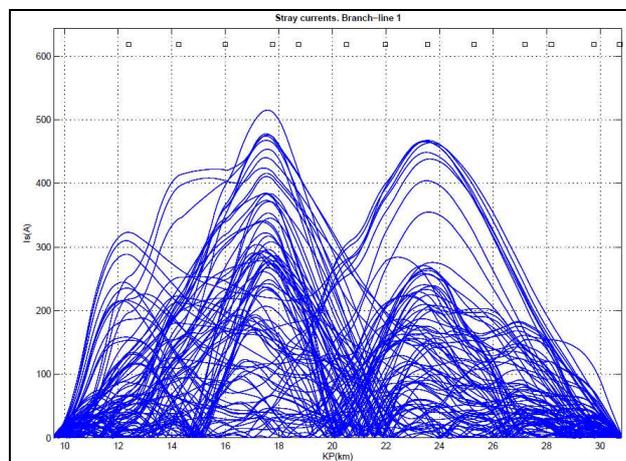


Figura 99. Ejemplo de gráfico de las corrientes vagabundas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [94] DOMINGUEZ Enric. Apuntes del curso "Señalización ferroviaria". Master Sistemas Ferroviarios y Tracción eléctrica. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010-2011.
- [95] ATTIA J. Electronics and circuit analysis using Matlab.
- [96] HILL R J. Electric railway traction: Part 4 Signalling and interlockings. Power engineering journal. August 1995.
- [97] HUNT B, LIPSMAN R and ROSENBERG J. A guide to Matlab for beginners and experienced users. Cambridge University press. 2006.
- [98] KALECHMAN Misza. Practical Matlab: Applications for engineers. CRC Press. 2007.
- [99] MATLAB. DESKTOP TOOLS AND DEVELOPMENT ENVIRONMENT. Mathworks. 2004.
- [100] MATLAB. PROGRAMMING. Mathworks. 2004.
- [101] MATLAB. USING MATLAB GRAPHICS. Mathworks. 2004.

CAPITULO 6. APLICACIÓN DEL PROGRAMA RSIM

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la aplicación del programa Rsim sobre dos estudios realizados. El primer estudio corresponde a una línea electrificada en corriente alterna en su mayor parte en 2x25 kV y en algunos tramos en 1x25 kV: la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona. En el segundo estudio se muestra la aplicación sobre una línea metropolitana electrificada a 1500 V en corriente continua, que corresponde a la línea 9 de Metro de Barcelona.

2. APLICACIÓN SOBRE UNA LÍNEA ELECTRIFICADA EN CA

2.1. Datos de partida

2.1.1. Trazado

El tramo entre Madrid y Barcelona forma parte de la Línea de alta velocidad Madrid - Zaragoza - Barcelona - Frontera Francesa, y está en servicio desde finales de febrero del 2008.



Figura 100. Trazado de la línea de alta velocidad Madrid - Barcelona.

La línea presenta las siguientes características principales [102]:

Longitud	621 km
Velocidad máxima	350 km/h
Carril de rodadura:	UIC 60
Ancho	1435 mm
Radio de curvatura mínimo	7000 m en vía general
Rampas máximas	25 ‰
Peralte máximo	140 mm

Tabla 20. Datos principales de la línea LAV Madrid - Barcelona

En la siguiente figura se muestra el perfil de la línea de alta velocidad:

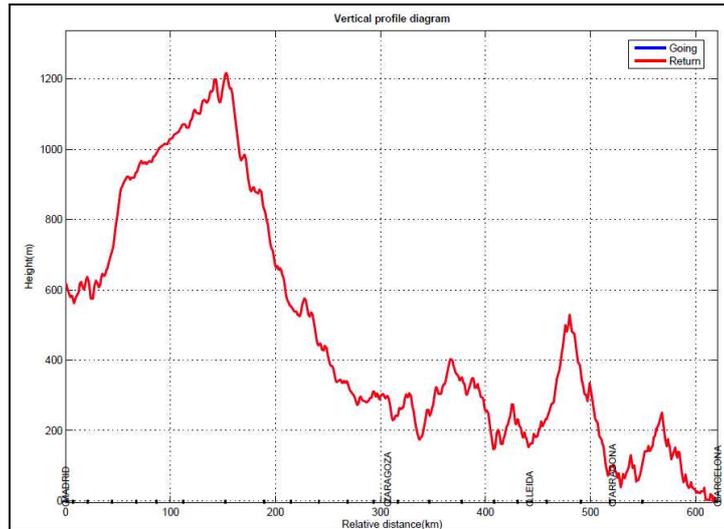


Figura 101. Perfil de la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona.

2.1.2. Material rodante

El material rodante elegido para el estudio es el Siemens Velaro [103] en configuración simple que coincide con el material rodante que habitualmente realiza este trayecto. El Siemens Velaro es una familia de trenes de alta velocidad con potencia distribuida, sin cabezas tractoras. Cada tren es una unidad de ocho coches de viajeros con tracción distribuida. Los coches 1, 3, 6 y 8 cuentan con dos bogies motorizados con dos motores de 550 kW de potencia cada uno. Está provisto de frenos regenerativos, neumáticos. Y reostáticos con resistencias en el techo.

Las características básicas de estos trenes son las siguientes:

Plataforma:	Siemens Velaro E
Composición:	M-R-M-R+R-M-R-M
Motores:	16 (potencia distribuida)
Peso en vacío:	404 t
Longitud:	200 m
Número de plazas totales:	404 p
Potencia:	8.800 kW
Potencia auxiliares:	1.500 kW
Aceleración de servicio:	0,3 m/s ²
Desaceleración de servicio:	- 0.3 m/s ²

Tabla 21. Datos técnicos del material rodante

En la siguiente figura se muestran las curvas de tracción y frenado:

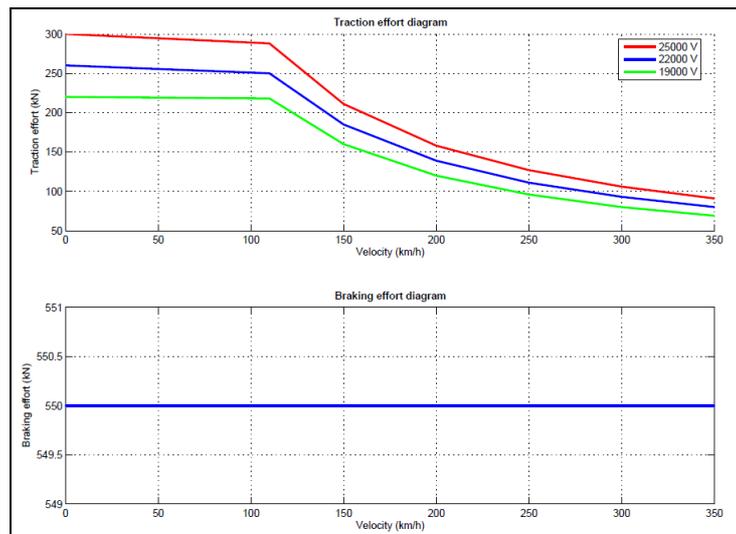


Figura 102. **Curvas de tracción y frenado del material Siemens Velaro.**

Y en la siguiente gráfica la curva de la resistencia al avance en función de la velocidad:

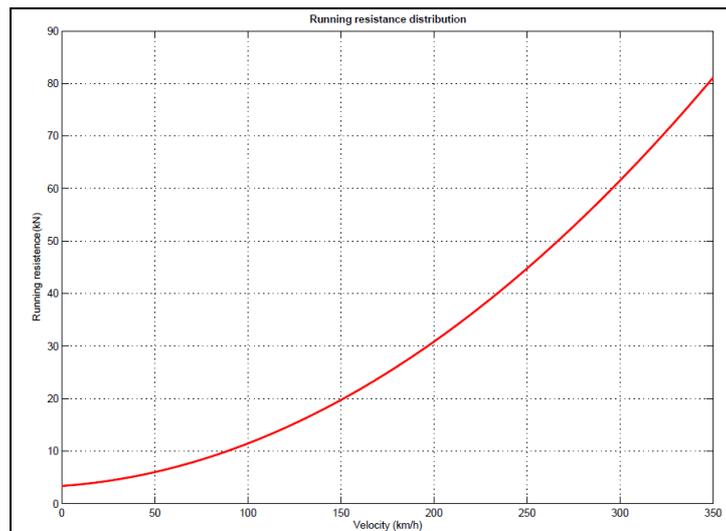


Figura 103. **Curva de la resistencia al avance del material Siemens Velaro.**

Como puede apreciarse, la resistencia al avance a alta velocidad alrededor de 350 km/h es de un valor similar que el esfuerzo máximo a esa velocidad en prestaciones nominales, por lo que independientemente del perfil del trazado el tren estará demandando prácticamente su potencia nominal para mantener la velocidad máxima. Así el tren tendrá dificultad en alcanzar la máxima velocidad en los tramos ascendentes y con tensiones de catenaria – carril inferiores a la nominal.

2.1.3. Red de electrificación

La línea de alta velocidad Madrid – Barcelona está electrificada con el sistema 2x25 kV, con la excepción de los accesos a Madrid y Barcelona que están electrificados con el sistema 1x25 kV. En la siguiente tabla se indica las subestaciones de tracción que alimentan a la línea:

Nº	Subestación	Pk(m)	Transformadores		
			Nº	Potencia (MVA)	Ecc (%)
1	Villaverde	8+101	2	60	10
2	Anchuelo	44+333	2	60	10
3	Brihuega	86+550	2	60	10
4	Medinaceli	152+414	2	60	10
5	Terrer	214+842	2	60	10
6	Rueda	268+891	2	60	10
7	Zaragoza	316+426	2	60	10
8	Peñalba	377+587	2	60	10
9	Montagut	430+446	2	60	10
10	Espluga	489+055	2	60	10
11	Gornal	549+253	2	60	10
12	Sant Boi	610+028	2	60	10

Tabla 22. Datos generales de las subestaciones de tracción.

Los centros de autotransformación intermedios (ATI) y finales (ATF) están situados aproximadamente en los siguientes puntos kilométricos:

Sector	ATF	ATI
1	0 Ud.	0 Ud.
2	2 Ud. (Pk: 20+999 y 67+619)	2 Ud. (Pk: 32+559 y 56+157)
3	2 Ud. (Pk: 67+619 y 112+174)	3 Ud. (Pk: 77+590, 95+390 y 103+434)
4	2 Ud. (Pk: 112+174 y 188+969)	6 Ud. (Pk: 122+754, 133+222, 143+221, 162+494, 170+984 y 178+748)
5	2 Ud. (Pk: 188+969 y 241+281)	4 Ud. (Pk: 195+448, 204+464, 225+231 y 232+535)
6	2 Ud. (Pk: 241+281 y 294+007)	4 Ud. (Pk: 248+631, 259+991, 277+991 y 285+891)
7	2 Ud. (Pk: 294+007 y 346+712)	3 Ud. (Pk: 305+946, 326+948 y 336+690)

8	2 Ud. (Pk: 346+712 y 408+290)	4 Ud. (Pk: 358+549, 367+309, 388+235 y 398+481)
9	2 Ud. (Pk: 408+290 y 457+675)	3 Ud. (Pk: 419+800, 440+140 y 449+496)
10	2 Ud. (Pk: 457+675 y 518+628)	4 Ud. (Pk: 469+126, 479+845, 498+767 y 508+818)
11	2 Ud. (Pk 518+628 y 580+927)	4 Ud. (Pk 530+594, 541+754, 560+586 y 570+159)
12	0 Ud.	0 Ud.

Tabla 23. Datos generales de los centros de autotransformación.

Delimitando cada sector, existe una zona no electrificada de aproximadamente 400 m de longitud denominada zona neutra. Los autotransformadores tienen una potencia nominal de 15 MVA y una tensión de cortocircuito de 1,2%. Los ATI están formados por dos autotransformadores, estando uno siempre en reserva.

La catenaria considerada en el estudio tiene las siguientes características:

Conductor	Sección
Hilo de contacto	150 mm ² Cu
Sustentador	100 mm ² Cu
Feeder positivo	LA-180
Feeder negativo	LA-280
Cable de guarda	LA-110

Tabla 24. Características de la catenaria.

2.1.4. Itinerarios e intervalos de paso

Para el estudio se ha considerado un itinerario con parada en las siguientes estaciones:

Estación	Pk (m)	Tiempo de parada (s)
Madrid – Atocha	0	60
Zaragoza	306+700	60
Lleida	442+100	60
Camp de Tarragona	520+869	60
Barcelona – Sants	621+000	60

Tabla 25. Estaciones y tiempos de parada.

El intervalo entre dos tres consecutivos será de 3 minutos, que corresponde al mínimo intervalo en líneas de categoría I según la Especificación Técnica de Interoperabilidad Europea (ETI), vigente en el momento de la redacción y la ejecución del proyecto.

2.2. Escenarios estudiados

En la línea de alta velocidad Madrid – Barcelona, se han considerado dos escenarios:

Escenario	Condicionantes
1	Material rodante sin frenado regenerativo
2	Material móvil con frenado regenerativo

Tabla 26. Resumen de los escenarios estudiados.

Al tratarse de una línea electrificada en corriente alterna, no se han considerado escenarios con sistemas de almacenamiento de energía, pues la energía excedente será exportada a la red de alta tensión de alimentación a las subestaciones de tracción.

2.3. Resultados

2.3.1. Movimiento del tren

En la siguiente gráfica se muestra el perfil de velocidades obtenido con el programa Rsim en el tramo Madrid – Barcelona:

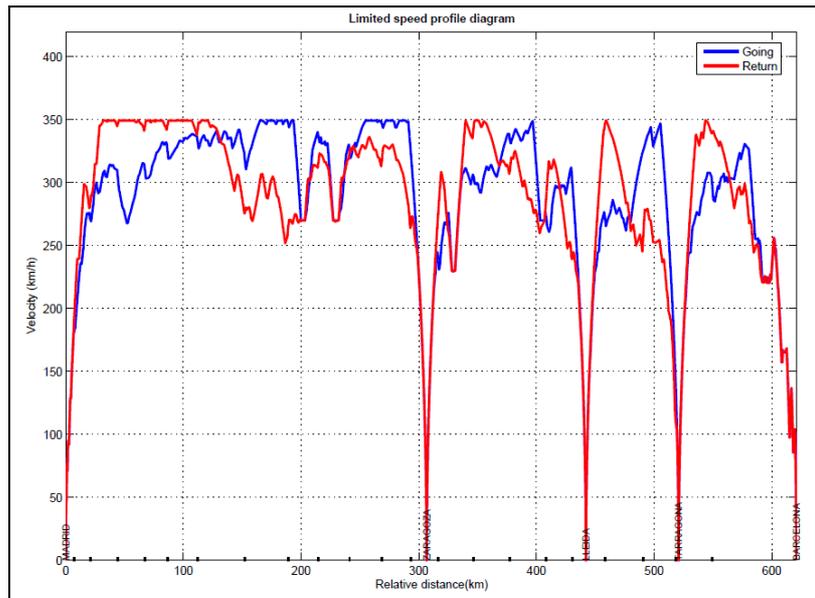


Figura 104. Gráfico del perfil de velocidades.

Los tiempos efectuados por el material rodante para realizar este recorrido, incluyendo los tiempos estacionamiento en las estaciones, son los siguientes:

Sentido	Tiempo
Madrid → Barcelona	2 h 29 m 37 s
Barcelona → Madrid	2 h 31 m 03 s

Tabla 27. Tiempos realizados en cada sentido.

2.3.2. Malla de tráfico

La malla de tráfico siguiente es el resultado de la superposición de los trenes previstos, de acuerdo con los intervalos marcados por los horarios, durante un tiempo de 900 s.

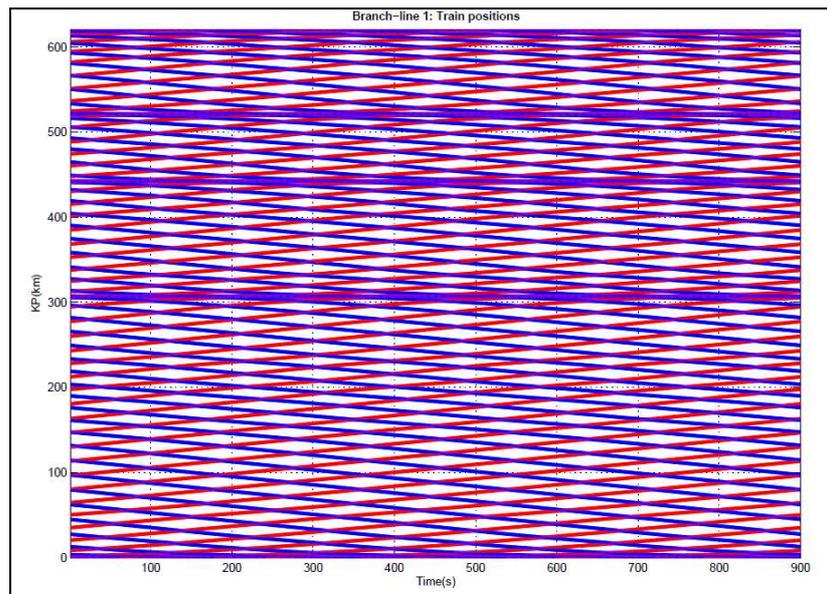


Figura 105. Gráfico de la malla de tráfico.

2.3.3. Resultados del flujo de cargas

A través de la resolución del flujo de cargas se determinan las tensiones en todos los nodos de la red en los instantes definidos por la malla de tráfico. A partir de las tensiones de los nodos, y con los procedimientos desarrollados en los capítulos 3 y 4 se determinan las potencias y las intensidades en todos los elementos de la red.

2.3.3.1. Potencias en las subestaciones.

En la siguiente gráfica se muestran las potencias medias demandadas en cada una de las subestaciones existentes. Las barras en rojo corresponden al escenario 1 (con material rodante sin frenado regenerativo) y las barras en azul al escenario 2 (con material rodante con frenado regenerativo).

