



Universidad de Valladolid



**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

TESIS DOCTORAL:

**Optimización de los flujos de potencia
en la programación de la operación de
un sistema ferroviario de alta
velocidad**

Presentada por Jesús Riego Martínez

para optar al grado de

Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:

Dr. Óscar Duque Pérez

Dr. Marcelo Pérez Alonso

A mi padre

Agradecimientos

Deseo mostrar mi agradecimiento a mis directores de tesis Óscar y Marcelo por su confianza, orientación y apoyo. Su confianza me ha permitido trabajar con libertad, pero no en soledad. Desde el principio y durante todas las etapas de este largo camino me han transmitido valiosas ideas y consejos. Su orientación ha sido clave en la búsqueda del mejor enfoque para afrontar las tareas más complejas. Su apoyo cercano ha contribuido a compensar los esfuerzos del recorrido y a no perder de vista el objetivo. Gracias sinceras.

También deseo expresar mi gratitud a mi esposa Ana. A pesar de las dificultades, siempre ha mostrado comprensión hacia mi tarea y ha sido generosa concediéndome el tiempo necesario para realizarla. Su presencia ha sido imprescindible para la elaboración de esta tesis. Su ánimo continuo ha sido un verdadero motor. Gracias de corazón.

Gracias muy especiales para mi hija Julia, cuya alegría es un estímulo constante.

Agradezco a mis padres Ana y Jesús haberme enseñado con su ejemplo la importancia del estudio y del trabajo. Con ellos inicié el camino que hoy sigo. Gracias por todo.

Índice general

Glosario	19
Capítulo 1. Introducción	21
1.1. Motivación de la tesis	23
1.2. Estado del arte	24
1.3. Objetivos de la tesis	27
1.4. Metodología	30
1.5. Estructura de la tesis	30
1.6. Bibliografía	33
Capítulo 2. Potencia mecánica desarrollada por un tren	35
Lista de símbolos	37
2.1. Introducción	39
2.2. Dinámica longitudinal del movimiento de un tren	39
2.2.1. Fuerza de tracción y frenado	39
2.2.2. Resistencia básica al avance	40
2.2.3. Efecto de la declividad de la vía	42
2.2.4. Efecto de la curvatura de la vía	44
2.2.5. Efecto de los túneles	46
2.2.6. Resistencia al avance debida a la infraestructura	48
2.3. Trayectoria individual de un tren	49
2.3.1. Tiempo de viaje mínimo	50
2.3.2. Tiempo de viaje real	52
2.4. Potencia mecánica	53
2.5. Trabajo mecánico realizado	54
2.6. Conducción eficiente	54
2.7. Conclusiones	56
2.9. Bibliografía	57
Capítulo 3. Potencia eléctrica desarrollada por un tren	61

Lista de símbolos	63
3.1 Introducción	65
3.2 Cadena de tracción de un tren eléctrico	65
3.3 Aplicación del motor asíncrono en el tren eléctrico	67
3.4 Fuerza de tracción de un tren eléctrico	70
3.5 Fuerza de frenado de un tren eléctrico	72
3.6 Potencia en un tren eléctrico	74
3.6.1 Potencia eléctrica activa	75
3.6.2 Potencia eléctrica reactiva	78
3.7 Energía consumida por un tren eléctrico	79
3.8 Conclusiones	80
3.9 Bibliografía	82
Capítulo 4 Consumo energético de un tren en una sección de electrificación ..	85
Lista de símbolos	87
4.1 Introducción	89
4.2 Electrificación en corriente alterna	89
4.3 Sistema de electrificación 1x25 kV	91
4.3.1 Modelo de trabajo del sistema 1x25 kV	92
4.3.1.1 Suministro eléctrico y transformador de tracción	92
4.3.1.2 Circuito de tracción	93
4.3.1.2.1 Impedancias de los conductores del circuito de tracción	94
4.3.1.2.2 Impedancia equivalente del circuito de tracción	97
4.3.2 Potencia en una sección de electrificación 1x25 kV	98
4.3.2.1 Potencia en la subestación de tracción	98
4.3.2.1.1 Sección en plena vía	99
4.3.2.1.2 Sección con una estación	100
4.3.2.2 Potencia consumida por el circuito de tracción	101
4.3.2.2.1 Sección en plena vía	102
4.3.2.2.2 Sección con una estación	103
4.3.3 Balance energético en una sección de electrificación 1x25 kV	104
4.3.3.1 Energía suministrada por la subestación	104
4.3.3.1.1 Sección en plena vía	105

4.3.3.1.2	Sección con una estación	106
4.3.3.2	Energía perdida en el circuito de tracción	107
4.3.3.2.1	Sección en plena vía	107
4.3.3.2.2	Sección con una estación	108
4.4	Sistema de electrificación 2x25kV	109
4.4.1	Modelo de trabajo del sistema 2x25 kV	111
4.4.1.1	Suministro eléctrico y transformador de tracción	111
4.4.1.2	Circuito de tracción	112
4.4.1.2.1	Impedancias de los conductores del circuito de tracción	115
4.4.1.2.2	Impedancia equivalente del circuito de tracción	119
4.4.2	Potencia eléctrica en una sección de electrificación 2x25 kV.....	123
4.4.2.1	Potencia en la subestación de tracción.....	123
4.4.2.1.1	Sección en plena vía	124
4.4.2.1.2	Sección con una estación	125
4.4.2.2	Potencia consumida por el circuito de tracción.....	126
4.4.2.2.1	Sección en plena vía	126
4.4.2.2.2	Sección con una estación	127
4.4.3	Balance energético en una sección de electrificación 2x25 kV	128
4.4.3.1	Energía suministrada por la subestación	128
4.4.3.1.1	Sección en plena vía	128
4.4.3.1.2	Sección con una estación	129
4.4.3.2	Energía perdida en el circuito de tracción	130
4.4.3.2.1	Sección en plena vía	130
4.4.3.2.2	Sección con una estación	131
4.5	Conclusiones	132
4.6	Bibliografía	133

Capítulo 5 *Consumo energético de dos trenes en una sección de electrificación*

135

Lista de símbolos	137	
5.1	Introducción	139
5.2	Coincidencia de dos trenes en una sección de electrificación	139
5.2.1	Sección en plena vía.....	140
5.2.2	Sección con una estación	141
5.3	Sistema de electrificación 1x25 kV	142

5.3.1	Topología de electrificación	142
5.3.1.1	Intervalo de concurrencia	143
5.3.2	Modelo de una sección de electrificación con dos trenes	144
5.3.3	Potencia en una sección de electrificación 1x25 kV	148
5.3.3.1	Potencia en la subestación de tracción	148
5.3.3.1.1	Sección en plena vía	149
5.3.3.1.2	Sección con una estación	151
5.3.3.2	Potencia consumida por los circuitos de tracción	152
5.3.3.2.1	Sección en plena vía	155
5.3.3.2.2	Sección con una estación	156
5.3.4	Balance energético en una sección de electrificación 1x25 kV	158
5.3.4.1	Energía suministrada por la subestación	158
5.3.4.1.1	Sección en plena vía	159
5.3.4.1.2	Sección con una estación	161
5.3.4.2	Energía perdida en los circuitos de tracción	163
5.3.4.2.1	Sección en plena vía	164
5.3.4.2.2	Sección con una estación	165
5.4	Sistema de electrificación 2x25 kV	168
5.4.1	Topología de electrificación	168
5.4.1.1	Intervalo de concurrencia	168
5.4.2	Modelo de una sección de electrificación con dos trenes	169
5.4.3	Potencia en una sección de electrificación 2x25 kV	169
5.4.3.1	Potencia en la subestación de tracción	169
5.4.3.1.1	Sección en plena vía	170
5.4.3.1.2	Sección con una estación	171
5.4.3.2	Potencia consumida por los circuitos de tracción	173
5.4.3.2.1	Sección en plena vía	173
5.4.3.2.2	Sección con una estación	175
5.4.4	Balance energético en una sección de electrificación 2x25 kV	177
5.4.4.1	Energía suministrada por la subestación	177
5.4.4.1.1	Sección en plena vía	178
5.4.4.1.2	Sección con una estación	179
5.4.4.2	Energía perdida en los circuitos de tracción	180
5.4.4.2.1	Sección en plena vía	181
5.4.4.2.2	Sección con una estación	182
5.5	Conclusiones	183
5.6	Bibliografía	185

Capítulo 6	Análisis de un plan de transporte cadenciado	187
	Lista de símbolos	189
6.1	Introducción	191
6.2	Programación de un plan de transporte cadenciado	191
6.2.1	Marcha tipo de un tren	193
6.2.2	Capacidad de la infraestructura	194
6.2.3	Estructura temporal de un plan de transporte cadenciado	196
6.3	Consumo energético de un plan de transporte cadenciado	198
6.3.1	Análisis temporal	200
6.3.2	Análisis espacial	201
6.3.3	Potencia en las secciones de electrificación	202
6.3.3.1	Potencia en las subestaciones de tracción	202
6.3.3.2	Potencia consumida por los circuitos de tracción	208
6.3.4	Balance energético en las secciones de electrificación	214
6.3.4.1	Energía suministrada por las subestaciones	215
6.3.4.1.1	Energía neta suministrada	215
6.3.4.1.2	Energía suministrada y energía recuperada	216
6.3.4.2	Energía perdida en los circuitos de tracción	217
6.3.5	Balance energético total	218
6.3.5.1	Energía consumida por el sistema ferroviario	218
6.3.5.1.1	Energía neta consumida	218
6.3.5.1.2	Energía importada y energía exportada	220
6.3.5.2	Energía perdida en el sistema ferroviario	222
6.3.6	Coste económico de la energía	224
6.4	Conclusiones	226
6.5	Bibliografía	229
Capítulo 7	Conclusiones	231
7.1	Conclusiones	233
7.2	Aportaciones de esta tesis	234
7.3	Futuras líneas de investigación	235

Índice de figuras

Figura 2.1. Curva de acuerdo vertical convexa en una línea ferroviaria	43
Figura 2.2. Curvas de transición en una línea ferroviaria	46
Figura 2.3. Regulación temporal de la marcha de un tren	50
Figura 2.4. Perfil temporal de la velocidad para la trayectoria de tiempo mínimo	51
Figura 2.5. Perfiles temporales de la velocidad con igual tiempo de viaje	52
Figura 2.6. Perfiles temporales de la potencia mecánica con igual tiempo de viaje	53
Figura 3.1. Cadena de tracción de un tren eléctrico alimentado en corriente alterna	66
Figura 3.2. Característica mecánica de un motor asíncrono en función de su deslizamiento	69
Figura 3.3. Fuerza de tracción de un tren en función de su velocidad	71
Figura 3.4. Fuerza de frenado eléctrico de un tren en función de su velocidad	73
Figura 3.5. Factor de potencia de un tren en función de su potencia activa	79
Figura 4.1. Secuencia de rotación de conexión a las fases de la red de transporte	91
Figura 4.2. Sistema de electrificación 1x25 kV	92
Figura 4.3. Suministro eléctrico y transformador en el sistema de electrificación 1x25 kV	93
Figura 4.4. Circuito de tracción en el sistema de electrificación 1x25 kV	93
Figura 4.5. Impedancias del circuito de tracción del sistema 1x25 kV	95
Figura 4.6. Componente resistiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción	97
Figura 4.7. Modelo de trabajo completo del sistema 1x25 kV	98
Figura 4.8. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV en plena vía	100
Figura 4.9. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV con estación	101
Figura 4.10. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV en plena vía	102
Figura 4.11. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV con estación	104
Figura 4.12. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV en plena vía	105