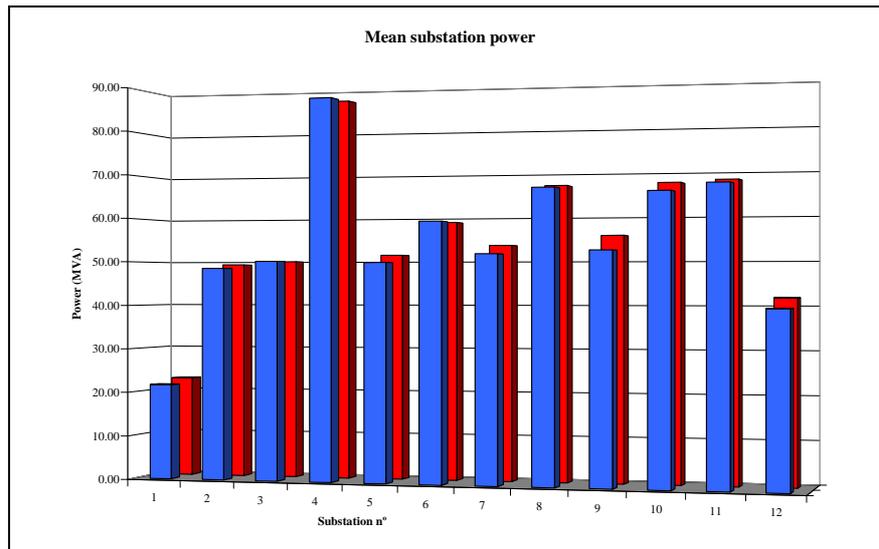


Figura 106. Potencias demandadas en las subestaciones.

Las mayores diferencias se producen en las siguientes subestaciones:

Subestación	Diferencia
9 (S/E Montagut)	6,16 %
12 (S/E Sant Boi)	5,25 %
1 (S/E Villaverde)	4,58 %
7 (S/E Zaragoza)	3,86 %

Tabla 28. Máximas diferencias en potencia media demandada entre escenarios.

Los sectores anteriores coinciden con frenadas debido a las estaciones de Lleida (sector 9), Barcelona (sector 12), Madrid (sector 1) y Zaragoza (sector 7). Así, la energía de frenado es aprovechada en el escenario 2, mientras que en el escenario 1 es quemada en las resistencias reostáticas.

2.3.3.2. Tensiones entre el pantógrafo y el carril a lo largo del recorrido.

En las dos siguientes gráficas se muestra la tensión entre el pantógrafo y el carril de rodadura a lo largo del trayecto para los dos escenarios. La línea roja corresponde al escenario 1 (con material rodante sin frenado regenerativo) y la línea azul al escenario 2 (con material rodante con frenado regenerativo).

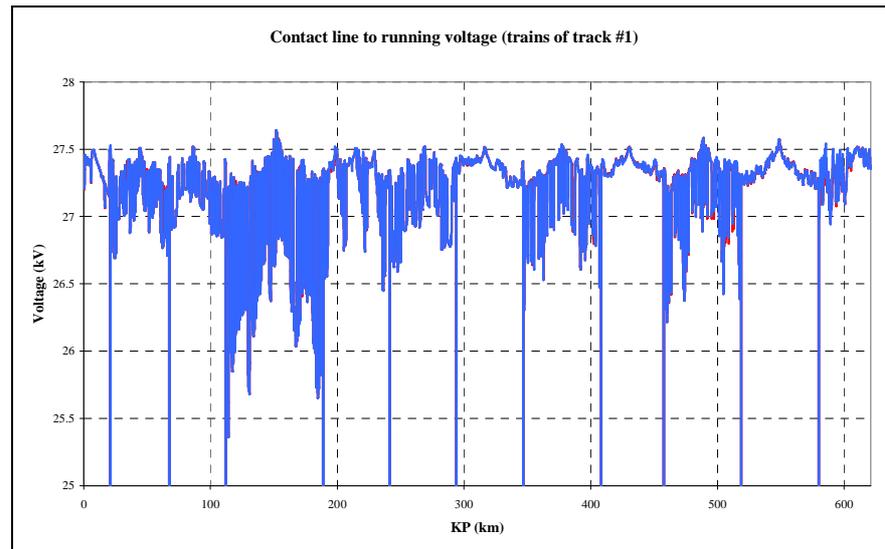


Figura 107. Tensión entre pantógrafo y carril en sentido Madrid – Barcelona.

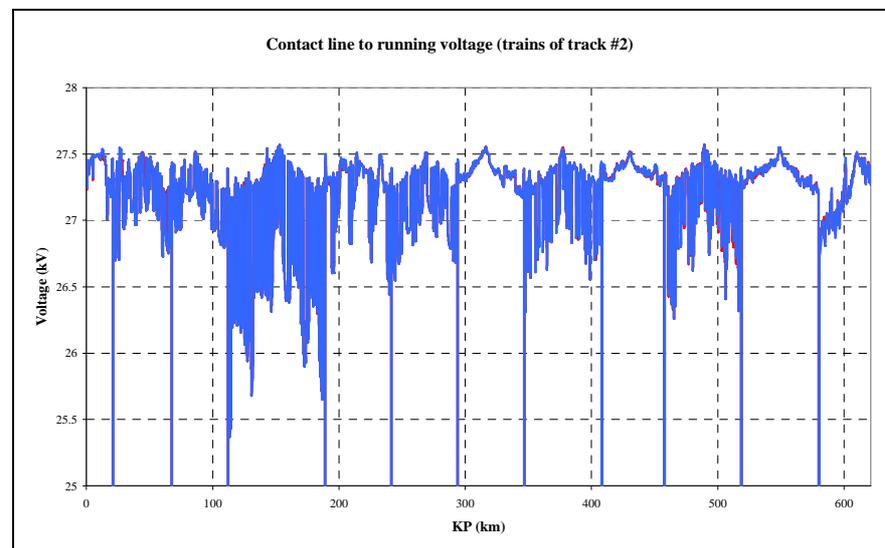


Figura 108. Tensión entre pantógrafo y carril en sentido Barcelona – Madrid.

Como puede apreciarse la tensión pantógrafo – carril de rodadura prácticamente se superpone para los escenarios 1 y 2. Por otra parte, vistos los valores máximos de la tensión, la tensión máxima de la línea no supone una limitación para la aceptación del frenado regenerativo.

2.3.3.3. Tensión carril - tierra.

En las dos siguientes gráficas se muestra la tensión entre el carril de rodadura y tierra en el sector 4 que es el de más longitud. La primera gráfica corresponde al escenario 1 (con material rodante sin frenado regenerativo) y la segunda gráfica al escenario 2 (con material rodante con frenado regenerativo).

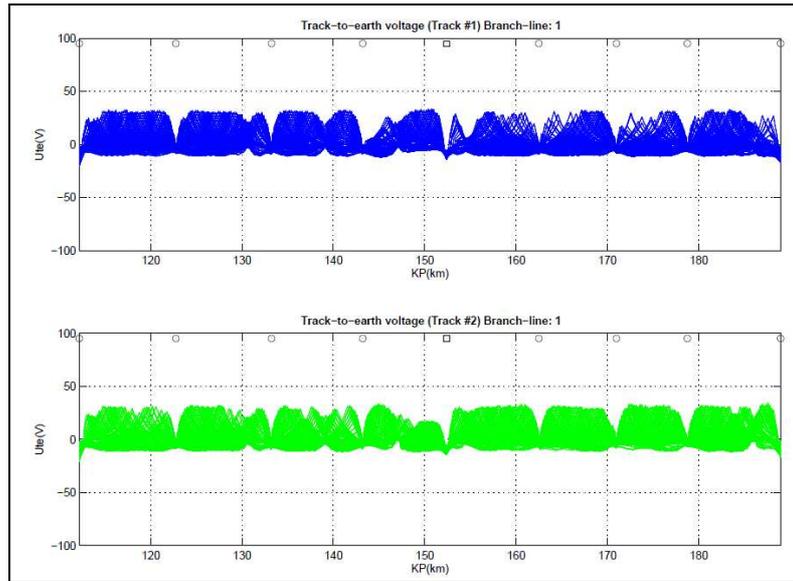


Figura 109. Tensión carril – tierra del sector 4 en el escenario 1.

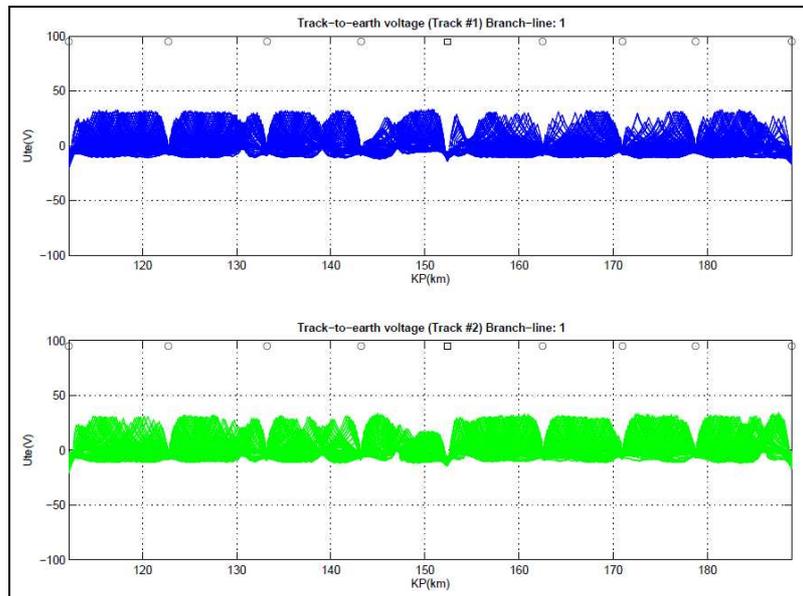


Figura 110. Tensión carril – tierra del sector 4 en el escenario 2.

En este caso, también los valores son prácticamente iguales para ambos escenarios.

2.3.3.4. Desequilibrios.

En las dos siguientes gráficas se muestra el desequilibrio instantáneo para la subestación nº 9 (Montagut). Igualmente, la primera gráfica corresponde al escenario 1 (con material rodante no provisto de frenado regenerativo) y la segunda gráfica al escenario 2 (con material rodante con frenado regenerativo).

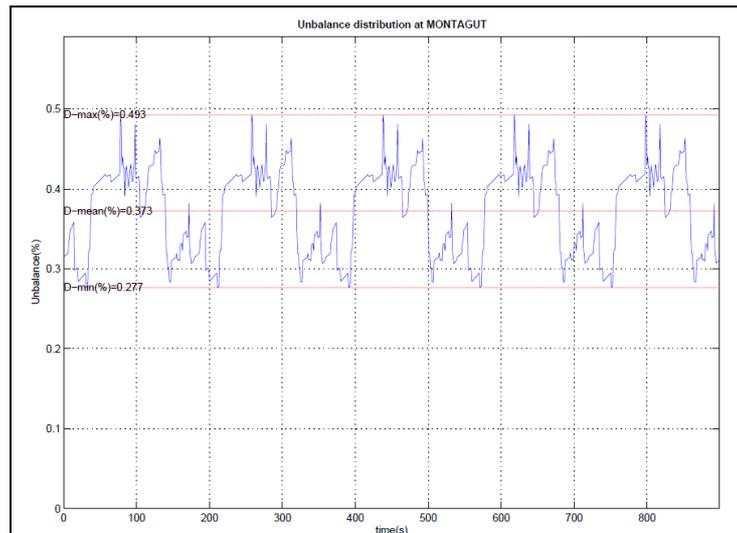


Figura 111. **Desequilibrio en el punto de conexión de Montagut en el escenario 1.**

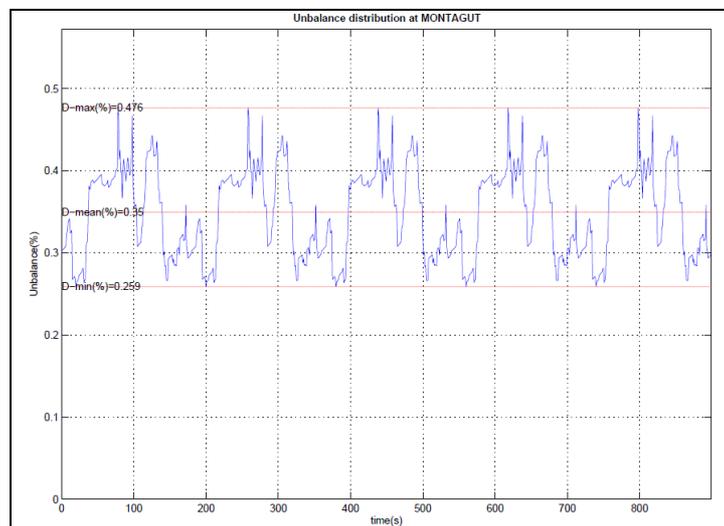


Figura 112. **Desequilibrio en el punto de conexión de Montagut en el escenario 2.**

El valor medio del desequilibrio en la red de alta tensión del punto de conexión en la subestación de Montagut en el escenario 1 es 0,37% y para el escenario 2 es 0,35%. En esta subestación el frenado regenerativo permite disminuir en 0,02% el valor medio del desequilibrio. Aunque es preciso aclarar que, las gráficas mostradas corresponden a la subestación de Montagut que era donde existía mayor diferencia entre la potencia media entre los escenarios 1 y 2, se puede afirmar que generalmente la utilización del frenado regenerativo repercute favorablemente en la disminución del desequilibrio.

2.3.3.5. Balance de energías.

La Energía suministrada a las subestaciones durante 18 h de operación en función del escenario es:

Escenario	Energía suministrada a las SET
1	12.104,60 MWh
2	11.791,45 MWh
1 – 2	313,15 MWh

Tabla 29. Resumen del balance de energías.

Así, el frenado regenerativo supone un ahorro diario 313,15 MWh, que representa un 2,6 % del total de la energía consumida.

Las pérdidas en la catenaria y en el circuito de retorno durante 18 h de operación son las siguientes:

Escenario	Pérdidas en la catenaria
1	131,96 MWh
2	129,08 MWh

Tabla 30. Resumen de las pérdidas en catenaria.

Aunque muy ligeramente, la utilización del frenado regenerativo en este caso repercute favorablemente también en la reducción de las pérdidas en la catenaria.

2.4. Conclusiones

Una vez vistos los resultados obtenidos con el simulador Rsim en la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En la línea estudiada al tratarse de un sistema de corriente alterna existe una receptibilidad muy elevada de la energía procedente del frenado regenerativo, así la potencia entregada a la catenaria durante el frenado regenerativo es consumida por el resto de trenes demandantes de potencia del mismo sector. Si se circula con intervalos del orden de los 3 minutos, prácticamente nunca se producirá un sobrante de energía en un sector.
- La resistencia al avance de los trenes de alta velocidad cuando circulan a velocidades próximas a 350 km/h es casi del mismo orden que la fuerza de tracción, que a nivel de potencias demandadas representa la potencia nominal del tren durante gran parte del recorrido.
- El trazado estudiado con una longitud total de 621 km y únicamente tres estaciones intermedias repercute en un potencial de energía recuperable baja, pues tan solo en las frenadas de las

estaciones, en los descensos o en la reducción de la velocidad por el paso en algunos tramos se genera energía recuperable.

En la siguiente tabla se indica la repercusión del frenado regenerativo en algunos parámetros de diseño de los sistemas de electrificación ferroviaria en corriente alterna.

Parámetro de diseño	Repercusión del frenado regenerativo
Potencias medias demandadas en las subestaciones.	En general disminuye la potencia demandada, siempre que en el tramo alimentado por la subestación se produzcan frenadas.
Tensiones entre pantógrafo y carril	Aumenta en los puntos donde se utiliza el frenado regenerativo, y también aumenta en los puntos donde existen trenes cercanos regenerando.
Tensiones carril – tierra	Generalmente no tendrá una influencia sensible, pero en ciertas circunstancias con la utilización del frenado regenerativo pueden darse valores ligeramente superiores.
Desequilibrios	Aunque ligeramente, el frenado regenerativo disminuye los valores de desequilibrio.
Energía consumida	Lógicamente, la utilización del frenado regenerativo permite un ahorro energético.
Pérdidas en la catenaria	Las pérdidas en la catenaria suelen disminuir si se utiliza el frenado regenerativo.

Tabla 31. Repercusión del frenado regenerativo sobre los parámetros de diseño.

3. APLICACIÓN SOBRE UNA LÍNEA ELECTRIFICADA EN CC

3.1. Datos de partida

3.1.1. Trazado

La línea 9 de Metro de Barcelona es una línea de ferrocarril metropolitano soterrado que actualmente se encuentra parcialmente en servicio. Con una longitud total de 48 km y soterrada en su mayor parte, será la línea soterrada más larga de Europa. En gran parte de la línea las dos vías transcurren por un mismo túnel, pero a distinto nivel. El túnel en algunos tramos llegará a los 90 metros de profundidad para evitar el resto de líneas y salvar la compleja geología del centro de Barcelona

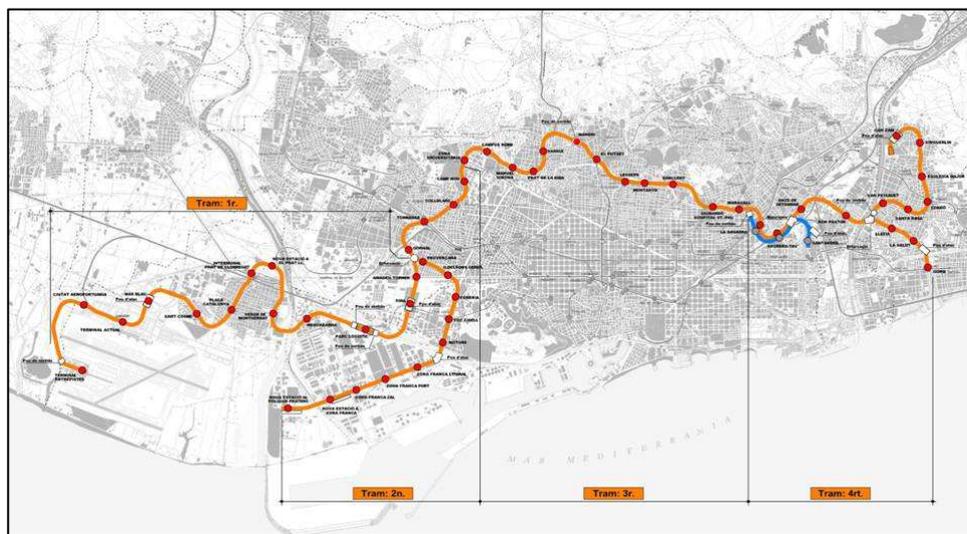


Figura 113. Trazado de la línea 9 de Metro de Barcelona.

La línea presenta las siguientes características principales:

Longitud	48 km
Velocidad máxima	80 km/h
Carril de rodadura:	UIC 54
Ancho	1435 mm
Radio de curvatura mínimo	250 m
Rampas máximas	40 ‰
Peralte máximo	140 mm

Tabla 32. Datos generales de la línea.