Figura 4.13. Energía activa suministrada y recuperada en una sección 1x25 kV con estación.....	106
Figura 4.14. Pérdida de energía activa en una sección 1x25 kV en plena vía	108
Figura 4.15. Pérdida de energía activa en una sección 1x25 kV con estación	109
Figura 4.16. Sistema de electrificación 2x25 kV, 50 Hz	110
Figura 4.17. Suministro eléctrico y transformador en el sistema 2x25 kV.....	111
Figura 4.18. Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV	112
Figura 4.19. Circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo ideal)	113
Figura 4.20. Circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo físico aproximado)	114
Figura 4.21. Impedancias del circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo físico aprox.).....	116
Figura 4.22. Componente resistiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción.....	122
Figura 4.23. Modelo de trabajo completo del sistema 2x25 kV.....	123
Figura 4.24. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV en plena vía.....	125
Figura 4.25. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV con estación.....	126
Figura 4.26. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV en plena vía	127
Figura 4.27. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV con estación	128
Figura 4.28. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV en plena vía.....	129
Figura 4.29. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV con estación.....	129
Figura 4.30. Pérdida de energía activa en una sección 2x25 kV en plena vía	130
Figura 4.31. Pérdida de energía activa en una sección 2x25 kV con estación	131
Figura 5.1. Ventana temporal de coincidencia de dos trenes en una sección en plena vía.....	140
Figura 5.2. Ventana temporal de coincidencia de dos trenes en una sección con estación.....	141
Figura 5.3. Sección de electrificación del sistema 1x25 kV con vía doble	143
Figura 5.4. Reparto de corrientes en el circuito de tracción de un tren en vía doble.....	144

.Figura 5.5. Modelo de una sección de electrificación con dos trenes en vía doble	145
.Figura 5.6. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV en plena vía.....	150
.Figura 5.7. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV con estación.....	151
.Figura 5.8. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV en plena vía	155
.Figura 5.9. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV con estación.	157
.Figura 5.10. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV en plena vía.....	160
.Figura 5.11. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV con estación.....	162
.Figura 5.12. Energía activa perdida en una sección 1x25 kV en plena vía.	164
.Figura 5.13. Energía activa perdida en una sección 1x25 kV con estación.	166
.Figura 5.14. Sección de electrificación del sistema 2x25 kV con vía doble	168
.Figura 5.15. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV en plena vía.....	170
.Figura 5.16. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV con estación.....	171
.Figura 5.17. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV en plena vía	174
.Figura 5.18. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV con estación.	175
.Figura 5.19. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV en plena vía.....	178
.Figura 5.20. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV con estación.....	180
.Figura 5.21. Energía activa perdida en una sección 2x25 kV en plena vía.	181
.Figura 5.22. Energía activa perdida en una sección 2x25 kV con estación.	182
.Figura 6.1. Marcha programada y trayectoria de un tren.....	193
.Figura 6.2. Bloqueo de cantones en una línea ferroviaria	195
.Figura 6.3. Gráfico de marchas programadas de un plan de transporte cadenciado.	196
.Figura 6.4. Recorrido de los servicios e infraestructura de electrificación.	198
.Figura 6.5. Intervalo de estudio de un plan de transporte cadenciado.	200
.Figura 6.6. Descomposición espacial del intervalo de estudio.....	202
.Figura 6.7. Trayectorias y potencia activa en las subestaciones eléctricas de tracción.....	203
.Figura 6.8. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 1.....	204
.Figura 6.9. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 2.....	205

Figura 6.10. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 3	207
Figura 6.11. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 4	208
Figura 6.12. Trayectorias y pérdida de potencia activa en las secciones de electrificación	209
Figura 6.13. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 1	209
Figura 6.14. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 2	211
Figura 6.15. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 3	213
Figura 6.16. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 4	214
Figura 6.17. Energía activa neta suministrada por las subestaciones en función de T_D	215
Figura 6.18. Energía activa suministrada y recuperada por las subestaciones en función de T_D	216
Figura 6.19. Energía activa perdida en los circuitos de tracción en función de T_D	217
Figura 6.20. Energía activa neta consumida por el plan de transporte en función de T_D ..	219
Figura 6.21. Energía activa importada y exportada por el plan de transporte en función de T_D	221
Figura 6.22. Energía activa perdida por el plan de transporte en función de T_D	223
Figura 6.23. Escenario de mínimo coste económico de la energía	225
Figura 6.24. Ahorro económico en el escenario de mínimo coste	226

Índice de tablas

Tabla 2.1. Coeficientes A , B y C de varios trenes de alta velocidad	42
Tabla 2.2. Superficies transversales de varios trenes de alta velocidad	47
Tabla 2.3. Dimensiones de varios túneles ferroviarios de alta velocidad	47
Tabla 2.4. Líneas de ferrocarril en España con más kilómetros de túnel	48
Tabla 3.1. Tensión nominal y límite para líneas alimentadas a 25 kV, según UNE-EN 50163	76
Tabla 3.2. Rendimientos típicos de la cadena de tracción	77
Tabla 3.3. Corriente máxima permitida en un tren alimentado a 25 kV	78
Tabla 4.1. Máximas intensidades de corriente en el pantógrafo	91
Tabla 4.2. Impedancias unitarias en el sistema 1x25 kV en vía única	96
Tabla 4.3. Impedancias unitarias en el sistema 2x25 kV en vía única	119
Tabla 5.1. Duración máxima de la ventana de coincidencia en una sección en plena vía ..	141
Tabla 5.2. Duración máxima de la ventana de coincidencia en una sección con estación ..	142
Tabla 5.3. Potencia activa de solapamiento en función de las corrientes $I_1(t)$ e $I_2(t)$	154
Tabla 6.1. Escenarios de máxima y mínima energía neta suministrada	218
Tabla 6.2. Energía activa neta consumida por el plan de transporte	220
Tabla 6.3. Energía activa importada y exportada por el plan de transporte	222
Tabla 6.4. Energía activa perdida en el sistema de electrificación por el plan de transporte	223

Glosario

Autotransformador de tracción. Autotransformador utilizado en el sistema de electrificación 2x25 kV encargado de recoger las corrientes de retorno y transmitir las al feeder negativo.

Cadena de tracción. Conjunto de elementos embarcados a bordo del tren que realizan las transformaciones necesarias para la conversión de potencia eléctrica en potencia mecánica, y viceversa.

Catenaria. Conjunto de conductores aéreos del sistema de electrificación ferroviaria que hacen llegar la corriente eléctrica a las cadenas de tracción de los trenes.

Celda de electrificación. Parte del sistema de electrificación 2x25 kV comprendida entre dos autotransformadores consecutivos.

Circuito de tracción. Elementos conductores del sistema de electrificación ferroviaria que permiten el flujo de corriente eléctrica entre una subestación eléctrica de tracción y la cadena de tracción de un tren.

Conducción eficiente. Procedimientos técnicos u operativos destinados a reducir el consumo energético individual de cada tren durante la operación del transporte ferroviario.

Feeder negativo. Conductor aéreo por el que se conducen las corrientes de retorno en el sistema de electrificación 2x25 kV.

Intervalo de concurrencia. Periodo de tiempo durante el cual se produce solapamiento de los circuitos de tracción de dos trenes presentes en la misma sección de electrificación.

Línea aérea de contacto. Conductor aéreo del sistema de electrificación con el que establece contacto eléctrico directo el pantógrafo del vehículo ferroviario.

Marcha. Secuencia de tiempos de paso por una serie de puntos consecutivos de una línea ferroviaria que ha de cumplir un servicio.

Pantógrafo. Mecanismo articulado sobre la caja del vehículo ferroviario encargado de la captación de la corriente eléctrica.

Perfil de la velocidad. Velocidad de circulación del tren en cada punto o en cada instante de su trayectoria.

Red de transporte del sistema de suministro eléctrico. Red de alta tensión encargada de llevar la potencia eléctrica generada hasta las subestaciones eléctricas de tracción.

Sección de electrificación. Segmento aislado del sistema de electrificación ferroviaria alimentado por un único transformador.

Subestación eléctrica de tracción. Subestación eléctrica que facilita la transferencia de potencia desde la red de transporte del sistema de suministro eléctrico al sistema de electrificación ferroviaria.

Trayectoria. Secuencia de tiempos de paso efectivos por todos los puntos recorridos por un servicio ferroviario.

Velocidad base. Velocidad de circulación de un tren que separa los dos regímenes de funcionamiento de sus motores de tracción.

Ventana temporal de coincidencia. Periodo temporal en el que dos trenes se hallan presentes simultáneamente en una sección de electrificación.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Motivación de la tesis

En los últimos años, el desarrollo de las políticas de transporte en la Unión Europea y en todo el mundo se ha venido centrando en la internalización de los costes externos provocados en la sociedad y en el medioambiente. El objetivo es que los efectos secundarios adversos originados por la actividad del transporte formen parte del proceso de toma de decisiones de los usuarios, a través del precio pagado por el servicio, y se consiga una reducción de estos efectos secundarios adversos, un uso más eficiente de la infraestructura y una mejora de la equidad entre los usuarios.

Uno de los costes externos más importantes del sector del transporte es el energético, ya que se trata de la actividad económica que más energía consume actualmente en la Unión Europea. Según los datos de la Agencia Internacional de la Energía, el transporte utiliza aproximadamente la tercera parte de toda la energía consumida en la Unión Europea, por delante de sectores como la industria de fabricación y la construcción [IEA, 2017].

La reducción del consumo energético del transporte, por tanto, es un objetivo clave en la sociedad actual a través del cual se pretenden rebajar las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera y de gases causantes del efecto invernadero, frenar el ritmo de agotamiento de las fuentes de energía no renovables y evitar la dependencia exterior, disminuyendo las importaciones de fuentes de energía no autóctonas.

En la actualidad, las instituciones de la Unión Europea están desarrollando estrategias políticas y técnicas tendentes a la reducción del consumo energético del transporte [EU, 2011]. Por un lado, las estrategias políticas pretenden provocar un cambio en la sociedad de forma que los usuarios del transporte vayan abandonando progresivamente aquellos modos más ineficientes y los sustituyan por otros más eficientes. Con este cambio modal, se logra una reducción del consumo energético total manteniendo el mismo nivel de actividad del sector del transporte. Por otro lado, las estrategias técnicas consisten en la introducción de mejoras en todos los modos de transporte con el fin de reducir su consumo energético.

El transporte ferroviario posee una serie de características intrínsecas que le hacen especialmente eficiente en la utilización de la energía. Entre ellas, se pueden destacar la física del desplazamiento, el tamaño de los vehículos y el flujo regular de las operaciones. Sin embargo, en los últimos años, los estímulos a la reducción de las emisiones de gases y la

búsqueda del ahorro de costes han llevado al resto de modos de transporte a introducir mejoras técnicas que les han permitido lograr importantes avances en el ahorro energético.

Para que el transporte ferroviario pueda mantener su cuota de participación en el reparto modal y no vea reducida su actividad en el futuro, debe recuperar la ventaja comparativa en la utilización de la energía que tradicionalmente le ha caracterizado. Con este fin, se están desarrollando estrategias técnicas que incluyen la investigación y el desarrollo de nuevas ideas sobre los vehículos, la infraestructura y la operación de transporte [UIC, 2016].

Las estrategias técnicas sobre los vehículos o la infraestructura sólo pueden ser aplicadas en casos de nueva construcción o reforma. Sin embargo, las estrategias técnicas sobre la operación en líneas y con flotas ya existentes, pueden llevarse a cabo en todo momento. Por lo tanto, los frutos de la investigación en el campo de la operación ferroviaria tienen mayores posibilidades de ser aplicados en un corto plazo [UIC, 2018].

1.2 Estado del arte

Dado que el flujo del tráfico ferroviario no es libre por las vías, sino que ha de ser previamente planificado, una fase fundamental en la operación ferroviaria es la programación de los servicios, durante la cual se elabora una oferta de transporte adaptada al patrón de la demanda previamente estimado. Esta actividad se lleva a cabo periódicamente para realizar los ajustes necesarios y satisfacer aquellas necesidades de transporte que hayan sido detectadas. Las decisiones que se toman durante esta etapa tienen especial trascendencia en el consumo energético del sistema de transporte ferroviario.

En la literatura se pueden encontrar numerosas referencias en las que se investiga la relación entre la programación de los servicios ferroviarios y su consumo energético. Estos trabajos de investigación suelen utilizar dos aproximaciones diferentes: el enfoque individual, en el que se analiza la trayectoria de cada tren independientemente del resto de circulaciones, o el enfoque conjunto, que estudia el sistema formado por todos los trenes presentes simultáneamente en la línea [YANG, 2016].

Los trabajos de investigación que siguen el enfoque individual se basan principalmente en la búsqueda de trayectorias energéticamente óptimas de los vehículos ferroviarios a lo largo de distintas líneas [HOWLETT, 2000], [KHMELNITSKY, 2000]. Si bien inicialmente se utilizaron métodos analíticos en la búsqueda de trayectorias óptimas, los trabajos de investigación

recientes aplican métodos numéricos que explotan la gran capacidad de procesamiento disponible actualmente para la simulación por ordenador de escenarios de operación ferroviaria [XIE, 2012], [FAN, 2015], [KESKIN, 2016]. Tanto en los métodos analíticos como en los algoritmos desarrollados para la simulación numérica, los trabajos de investigación que siguen el enfoque individual explotan el conocimiento de las características dinámicas del tren y de la geometría de la vía para obtener la secuencia de esfuerzos de tracción y de frenado que minimiza el consumo energético a lo largo de un recorrido [ALBRECHT, 2008]. Adicionalmente, al combinar los objetivos de mínima energía y mínimo tiempo de viaje, el resultado de este tipo de algoritmos es el perfil óptimo de velocidades para un servicio ferroviario entre un origen y un destino [LUKASZEWICZ, 2001]. Sin embargo, una limitación de los algoritmos de conducción eficiente es que basan su optimización en el trabajo mecánico desarrollado por el tren en la trayectoria ignorando las pérdidas energéticas que se producen en el sistema de electrificación.

El enfoque individual de estos algoritmos de conducción eficiente adolece de una visión de conjunto del sistema ferroviario pues su ámbito de estudio se reduce únicamente a la circulación del tren cuya trayectoria desean optimizar, obviando el resto de trenes que circulan por la misma línea [YANG, 2014]. No obstante, durante la circulación de los vehículos ferroviarios de tracción eléctrica es práctica habitual la realización de frenados eléctricos para mantener su velocidad objetivo. Bajo ciertas condiciones, los frenados eléctricos ejercidos provocan una interacción entre los trenes que tiene resultados en la energía consumida por el conjunto del sistema ferroviario [KOSEKI, 2010].

El frenado eléctrico es utilizado a lo largo de la práctica totalidad de las fases de deceleración en las trayectorias de los trenes. Para conseguir el frenado eléctrico, se invierte el funcionamiento de la cadena de tracción, pasando ésta a generar corriente –los motores actúan como generadores–. El par de frenado deseado se logra regulando la corriente generada en la cadena de tracción, que es inyectada a la línea aérea de contacto. Cuando un segundo tren circula en las proximidades del tren que aplica el frenado eléctrico, se establece una transferencia de potencia entre ambos mediante la circulación de la corriente de frenado a través de la línea aérea de contacto. De esta manera, la energía generada durante el frenado eléctrico se aprovecha dentro del sistema eléctrico ferroviario. Por el contrario, si no existiera este segundo tren en el momento de la aplicación del frenado eléctrico, la potencia generada sería disipada en las resistencias de freno embarcadas en el tren o sería devuelta a la red de transporte del sistema de suministro eléctrico. El primer caso –poco frecuente en

los trenes de alta velocidad alimentados por corriente alterna monofásica, no es deseable pues implica una pérdida de energía irrecuperable debido al efecto Joule. En el segundo caso, la potencia transmitida a la red de transporte del sistema de suministro eléctrico a través del transformador de tracción puede causar problemas por su gran contenido armónico y por los desequilibrios de tensión provocados entre las tres fases. Al mismo tiempo, en este segundo caso se reduce la tasa de utilización efectiva la energía generada durante el frenado eléctrico debido a las pérdidas en las líneas de transmisión. Para reducir estos problemas y evitar comprometer el funcionamiento seguro de la red de transporte del sistema de suministro eléctrico, se debe prestar atención a este segundo caso [TAKAGI, 2010].

En definitiva, los trabajos de investigación que siguen el enfoque conjunto se centran en la búsqueda de la utilización más adecuada de la energía generada durante los frenados eléctricos de los trenes. Las soluciones propuestas hasta el momento pueden ser clasificadas en tres categorías [DOUGLAS, 2015].:

1. Almacenamiento de la energía. La energía generada en los frenados eléctricos es almacenada para ser utilizada posteriormente por otros trenes que la demanden posteriormente. La capacidad de estos dispositivos debe ser muy alta pues la potencia generada por los trenes durante el frenado es muy elevada. Dado que la reutilización de la energía generada exige reiteradas cargas y descargas, la eficiencia de esta solución es relativamente baja.
2. Regulación de la energía. En el caso de sistemas de electrificación ferroviaria mediante corriente alterna monofásica, se han venido utilizando acondicionadores de potencia para mejorar la calidad de la energía. Estos equipos permiten la transferencia de potencia a través de las zonas neutras ampliando las posibilidades de utilización de la potencia generada en los frenados eléctricos. La eficiencia de esta solución está condicionada por el rendimiento de los acondicionadores de potencia.
3. Optimización de horarios. La ordenación temporal de las trayectorias de los trenes previamente definidas busca encontrar oportunidades de utilización de la potencia generada durante los frenados eléctricos. Esta es una tarea de programación del tráfico ferroviario que requiere conocer la topología del sistema de electrificación. La demanda de transporte sigue siendo atendida pues esta solución no modifica la capacidad ofertada.

Las dos primeras soluciones exigen la instalación de equipos adicionales en la infraestructura de electrificación. Aunque sus principios de diseño son conocidos en el sector eléctrico, estos

equipos no pueden ser aplicados de forma inmediata pues deben ser adaptados a las condiciones de uso propias del sector ferroviario. Adicionalmente, este tipo de soluciones implican unos mayores costes de suministro, instalación y mantenimiento que deben ser asumidos en la operación ferroviaria.

La optimización de horarios presenta una capacidad de aprovechamiento de la energía más limitada que las dos primeras soluciones ya que exige la concurrencia del tren generador y del tren consumidor, y esto no siempre es posible. En cambio, la transferencia directa de potencia entre ambos trenes elimina las pérdidas debidas a las conversiones realizadas en los equipos necesarios en las dos primeras soluciones. Una ventaja clave de esta tercera solución sobre las dos anteriores es que tiene unos costes asociados prácticamente nulos y su implantación puede ser inmediata.

1.3 Objetivos de la tesis

Esta tesis se va a centrar en el estudio de la programación de la operación de un sistema ferroviario, entendiendo por tal un conjunto de trenes circulando simultáneamente en una misma infraestructura alimentada por energía eléctrica, con el objetivo general de reducir el consumo energético total mediante el aprovechamiento de los flujos de potencia entre sus elementos. Si bien es posible encontrar algunas referencias a este tema en la literatura, en todas ellas se estudia su aplicación a líneas ferroviarias urbanas, electrificadas en corriente continua [CHEN, 2019]. En esta tesis, sin embargo, se evaluará el efecto de la programación del tráfico ferroviario en el consumo energético total, particularizado para líneas de alta velocidad, electrificadas en corriente alterna y con una intensidad circulatoria menor que las líneas urbanas.

Para alcanzar este objetivo general, se cubrirán previamente una serie objetivos más específicos cuyo desglose se expone a continuación.

1. Modelización del comportamiento dinámico de un tren y de las características geométricas de una línea.

Durante su desplazamiento por la vía, el tren está sometido fundamentalmente a tres fuerzas. La fuerza de tracción o frenado está controlada, dentro de las características específicas de cada vehículo, por el maquinista en cada momento con el fin de cumplir el horario previamente programado. La fuerza gravitatoria es la componente longitudinal

del peso del tren, de forma que se opone a su desplazamiento cuando asciende por una rampa y lo favorece cuando desciende por una pendiente. La resistencia al avance varía su valor durante el movimiento del tren oponiéndose siempre a su desplazamiento y con una fuerte dependencia de la velocidad del tren del tipo $R=A+Bv+Cv^2$.

2. Simulación de la trayectoria de un servicio ferroviario a partir de los modelos del tren y de la línea.

La programación de un servicio ferroviario implica la definición de una trayectoria que incluya los tiempos de paso por todos los puntos significativos entre la estación de origen y la de destino. Dado que el desplazamiento de un tren por una vía es unidimensional, su movimiento puede ser descrito por las ecuaciones de la cinemática del punto.

Realizando un análisis dinámico de una trayectoria previamente definida, es decir, considerando las fuerzas que actúan durante el desplazamiento del tren, pueden deducirse los esfuerzos de tracción y frenado –y, por tanto, las potencias mecánicas– necesarios a lo largo del recorrido.

3. Modelización del comportamiento eléctrico del tren.

Para abordar la vertiente eléctrica del problema, el siguiente paso es traducir las potencias mecánicas a términos eléctricos. A través del conocimiento de las cadenas de tracción y de frenado montadas sobre cada tren, se pueden establecer las relaciones entre los valores de las potencias mecánicas y las eléctricas, de tracción y frenado, respectivamente. Por lo tanto, a partir del conocimiento del funcionamiento interno tren, se puede obtener una primera ecuación no lineal que relaciona la corriente circulante y la tensión entre el pantógrafo y las ruedas del tren.

4. Modelización de la topología de la infraestructura eléctrica de la línea.

Por otro lado, el tren supone una carga variable espacial y temporalmente dentro del sistema de electrificación ferroviario. La posición del tren y la topología del sistema de electrificación de la línea por la que circula el tren definen el circuito eléctrico que se establece en cada instante entre la fuente de energía y el consumidor. Utilizando la expresión obtenida en el cálculo de la caída de tensión en este circuito eléctrico, se obtiene una segunda ecuación que relaciona la corriente circulante y la tensión entre el pantógrafo y las ruedas del tren.

5. Cálculo de los valores eléctricos y energéticos en la circulación del tren por la línea.

La resolución del sistema formado por las dos ecuaciones anteriores permite conocer los valores de la corriente circulante y la caída de tensión entre el pantógrafo y las ruedas del tren –y, por tanto, las potencias eléctricas– en cada instante a lo largo del recorrido.

6. Cálculo de los valores eléctricos y energéticos de un conjunto de servicios ferroviarios.

La coincidencia espacial y temporal de varios trenes en una misma línea provoca la aparición de varios circuitos eléctricos superpuestos. A partir de las trayectorias conocidas de los servicios ferroviarios coincidentes y la topología del sistema de electrificación, se definen los circuitos eléctricos y se formula el sistema de ecuaciones a resolver para cada instante.