En las siguientes figuras se muestra los perfiles de la línea metropolitana [104] [105] [106] [107]:

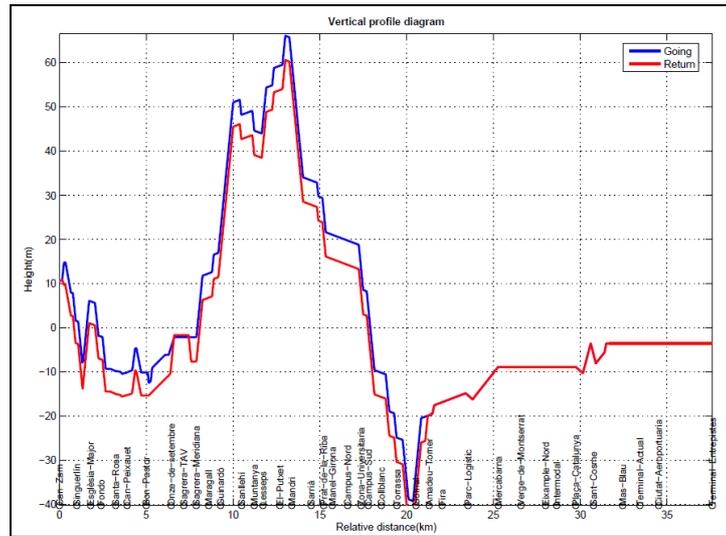


Figura 114. Perfil de la línea 9 (Can Zam – Terminal entre pistes).

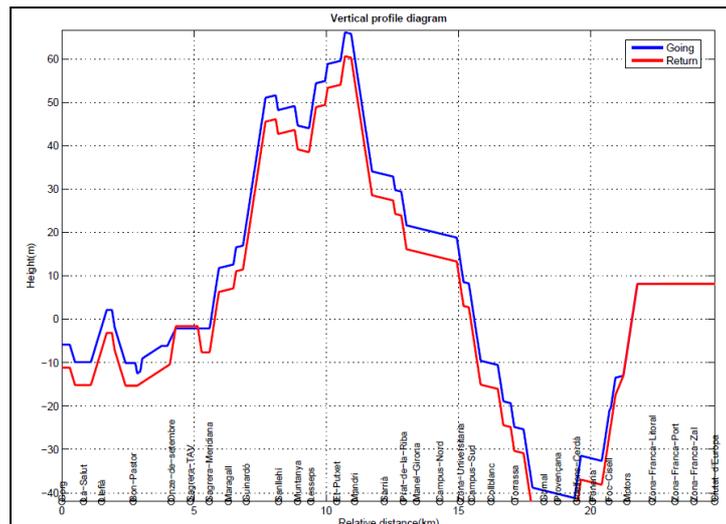


Figura 115. Perfil de la línea 9 (Gorg – Ciutat d'Europa).

3.1.2. Material rodante

El material rodante elegido para el estudio es un Alstom de la gama Metrópolis que coincide con el material rodante adquirido para el servicio de esta línea. El equipo de tracción distribuida está basado en la tecnología IGBTs. Comprende cuatro cadenas de tracción distribuidas dos a dos (en las parejas de coches extremos) que alimentan los motores de cada eje de bogie. Las unidades disponen de un sistema de retorno de corriente a la red, frenado regenerativo así como de un sistema de frenado reostático cuando la red no es capaz de absorber la corriente necesaria. Las características básicas [108] de estos trenes son las siguientes:

Modelo:	Alstom Metrópolis
Composición:	M-M-R-M-M
Motores:	16
Peso en vacío:	173,2 t
Longitud:	80 m
Número de plazas totales:	696 p
Potencia:	2.489 kW
Potencia auxiliares:	211 kW
Aceleración de servicio:	1 m/s ²
Desaceleración de servicio:	- 1 m/s ²

Tabla 33. Datos técnicos del material rodante.

En la siguiente figura se muestran las curvas de tracción y frenado:

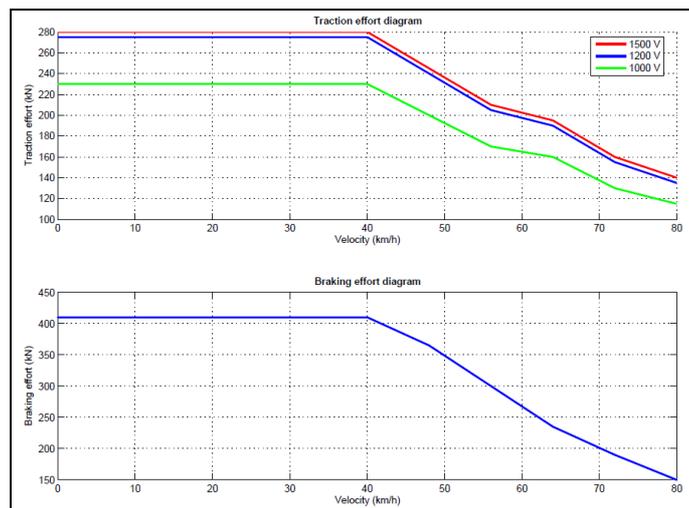


Figura 116. Curvas de tracción y frenado del material Alstom Metrópolis.

Y en la siguiente gráfica se indica la curva de la resistencia al avance en función de la velocidad:

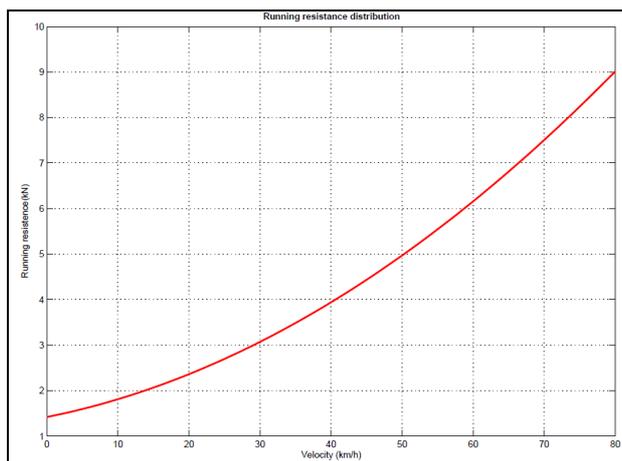


Figura 117. Curva de la resistencia al avance del material Alstom Metrópolis.

3.1.3. Red de electrificación

La línea 9 está electrificada en corriente continua a 1500 V. En la siguiente tabla se indica las subestaciones de tracción que alimentan a la línea:

Nº	Rama	Pk(m)	Subestación	Potencia (kW)	Tipo
1	1	0+600	Can Zam	2x2.000	Rectificadora
2	1	2+390	Església Major	2x2.000	Rectificadora
3	1	5+000	Pou Rodó Bon Pastor	2x2.000	Rectificadora
4	2	2+900	Gorg	2x2.000	Rectificadora
5	3	8+470	Sagrera Meridiana	2x2.000	Rectificadora
6	3	11+050	Sanllehy	2x2.000	Rectificadora
7	3	13+350	El Putxet	2x2.000	Rectificadora
8	3	15+880	Prat de la Riba	2x2.000	Rectificadora
9	3	17+110	Campus Nord	2x2.000	Rectificadora
10	3	18+400	Campus Sud	2x2.000	Rectificadora
11	3	20+900	Gornal	2x2.000	Rectificadora
12	4	24+280	Parc Logistic	2x2.000	Rectificadora
13	4	27+110	Verge de Montserrat	2x2.000	Rectificadora
14	4	30+250	Plaça de Catalunya	2x2.000	Rectificadora
15	4	32+960	Mas Blau	2x2.000	Rectificadora
16	4	35+200	Ciutat Aeroportuaria	2x2.000	Rectificadora
17	4	37+600	Terminal entre pistes	2x2.000	Rectificadora
18	5	24+600	Motors	2x2.000	Rectificadora
19	5	26+880	Zona Franca Zal	2x2.000	Rectificadora
20	5	27+600	Zona Franca Tallers	2x2.000	Rectificadora

Tabla 34. Relación de subestaciones de tracción.

En la siguiente tabla se indica la correspondencia de las ramas:

Número	Rama
1	Can Zam – Bon Pastor
2	Gorg – Bon Pastor
3	Central: Bon Pastor – Gornal
4	Gornal – Terminal entre pistas
5	Gornal – Ciutat d'Europa

Tabla 35. Correspondencia rama - tramo.

La catenaria de la línea es del tipo rígido, y con las siguientes características:

Conductor	Sección
Hilo de contacto:	107 mm ² Cu
Perfil:	2.220 mm ² Al

Tabla 36. Datos de la catenaria rígida.

3.1.4. Itinerarios e intervalos de paso

La línea será operada por Transports Metropolitans de Barcelona (TMB) y existirán tres servicios (1, 2 y 3). Los servicios 1 y 2 comparten el tramo central, situado entre las estaciones de Gornal y Bon Pastor, y desde la estación de Parc Logístic a Terminal entre pistas existirán los servicios 1 y 3.

Así, para el estudio se han considerado tres itinerarios con paradas en las estaciones siguientes:

Itinerario 1: Can Zam – Terminal entre pistas:

Rama	Pk (m)	Estación	Tiempo de parada (s)
1	0+600	Can Zam	40
1	1+590	Singuerlín	20
1	2+390	Església Major	20
1	3+000	Fondo	20
1	3+840	Santa Rosa	20
1	4+490	Can Peixauet	20
3	5+600	Bon Pastor	20
3	7+030	Onze de setembre	20

3	7+750	Sagrera TAV	20
3	8+470	Sagrera Meridiana	20
3	9+190	Maragall	20
3	9+870	Guinardó	20
3	11+100	Sanllehí	20
3	11+820	Muntanya	20
3	12+320	Lesseps	20
3	13+300	El Putxet	20
3	13+970	Mandri	20
3	15+100	Sarrià	20
3	15+820	Prat de la Riba	20
3	16+320	Manel Girona	20
3	17+190	Campus Nord	20
3	17+970	Zona Universitaria	20
3	18+400	Campus Sud	20
3	19+140	Collblanc	20
3	20+040	Torrassa	20
3	21+140	Gornal	20
4	21+900	Amadeu Torner	20
4	22+630	Fira	20
4	24+140	Parc Logistic	20
4	25+870	Mercabarna	20
4	27+180	Verge de Montserrat	20
4	28+590	Eixample Nord	20
4	29+230	Intermodal	20
4	30+340	Plaça Catalunya	20
4	31+350	Sant Cosme	20
4	33+030	Mas Blau	20
4	34+030	Terminal Actual	20
4	35+110	Ciutat Aeroportuaria	20
4	38+200	Terminal entre pistes	40

Tabla 37. Relación de estaciones del itinerario 1.

El intervalo entre dos tres consecutivos en este itinerario será de 240 segundos.

Itinerario 2: Gorg – Ciutat d’Europa:

Rama	Pk (m)	Estación	Tiempo de parada (s)
2	2900	Gorg	40

2	3720	La Salut	20
2	4400	Llefià	20
3	5+600	Bon Pastor	20
3	7+030	Onze de setembre	20
3	7+750	Sagrera TAV	20
3	8+470	Sagrera Meridiana	20
3	9+190	Maragall	20
3	9+870	Guinardó	20
3	11+100	Sanllequí	20
3	11+820	Muntanya	20
3	12+320	Lesseps	20
3	13+300	El Putxet	20
3	13+970	Mandri	20
3	15+100	Sarrià	20
3	15+820	Prat de la Riba	20
3	16+320	Manel Girona	20
3	17+190	Campus Nord	20
3	17+970	Zona Universitaria	20
3	18+400	Campus Sud	20
3	19+140	Collblanc	20
3	20+040	Torrassa	20
3	21+140	Gornal	20
5	21650	Provençana	20
5	22370	Ildelfons Cerdà	20
5	22980	Foneria	20
5	23600	Foc Cisell	20
5	24270	Motors	20
5	25240	Zona Franca Litoral	20
5	26090	Zona Franca Port	20
5	26810	Zona Franca Zal	20
5	27600	Ciutat d'Europa	40

Tabla 38. Relación de estaciones del itinerario 2.

El intervalo entre dos tres consecutivos en este itinerario será de también 240 segundos.

Itinerario 3: Parc Logístic – Terminal entre pistas:

Rama	Pk (m)	Estación	Tiempo de parada (s)
4	24+140	Parc Logístic	20

4	25+870	Mercabarna	20
4	27+180	Verge de Montserrat	20
4	28+590	Eixample Nord	20
4	29+230	Intermodal	20
4	30+340	Plaça Catalunya	20
4	31+350	Sant Cosme	20
4	33+030	Mas Blau	20
4	34+030	Terminal Actual	20
4	35+110	Ciutat Aeroportuaria	20
4	38+200	Terminal entre pistes	40

Tabla 39. Relación de estaciones del itinerario 3.

El intervalo entre dos tres consecutivos en este itinerario será también de 240 segundos.

3.2. Escenarios estudiados

En la línea 9 de metro de Barcelona, se han considerado seis escenarios:

Escenario	Condicionantes
1	Material móvil sin frenado regenerativo
2	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales y la catenaria alimentada en vías separadas.
3	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales y la catenaria alimentada en vías unidas.
4	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones reversibles y la catenaria alimentada en vías separadas.
5	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones reversibles y la catenaria alimentada en vías unidas.
6	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales provistas de acumuladores de energía y la catenaria alimentada en vías separadas.

Tabla 40. Relación de escenarios estudiados.

En los escenarios 2 y 3, y 4 y 5 se estudia la influencia de la disminución de la resistencia de la línea de contacto sobre las pérdidas en la catenaria y la receptibilidad del frenado regenerativo. En los escenarios 4 y 5 se ha considerado que todas las subestaciones de tracción son del tipo reversible.

En el escenario 6 se han incluido acumuladores de energía a la altura de las subestaciones con pk 2+900 de la rama 2, pk 13+350 y 20+900 de la rama 3, pk 24+280, pk 27+110, pk 30+250 y pk 32+960 de la rama 3, y pk 24+600, pk 26+880 y pk 27+600 de la rama 5. En todos los casos la energía máxima almacenable es de 10 kWh y la potencia máxima entregable de 1.500 kW.

3.3. Resultados

3.3.1. Movimiento del tren

En la siguiente gráfica se muestra el perfil de velocidades obtenido con el programa Rsim en la línea 9 de Metro de Barcelona:

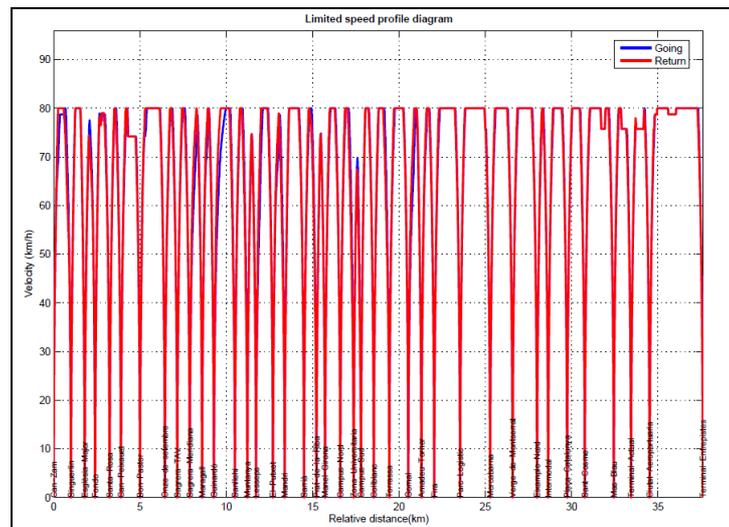


Figura 118. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 1.

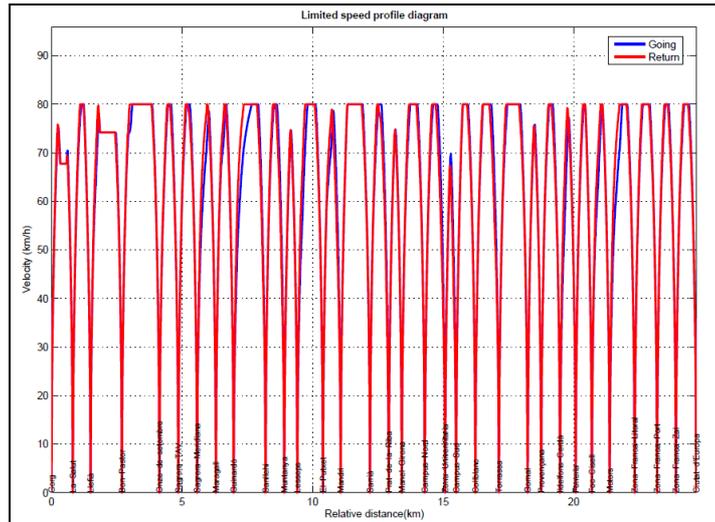


Figura 119. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 2.

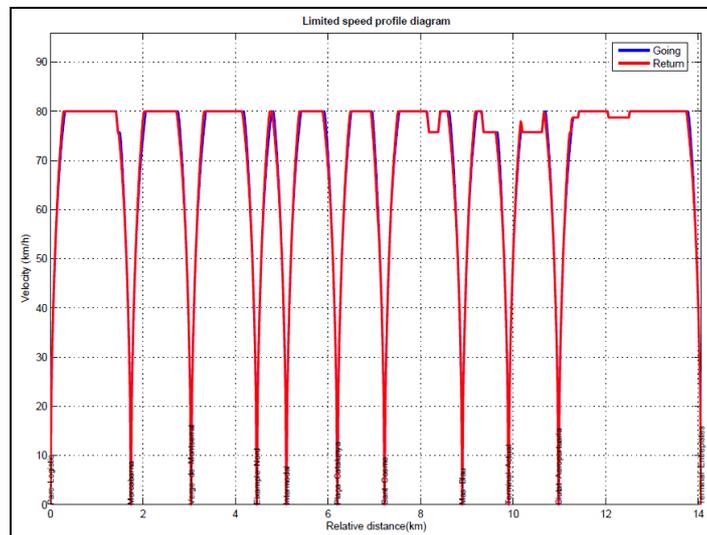


Figura 120. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 3.

Los tiempos efectuados por el material rodante para realizar estos itinerarios, incluyendo los tiempos estacionamiento en las estaciones, son los siguientes:

Itinerario	Sentido	Tiempo
1	Can Zam → Terminal entre pistes	56m 21s
1	Terminal entre pistes → Can Zam	56m 24s
2	Gorg → Ciutat d'Europa	42m 09s
2	Ciutat d'Europa → Gorg	42m 02s
3	Parc Logístic → Terminal entre pistes	18m 23s
3	Terminal entre pistes → Parc Logístic	18m 24s

Tabla 41. Tiempos efectuados por itinerario y sentido.

3.3.2. Malla de tráfico

Las mallas de tráfico siguientes son el resultado de la superposición de los trenes previstos por los tres itinerarios, de acuerdo con los intervalos marcados por los horarios, durante un tiempo de 900 s.