7. Evaluación de la energía suministrada por las subestaciones, de la energía consumida por los trenes y de las pérdidas de energía en la línea aérea de contacto.

En los intercambios de potencia entre las subestaciones y los trenes se producen unas pérdidas de transmisión debidas a la naturaleza del sistema de electrificación. Estas pérdidas, necesarias para la alimentación eléctrica de los vehículos ferroviarios, han de ser computadas en la evaluación del consumo energético del sistema ferroviario pues aumentan la energía que han de suministrar las subestaciones.

8. Comparación del consumo energético para diferentes programaciones de servicios.

Un frenado eléctrico puede originar un oportuno circuito entre dos trenes coincidentes con dos importantes ventajas energéticas: se evita la disipación de la energía de frenado en el tren que frena y se reduce la distancia entre la fuente de energía y el consumidor, ya que la distancia al tren que frena es menor que la distancia a la subestación, disminuyendo de este modo las pérdidas en el circuito eléctrico.

Cada programación de servicios ferroviarios da lugar a un conjunto de coincidencias entre los trenes circulantes, lo que resulta en un consumo energético total del sistema ferroviario. Es posible establecer una comparación entre los consumos energéticos obtenidos para diferentes programaciones.

1.4 Metodología

Los modelos matemáticos utilizados en esta tesis han sido obtenidos del estudio de la literatura especializada en la dinámica de los vehículos ferroviarios y en los sistemas de electrificación ferroviaria. Para poder simular el comportamiento del sistema eléctrico y ferroviario en condiciones reales de operación, estos modelos han sido traducidos a algoritmos numéricos mediante la herramienta de software matemático Matlab®.

Todos los códigos empleados en las simulaciones han sido desarrollados y ejecutados en la versión R2019a de Matlab® equipada con los siguientes complementos:

- Symbolic Math Toolbox, versión 8.3.
- Simulink Control Design, versión 5.3.
- Signal Processing Toolbox, versión 8.2.
- Curve Fitting Toolbox, versión 3.5.9.
- Control System Toolbox, versión 10.6.

1.5 Estructura de la tesis

Esta tesis parte de la definición de los modelos mecánicos y eléctricos del movimiento de un tren a lo largo de una línea ferroviaria, para estudiar el funcionamiento de un sistema eléctrico ferroviario con varios trenes en circulación simultánea y evaluar el consumo energético total correspondiente a varias programaciones de servicios.

En el Capítulo 1 se hace una presentación de la tesis recogiendo la motivación, el estado del arte, los objetivos y la metodología. La motivación surge básicamente de la necesidad del progreso del sistema ferroviario hacia una operación más eficiente desde un punto de vista energético. En el estado del arte se recogen las aportaciones más recientes en la relación entre la programación de los servicios ferroviarios y el consumo energético del sistema ferroviario. Los objetivos concretos se centran en conocer detalladamente los modelos físicos que representan la dinámica de los trenes y el funcionamiento de los sistemas de electrificación, utilizar estos modelos para simular escenarios de operación, evaluar el consumo energético asociado a cada escenario y extraer las conclusiones. La metodología empleada es la ejecución de algoritmos numéricos desarrollados a partir de los modelos físicos estudiados.

En el Capítulo 2 se estudia el modelo dinámico del movimiento de un tren a lo largo de un recorrido. Para ello, se caracterizan las fuerzas que actúan durante el desplazamiento del tren de forma que, conocida su trayectoria y la geometría de la vía por la que circula, se pueden deducir los esfuerzos de tracción y de frenado instantáneos. A partir de estos esfuerzos y la velocidad de circulación se puede conocer la potencia mecánica instantánea en cada punto de la trayectoria y se puede deducir el trabajo útil desarrollado por el tren en todo su recorrido. En la parte final de este capítulo se introduce la idea de conducción eficiente y se revisan los trabajos de investigación más relevantes sobre este concepto.

En el Capítulo 3 se presenta el modelo de conversión electromecánica que se produce durante la tracción y el frenado de un tren. De una forma somera se expone el funcionamiento básico de las cadenas de tracción más habituales en los trenes actuales de alta velocidad y se establecen las relaciones entre la potencia mecánica y eléctrica en sus diferentes regímenes de funcionamiento. Estas relaciones nos permiten traducir a términos eléctricos las magnitudes deducidas en el Capítulo 2 y, por tanto, llegar a conocer la potencia eléctrica instantánea y la energía consumida individualmente por el tren en todo su recorrido.

En el Capítulo 4 se estudia el modelo eléctrico que representa el funcionamiento de la infraestructura de electrificación que soporta los flujos de potencia entre los puntos de alimentación al sistema ferroviario y las cadenas de tracción de los trenes. Se analizan los sistemas de electrificación más utilizados actualmente en las líneas de alta velocidad y se desplaza el foco de estudio a la subestación eléctrica de tracción. Desde este nuevo punto de vista, se computan las pérdidas de potencia que se producen durante la circulación de las corrientes por los conductores del sistema de electrificación. El cálculo desde las subestaciones eléctricas de tracción nos permite obtener un valor más realista de la potencia eléctrica instantánea y de la energía consumida por el tren en todo su recorrido.

En el Capítulo 5 se mantiene el foco de estudio en la subestación eléctrica de tracción y se amplía el número de trenes en circulación para analizar escenarios de operación realistas. La simultaneidad de elementos consumidores y generadores de potencia provoca la superposición de corrientes circulantes por el sistema de electrificación. Los efectos cruzados resultantes de la superposición de corrientes dependen de la concurrencia espacial y temporal de los trenes. Se comprueba que los valores de la potencia eléctrica instantánea y la energía total consumida por el sistema están determinados por el modo de concurrencia de los trenes.

En el Capítulo 6 se evalúa la energía total que se ha de suministrar al sistema ferroviario a través de las subestaciones para atender un plan de transporte cadenciado en una línea de alta velocidad. Mediante ligeras variaciones de los horarios de los servicios, se comprueba que se producen diferencias en el consumo energético total. La comparación entre los distintos escenarios posibles permite obtener la programación que minimiza el consumo energético total sin modificar la capacidad ofertada en el plan de transporte.

Finalmente, en el Capítulo 7 se extraen las principales conclusiones de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas y de las aportaciones de esta tesis. Asimismo, se sugieren futuras líneas de investigación que profundicen en algunos factores de los modelos utilizados y amplíen los casos simulados a fin de explorar el potencial de ahorro de la optimización de la programación en más escenarios de operación.

1.6 Bibliografía

[ALBRECHT, 2008]. Albrecht, T., Energy-efficient train operation, Railway Timetable & Traffic, 2008, ed. I. A. Hansen, J. Pahl (Eurail Press), pp. 87-105.

[CHEN, 2019]. Chen, M., Xiao, Z., Sun, P., Wang, Q., Jin, B., Feng, X., Energy-Efficient Driving Strategies for Multi-Train by Optimization and Update Speed Profiles Considering Transmission Losses of Regenerative Energy, Energies, 2019, 12, no. 18, 3573.

[DOUGLAS, 2015]. Douglas, H., Roberts, C., Hillmansen, S., Schmid, F., An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks, Energy Conversion and Management, vol. 106, 2015, pp. 1149-1165.

[EU, 2011]. Libro Blanco del Transporte, Unión Europea, 2011.

[FAN, 2015]. Fan, L., Cao, F., Ke, B., Tang, T. Speed Profile Optimization for Train Operation Based on Ant Colony Algorithm. 2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, 19-20 Dec. 2015.

[KESKIN, 2016]. Keskin, K., Karamancioglu, A. Application of Firefly Algorithm to Train Operation. 2016 IEEE 8th International Conference on Intelligent Systems (IS), Sofia, Bulgaria, 4-6 Sept. 2016.

[HOWLETT, 2000]. Howlett, P., The Optimal Control of a Train, Annals of Operations Research, vol. 98, pp. 65, 2000.

[IEA, 2017]. IEA-UIC, Railway Handbook on Energy Consumption and CO₂ Emissions, International Energy Agency and the International Union of Railways, Paris, 2017.

[KHMELNITSKY, 2000]. Khmelnitsky, E., On an optimal control problem of train operation, IEEE Trans. Autom. Control, vol. 45, no. 7, pp. 1257-1266, 2000.

[KOSEKI, 2010]. Koseki, T., Technologies for Saving Energy in Railway Operation: General Discussion on Energy Issues Concerning Railway Technology, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5: 285-290.

[LUKASZEWICZ, 2001]. Lukaszewicz, P., Energy Consumption and Running Time for Trains, in KTH, Department of Vehicle Engineering: Royal Institute of Technology, Stockholm, 2001, pp. 153.

[TAKAGI, 2010]. Takagi, R., Energy Saving Techniques for the Power Feeding Network of Electric Railways. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5: 312-316.

[UIC, 2018] High speed rail. Fast track to sustainable mobility, UIC, International Union of Railways, Paris, May 2018.

[UIC, 2016]. Technologies and potential developments for energy efficiency and CO₂ reductions in rail systems, UIC, International Union of Railways, Paris, December 2016.

[XIE, 2012.] Xie, T., Wang, S., Zhao, X., Zhang, Q. Optimization of Train Energy-Efficient Operation Using Simulated Annealing Algorithm. Intelligent Computing for Sustainable Energy and Environment. ICSEE 2012. Communications in Computer and Information Science, vol. 355. Springer, Berlin, Heidelberg.

[YANG, 2014]. Yang, J., Jia, L. and Wei, X. A Review on Intelligent Control for Energy-Efficient Train Operation, IEEE Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation Shenyang, China, June 29 - July 4, 2014.

[YANG, 2016]. X. Yang, X. Li, B. Ning and T. Tang, A Survey on Energy-Efficient Train Operation for Urban Rail Transit, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 17, no. 1, pp. 2-13, 2016.

Capítulo 2 Potencia mecánica desarrollada por un tren

Lista de símbolos

m_{tren} : Masa de un tren, en t.

p : Pendiente en una posición de la línea ferroviaria.

\bar{p} : Pendiente media de la vía a lo largo de un tren.

k_v : Parámetro de curva de acuerdo vertical, en m/rad.

r : Radio de curvatura de la vía en una posición de la línea ferroviaria, en m.

\bar{r} : Radio medio de curvatura de la vía a lo largo de un tren, en m.

R_{tren} : Resistencia básica de un tren, en kN.

R_{curva} : Resistencia al paso por curva de un tren, en kN.

R_g : Resistencia gravitatoria de un tren, en kN.

$R_{túnel}$: Resistencia aerodinámica en túnel de un tren, en kN.

R_{infra} : Resistencia debida a la infraestructura, en kN.

x : Posición del tren en la línea ferroviaria, en m.

x_{AV} : Posición del inicio de una curva de acuerdo vertical en la línea ferroviaria, en m.

x_{CT} : Posición del inicio de una curva de transición en la línea ferroviaria, en m.

t : Tiempo, en s.

T_f : Factor de túnel.

v : Velocidad de circulación de un tren, en m/s.

ξ : Coeficiente de masas rotativas de un tren.

F_T : Fuerza de tracción ejercida por un tren, en kN.

F_F : Fuerza de frenado ejercida por un tren, en kN.

$F_{F,eléct}$: Fuerza de frenado eléctrico ejercida por un tren, en kN.

$F_{F,neum}$: Fuerza de frenado neumático ejercida por un tren, en kN.

P : Potencia mecánica desarrollada por un tren, en kW.

W : Trabajo mecánico realizado por un tren, en kJ.

2.1 Introducción

La aproximación al consumo energético individual de un tren debe comenzar por la determinación de la potencia mecánica que desarrolla durante su recorrido. En este capítulo se calcula la potencia mecánica a partir de los esfuerzos de tracción y frenado que ha de realizar un tren para compensar las resistencias al avance que experimenta y lograr la velocidad deseada en cada punto de su recorrido.

Más adelante, se establece que la trayectoria seguida a lo largo del recorrido determina unívocamente el consumo energético individual de un tren y se presenta el concepto de conducción eficiente cuyo objetivo es lograr trayectorias de bajo consumo energético.

Finalmente, se repasa la literatura más relevante sobre las técnicas desarrolladas hasta el momento para la obtención de la trayectoria de mínimo consumo energético o de trayectorias óptimas que combinan el consumo energético con otros objetivos, tales como el tiempo de viaje y el confort de los viajeros.

2.2 Dinámica longitudinal del movimiento de un tren

En la literatura, el movimiento de un tren se suele modelar como el desplazamiento unidimensional de una masa puntual a lo largo de una línea. Esto no supone una limitación respecto al modelo de masas distribuidas si se realiza un procesamiento previo teniendo en cuenta las características geométricas de la infraestructura y el reparto de masas en toda la longitud del tren [FRANKE, 2000].

Para caracterizar el movimiento de esta masa puntual a lo largo de una línea es necesario conocer todas las fuerzas que actúan sobre ella. Considerando exclusivamente una dimensión de trabajo, esto es, la dirección de desplazamiento del tren, se puede afirmar que el tren está sometido a dos fuerzas básicas: la fuerza de tracción y frenado y la resistencia al avance.

2.2.1 Fuerza de tracción y frenado

La fuerza de tracción y frenado puede ser controlada manualmente por el maquinista, o automáticamente por el sistema de operación automática del tren, y procede de los pares de aceleración y de frenado ejercidos sobre las ruedas del vehículo.

Dado que la fuerza de tracción y la fuerza de frenado son antagonistas y su aplicación nunca es simultánea en condiciones normales de explotación, se consideran una misma fuerza cuyo signo positivo se asocia a la tracción y el negativo, al frenado.

2.2.2 Resistencia básica al avance

La resistencia al avance es la fuerza que se opone al desplazamiento del tren cuando está en movimiento. Su valor varía a lo largo del recorrido, y depende fundamentalmente de las características propias del vehículo, de su velocidad de circulación y de la geometría de la vía.

Si un vehículo ferroviario se desplaza por un trayecto horizontal, rectilíneo y al aire libre, experimenta una resistencia básica al avance que depende exclusivamente de sus características y de su velocidad de circulación. En la literatura, se pueden encontrar distintas expresiones para esta resistencia básica, según los tipos de vehículos y sus velocidades normales de circulación, pero todas ellas responden a una forma general que suele recibir el nombre de fórmula de Davis [IWNICKI, 2006].

$$R_{tren}(v) = A + 3,6 B v + 12,96 C v^2 \quad (2.1)$$

Resistencia básica al avance de un tren

El valor del término independiente A de la fórmula de Davis, expresada en (2.1), engloba todas las resistencias debidas a las fricciones mecánicas que se producen durante el desplazamiento del tren. Las fricciones más importantes se originan en la rodadura, por el rozamiento entre la rueda y el carril, y en los rodamientos internos del tren, debido al rozamiento en los rodamientos y cajas de grasa de sus ejes.

$$R_m = m_{tren} (0,65 + \varphi) + 13 n_e \quad (2.2)$$

Resistencia mecánica al avance

En la expresión (2.2) se observa que la resistencia mecánica debida al rozamiento en la rodadura es directamente proporcional a la masa del tren, m_{tren} . Los reducidos valores que toma el coeficiente φ suponen una gran ventaja para el transporte ferroviario respecto a otros modos de transporte, ya que un menor rozamiento implica un menor consumo energético. Sin embargo, de esta característica también se deriva un alargamiento de las distancias de frenado de los vehículos ferroviarios, lo que obliga a que los trenes circulen muy separados entre sí, reduciendo en definitiva la intensidad de tráfico que pueden admitir las infraestructuras ferroviarias.

El coeficiente del término lineal B de la fórmula de Davis, expresada en (2.1), debe su valor en gran medida a la resistencia ocasionada por la entrada de aire en el tren, tanto para la refrigeración de los sistemas de tracción como para la renovación del aire del interior de los coches de viajeros. En la expresión (2.3) se establece que esta resistencia depende linealmente de la velocidad de circulación del tren v , del caudal volumétrico total de la ventilación forzada Q y de la densidad del aire ρ .

$$R_{ent}(v) = 0,0277 \rho Q v \quad (2.3)$$

Resistencia a la entrada de aire en un tren

Finalmente, el término cuadrático de (2.1) representa la resistencia aerodinámica durante el desplazamiento, que se debe a la presión y a la fricción que ejerce el aire sobre la superficie del tren. Como se aprecia en (2.4), la resistencia aerodinámica equivale al producto del coeficiente aerodinámico del tren C por el cuadrado de su velocidad de circulación, v . Contribuyen al valor del coeficiente aerodinámico de un tren su sección transversal S_{tren} , toda su superficie, su forma, incluyendo todos los elementos exteriores fijados a su caja, y la densidad del aire ρ [EN 14067].

$$R_{aero}(v) = \frac{C_x S_{tren} \rho}{2} v^2 \quad (2.4)$$

Resistencia aerodinámica al avance

En la fórmula de Davis los valores de los coeficientes A , B y C son propios de cada tipo de tren y determinan su resistencia básica, que es la resistencia al avance total que experimenta cuando circula por un trayecto horizontal, rectilíneo y al aire libre. En la Tabla 2.1, se muestran los valores de la masa y de los coeficientes A , B y C de varios trenes de alta velocidad europeos [LÓPEZ, 2008].

Tren	m_{tren} (t)	A (kN)	B (kN/kmh)	C (kN/kmh ²)
TGV Sud Est	418	2,35	$3,09 \times 10^{-2}$	$5,35 \times 10^{-4}$
TGV Reseau	416	2,70	$3,03 \times 10^{-2}$	$5,10 \times 10^{-4}$
TGV Atlantique	490	3,8	$3,9 \times 10^{-2}$	$5,65 \times 10^{-4}$
TGV Duplex	424	2,7	$3,2 \times 10^{-2}$	$5,35 \times 10^{-4}$
TGV Regional	231	1,7	$1,51 \times 10^{-2}$	$3,41 \times 10^{-4}$
AVE s-100	416	2,92	$3,84 \times 10^{-2}$	$4,98 \times 10^{-4}$
AVE s-102	357	2,82	$2,22 \times 10^{-2}$	$5,29 \times 10^{-4}$
ICE 3	426	3,12	$2,24 \times 10^{-2}$	$5,21 \times 10^{-4}$

Tabla 2.1. Coeficientes A , B y C de varios trenes de alta velocidad

2.2.3 Efecto de la declividad de la vía

Cuando un tren circula por un tramo cuya pendiente no es nula, aparece una resistencia gravitatoria que se opone o favorece su desplazamiento. El valor de esta resistencia gravitatoria es el resultante de la proyección del peso del tren sobre su dirección de desplazamiento. Sin embargo, tal y como se muestra en la expresión (2.5), para determinar esta resistencia en el modelo de masa puntual se debe obtener previamente el valor medio de la pendiente de la vía \bar{p} , teniendo en cuenta la distribución de masas en toda la longitud del tren.

$$\bar{p}(x) = \frac{1}{m_{\text{tren}}} \sum_{n=1}^N p_n m_n \quad (2.5)$$

Valor medio de la pendiente de la vía a lo largo de un tren de N coches

El alzado longitudinal de una vía está formado por una sucesión de rasantes rectas correspondientes a los tramos horizontales, las rampas y las pendientes. En las líneas de alta velocidad, si la diferencia algebraica entre las pendientes de dos tramos consecutivos es igual o mayor a 2 milésimas, estas se deben unir entre sí por un tramo curvo intermedio denominado curva de acuerdo vertical. Esta curva tiene la función de establecer una transición entre ambas rasantes mediante una variación continua de la pendiente de la vía.

El enlace entre rasantes diferentes más comúnmente utilizado por las administraciones ferroviarias es la parábola simétrica de eje vertical, que presenta una curvatura máxima en el vértice y decrece hacia los puntos de tangencia con las dos rectas que enlaza.

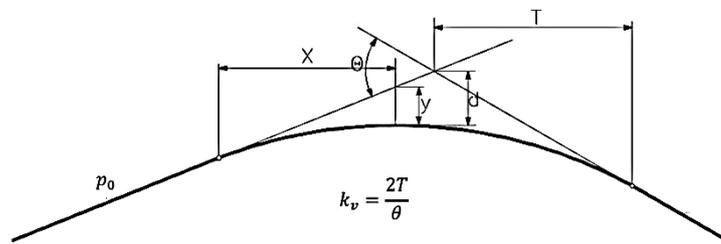


Figura 2.1. Curva de acuerdo vertical convexa en una línea ferroviaria

Como se observa en la Figura 2.1, el parámetro k_v determina la variación lineal de la pendiente a lo largo de la curva de acuerdo vertical desde su punto inicial, x_{AV} . Este parámetro toma valores positivos para curvas de acuerdo verticales cóncavas y negativos cuando se trata de acuerdos verticales convexos.

$$p(x) = p_0 + \frac{x - x_{AV}}{k_v} \quad (2.6)$$

Pendiente de la vía en una curva de acuerdo vertical

La variación de la pendiente hace que, durante la circulación del tren por una curva de acuerdo, los viajeros experimenten una aceleración vertical. Diversos ensayos de simulación realizados han establecido que el valor máximo admisible para esta aceleración vertical

es $0,5 \text{ m/s}^2$. La longitud de la curva de acuerdo ha de ser suficiente para que no se supere el valor máximo admisible de la aceleración vertical durante la circulación del tren [ESCOLADO, 1987].