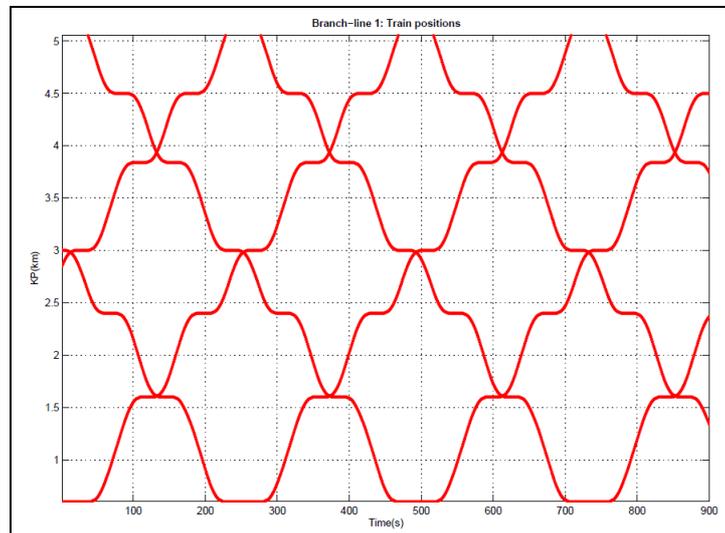


Figura 121. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 1 (Can Zam – Bon Pastor)

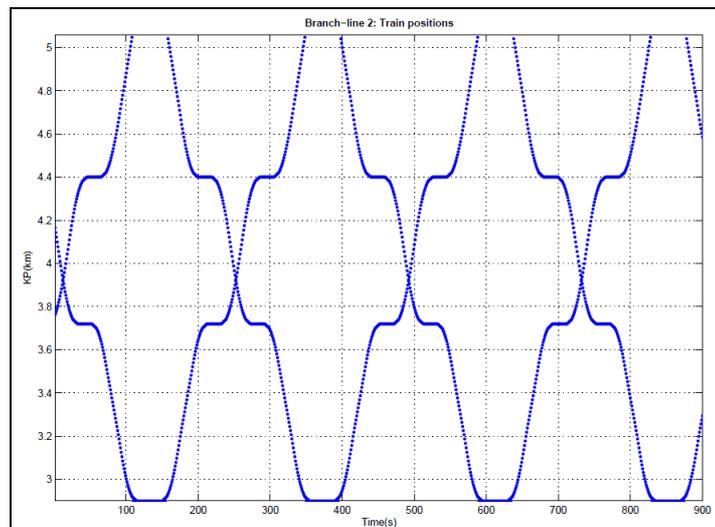


Figura 122. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 2 (Gorg – Bon Pastor).

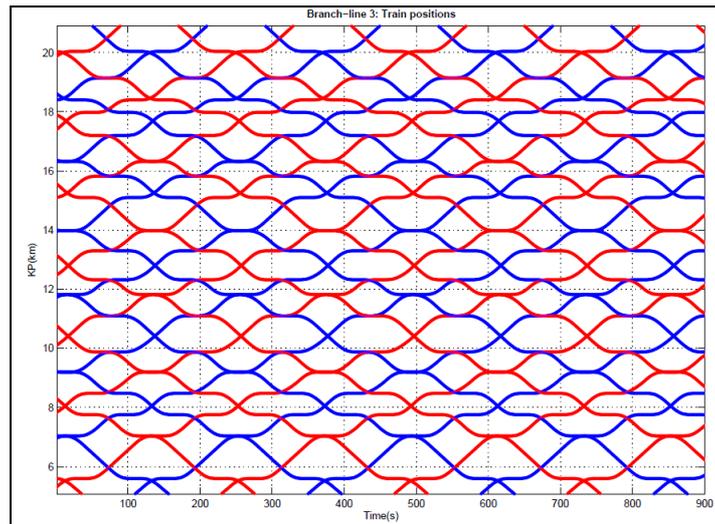


Figura 123. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 3 (Bon Pastor – Gornal).

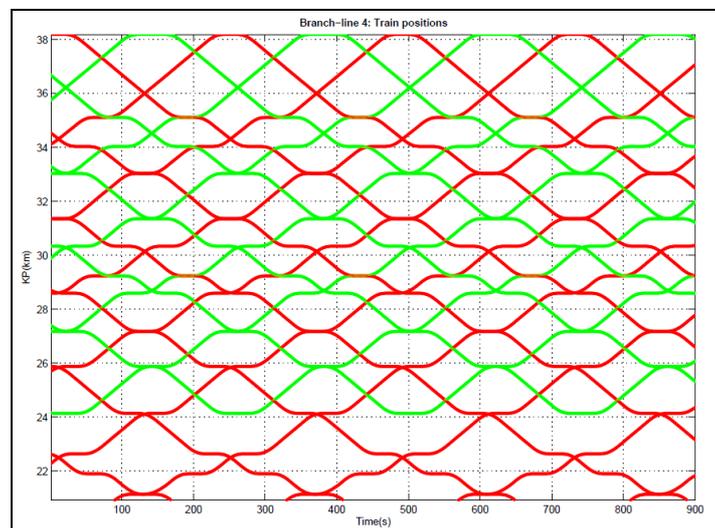


Figura 124. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 4 (Gornal – Terminal entre pistes).

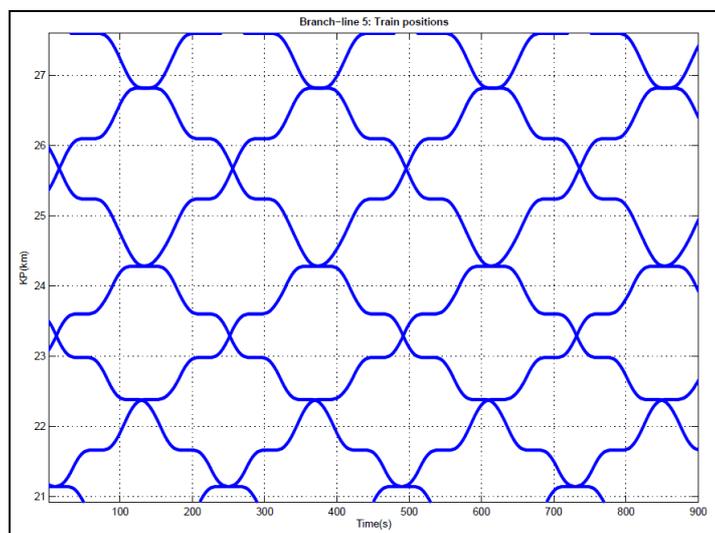


Figura 125. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 5 (Gornal – Ciutat d'Europa).

En las gráficas anteriores se ha seguido el siguiente código de colores:

Itinerario	Trayecto	Color
1	Can Zam \leftrightarrow Terminal entre pistas	Rojo
2	Gorg \leftrightarrow Ciutat d'Europa	Azul
3	Parc Logistic \leftrightarrow Terminal entre pistas	Verde

Tabla 42. Correspondencia itinerario – color.

3.3.3. Resultados del flujo de cargas

A través de la resolución del flujo de cargas se determinan las tensiones en todos los nodos de la red en los instantes definidos por la malla de tráfico. A partir de las tensiones de los nodos, y con los procedimientos desarrollados en los capítulos 3 y 4 se determinan las potencias y las intensidades en todos los elementos de la red.

3.3.3.1. Potencias en las subestaciones.

En la siguiente gráfica se muestran las potencias medias demandadas en cada una de las subestaciones existentes.

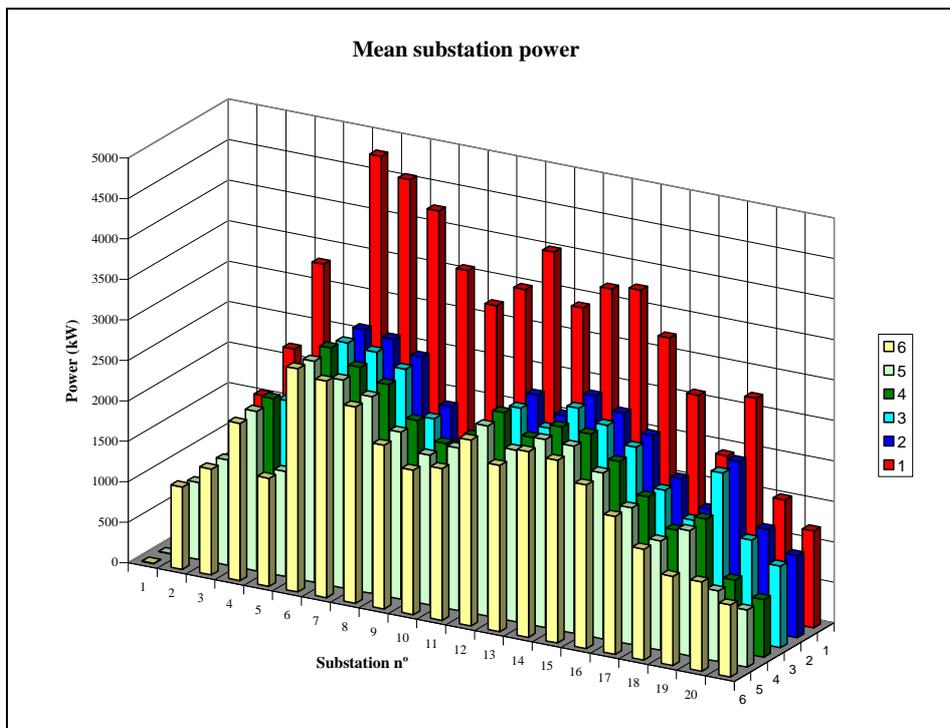


Figura 126. Potencias demandadas en las subestaciones.

El código de colores de las barras anteriores es el siguiente:

Color barra	Escenario	Condicionantes
Rojo	1	Material móvil sin frenado regenerativo
Azul oscuro	2	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales y la catenaria alimentada en vías separadas.
Azul claro	3	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales y la catenaria alimentada en vías unidas.
Verde oscuro	4	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones reversibles y la catenaria alimentada en vías separadas.
Verde claro	5	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones reversibles y la catenaria alimentada en vías unidas.
Amarillo	6	Material móvil con frenado regenerativo, subestaciones convencionales provistas de acumuladores de energía y la catenaria alimentada en vías separadas.

Tabla 43. Correspondencia escenario - color.

Contrariamente a lo que sucedía en el estudio anterior sobre la línea de alta velocidad, en una línea metropolitana con multitud de frenadas existe un importante potencial de energía recuperable, de aquí la gran diferencia que se observa entre el escenario 1 (sin frenado regenerativo) y el resto de escenarios. En los próximos apartados se determinará en que escenario se produce un mayor ahorro energético.

3.3.3.2. Tensiones entre el pantógrafo y el carril a lo largo de los itinerarios.

En las tres siguientes gráficas se muestra la tensión entre el pantógrafo y el carril de rodadura a lo largo de los tres itinerarios y para los seis escenarios.

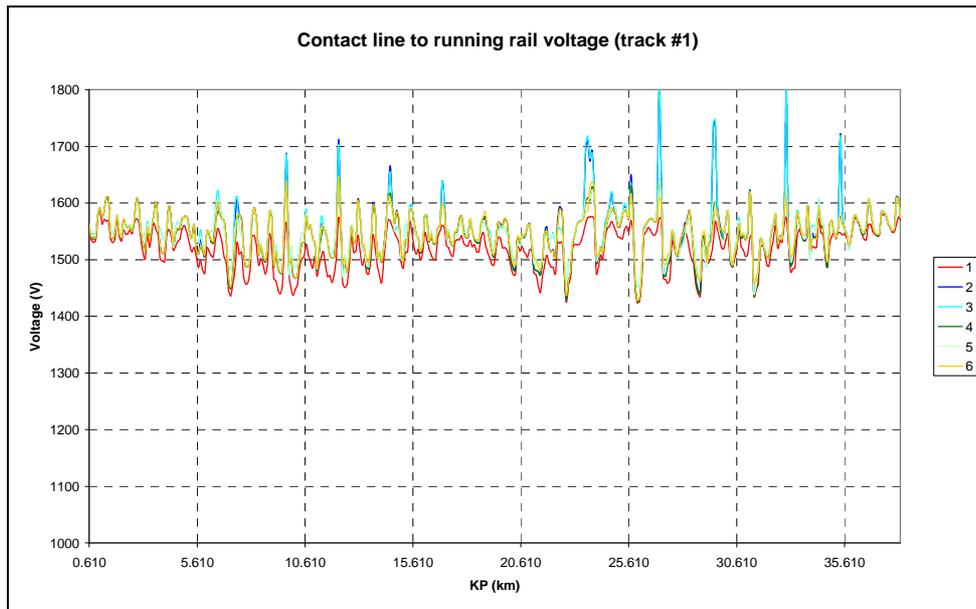


Figura 127. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 1 (sentido Can Zam – Terminal entre pistas).

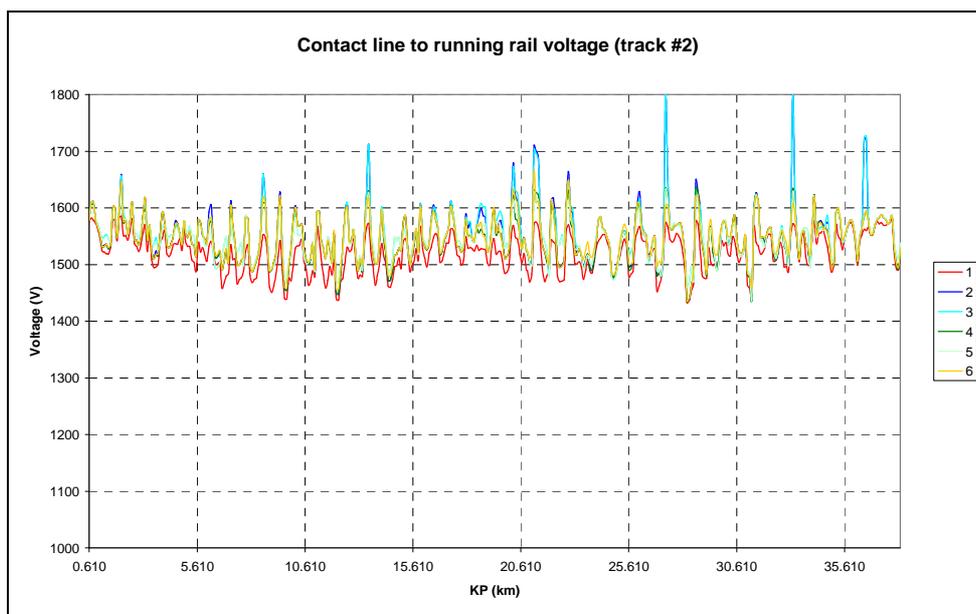


Figura 128. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 1 (sentido Terminal entre pistas – Can Zam).

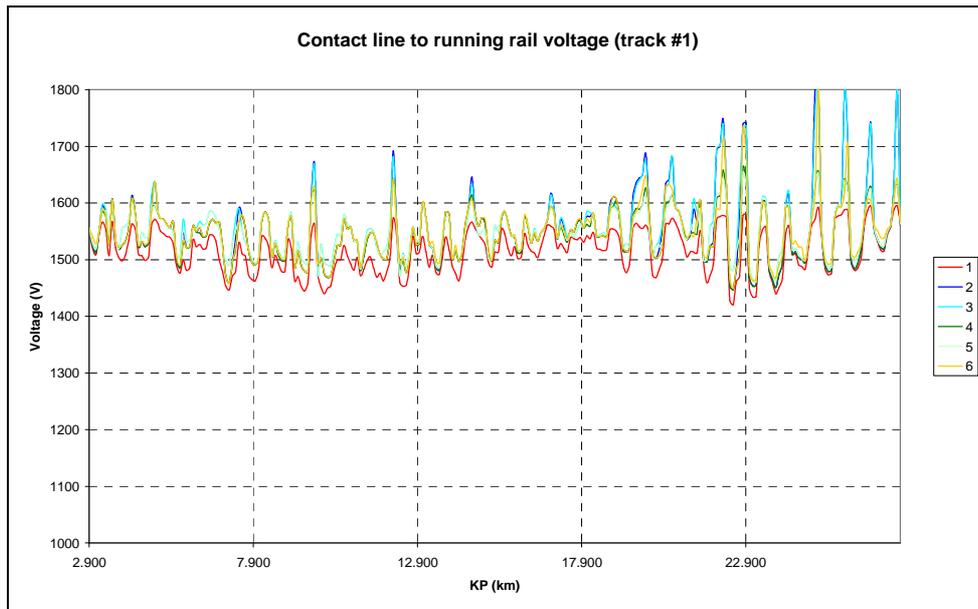


Figura 129. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 2 (sentido Gorg – Ciutat d’Europa).

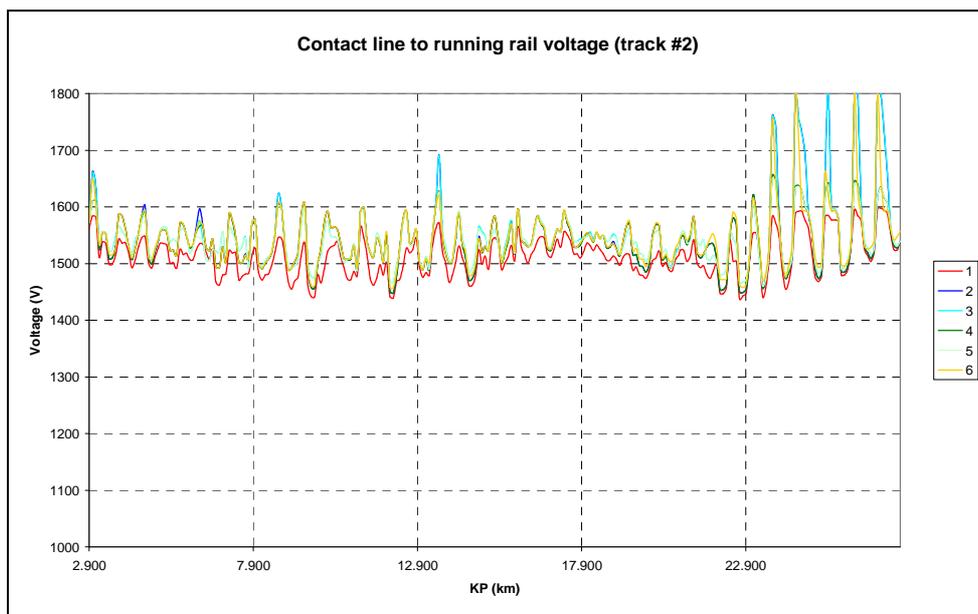


Figura 130. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 2 (sentido Ciutat d’Europa - Gorg).