Dado que las pendientes de las líneas ferroviarias son muy reducidas, se admite la expresión (2.7) donde el valor de la pendiente en tanto por uno se utiliza como aproximación al valor de la función seno.

$$R_g(x) = m_{tren} g \sin [\bar{p}(x)] \approx m_{tren} g \bar{p}(x) \quad (2.7)$$

Resistencia gravitatoria de un tren

2.2.4 Efecto de la curvatura de la vía

La inscripción del sistema de rodadura de los vehículos ferroviarios en la geometría de las curvas aumenta el rozamiento mecánico entre sus ruedas y los carriles, y los deslizamientos en sus ejes, incrementando la resistencia mecánica que debe vencer el tren en su movimiento. El diseño y las condiciones del material rodante, la deficiencia del peralte, el perfil y la lubricación de los carriles y el radio de curvatura de la vía afectan la resistencia mecánica experimentada por un vehículo en una curva. Como el resto de factores pueden variar, es habitual estimar la resistencia mecánica adicional al paso por curva mediante una función empírica que depende sólo del radio de curvatura de la vía [GARCIA, 1954].

$$R_{curva}(x) = \frac{6,116 m_{tren}}{\bar{r}(x)} \quad (2.8)$$

Resistencia mecánica adicional al paso por curva

Como se ha indicado anteriormente, antes de aplicar la expresión (2.8), el valor medio de la curvatura de la vía en toda la longitud del tren \bar{r} debe ser calculado a través de (2.9).

$$\bar{r}(x) = \frac{1}{m_{tren}} \sum_{n=1}^N r_n m_n \quad (2.9)$$

Valor medio de la curvatura de la vía en la posición de un tren de N coches

El trazado en planta de una línea ferroviaria consiste básicamente en alineaciones rectas unidas entre sí por curvas circulares. Durante la circulación de los trenes por las curvas circulares los viajeros soportan una aceleración centrífuga, a_{cent} , cuyo valor se obtiene de la expresión (2.10). Para que la marcha se desarrolle confortablemente para los viajeros, el valor máximo de la aceleración centrífuga suele limitarse. Habitualmente, las administraciones ferroviarias suelen considerar aceptable un valor de aceleración centrífuga de hasta $0,65 \text{ m/s}^2$ en el plano de rodadura del vehículo. Para lograr este objetivo, en primer lugar, se intenta trazar curvas de un radio r_{curva} suficientemente grande para la velocidad de circulación v esperada. Sin embargo, esta medida no siempre es posible dadas las restricciones orográficas y de ocupación del terreno con las que se suele encontrar la construcción de una línea ferroviaria. En este caso, se limita la velocidad de paso de los trenes por las curvas de radio reducido.

$$a_{cent} = \frac{v^2}{r_{curva}} \quad (2.10)$$

Aceleración centrífuga en curva

Con independencia de lo anterior, cuando un vehículo ferroviario pasa por el punto de tangencia entre una recta y una curva, se produce una variación brusca en la aceleración centrífuga que resulta molesta para los viajeros y perjudicial para la conservación de la infraestructura. Con el fin de eliminar este fenómeno, se introduce una sección intermedia donde el radio de la curvatura de la vía varíe de forma continua entre la recta y la curva circular. Estas secciones intermedias reciben el nombre de curvas de transición.

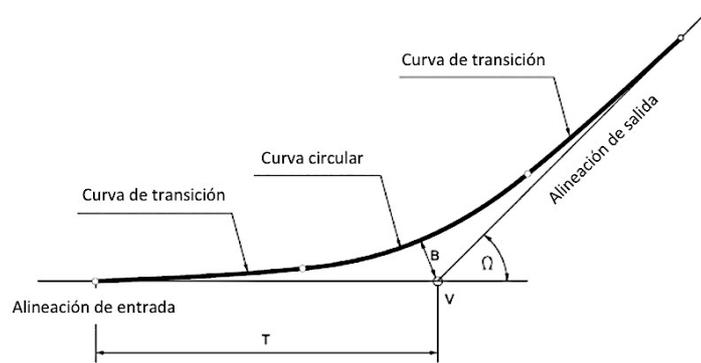


Figura 2.2. Curvas de transición en una línea ferroviaria

La curva de transición más utilizada por las administraciones ferroviarias es la clotoide. La característica principal de la clotoide es la variación lineal del radio de curvatura con la distancia recorrida, tal y como se expresa en (2.11). La longitud de la curva de transición L se elige en cada caso para limitar la variación temporal de la aceleración centrífuga percibida por los viajeros. Las administraciones ferroviarias suelen fijar la máxima variación temporal de la aceleración centrífuga en $0,4 \text{ m/s}^3$. [ESCOLADO, 1988].

$$r(x) = \frac{L}{x-x_{CT}} r_{curva} \quad (2.11)$$

Radio de curvatura en una curva de transición

2.2.5 Efecto de los túneles

Durante la circulación de un tren por el interior de un túnel, la resistencia aerodinámica que se opone a su avance es mayor que la existente cuando el tren circula a la misma velocidad al aire libre. La relación entre ambas resistencias aerodinámicas aparece en la expresión (2.12) y recibe el nombre de factor de túnel, T_f .

$$R_{túnel}(x, v) = 12,96 T_f(x) C v^2 \quad (2.12)$$

Resistencia aerodinámica al avance dentro de un túnel

El valor de la resistencia aerodinámica dentro de un túnel $R_{túnel}$ depende de una gran cantidad de factores, entre otros, las longitudes del tren y del túnel, las superficies transversales del tren y del túnel, la forma del tren, las condiciones del viento y las posibles interferencias con otros trenes [HANSEN, 2017]. En la Tabla 2.2, se muestran los valores de la superficie transversal S_{tren} de varios trenes de alta velocidad europeos [LÓPEZ, 2006].

Tren	S_{tren} (m ²)
ICE 1ª generación	11,78
ETR 500	12,08
TGV Atlantique	10,10
TGV Duplex	10,91
TGV Sud Est	9,65

Tabla 2.2. Superficies transversales de varios trenes de alta velocidad

El valor de la resistencia aerodinámica sufrida por el tren es consecuencia de la presión ejercida por el propio tren en el aire circundante a lo largo del túnel y del rozamiento del aire entre la superficie del vehículo y del túnel. Para reducir este último efecto, se ha establecido el criterio de revestir todos los túneles ferroviarios de alta velocidad independientemente de la existencia de necesidades estructurales [LÓPEZ, 2006].

Túnel	Ubicación	L (km)	Φ (m)
San Gotardo	Suiza	57	8,30
Eurotunnel	Canal de la Mancha	50	7,60
Guadarrama	LAV Madrid-Valladolid	29	8,50
Abdalajís	LAV Córdoba-Málaga	8	8,80
Perthus	LAV Figueras-Perpiñán	7	8,70

Tabla 2.3. Dimensiones de varios túneles ferroviarios de alta velocidad

Sin embargo, el factor más influyente en la resistencia aerodinámica que experimenta un tren al circular por el interior de un túnel es la relación entre las superficies transversales del

tren y del túnel, denominada relación de bloqueo [EN 14067-3]. En la Tabla 2.3, se muestran los valores de la longitud L y el diámetro Φ de varios túneles ferroviarios de alta velocidad en Europa [HILAR, 2009].

Los estudios realizados en Japón con ocasión de la construcción del Tokaido Shinkansen, inaugurado en el año 1964, permitieron demostrar que para relaciones de bloqueo del orden de 0,3 se doblaba la resistencia aerodinámica sufrida por los trenes. A pesar de esto, el diámetro de los túneles ferroviarios de alta velocidad se dimensiona principalmente atendiendo a los efectos que sobre el confort y la salud de los viajeros provocan las variaciones de presión, dando lugar a resistencias aerodinámicas elevadas [MELIS, 2001].

Las condiciones orográficas del territorio español han obligado a la utilización de diferentes recursos constructivos para el desarrollo de la red ferroviaria desde sus orígenes. No obstante, la construcción de túneles es una de las soluciones cuya utilización se ha ido incrementando con el paso del tiempo a medida que el avance de la técnica lo ha hecho más factible. En la Tabla 2.4, se indican las líneas ferroviarias españolas que contienen mayor longitud de vía en túnel [MELIS, 2005].

Línea	Longitud (km)	Long. total túneles (km)
LAV Madrid a Valladolid	179,0	81,8
Zamora a La Coruña	453,2	77,2
Madrid a Barcelona (por Caspe)	677,7	49,3
León a Gijón	171,5	39,1
Baeza a Utiel	334,0	30,3
LAV Madrid a Lérida	442,0	29,8
LAV Córdoba a Málaga	155,0	25,3
Madrid a Burgos	282,1	23,7
Madrid a Irún	641,1	22,3

Tabla 2.4. Líneas de ferrocarril en España con más kilómetros de túnel

2.2.6 Resistencia al avance debida a la infraestructura

Sumando la resistencia gravitatoria a las resistencias adicionales debidas a las curvas y a los túneles, se obtiene la resistencia al avance aportada por la infraestructura, R_{infra} . Como se

puede apreciar en (2.13), el valor de la resistencia al avance aportada por la infraestructura es función de la posición del tren x y de su velocidad de circulación v . En consecuencia, la resistencia total al avance que experimenta un tren viene determinada por la suma de su resistencia básica R_{tren} , expresada en (2.1), más la resistencia debida a la infraestructura, R_{infra} .

$$R_{infra}(x, v) = m_{tren} g \tilde{d}(x) + \frac{6,116 m_{tren}}{\tilde{r}(x)} + 12,96 T_f(x) C v^2 \quad (2.13)$$

Resistencia al avance debida a la infraestructura

2.3 Trayectoria individual de un tren

Una vez conocidas las fuerzas que actúan sobre la masa puntual que representa al tren, se puede aplicar la segunda ley de Newton para hallar la ecuación de su movimiento a lo largo de la línea. En el caso de los trenes, con el fin de tener en cuenta los momentos de inercia de todas las masas rotativas durante su movimiento, es necesario incrementar el valor de su masa por el coeficiente de masas rotativas ξ [STEIMEL, 2014].

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.14)$$

$$\xi m_{tren} \frac{dv}{dt} = F_{TF}(t) - R_{tren}(v) - R_{infra}(x, v) \quad (2.15)$$

Ecuaciones del movimiento del tren

La trayectoria x desarrollada por un tren durante un servicio es el resultado de todas las fuerzas que soporta en cada momento, tal y como se expresa en (2.14) y (2.15). Sin embargo, mientras la fuerza de resistencia al avance R viene determinada por las características del vehículo y de la línea por la que circula, la fuerza de tracción y frenado F_{TF} es controlada manualmente por el maquinista o por el sistema de operación automática del tren. Como se muestra en la Figura 2.3, a través de la fuerza de tracción y frenado se regula la marcha del tren y se determina el perfil temporal de su velocidad, es decir, los valores de su velocidad de circulación v en cada instante t .

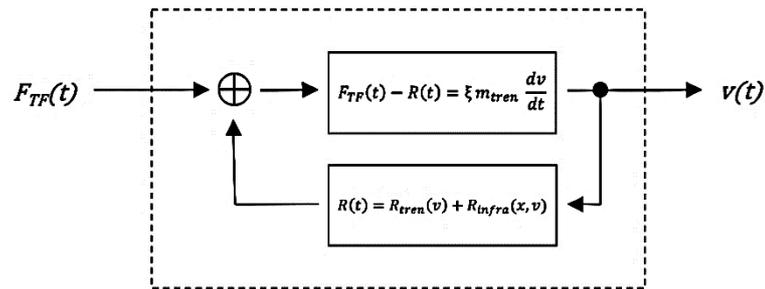


Figura 2.3. Regulación temporal de la marcha de un tren

2.3.1 Tiempo de viaje mínimo

A la hora de establecer el horario de un servicio ferroviario resulta muy útil conocer previamente el mínimo tiempo de viaje posible entre el origen y el destino. Para calcular teóricamente esta trayectoria de tiempo mínimo, se debe simular la marcha del tren utilizando sus máximas capacidades de tracción y de frenado respetando en todo momento el límite de velocidad establecido para la operación.

Es preciso diferenciar entre la velocidad técnica del tren y la velocidad máxima de servicio. La velocidad técnica de un tren se define como la velocidad máxima que puede lograr para unas condiciones dadas, y es una característica propia del vehículo. En cambio, la velocidad máxima de servicio es la velocidad máxima a la que está permitido operar el tren en cada tramo del recorrido. El perfil de la velocidad del tren ha de ser inferior a la menor de ambas velocidades a lo largo de todo el recorrido.

Para un tipo de tren y un recorrido dados, la trayectoria de tiempo mínimo de viaje obtenida es única. Esta trayectoria se simula modulando la fuerza de tracción y frenado del tren de la siguiente manera:

- Fase de aceleración: Mientras la velocidad de circulación del tren sea inferior a la velocidad máxima de servicio, se aplica el máximo esfuerzo de tracción.
- Fase de crucero: Cuando la velocidad de circulación alcanza la velocidad máxima de servicio, se deben aplicar los esfuerzos de tracción y frenado justos para equilibrar las fuerzas que actúan sobre el tren y mantener constante su velocidad.

- Fase de frenado: Si es necesario reducir la velocidad de circulación, debido a una parada o a una reducción local de la velocidad máxima de servicio, se aplicará el máximo esfuerzo de frenado. Esta fase debe iniciarse lo más tarde posible, pero a tiempo para asegurar que la distancia disponible es igual a la distancia de frenado que requiere el tren.

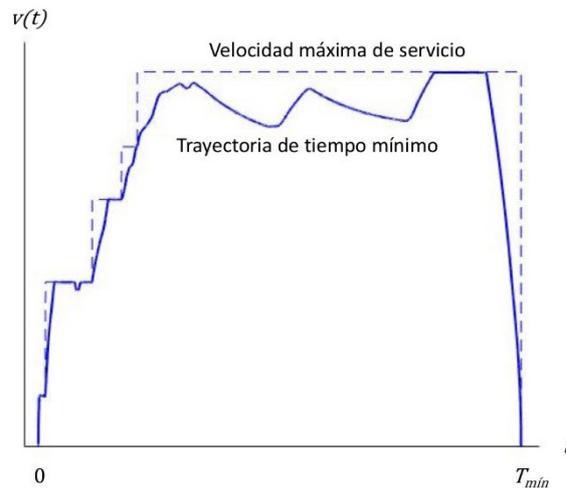


Figura 2.4. Perfil temporal de la velocidad para la trayectoria de tiempo mínimo

En la Figura 2.4 se representa el perfil temporal de la velocidad resultante para la trayectoria de tiempo mínimo simulada sobre una infraestructura conocida. Se observa que la velocidad de circulación del tren en esta trayectoria simulada tiende a igualar la máxima velocidad permitida en cada momento y las fases de aceleración y de frenado se completan en un tiempo reducido. Este resultado es concordante con la definición de la trayectoria de tiempo mínimo pues en ella se aplican las máximas capacidades de tracción y de frenado del tren. Sin embargo, en la parte central del recorrido se puede apreciar una fase de cruce donde la velocidad de circulación del tren permanece inferior a la máxima velocidad permitida e, incluso, se reduce en algunos instantes. Esta observación, en principio discordante con la definición de la trayectoria de tiempo mínimo, se explica considerando que en algunos instantes de esta fase de cruce la resistencia al avance soportada por el tren R supera la máxima capacidad de tracción del tren, es decir, el máximo valor de F_{TF} . En consecuencia, la velocidad de circulación del tren se reduce en estos instantes.

2.3.2 Tiempo de viaje real

Aunque ofrecer el mínimo tiempo de viaje entre el origen y el destino puede resultar muy atractivo a priori, en la programación de los servicios ferroviarios es conveniente añadir un margen de tiempo para contingencias que asegure la puntualidad bajo diversas condiciones de explotación [DESPREZ, 2012].

Una vez fijado el margen de tiempo adicional queda establecido el tiempo de viaje, pero existe un número ilimitado de trayectorias posibles que lo cumplen. A cada trayectoria posible le corresponde un perfil de la velocidad distinto, aunque el tiempo de viaje entre el origen y el destino sea el mismo para todas ellas.

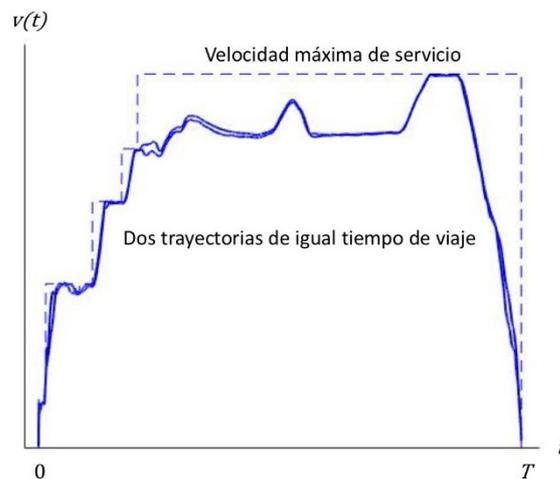


Figura 2.5. Perfiles temporales de la velocidad con igual tiempo de viaje

En la Figura 2.5, se representan los perfiles temporales de la velocidad de dos trayectorias reales registradas correspondientes a dos circulaciones de un mismo servicio ferroviario en diferentes días. Ambas trayectorias reales se desarrollaron sobre la misma infraestructura que la trayectoria de tiempo mínimo simulada y representada en la Figura 2.4. Comparando estas dos trayectorias con la trayectoria de tiempo de viaje mínimo, se observa que sus velocidades de circulación permanecen más tiempo alejadas de la máxima velocidad permitida y que sus fases de aceleración y de frenado tienen una mayor duración. Esta diferencia es consecuencia de que el tiempo de viaje programado para el servicio real contiene un margen de tiempo adicional. Este margen permite que durante ambas

trayectorias reales no sea necesario aplicar las máximas capacidades de tracción y de frenado del tren.

2.4 Potencia mecánica

La potencia mecánica P es la magnitud que nos va a permitir aproximarnos al consumo energético individual de un tren. Su valor puntual en cada instante, expresado en (2.16), equivale al producto de la fuerza de tracción y frenado ejercida por el tren F_{TF} , y su velocidad de circulación, v .

$$P(t) = F_{TF}(t) v(t) \quad (2.16)$$

Potencia mecánica desarrollada por un tren

A cada trayectoria realizada le corresponde un perfil temporal de la potencia mecánica. Dado que para un mismo tiempo de viaje existe un número ilimitado de trayectorias posibles, también existe un número ilimitado de perfiles temporales de la potencia mecánica.

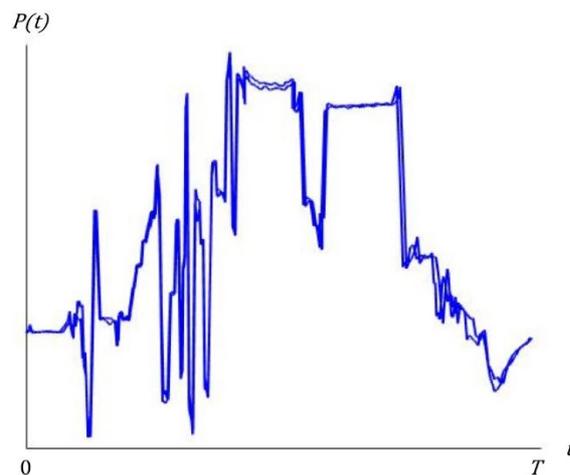


Figura 2.6. Perfiles temporales de la potencia mecánica con igual tiempo de viaje

2.5 Trabajo mecánico realizado

Una primera aproximación al consumo energético individual de un tren es el trabajo mecánico total realizado durante su trayectoria, W . En la expresión (2.17) se muestra la obtención del valor del trabajo mecánico realizado por un tren a partir de su potencia mecánica P desde el inicio hasta el final de su recorrido.

$$W = \int_0^T P(t) dt \quad (2.17)$$

Trabajo mecánico realizado por un tren

Dado que en (2.16) se establece que la potencia mecánica P de un tren depende de su trayectoria, su trabajo mecánico W también queda determinado por la trayectoria realizada por el tren.

2.6 Conducción eficiente

De acuerdo con la literatura, para un tiempo de viaje programado existe una única trayectoria cuyo perfil temporal de la potencia mecánica $P(t)$ minimiza el trabajo mecánico realizado por el tren en el recorrido, W . El objetivo de la conducción eficiente es la obtención de esta trayectoria entre todas aquellas que cumplen un mismo tiempo de viaje, para aplicarlo a la conducción de los trenes y reducir el consumo energético en la operación ferroviaria.

Las primeras investigaciones sobre la conducción eficiente comenzaron en los años 60 del siglo XX utilizando la programación dinámica para descomponer el problema de optimización en una secuencia de subproblemas [EROFEYEV, 1967]. Pronto se llegó a la conclusión de que la trayectoria de mínimo trabajo mecánico para un recorrido simple debería contener las fases de tracción, deriva (tracción y frenado nulos) y frenado, y de que la resolución del problema de optimización consistiría en la determinación de los puntos de cambio entre estas fases [ISHIKAWA, 1968].

Más adelante, se aplicó la teoría del control óptimo para encontrar cuál debería ser la senda de comportamiento de la variable de control, es decir, de la fuerza de tracción y frenado F_{TF} ,

para que la trayectoria resultante del tren fuera la de mínimo trabajo mecánico [STROBEL, 1974]. En el caso de recorridos suficientemente largos, se dedujo que la operación óptima de un tren debería incluir una cuarta fase: la de velocidad de crucero (velocidad constante) [LEE, 1982]. A continuación, se probó que, en las trayectorias óptimas de recorridos suficientemente largos, las cuatro fases deberían seguir la secuencia aceleración-crucero-deriva-frenado, tratando de mantener la velocidad constante el máximo tiempo posible [HOWLETT, 1988]. Posteriormente, se obtuvo que las fases de aceleración y frenado deberían hacerse con las máximas capacidades del tren y que, en la fase de crucero, las tracciones o frenados parciales vendrían determinados por la resistencia al avance que experimentara el tren [HOWLETT, 1995]. Finalmente, se dedujo que los puntos óptimos de cambio de fase en cada sección de vía son únicos y que la estrategia óptima global también lo es [ALBRECHT, 2013].

En ocasiones, el problema de obtención de trayectorias se formula como un problema de optimización que combina varios objetivos simultáneos, tales como el trabajo mecánico, el tiempo de viaje y el confort de los viajeros. Para ello, se construye una función de mayor complejidad donde se pondera la importancia de cada objetivo.

La aplicación de los métodos analíticos al problema de optimización de trayectorias exige el conocimiento preciso de los modelos matemáticos. Sin embargo, la no linealidad y la complejidad de las variables externas que afectan a la ecuación del movimiento de un tren hacen que esto sólo sea posible bajo ciertas simplificaciones [FRANKE, 2000]. Por este motivo, desde los años 70, se han venido aplicando métodos numéricos al problema de la obtención de la trayectoria óptima. Inicialmente, los algoritmos numéricos adolecían de unos tiempos de ejecución extremadamente largos y su aplicación fue limitada. En los últimos años, la evolución de la capacidad de cómputo y el desarrollo de la teoría de cálculo han permitido la aparición de un número cada vez mayor de estudios de conducción eficiente basados en algoritmos numéricos.

Un ejemplo de estas técnicas es el control difuso, que utiliza una serie de reglas que relacionan la función de regulación y las variables externas con el resultado del proceso a optimizar. En el caso de la minimización del trabajo mecánico, las reglas manejadas por el motor de inferencia del sistema de control difuso pueden ser formuladas por expertos, que conozcan las estrategias de conducción, o bien aprendidas por el propio sistema. En este último caso, se logran soluciones robustas haciendo uso de redes neuronales para entrenar el sistema con datos resultantes de la experiencia. Por el contrario, la estabilidad de las

soluciones y el tiempo de cálculo son los puntos débiles de esta técnica de optimización [CHANG, 1999].