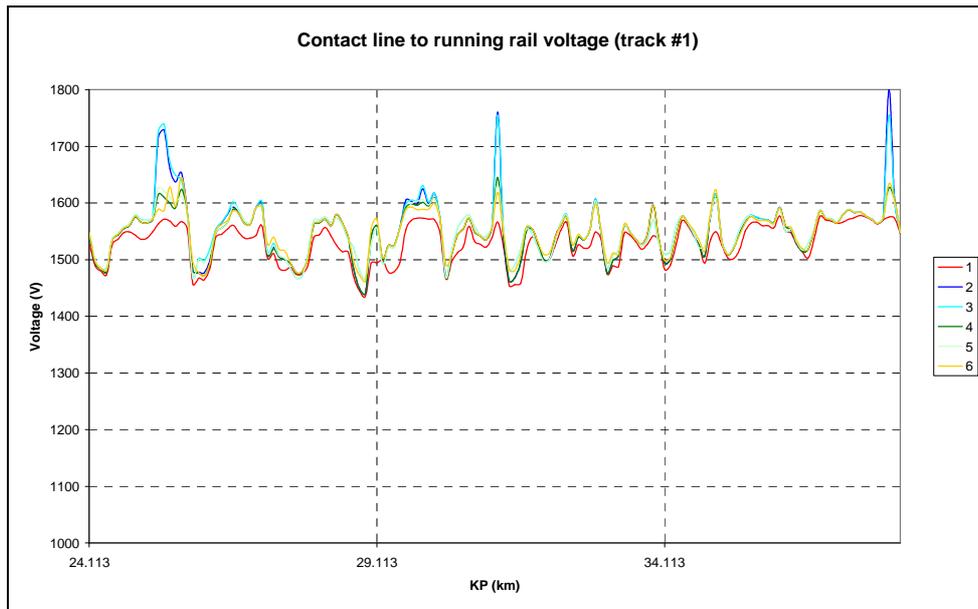


Figura 131. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 3 (sentido P Logístico – T. entrepistes).

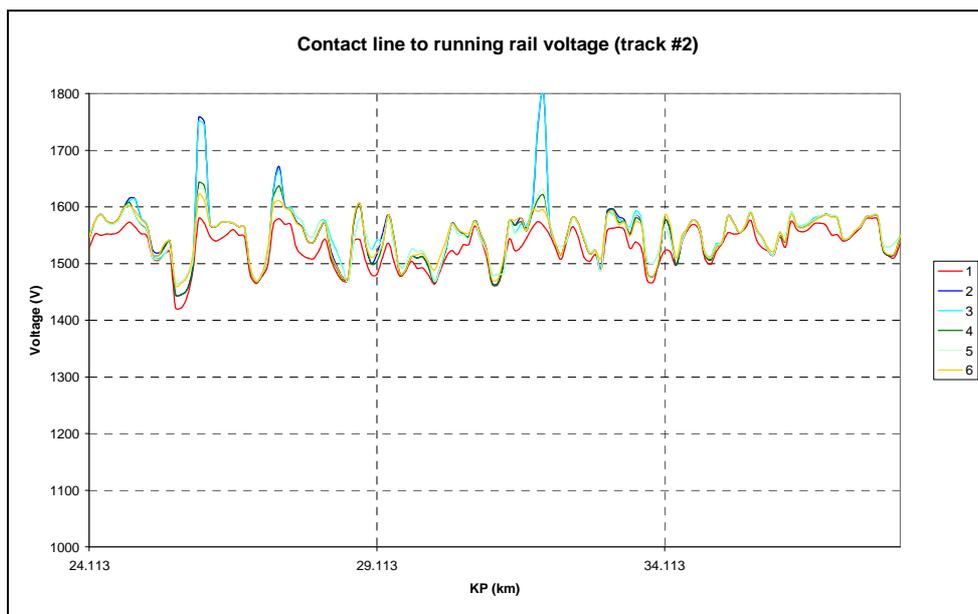


Figura 132. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 3 (sentido T. entrepistes – P Logístico).

En los tres itinerarios se puede observar que en los escenarios con subestaciones convencionales (2 y 3) es cuando se alcanzan en las frenadas las tensiones pantógrafo-carril máximas, e incluso en algunos casos se llega a alcanzar la tensión máxima de 1800 V. Mientras que las tensiones pantógrafo-carril máximas en los escenarios con subestaciones reversibles o con acumuladores (4, 5 y 6) en general se encuentran bastante por debajo que la tensión máxima permitida en la línea (1800 V).

3.3.3.3. Tensiones carril – tierra y corrientes vagabundas

En este apartado se muestra la influencia del frenado regenerativo y las tensiones máximas de la línea sobre las tensiones carril – tierra y las corrientes vagabundas. Para ello se ha escogido el tramo central de la línea 9 que corresponde a la rama 3, y se han elegido tres escenarios:

- Escenario 1, sin frenado regenerativo.
- Escenario 2, con frenado regenerativo y subestaciones convencionales.
- Escenario 4, con frenado regenerativo y subestaciones reversibles.

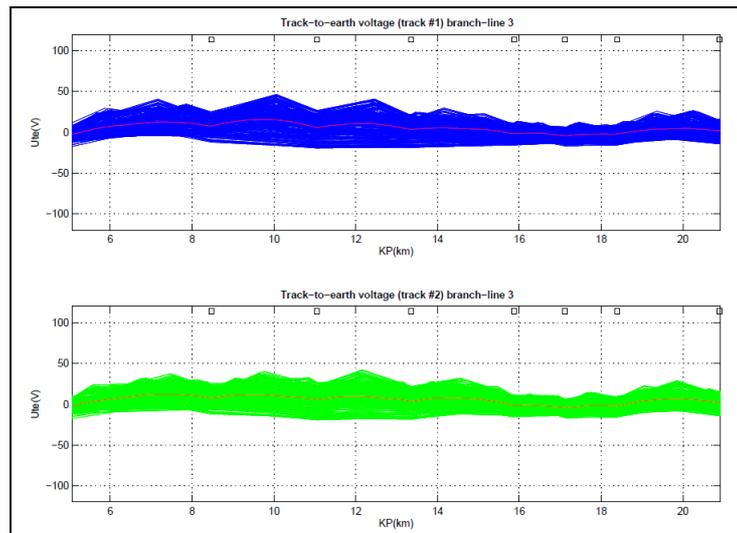


Figura 133. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 1.

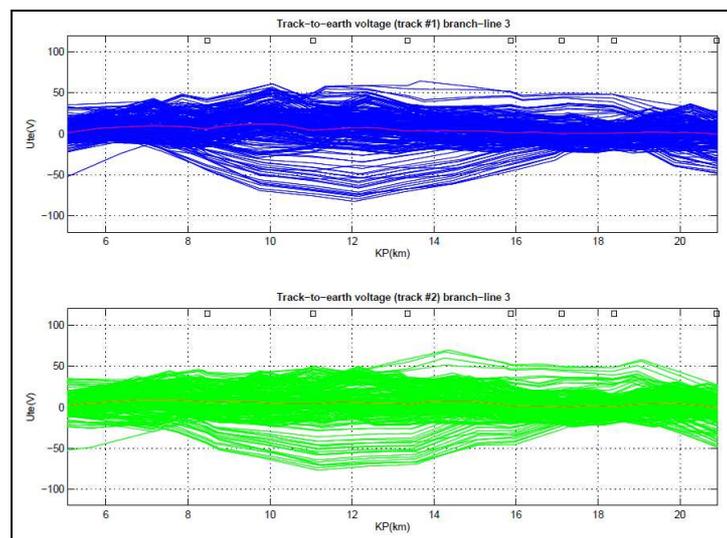


Figura 134. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 2.

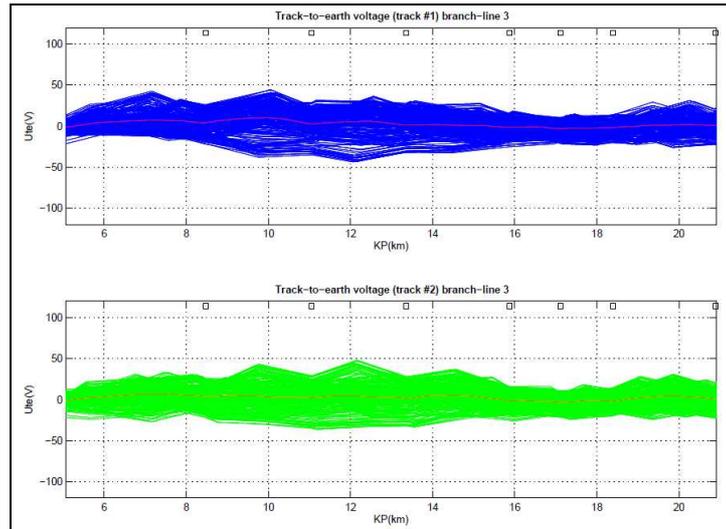


Figura 135. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 4.

En los gráficos anteriores se observa que se obtienen tensiones carril-tierra más elevadas en el escenario 2. Este aumento de las tensiones carril-tierra es debido a que las subestaciones convencionales no permiten inyectar la energía procedente del frenado regenerativo a la red trifásica de alta tensión, lo que obliga a que sea consumida por otros trenes traccionando siempre que la tensión pantógrafo – carril se encuentra por debajo a la tensión máxima en los trenes que se encuentran regenerando. Esta tensión de regeneración más elevada que la tensión de vacío de las subestaciones origina tensiones carril – tierra más elevadas, y como se verá en los siguientes gráficos, también repercute en unos valores superiores de corrientes vagabundas.

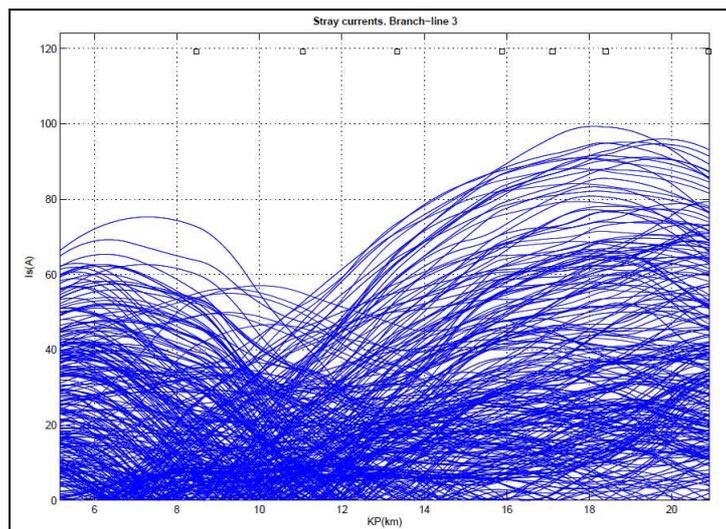


Figura 136. Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 1.

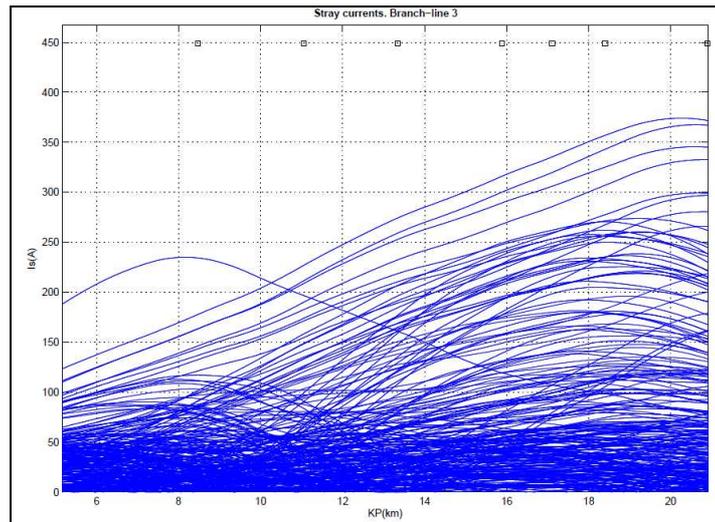


Figura 137. **Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 2.**

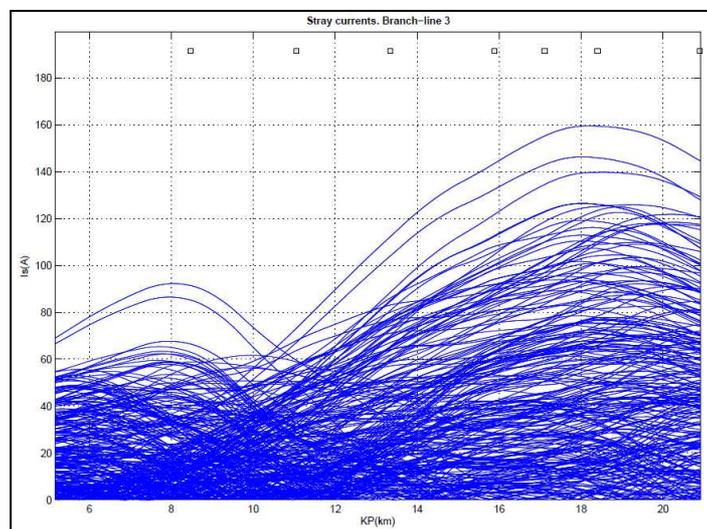


Figura 138. **Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 4.**

3.3.3.4. Corrientes en los feeders de alimentación de las subestaciones

En este apartado se muestra la influencia del frenado regenerativo y las tensiones máximas de la línea sobre las corrientes en los *feeders* de salida de las subestaciones. Para ello se han elegido tres escenarios:

- Escenario 1, sin frenado regenerativo.
- Escenario 2, con frenado regenerativo y subestaciones convencionales.
- Escenario 4, con frenado regenerativo y subestaciones reversibles.

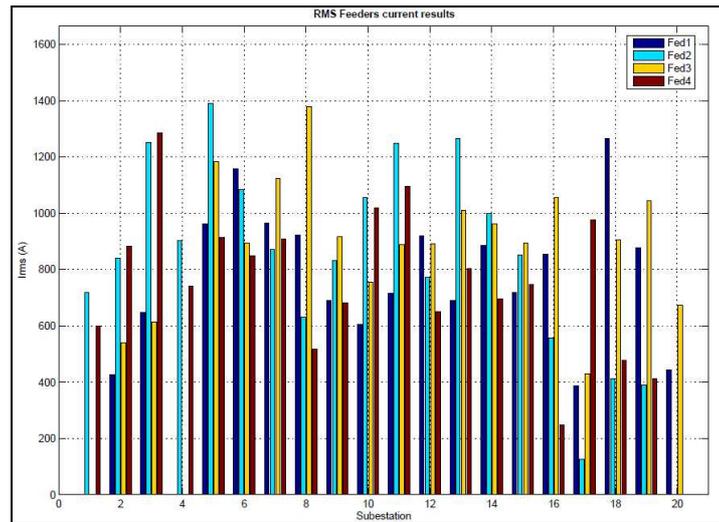


Figura 139. Corrientes RMS en los *feeders* de salida de las subestaciones en el escenario 1.

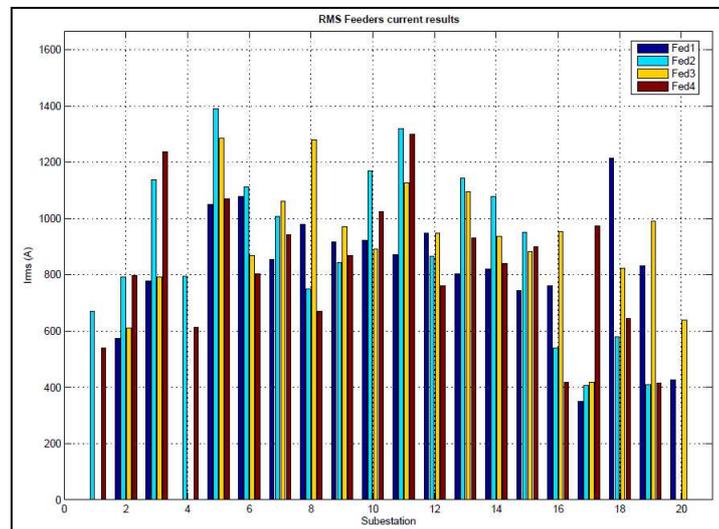


Figura 140. Corrientes RMS en los *feeders* de salida de las subestaciones en el escenario 2.

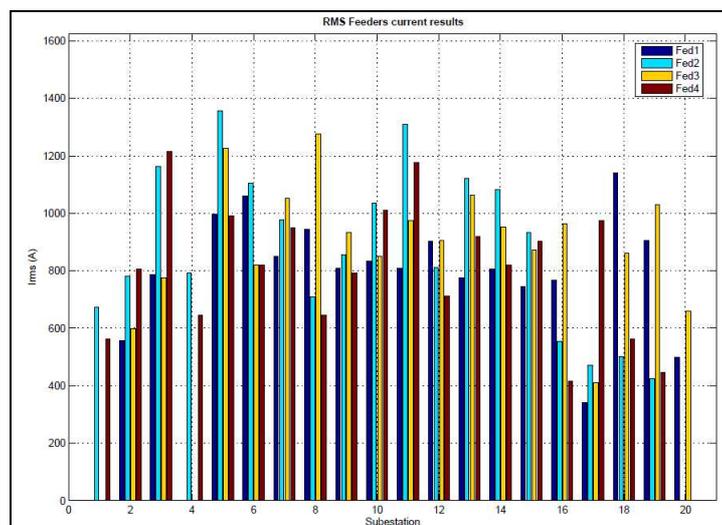


Figura 141. Corrientes RMS en los *feeders* de salida de las subestaciones en el escenario 4.

En las gráficas anteriores puede observarse que la utilización del frenado regenerativo no tiene una gran influencia en las corrientes que circulan en los *feeders* de salida. Esto es debido a que en los escenarios 2 y 4 la corriente que circula por los *feeders* no proviene totalmente de la red de alta tensión, sino que una parte transcurre entre sectores, entrando por el *feeder* del sector con energía sobrante y saliendo por el *feeder* del sector demandante de energía.

3.3.3.5. Evolución de la potencia y energía en los acumuladores.

En el escenario 6 se ha previsto la instalación de acumuladores de energía en diversas subestaciones. Los resultados de este escenario es comparable a los resultados de los escenarios con subestaciones reversibles (4 y 5), si bien la energía del acumulador está limitada por su capacidad máxima. En los siguientes gráficos se muestra la evolución de la energía almacenada y el flujo de potencia en dos de los acumuladores instalados en la línea para el escenario 6.

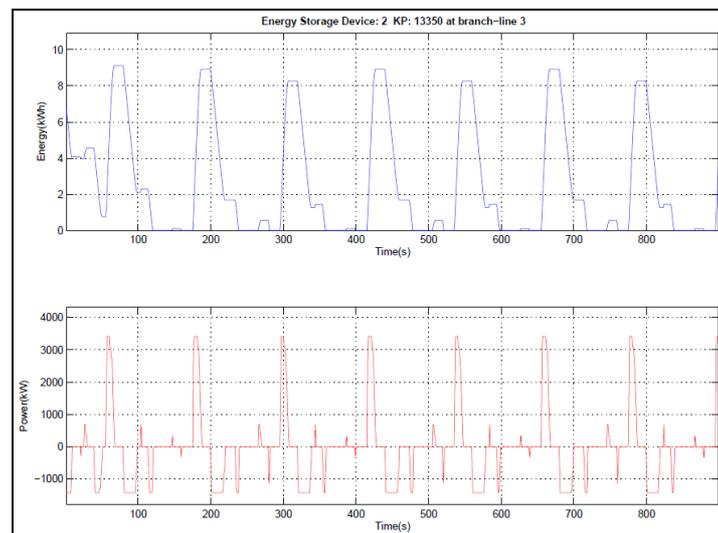


Figura 142. Evolución de la energía y potencia en el acumulador Pk 13+350 en la rama 3.

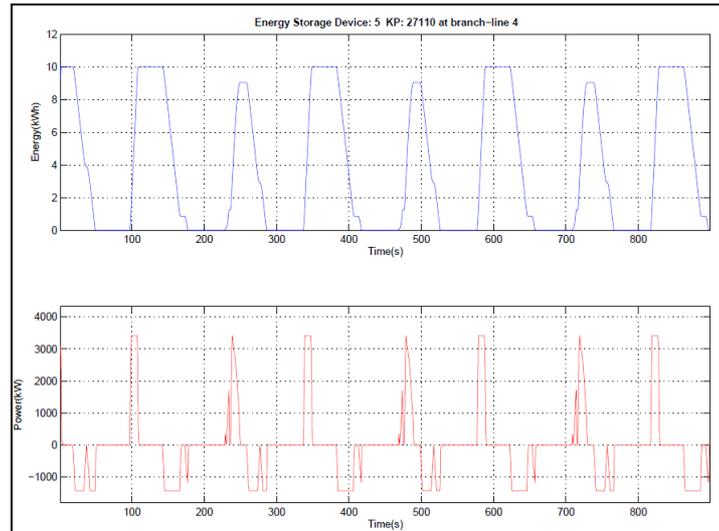


Figura 143. Evolución de la energía y potencia en el acumulador Pk 27+110 en la rama 4.

3.3.3.6. Balance de energías.

La energía suministrada a las subestaciones durante 18 h de operación en función del escenario es:

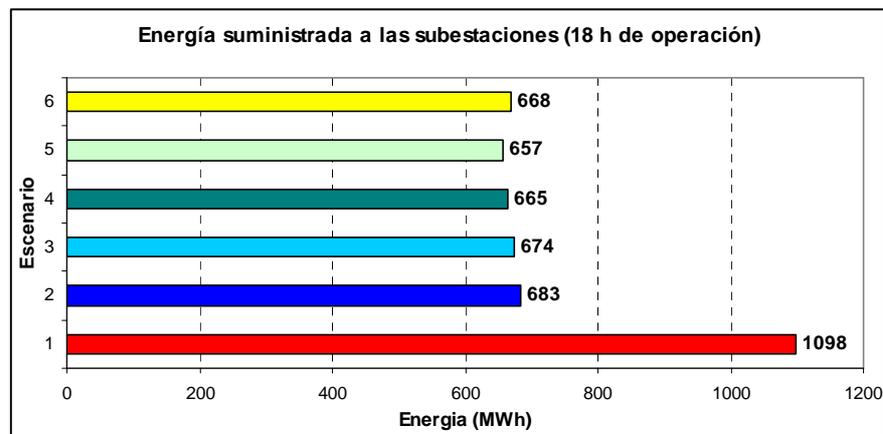


Figura 144. Energía suministrada a las subestaciones en función del escenario.

En los escenarios con subestaciones reversibles (4 y 5) se ha indicado el balance neto de energía. Así, la energía exportada a la red de corriente alterna en estos escenarios será:

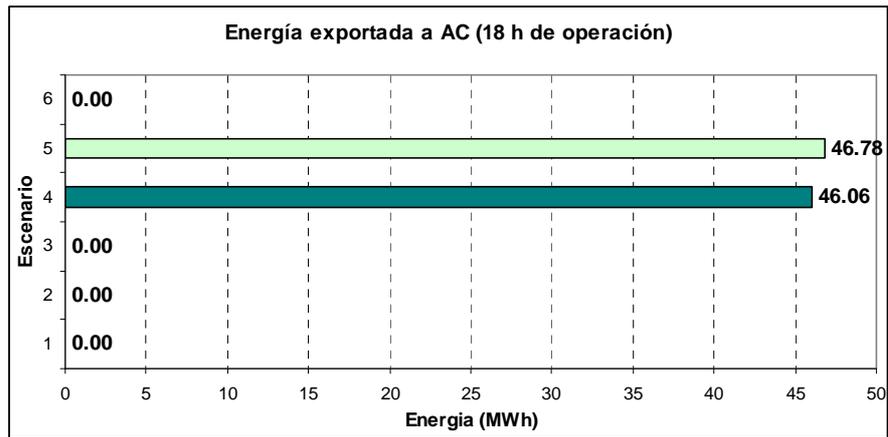


Figura 145. Energía exportada a la red de corriente alterna en función del escenario.

Las pérdidas en la catenaria y en el circuito de retorno durante 18 h de operación son las siguientes:

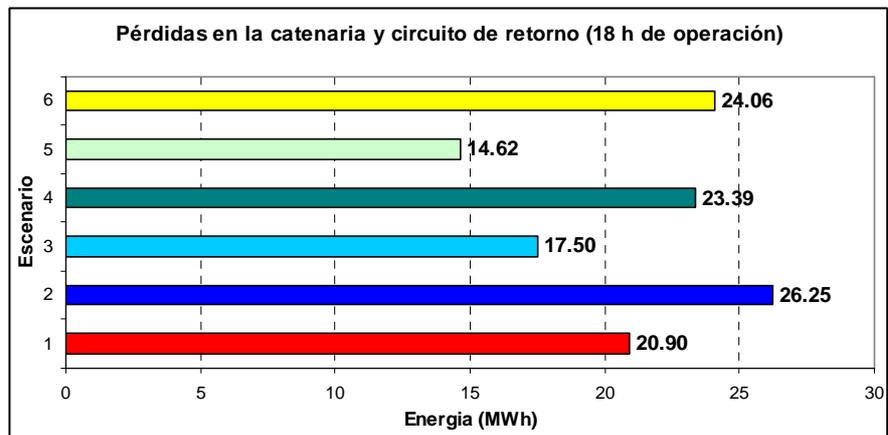


Figura 146. Pérdidas en la catenaria y circuito de retorno en función del escenario.

Desde el punto de vista energético, en la figura anterior puede observarse la importancia de la alimentación en vías unidas, pues tanto en el escenario 3 como en el escenario 5 se producen menores pérdidas en la catenaria que en el escenario 1. A nivel práctico, esto significa que las corrientes que transcurren por la catenaria hacia los trenes demandantes de potencia tienen que recorrer menos distancia que si toda la corriente viniera desde las subestaciones (escenario 1). En los escenarios 2, 3 y 6, la alimentación en vías separadas provoca justamente lo contrario: como sólo existen conexiones entre la catenaria y el circuito de vía 1 y de vía 2 a la altura de las subestaciones, se dificulta el transvase de la potencia regenerada de la vía 1 a la vía 2, o viceversa.

Por último, se muestran los porcentajes de energía procedente del frenado regenerativo en cada uno de los escenarios:

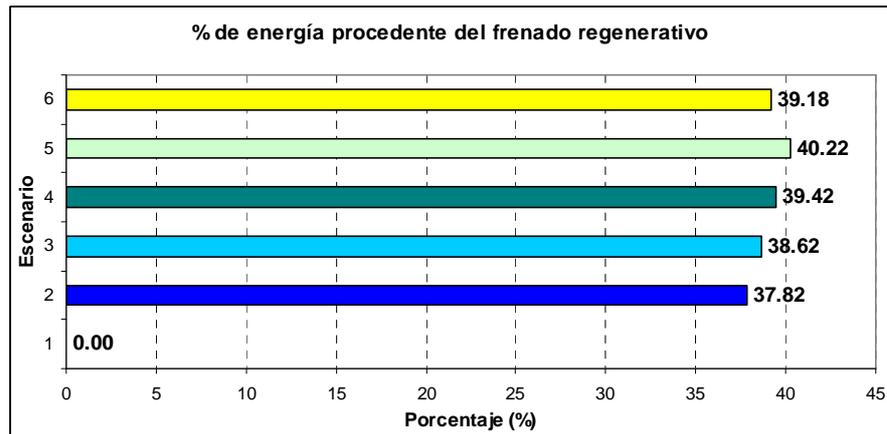


Figura 147. **Porcentaje de energía procedente del frenado regenerativo en función del escenario.**

3.4. Conclusiones

Una vez vistos los resultados obtenidos con el simulador Rsim en la línea 9 de metro de Barcelona, se pueden extraer una serie de conclusiones. Los porcentajes siguientes no pueden generalizarse para cualquier línea metropolitana, pues dependen en gran medida de su tensión nominal, intervalos de paso, resistencia lineal de la catenaria, etc, de la línea. Las conclusiones son las siguientes:

- La utilización de la energía procedente del frenado regenerativo permite un ahorro energético entorno al 40%. Este elevado porcentaje es debido principalmente a tres factores: el gran número de frenadas que se realizan en la línea, la baja resistencia lineal de la catenaria rígida, y por último el corto intervalo entre dos trenes consecutivos.
- La utilización de subestaciones reversibles permite aumentar la energía ahorrada aproximadamente un 2,5% con respecto al escenario con subestaciones convencionales.
- La interconexión de las dos catenarias y de los circuitos de retorno de ambas vías permite un ahorro de más de 1%. Este ahorro viene reflejado por un lado por la disminución de las pérdidas en la catenaria y por otro por el aumento de la receptibilidad del frenado regenerativo. Contrariamente a la implantación de las subestaciones reversibles y, desde un punto de vista únicamente energético, la implantación de un sistema de vías unidas no tiene una repercusión económica importante, e incluso puede abaratar el coste al disminuirse el número de interruptores extrarrápidos de las salidas necesarios.

- La utilización de acumuladores de energía permite un ahorro de aproximadamente un 1,5%. Este porcentaje dependerá de la energía máxima acumulable y del rendimiento del propio acumulador, pudiendo aproximarse teóricamente hasta el ahorro alcanzado con las subestaciones reversibles.

En la siguiente tabla se indica las repercusiones sobre los parámetros principales de diseño de los sistemas de electrificación ferroviaria en corriente continua en relación con:

- El frenado regenerativo.
- La unión de la alimentación de las dos catenarias.
- Las subestaciones reversibles.
- Los acumuladores.

3.4.1. Frenado regenerativo

Parámetro de diseño	Repercusión del frenado regenerativo
Potencias medias demandadas en las subestaciones.	Disminuyen las potencias demandadas.
Tensiones entre pantógrafo y carril	Aumenta en los puntos donde se utiliza el frenado regenerativo, y generalmente también aumenta en los puntos donde existen trenes cercanos regenerando.
Tensiones carril – tierra	Aumentan, especialmente si se trata de líneas alimentadas con las catenarias y los circuitos de retorno de vía 1 y de vía 2 solo interconectados a la altura de las subestaciones.
Energía consumida	Lógicamente, la utilización del frenado regenerativo permite un ahorro energético importante.
Pérdidas en la catenaria	Las pérdidas en la catenaria pueden aumentar o disminuir en función de la alimentación en vías separadas o unidas respectivamente.

Tabla 44. Repercusión del frenado regenerativo sobre los parámetros de diseño.

3.4.2. Alimentación con vías unidas

Parámetro de diseño	Repercusión de la alimentación con vías unidas
Potencias medias demandadas en las subestaciones.	Disminuyen las potencias demandadas.
Tensiones entre pantógrafo y carril	Influyen minorizando el aumento de la tensión en los puntos donde se utiliza el frenado regenerativo, y

	generalmente también aumenta en los puntos donde existen trenes cercanos regenerando.
Tensiones carril – tierra	Disminuyen pues están directamente relacionadas con la resistencia del circuito de retorno.
Receptibilidad del frenado regenerativo	Aumenta.
Energía consumida	Disminuye.
Pérdidas en la catenaria	Disminuyen.

Tabla 45. Repercusión de la alimentación con vías unidas sobre los parámetros de diseño.

3.4.3. Subestaciones reversibles

Parámetro de diseño	Repercusión de las subestaciones reversibles
Potencias medias demandadas en las subestaciones.	Disminuyen las potencias demandadas, pues se transmite la energía sobrante a la red de corriente alterna.
Tensiones entre pantógrafo y carril	Influyen minorizando sensiblemente el aumento de la tensión en los puntos donde se utiliza el frenado regenerativo, permitiendo una mayor receptibilidad del frenado regenerativo.
Tensiones carril – tierra	Disminuyen pues se minimizan las distancias recorridas por las corrientes procedentes del frenado regenerativo.
Receptibilidad del frenado regenerativo	Aumenta.
Energía consumida	Disminuye.
Pérdidas en la catenaria	Disminuyen.

Tabla 46. Repercusión de las subestaciones reversibles sobre los parámetros de diseño.

3.4.4. Acumuladores de energía

Parámetro de diseño	Repercusión de los acumuladores de energía.
Potencias medias demandadas en las subestaciones.	Disminuyen las potencias demandadas, pues se almacena la energía sobrante, y se entrega cuando se necesita.
Tensiones entre pantógrafo y carril	Influyen minorizando el aumento de la tensión en los puntos donde se utiliza el frenado regenerativo, permitiendo una mayor receptibilidad del frenado regenerativo.
Tensiones carril – tierra	Disminuyen pues se minimizan las distancias recorridas por las corrientes procedentes del frenado regenerativo.

Receptibilidad del frenado regenerativo	Aumenta.
Energía consumida	Disminuye.
Pérdidas en la catenaria	Disminuyen.

Tabla 47. Repercusión de los acumuladores de energía sobre los parámetros de diseño.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [102] Perfil longitudinal, planta y esquema de vías. Tramo Madrid Puerta de Atocha - Barcelona Sants. Línea de alta velocidad de Madrid a Zaragoza - Barcelona y Frontera Francesa. ADIF. 2006.
- [103] Data sheet: High-Speed Trainset Velaro. Siemens. 2010.
- [104] Resum del projecte constructiu Linía 9 del Metro de Barcelona. Tram primer. GISA.
- [105] Resum del projecte constructiu Linía 9 del Metro de Barcelona. Tram segon. GISA.
- [106] Resum del projecte constructiu Linía 9 del Metro de Barcelona. Tram tercer. GISA.
- [107] Resum del projecte constructiu Linía 9 del Metro de Barcelona. Tram quart. GISA.
- [108] Data sheet. Metropolis platform. Line 9. Alstom 2006.

CAPITULO 7. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE RSIM

1. INTRODUCCIÓN

En este séptimo capítulo se presenta la validación del programa Rsim. A lo largo del capítulo se muestra una comparativa entre los datos procedentes de registros de medidas reales con los resultados obtenidos con el programa Rsim.

El estudio se ha realizado sobre una línea interurbana electrificada en corriente continua.

2. DATOS GENERALES DE LA LÍNEA

Para la validación del programa Rsim se ha utilizado una línea ferroviaria interurbana con las siguientes características principales:

Longitud	110 km
Nº de vías	Vía única
Velocidad máxima	120 km/h
Carril de rodadura:	UIC 54
Ancho	1435 mm
Radio de curvatura mínimo	160 m
Rampas máximas	25 ‰
Peralte máximo	160 mm

Tabla 48. Datos generales de la línea.

En la siguiente figura se muestra el perfil de la línea:

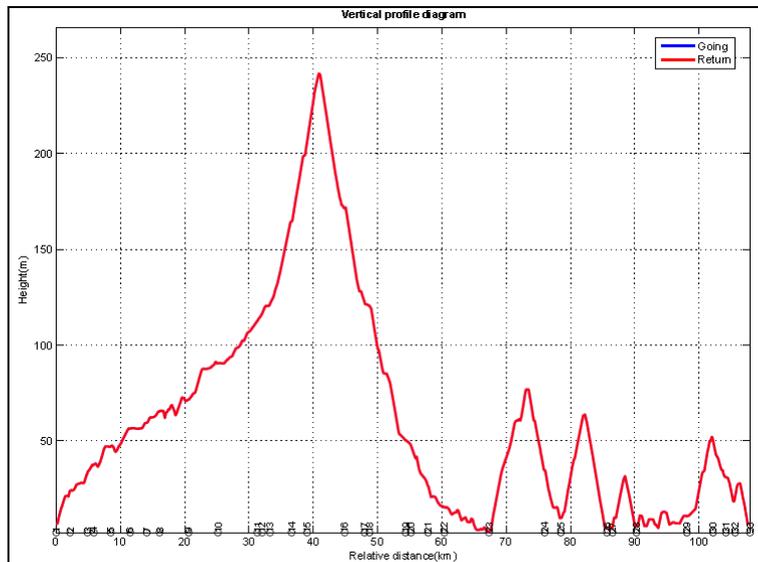


Figura 148. Trazado de la línea

A lo largo del trazado existen 33 estaciones donde el tren efectúa parada.

Las características principales del material móvil son las siguientes:

Fabricante	CAF
Configuración	M-R-R-M

Potencia	2.200 kW
Peso en vacío	170 t
Longitud	75 m
Conducción:	Manual con ATP
Frenado regenerativo	Si

Tabla 49. Datos generales del tren.

La línea está electrificada a 1500 V, y está alimentada a través de 9 subestaciones de tracción, con una interdistancia entre ellas comprendida entre 10 y 15 km.

3. REGISTRO DE MEDIDAS

Para la validación del programa Rsim se han utilizado registros de medida procedentes de:

- Los puntos de medida de energía de las subestaciones de tracción, obteniéndose registros de las potencias activa y reactiva. Estos registros de potencia corresponden a las potencias medias de 15 minutos.
- Unos equipos de adquisición y registradores de datos embarcados en un tren. El tren estaba provisto de transductores con salidas para las medidas de velocidad y tensión pantógrafo – carril a lo largo del trazado.

En la siguiente figura se muestran los equipos embarcados utilizados para efectuar el registro de datos:

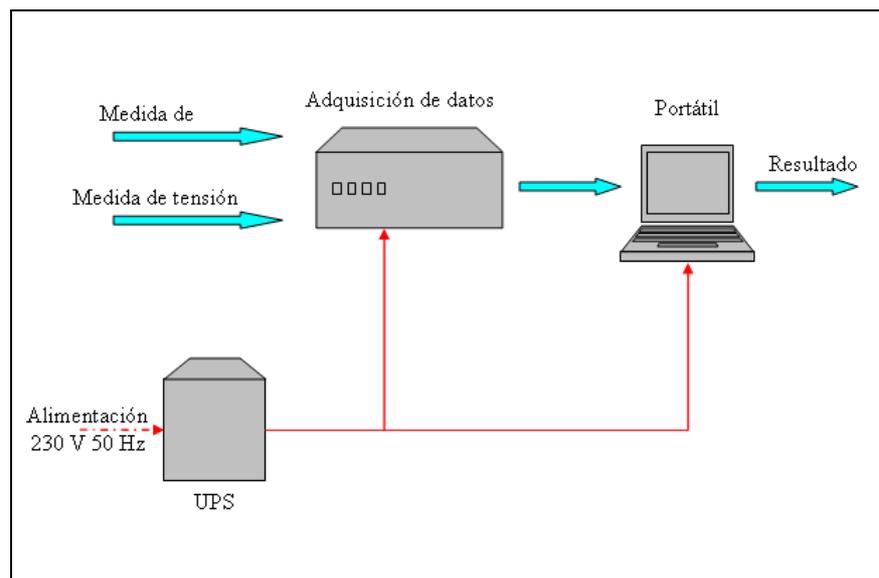


Figura 149. Equipos embarcados para la adquisición y registro de datos

En las siguientes figuras se pueden observar los detalles del montaje efectuado en la contracabina del tren.



Figura 150. Registrador y UPS embarcados.



Figura 151. Adquisición de los datos.

4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Velocidad del tren

En la siguiente figura se muestran los valores de las velocidades medidas y calculadas con Rsim a lo largo del trazado:

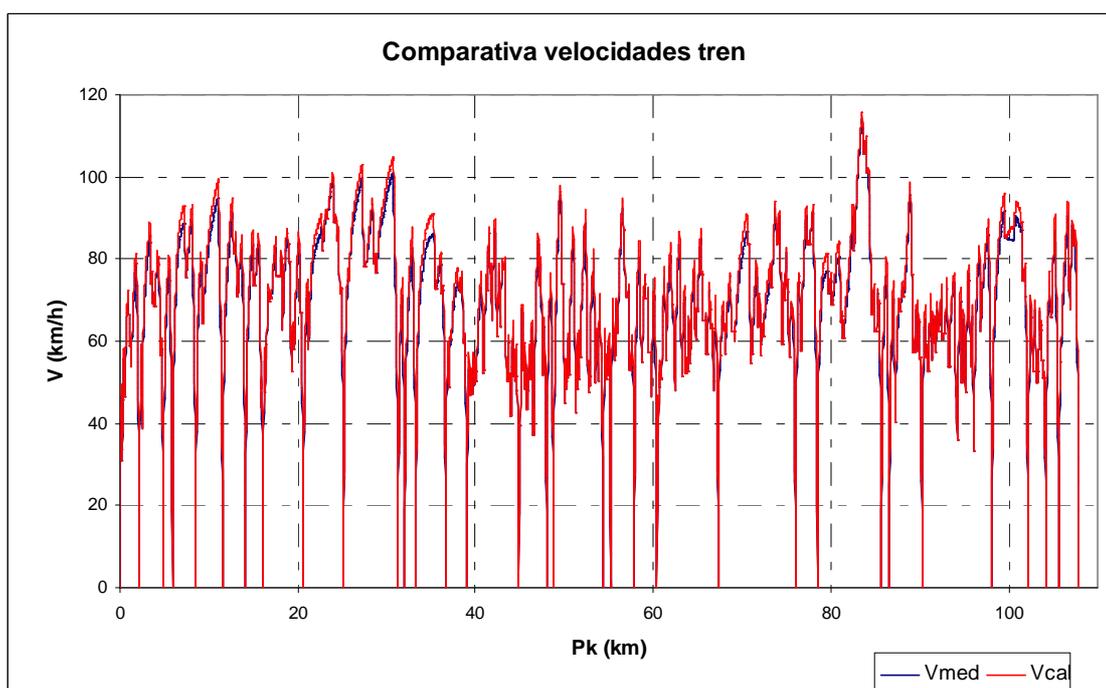


Figura 152. Comparativa de la velocidad del tren a lo largo del trazado.

En la tabla siguiente se comparan los resultados medidos y calculados:

	Datos medidos	Datos calculados	Diferencia
Velocidad media	67,5 km/h	69,5 km/h	2 km/h
Tiempo recorrido	1h 45m 39'	1h 44m 15'	1m 24s

Tabla 50. Comparativa de resultados.

Tanto en el cálculo de la velocidad media como en el tiempo transcurrido en el recorrido no se ha incluido el tiempo de estacionamiento en estaciones o apeaderos.

La leve diferencia entre ambos datos, podría explicarse por los siguientes motivos:

- El tren no va provisto de conducción automática. El conductor del tren en cualquier tramo tiene una velocidad máxima fijada por el sistema de protección ATP, y si se rebasa el propio ATP avisará al conductor, y dará la orden de parar si el tren no aminora la velocidad en un tiempo determinado. Así, es lógico que el conductor mantenga siempre un diferencial entre la velocidad real y la velocidad máxima permitida en cada tramo.
- Por otro lado, en el módulo de cálculo del simulador Rsim si que es posible mantener la velocidad máxima sin rebasarla en ningún instante.

4.2. Tensión pantógrafo - carril

En la figura siguiente se muestran los valores de las tensiones pantógrafo – carril medidas y calculadas:

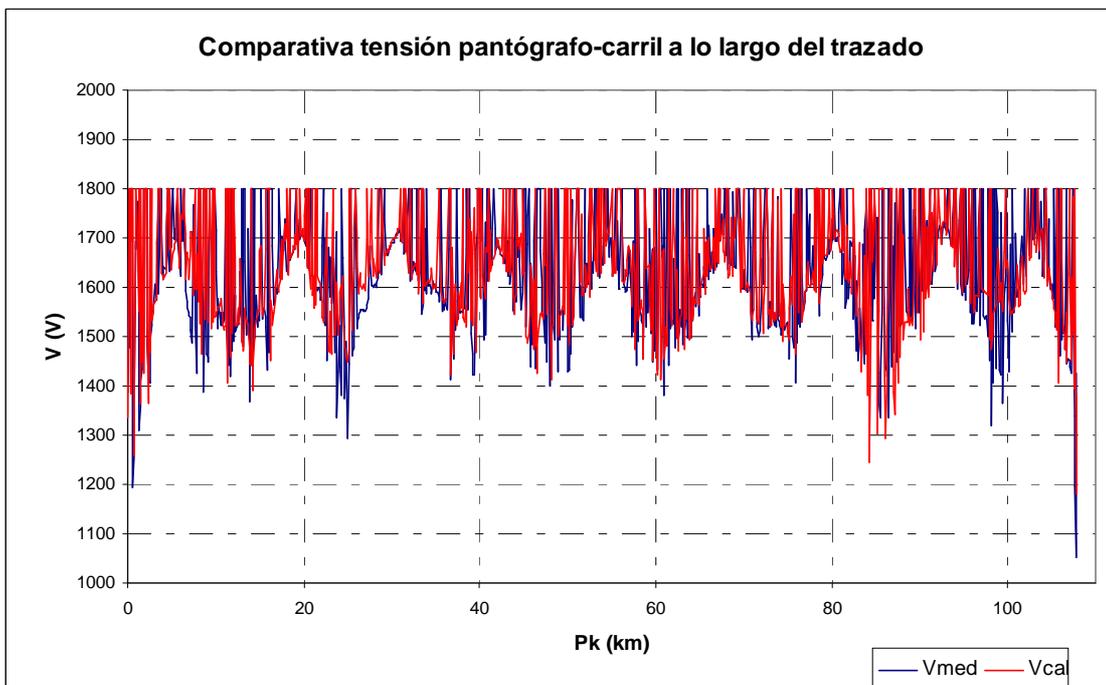


Figura 153. Comparativa de la tensión pantógrafo – carril a lo largo del trazado.

En la tabla siguiente se comparan los resultados medidos y calculados:

	Datos medidos	Datos calculados	Diferencia
Tensión media	1.638 V	1.643 V	5 V
Tensión máxima	1.800 V	1.800 V	0 V
Tensión mínima	1.052 V	1.180V	128 V

Tabla 51. Comparativa de resultados.

Del mismo modo que observaba en la comparativa de velocidades, la conducción manual obliga a traccionar el tren, en tramos en que la conducción automática circularía en deriva, pudiendo ser éste uno de los principales factores que explicaría las pequeñas diferencias entre las tensiones medidas y calculadas.

4.3. Potencias demandadas en las subestaciones

En la siguiente figura se muestran las potencias medias, en un periodo de 1 hora, medidas y calculadas en las 9 subestaciones existentes en el trazado en hora punta:

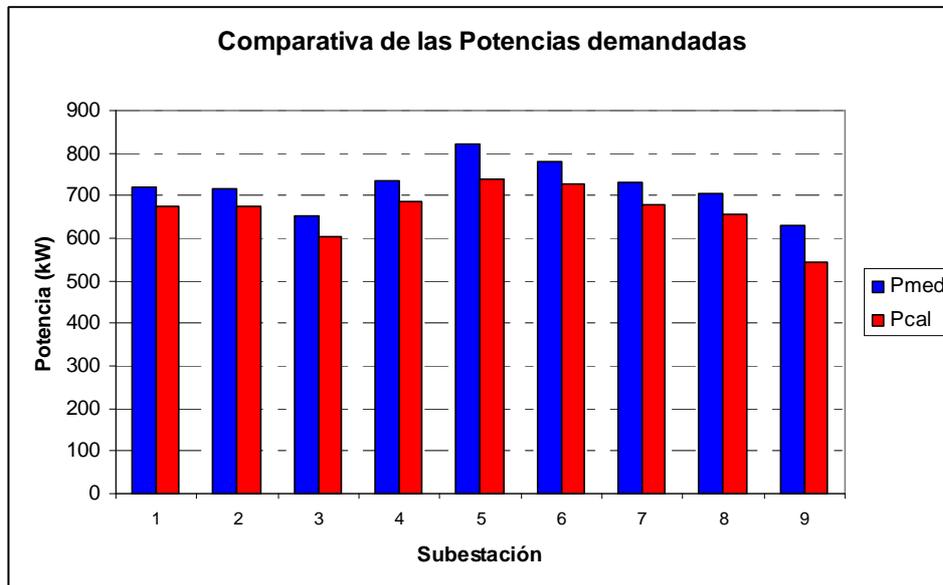


Figura 154. Comparativa de la potencias demandadas en las subestaciones.

En la tabla siguiente se comparan los resultados medidos y calculados:

	Potencia demandada media (1 hora)		
	Datos medidos	Datos calculados	Diferencia
Subestación nº 1	720 kW	674 kW	6.60%
Subestación nº 2	717 kW	675 kW	6.03%
Subestación nº 3	654 kW	605 kW	7.78%
Subestación nº 4	736 kW	685 kW	7.18%
Subestación nº 5	820 kW	740 kW	10.26%
Subestación nº 6	781 kW	728 kW	7.02%
Subestación nº 7	732 kW	677 kW	7.81%

Subestación nº 8	705 kW	658 kW	6.90%
Subestación nº 9	631 kW	545 kW	14.63%

Tabla 52. Comparativa de resultados.

En las potencias demandadas calculadas no están incluidas las pérdidas en los grupos transformadores y los consumos auxiliares de las subestaciones de tracción.

5. CONCLUSIÓN

En el apartado anterior se han mostrado comparativas entre los registros procedentes de medidas reales y los resultados obtenidos con el programa Rsim sobre una línea ferroviaria electrificada en corriente continua.

En los parámetros comparados no existen diferencias significativas, y los pequeños diferenciales obtenidos pueden ser explicados por factores como:

- La variabilidad de los pasajeros transportados en el tren a lo largo del trazado, que repercute en un aumento o disminución del esfuerzo de tracción demandado por el tren.
- La variabilidad en la potencia auxiliar del tren, dependiendo de las circunstancias del trazado y del confort de los pasajeros.
- La conducción manual del tren, tal y como se ha mencionado anteriormente.
- Influencia del sistema de señalización, al tratarse de una línea de vía única con bloqueo automático banalizado.

CAPITULO 8. RESUMEN, CONCLUSIONES Y APORTACIONES

1. RESUMEN

Como ya se ha mencionado en la introducción de esta tesis (capítulo 1), el objetivo principal de la misma, consistía en el desarrollo de una modelización detallada de los sistemas de electrificación ferroviaria con sistemas recuperadores de energía que permitiera el análisis de cualquier sistema habitual de electrificación ferroviaria, tanto desde su punto de vista puramente de diseño (dimensionado de elementos, verificación de los requisitos eléctricos, etc) como desde un punto de vista energético (energía demandada, capacidad de ahorro, % receptibilidad de la regeneración, etc).

Así para llegar a este objetivo final, después de analizar los distintos sistemas ferroviarios existentes, se ha desarrollado la modelización a través de sistemas de ecuaciones matriciales de los elementos simples agrupados en cuatro categorías: línea de contacto y circuitos de retorno, elementos fijos, elementos móviles y sistemas de acumulación de energía. A partir de las modelizaciones de los elementos simples se ha determinado la modelización de los sistemas completos, y por último se ha desarrollado una metodología para la formulación y resolución numérica de los sistemas de ecuaciones matriciales no lineales correspondientes a los sistemas completos.

Se ha desarrollado la modelización eléctrica de sistemas de recuperación de energía, al igual que el resto de elementos simples de los sistemas de electrificación ferroviaria, como son las subestaciones rectificadoras provistas de inversores para las líneas electrificadas en corriente continua, o como son también los acumuladores de energía.

Posteriormente se ha mostrado la estructura del programa Rsim, que se ha desarrollado íntegramente como parte del presente trabajo, y se han desarrollado dos ejemplos de aplicación de Rsim, el primero sobre una línea electrificada en corriente alterna, y el segundo sobre una línea metropolitana electrificada en corriente continua.

Por último se ha mostrado una comparativa entre datos procedentes de medidas reales con resultados obtenidos con el programa Rsim.

A lo largo del trabajo, se ha destacado la importancia del frenado regenerativo, y como a través de la modelización desarrollada se obtienen resultados no tan sólo sobre su receptibilidad en la línea o su

correspondiente ahorro energético, sino de su afectación sobre otros parámetros relacionados con el diseño del propio sistema de electrificación ferroviaria.

Por último, en el capítulo 6 se ha presentado los resultados de la aplicación de la metodología desarrollada en esta tesis sobre una línea en electrificada en corriente alterna y posteriormente sobre una línea electrificada en corriente continua. En ambos casos se han mostrado los resultados partiendo de diversas configuraciones en las electrificaciones: trenes con o sin regeneración, con sistemas recuperadores de energía, subestaciones reversibles, etc; de forma que se aprecien sus influencias sobre la propia eficiencia energética global de la línea o sobre los parámetros principales de diseño de los sistemas.

2. CONCLUSIONES

Como parte de esta tesis se ha desarrollado íntegramente el programa Rsim, que implementa la metodología presentada en los capítulos anteriores.

El programa Rsim permite el estudio de cualquier sistema de electrificación ferroviaria habitual con sistemas de almacenamiento de energía, y con una modelización detallada para un análisis ya sea puramente de diseño, energético o de seguridad eléctrica, y con un coste computacional alcanzable con cualquier ordenador personal.

Las estrategias de eficiencia energética, y especialmente en lo referente a los sistemas de almacenamiento de energía, dependen en gran medida de las características propias de cada línea ferroviaria, ya sea desde el propio trazado, a las tecnologías de la superestructura o del material móvil utilizado en la explotación. Así, las conclusiones derivadas de la aplicación de una tecnología en una línea concreta no son extrapolables automáticamente a otras líneas. Las principales aportaciones de esta tesis van dirigidas hacia la metodología y las herramientas para la realización de estos estudios, de este modo se han incluido dos ejemplos a efectos demostrativos.

Así de acuerdo con el párrafo anterior, una vez vistos los resultados obtenidos con Rsim en la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- En la línea al tratarse de un sistema de corriente alterna existe una receptibilidad muy elevada de la energía procedente del frenado regenerativo, así la potencia entregada a la catenaria durante el frenado regenerativo es consumida por el resto de trenes demandantes de potencia del mismo sector cuando se circula con intervalos del orden de los 3 minutos.
- El trazado estudiado con una longitud total de 621 km y únicamente tres estaciones intermedias repercute en un potencial de energía recuperable baja, pues tan solo en las frenadas de las estaciones, en los descensos o en la reducción de la velocidad por el paso en algunos tramos se genera energía recuperable.
- La instalación de sistemas de almacenamiento de energía en esta línea, con los condicionantes estudiados no repercutiría en una mejora en la eficiencia o ahorro energético de la línea.

De la misma forma, una vez vistos los resultados obtenidos con el programa Rsim en el estudio sobre la línea 9 de metro de Barcelona, se han obtenido las siguientes conclusiones.

- En el estudio realizado se ha comprobado que la utilización de la energía procedente del frenado regenerativo permite un ahorro energético entorno al 40%. Este elevado porcentaje es debido principalmente a tres factores: el gran número de frenadas que se realizan en la línea, la baja resistencia lineal de la catenaria rígida, y por último el corto intervalo entre dos trenes consecutivos.
- La utilización de subestaciones reversibles permite aumentar la energía ahorrada aproximadamente un 2,5% con respecto al escenario con subestaciones convencionales.
- La interconexión de las dos catenarias y de los circuitos de retorno de ambas vías permite un ahorro de más de 1%. Este ahorro viene reflejado por un lado por la disminución de las pérdidas en la catenaria y por otro por el aumento de la receptibilidad del frenado regenerativo. Contrariamente a la implantación de las subestaciones reversibles y, desde un punto de vista únicamente energético, la implantación de un sistema de vías unidas no tiene una repercusión económica importante, e incluso puede abaratar el coste al disminuirse el número de interruptores extrarrápidos de las salidas necesarios.
- La utilización de acumuladores de energía permite un ahorro de aproximadamente un 1,5%. Este porcentaje dependerá de la energía máxima acumulable y del rendimiento del propio acumulador, pudiendo aproximarse teóricamente hasta el ahorro alcanzado con las subestaciones reversibles.

Por último, la elección de cualquier de las tecnologías anteriores debería estar acompañada de un análisis económico correspondiente a sus costes de implementación. Estos análisis económicos quedarían fuera del alcance de esta tesis.

3. APORTACIONES DE ESTA TESIS

A lo largo de este trabajo se han presentado las siguientes aportaciones:

Modelización de los sistemas de electrificación ferroviaria:

- Para el análisis de los distintos sistemas de electrificación se ha presentado una metodología para la modelización de los sistemas habituales, partiendo de la superposición nodal de los modelos de los elementos simples a través del método numérico Modified Nodal Analysis.
- También se ha desarrollado el tratamiento de las configuraciones compuestas como pueden ser las líneas de vía doble, con ramificaciones, líneas circulares, by-pass, etc.

Modelización de los elementos simples:

- En la modelización de los elementos simples de los sistemas de electrificación ferroviaria con más de un modo de funcionamiento, como sucede en las subestaciones de tracción de líneas de corriente continua, se ha presentado una metodología para la resolución del sistema de matricial de ecuaciones no lineales partiendo de la solución del sistema de ecuaciones inicial, a través de la fórmula de Woodbury.

Frenado regenerativo y sistemas de acumulación de energía:

- Se ha presentado una metodología para incluir los condicionantes del frenado regenerativo de los materiales móviles dentro del procedimiento general de la resolución numérica de los sistemas de ecuaciones matriciales no lineales correspondientes a los flujos de cargas de las redes de electrificación ferroviaria. A través de esta metodología es posible determinar la máxima potencia entregada a la catenaria manteniendo la tensión pantógrafo – carril de rodadura por debajo de la tensión máxima permitida en la línea.
- Se ha desarrollado el procedimiento para la determinación de los esfuerzos de tracción del material rodante como función de su velocidad y de la tensión pantógrafo – carril en cada instante.

- Se ha presentado la modelización de los sistemas de acumulación de energía, así como los condicionantes correspondientes a su control dentro del procedimiento general de la resolución numérica de los sistemas de ecuaciones matriciales no lineales correspondientes a los flujos de cargas de las redes de electrificación ferroviaria. La modelización presentada es válida para cualquier tipo de acumulador, ya que está basado en los parámetros de funcionalidad del sistema.

Influencia del frenado regenerativo sobre otros aspectos del diseño eléctrico:

- En el capítulo 6, y a través de dos ejemplos, se ha presentado la influencia del frenado regenerativo sobre aspectos como la potencia suministrada a las subestaciones, las tensiones entre el pantógrafo y carril, las tensiones carril-tierra, los desequilibrios en los puntos de conexión en alta tensión, las corrientes vagabundas, etc, y se ha mostrado sobre que parámetros del diseño influye positivamente, o por lo contrario, sobre que parámetros influye negativamente.

4. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Después de la realización de este trabajo se han observado algunas líneas futuras de investigación, de cara a nuevos estudios, como pueden ser:

- En las líneas ferroviarias existen una serie de condicionantes que influyen en la circulación del material móvil que están fuera del alcance de los criterios puramente de horarios o eléctricos tenidos en cuenta en este trabajo, pertenecientes en gran medida al sistema de señalización. Estos condicionantes pueden influir significativamente en los perfiles de velocidad, especialmente en líneas banalizadas con los dos sentidos de circulación posibles sobre cada vía. Así se sugiere como futuros trabajos un proceso de simulación que englobará por un lado las limitaciones y requisitos del sistema de señalización con todas sus variantes y junto con todos los aspectos relativos a la electrificación que se han tenido en cuenta en este trabajo.
- También sería posible ampliar aspectos derivados de la propia electrificación, como pueden ser las perturbaciones electromagnéticas o la distorsión armónica generadas por el propio sistema.
- Otro aspecto importante consiste en el comportamiento de los sistemas de electrificación ferroviaria en régimen transitorio, como puede ser los cortocircuitos en los conductores por fallos de aislamiento, o simplemente debido a los arranques del material móvil. Este tipo de estudios es sumamente importante en la definición y coordinación de las protecciones eléctricas de estos sistemas. En el caso particular de las líneas electrificadas en corriente continua, y para mantener una buena calidad de servicio, es primordial la distinción entre las intensidades debidas a un arranque de un tren (situación normal) y las sobreintensidades ocasionadas en cortocircuitos lejanos (situación anómala).

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Reparto por sistemas de las líneas electrificadas a finales del siglo XX.....	11
Figura 2.	Esquema general de la electrificación en corriente continua	21
Figura 3.	Rectificación de 6 pulsos.....	22
Figura 4.	Rectificación de 12 pulsos: (a) asociación en serie (b) asociación en paralelo	23
Figura 5.	Esquema del sistema de 15 kV a 16,7 Hz.....	25
Figura 6.	Esquema de la alimentación en el sistema de 25 kV a 50 Hz	26
Figura 7.	Esquema de la alimentación en 1x25 kV.....	26
Figura 8.	Esquema de la alimentación con BT	27
Figura 9.	Esquema de la alimentación con AT	27
Figura 10.	Esquema del principio de funcionamiento del sistema 2x25 kV	28
Figura 11.	Esquema general del sistema de tracción de un tren actual.....	29
Figura 12.	Control reostático	30
Figura 13.	Chopper CC/CC.....	30
Figura 14.	Rectificador semi-controlado	31
Figura 15.	Inversor CSI.....	32
Figura 16.	Inversor VSI.....	32
Figura 17.	(a) CSI y (b) VSI.....	33
Figura 18.	(a) VSI y (b) CSI.....	34
Figura 19.	Esquema de la conexión del acumulador.....	40
Figura 20.	Esquema de la subestación reversible.....	42
Figura 21.	Tensiones máximas de contacto permisibles en sistemas de tracción CA y CC.....	46
Figura 22.	Modelo de una línea eléctrica.....	52
Figura 23.	Circuito equivalente.....	53
Figura 24.	Términos de las fórmulas de Carson	54
Figura 25.	Términos de las fórmulas de Dubanton.....	57
Figura 26.	Circuito equivalente de la línea de contacto en CC.....	65
Figura 27.	Alimentación en alta tensión con su equivalente Norton.....	72
Figura 28.	Esquema equivalente del transformador	73
Figura 29.	Esquema equivalente del transformador	74
Figura 30.	Esquema equivalente del autotransformador.....	75
Figura 31.	Esquema equivalente del transformador booster	76

Figura 32. Modelo de la alimentación a la subestación visto desde CC	78
Figura 33. Esquema equivalente de la subestación rectificadora	78
Figura 34. Esquema de un rectificador hexafásico	79
Figura 35. Modelo de la subestación convencional en modo conducción.....	81
Figura 36. Esquema de la subestación reversible.....	82
Figura 37. Esquema del inversor con tiristores	83
Figura 38. Esquema del inversor con IGBTs.....	84
Figura 39. Característica I_{dc} y V_{dc} de la subestación reversible	84
Figura 40. Fuerzas y resistencias a la tracción en un tren	86
Figura 41. Gráfica del esfuerzo máximo de tracción (velocidad y tensión).....	89
Figura 42. Gráfica del esfuerzo máximo de frenado.....	90
Figura 43. Gráfica de las velocidades de consigna.....	91
Figura 44. Procedimiento de cálculo de la velocidad y esfuerzo de tracción final	94
Figura 45. Tren con su equivalente Norton traccionando	97
Figura 46. Diagrama para el cálculo de la tensión en el tren traccionando.....	97
Figura 47. Tren con su equivalente Norton regenerando	98
Figura 48. Diagrama para el cálculo de la tensión en el tren regenerando	99
Figura 49. Esquema eléctrico del acumulador.....	100
Figura 50. Diagrama del proceso de carga del acumulador.	104
Figura 51. Diagrama del proceso de descarga del acumulador.....	105
Figura 52. Unión de dos elementos simples	112
Figura 53. Red con una nueva rama entre los nodos k y m.	116
Figura 54. Esquema de la red de alta tensión.	119
Figura 55. Esquema del tramo a modelizar.	121
Figura 56. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.	122
Figura 57. Modelización del sistema completo: numeración de los nodos.	122
Figura 58. Algoritmo de resolución de una línea ferroviaria electrificada en corriente alterna	127
Figura 59. Esquema del tramo a modelizar.	128
Figura 60. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.	129
Figura 61. Modelización del sistema completo: numeración de los nodos.	129
Figura 62. Algoritmo de resolución de una línea ferroviaria electrificada en corriente continua.....	134
Figura 63. Esquema del tramo de doble vía a modelizar.	135
Figura 64. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.	136
Figura 65. Esquema del tramo de doble vía a modelizar.	136
Figura 66. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.	137

Figura 67. Esquema a modelizar del tramo de vía única con ramal.	138
Figura 68. Modelización del sistema completo a partir de los modelos de los elementos simples.	138
Figura 69. Puesta en paralelo: (a) carril de retorno y (b) carril de retorno y línea de contacto.	139
Figura 70. Puesta a tierra del carril de retorno.	140
Figura 71. Longitud de la celda en un sistema de corriente continua.....	143
Figura 72. Trazado de la línea.....	144
Figura 73. Tensiones carril – tierra con $L = 300$ m	144
Figura 74. Tensiones carril – tierra con $L = 200$ m	145
Figura 75. Tensiones carril – tierra con $L = 100$ m	145
Figura 76. Tensiones carril – tierra con $L = 50$ m.....	146
Figura 77. Estructura general del programa Rsim.....	151
Figura 78. Gráfico del perfil de velocidades.....	153
Figura 79. Gráfico de la potencia demandada y potencialmente regenerable.....	153
Figura 80. Gráfico de la malla de tráfico.	154
Figura 81. Delimitación en cantones de una línea ferroviaria.	154
Figura 82. Nivel 1 (códigos de velocidad).	155
Figura 83. Nivel 2 (distancia objetivo).....	155
Figura 84. Nivel 3 (cantón móvil).....	155
Figura 85. Intensidades en la línea de contacto.	156
Figura 86. Tensión catenaria – carril a lo largo del sector.....	157
Figura 87. Pantalla de inicio del programa Rsim.	158
Figura 88. Pantalla del bloque de cálculo del movimiento del tren.	159
Figura 89. Pantalla del bloque de cálculo de la malla de tráfico.	159
Figura 90. Pantalla del bloque de cálculo del movimiento seguro del tren.....	160
Figura 91. Pantalla del bloque de cálculo de la electrificación en corriente continua.	160
Figura 92. Pantalla del bloque de cálculo de la electrificación en corriente alterna.....	161
Figura 93. Ejemplo de gráfico del perfil del trazado.....	162
Figura 94. Ejemplo de gráfico del perfil de velocidades a lo largo del trazado.	162
Figura 95. Ejemplo de gráfico de las potencias demandadas en las subestaciones de tracción.....	163
Figura 96. Ejemplo de gráfico de las corrientes máximas en los feeders de salida.....	163
Figura 97. Ejemplo de gráfico de la distribución de la tensión catenaria - carril.	163
Figura 98. Ejemplo de gráfico de la distribución de la tensión carril – tierra.	164
Figura 99. Ejemplo de gráfico de las corrientes vagabundas.	164
Figura 100. Trazado de la línea de alta velocidad Madrid - Barcelona.	167
Figura 101. Perfil de la línea de alta velocidad entre Madrid y Barcelona.....	168

Figura 102. Curvas de tracción y frenado del material Siemens Velaro.	169
Figura 103. Curva de la resistencia al avance del material Siemens Velaro.	169
Figura 104. Gráfico del perfil de velocidades.	173
Figura 105. Gráfico de la malla de tráfico.	174
Figura 106. Potencias demandadas en las subestaciones.	175
Figura 107. Tensión entre pantógrafo y carril en sentido Madrid – Barcelona.	176
Figura 108. Tensión entre pantógrafo y carril en sentido Barcelona – Madrid.	176
Figura 109. Tensión carril – tierra del sector 4 en el escenario 1.	177
Figura 110. Tensión carril – tierra del sector 4 en el escenario 2.	177
Figura 111. Desequilibrio en el punto de conexión de Montagut en el escenario 1.	178
Figura 112. Desequilibrio en el punto de conexión de Montagut en el escenario 2.	178
Figura 113. Trazado de la línea 9 de Metro de Barcelona.	181
Figura 114. Perfil de la línea 9 (Can Zam – Terminal entre pistas).	182
Figura 115. Perfil de la línea 9 (Gorg – Ciutat d’Europa).	182
Figura 116. Curvas de tracción y frenado del material Alstom Metropolis.	183
Figura 117. Curva de la resistencia al avance del material Alstom Metrópolis.	184
Figura 118. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 1.	189
Figura 119. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 2.	190
Figura 120. Gráfico del perfil de velocidades en el itinerario 3.	190
Figura 121. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 1 (Can Zam – Bon Pastor)	191
Figura 122. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 2 (Gorg – Bon Pastor).	191
Figura 123. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 3 (Bon Pastor – Gornal).	192
Figura 124. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 4 (Gornal – Terminal entre pistas).	192
Figura 125. Gráfico de la malla de tráfico de la rama 5 (Gornal – Ciutat d’Europa).	192
Figura 126. Potencias demandadas en las subestaciones.	193
Figura 127. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 1 (sentido Can Zam – Terminal entre pistas).	195
Figura 128. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 1 (sentido Terminal entre pistas – Can Zam).	195
Figura 129. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 2 (sentido Gorg – Ciutat d’Europa).	196
Figura 130. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 2 (sentido Ciutat d’Europa - Gorg).	196
Figura 131. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 3 (sentido P Logístic – T. entrepistes).	197
Figura 132. Tensión pantógrafo – carril en itinerario 3 (sentido T. entrepistes – P Logístic).	197
Figura 133. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 1.	198
Figura 134. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 2.	198
Figura 135. Tensión carril – tierra en el tramo central (rama 3) en el escenario 4.	199
Figura 136. Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 1.	199

Figura 137. Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 2.....	200
Figura 138. Corrientes vagabundas en el tramo central (rama 3) en el escenario 4.....	200
Figura 139. Corrientes RMS en los <i>feeders</i> de salida de las subestaciones en el escenario 1.	201
Figura 140. Corrientes RMS en los <i>feeders</i> de salida de las subestaciones en el escenario 2.	201
Figura 141. Corrientes RMS en los <i>feeders</i> de salida de las subestaciones en el escenario 4.	201
Figura 142. Evolución de la energía y potencia en el acumulador Pk 13+350 en la rama 3.....	202
Figura 143. Evolución de la energía y potencia en el acumulador Pk 27+110 en la rama 4.....	203
Figura 144. Energía suministrada a las subestaciones en función del escenario.....	203
Figura 145. Energía exportada a la red de corriente alterna en función del escenario.....	204
Figura 146. Pérdidas en la catenaria y circuito de retorno en función del escenario.....	204
Figura 147. Porcentaje de energía procedente del frenado regenerativo en función del escenario.	205
Figura 148. Trazado de la línea.....	211
Figura 149. Equipos embarcados para la adquisición y registro de datos.....	213
Figura 150. Registrador y UPS embarcados.....	214
Figura 151. Adquisición de los datos.	214
Figura 152. Comparativa de la velocidad del tren a lo largo del trazado.	215
Figura 153. Comparativa de la tensión pantógrafo – carril a lo largo del trazado.	216
Figura 154. Comparativa de la potencias demandadas en las subestaciones.	217

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Sistemas de electrificación para líneas interurbanas en países del oeste de Europa	10
Tabla 2.	Tensiones máximas y mínimas según la norma EN 50.163	36
Tabla 3.	Valores recomendados de conductancia por unidad de longitud.	47
Tabla 4.	Valores de los coeficientes b_i , c_i y d_i	56
Tabla 5.	Número de conductores en función del sistema y número de vías.	60
Tabla 6.	Matrices $[Z]$	62
Tabla 7.	Matriz $[Y]$	64
Tabla 8.	Número de conductores en función del número de vías.	67
Tabla 9.	Matrices $[R]$ en función del número de vías.	69
Tabla 10.	Matrices $[G]$ en función del número de vías.	70
Tabla 11.	Valores de los coeficientes $k1$, $k2$ y $k3$	77
Tabla 12.	Valores K en función del ancho de vía.	88
Tabla 13.	Datos relativos a un itinerario.	92
Tabla 14.	Ecuaciones que definen la funcionalidad del acumulador	103
Tabla 15.	Datos de partida de $[Y]$ y $[J]$	123
Tabla 16.	Datos de partida para el cálculo de $[Y]$ y $[J]$	130
Tabla 17.	Datos generales de la línea.	143
Tabla 18.	Resumen de datos obtenidos en vía 1 en función de L	146
Tabla 19.	Resumen de datos obtenidos en vía 2 en función de L	146
Tabla 20.	Datos principales de la línea LAV Madrid - Barcelona	167
Tabla 21.	Datos técnicos del material rodante	168
Tabla 22.	Datos generales de las subestaciones de tracción.	170
Tabla 23.	Datos generales de los centros de autotransformación.	171
Tabla 24.	Características de la catenaria.	171
Tabla 25.	Estaciones y tiempos de parada.	171
Tabla 26.	Resumen de los escenarios estudiados.	172
Tabla 27.	Tiempos realizados en cada sentido.	173
Tabla 28.	Máximas diferencias en potencia media demandada entre escenarios.	175
Tabla 29.	Resumen del balance de energías.	179
Tabla 30.	Resumen de las pérdidas en catenaria.	179
Tabla 31.	Repercusión del frenado regenerativo sobre los parámetros de diseño.	180
Tabla 32.	Datos generales de la línea.	181

Tabla 33.	Datos técnicos del material rodante.....	183
Tabla 34.	Relación de subestaciones de tracción.	185
Tabla 35.	Correspondencia rama - tramo.	185
Tabla 36.	Datos de la catenaria rígida.	185
Tabla 37.	Relación de estaciones del itinerario 1.....	186
Tabla 38.	Relación de estaciones del itinerario 2.....	187
Tabla 39.	Relación de estaciones del itinerario 3.....	188
Tabla 40.	Relación de escenarios estudiados.	188
Tabla 41.	Tiempos efectuados por itinerario y sentido.....	190
Tabla 42.	Correspondencia itinerario – color.....	193
Tabla 43.	Correspondencia escenario - color.	194
Tabla 44.	Repercusión del frenado regenerativo sobre los parámetros de diseño.	206
Tabla 45.	Repercusión de la alimentación con vías unidas sobre los parámetros de diseño.	207
Tabla 46.	Repercusión de las subestaciones reversibles sobre los parámetros de diseño.	207
Tabla 47.	Repercusión de los acumuladores de energía sobre los parámetros de diseño.	208
Tabla 48.	Datos generales de la línea.....	211
Tabla 49.	Datos generales del tren.	212
Tabla 50.	Comparativa de resultados.	215
Tabla 51.	Comparativa de resultados.....	216
Tabla 52.	Comparativa de resultados.....	218