Otra técnica ampliamente utilizada son los algoritmos genéticos, que hacen evolucionar una población de soluciones sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas) y a una selección según un determinado criterio. Las soluciones más adaptadas sobreviven y pasan a la nueva generación, mientras que el resto son descartadas. Existen muchos ejemplos de algoritmos genéticos en la literatura que buscan los puntos óptimos de cambio entre las fases de aceleración, crucero, deriva y frenado. El tiempo de ejecución de este tipo de algoritmos depende mucho de la población inicial de soluciones con que se inicie [KANG, 2011], [CHEVRIER, 2012], [KIM, 2013].

2.7 Conclusiones

La trayectoria desarrollada por un tren es el resultado de la fuerza de tracción y frenado aplicada y de las resistencias que encuentre a su avance. Existen infinitas trayectorias posibles para un tren que satisfacen un mismo tiempo de viaje en un recorrido entre un origen y un destino. A cada una de las trayectorias le corresponde un valor unívoco del trabajo mecánico total realizado por el tren en su recorrido.

Las técnicas de conducción eficiente buscan la utilización óptima de la fuerza de tracción y frenado del tren para encontrar la trayectoria de mínimo trabajo mecánico entre todas aquellas que satisfacen el tiempo de viaje programado entre el origen y el destino.

2.9 Bibliografía

[ALBRECHT, 2013]. Albrecht, R., Howlett, P. G., Pudney, P. J., Vu, X., Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. *Automatica*, 2013, 49 (10):3072-3078.

[CHANG, 1999]. Chang, C. S., Xu, D. Y., and Quek, H. B., "Pareto-optimal set based multiobjective tuning of fuzzy automatic train operation for mass transit system," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 146, pp. 577-583, 1999.

[CHEVRIER, 2012]. Chevrier R., Pellegrini P., Rodríguez, J. Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 37, December 2013, Pages 20-41.

[DESPREZ, 2012]. Desprez, C., Djellab, H. Traction energy saving by speed profile optimization, 15th Edition of the Euro Working Group on Transportation, EWGT 2012. International Scientific Conference, Paris, 10-13 Sep. 2012.

[EN 14067-3]. UNE-EN 14067-3:2004 Aplicaciones ferroviarias. Aerodinámica. Parte 3: Aerodinámica dentro de túneles.

[EROFEYEV, 1967]. Erofejev, E. Calculation of optimum train control using dynamic programming method, *Proceedings of Moscow Railway Engineering Institute*, Moscow, 1967, (811) 16-30.

[ESCOLADO, 1987]. José A. Escolado Paul, Curvas verticales en los trazados ferroviarios, *Revista de Obras Públicas*, pp. 537-542, septiembre 1987.

[ESCOLADO, 1988]. José A. Escolado Paul, Curvas horizontales en los trazados ferroviarios, *Revista de Obras Públicas*, pp. 197-210, marzo 1988.

[FRANKE, 2000]. Franke, R., Terwiesch, P., Meyer, M. An algorithm for the optimal control of the driving of trains. *Proceedings of the 39 IEEE Conference on Decision and Control*, Sidney, 2000.

[GARCIA, 1954]. *Tratado de Explotación de Ferrocarriles*, García Lomas, J. M., Ed. Escuela especial de caminos, canales y puertos, Madrid, 1952

[HANSEN, 2017]. Using operational data to estimate the running resistance of trains. Estimation of the resistance in a set of Norwegian tunnels.

[HILAR, 2009]. Long railway tunnels-comparison of major projects, Hilar, Matous, and Martin Srb., Planning, vol. 53, pp. 2020, año 2009.

[HOWLETT, 1988]. Howlett, P. G. Existence if an optimal strategy for the control of a train. School of Mathematics Report 3, University of South Australia, 1988.

[HOWLETT, 1995]. Howlett, P. G., Pudney, P. J. Energy-Efficient Train Control. London: Springer Press, 1995.

[ISHIKAWA, 1968]. Ishikawa, K. Application of optimization theory for bounded state variable problems to the operation of trains, Bulltino of JSME Nagoya University, 1968, 11(47):857-865.

[IWNICKI, 2006]. Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Simon Iwnicki, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

[KANG, 2011]. Kang, M. H. A GA-based Algorithm for Creating an Energy-Optimum Train Speed Trajectory. Journal of International Council on Electrical Engineering, 1:2, 123-128, 2011.

[KIM, 2013]. Kim, Y. G., Jeon, C. S., Kim, S. W., Park T. W. Operating speed pattern optimization of railway vehicles with differential evolution algorithm. International Journal of Automotive Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 903-911 (2013).

[LEE, 1982]. Lee, G. H., Milroy, I. P., Tyler, K. Application of Pontryagin's maximum principle to the semi-automatic control of rail vehicles. Proceedings of Second Conference on Control Engineering, Newcastle, 1982:233-236.

[LOPEZ, 2006]. Infraestructuras ferroviarias, López Pita, A., Ediciones UPC, Barcelona, 2006.

[MELIS, 2001]. Melis, M. J., Matías, I., Alonso, J. M., Navarro, J. L., Tasis, J. L. Diseño de túneles para trenes de alta velocidad. Rozamiento tren-aire-túnel y ondas de presión. Revista de obras públicas, 148, (3415): 27-44, 2001.

[MELIS, 2005]. Melis, M. J., Jiménez, M., Cuéllar, D. Inventario de túneles ferroviarios de España. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, 2005.

[STEIMEL, 2014]. Electric Traction. Motive Power and Energy Supply, München, Deutscher Industrieverlag, 2014.

[STROBEL, 1974]. Strobel, H., Horn P. Contribution to optimum computer-aided control of train operation. 2nd Symposium on Traffic Control and Transportation Systems, 1974, pp 377-387.

Capítulo 3 Potencia eléctrica desarrollada por un tren

Lista de símbolos

n_s : Velocidad de sincronismo de un motor asíncrono, en min^{-1} .

n_r : Velocidad de rotación del rotor de un motor asíncrono, en min^{-1} .

σ : Deslizamiento de un motor asíncrono.

σ_c : Deslizamiento crítico de un motor asíncrono.

M : Par desarrollado por un motor asíncrono, en Nm.

M_c : Par crítico desarrollado por un motor asíncrono, en Nm.

F_T : Fuerza de tracción ejercida por un tren, en kN.

$F_{F,el\acute{e}ct}$: Fuerza de frenado eléctrico ejercida por un tren, en kN.

v : Velocidad de circulación de un tren, en m/s.

η_T : Rendimiento de la cadena de tracción de un tren.

η_F : Rendimiento de la cadena de tracción de un tren durante el frenado eléctrico.

U_{tren} : Diferencia de tensión entre los extremos de la cadena de tracción de un tren, en kV.

I_{tren} : Intensidad de corriente circulante por la cadena de tracción de un tren, en A.

S_{tren} : Potencia eléctrica compleja en un tren, en kW + jkVAR.

P_{tren} : Potencia eléctrica activa total en un tren, en kW.

Q_{tren} : Potencia eléctrica reactiva total en un tren, en kVAR.

P_{tren}^T : Potencia eléctrica activa consumida por la tracción de un tren, en kW.

P_{tren}^F : Potencia eléctrica activa generada por el frenado eléctrico regenerativo de un tren, en kW.

P_{tren}^{AUX} : Potencia eléctrica activa consumida por los servicios auxiliares de un tren, en kW.

λ_{tren} : Factor de potencia de un tren.

E_{tren} : Energía eléctrica neta consumida por un tren, en kWh + jkVARh.

E^+_{tren} : Energía eléctrica consumida por un tren, en kWh + jkVARh.

E^-_{tren} : Energía eléctrica regenerada por un tren, en kWh + jkVARh.

3.1 Introducción

La potencia mecánica desarrollada por un tren dotado de tracción eléctrica tiene su origen en la potencia eléctrica manejada por su cadena de tracción. Para lograr una mayor aproximación al consumo energético individual de un tren eléctrico es necesario conocer su cadena de tracción y calcular su potencia eléctrica durante el recorrido.

En el presente capítulo se describe el funcionamiento del motor asíncrono aplicado a la tracción ferroviaria y se introduce el concepto de régimen de frenado eléctrico regenerativo. A continuación, se determinan las características de las fuerzas de tracción y de frenado eléctrico de un tren eléctrico dotado de motores asíncronos.

Finalmente, teniendo en cuenta el rendimiento de la cadena de tracción de un tren eléctrico y su factor de potencia, se obtienen las expresiones que permiten obtener la potencia eléctrica y la energía eléctrica.

3.2 Cadena de tracción de un tren eléctrico

La cadena de tracción de los trenes eléctricos está formada por los elementos necesarios para la transformación de la corriente eléctrica en fuerza de tracción o, a la inversa, de la fuerza de frenado en corriente eléctrica. Desde finales del siglo XIX, el ferrocarril ha utilizado ampliamente los motores eléctricos de corriente continua por la facilidad de control de su velocidad. Sin embargo, desde los años 50 del siglo XX, el desarrollo de equipos rectificadores hizo posible la implementación de nuevos esquemas de control para los motores eléctricos de corriente alterna. Actualmente, la práctica totalidad de los motores eléctricos utilizados en el ferrocarril son de corriente alterna.

Como se muestra en la Figura 3.1, en el caso de los trenes alimentados por corriente alterna monofásica, la cadena de tracción consta básicamente de un transformador, uno o varios convertidores de tracción y uno o varios motores asociados al sistema de transmisión mecánica. El transformador de tracción reduce la tensión de alimentación del sistema eléctrico ferroviario a los valores de trabajo de los equipos de potencia embarcados en el tren. Los convertidores de tracción acondicionan la tensión y la corriente para regular el funcionamiento de los motores. Finalmente, en los motores se produce la conversión electromecánica que propicia el movimiento del tren.

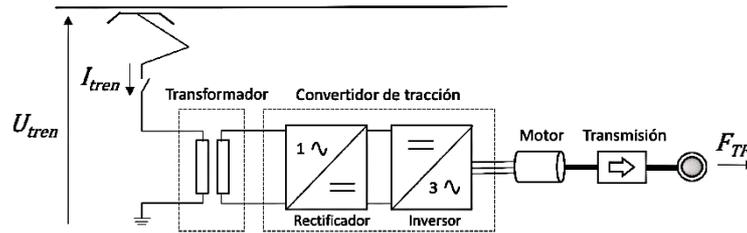


Figura 3.1. Cadena de tracción de un tren eléctrico alimentado en corriente alterna

Aunque el motor de inducción para la tracción ferroviaria fue puesto en práctica por primera vez en 1888, la complejidad de la infraestructura requerida para regular su velocidad de funcionamiento limitó inicialmente su expansión. A pesar de que el motor asíncrono trifásico constituye el motor industrial por excelencia, su utilización en la tracción ferroviaria no ha sido posible hasta que el desarrollo de la electrónica de control y de la electrónica de potencia lo ha permitido [STEIMEL, 2014].

En los años 70 del siglo XX, se pudieron demostrar las ventajas de la operación del motor asíncrono a frecuencia variable mediante la utilización de inversores de tiristores. En los años 80, la aparición de los tiristores de apagado por puerta (GTO) permitió aumentar las tensiones manejadas por los inversores. En los años 90, se consiguieron inversores para tensiones aún mayores y menores tiempos de conmutación gracias a la sustitución de los GTO por tiristores controlados por puerta integrada (IGBT) [KONDO, 2010].

El progresivo aumento de las potencias manejadas por la electrónica y la consiguiente reducción del coste de los inversores, han conducido a la generalización del empleo de los motores asíncronos en todos los vehículos ferroviarios de alto rendimiento (locomotoras de gran potencia y trenes de alta velocidad). El éxito actual del motor asíncrono en la tracción ferroviaria se basa en que combina una relación peso-potencia muy favorable con una gran robustez y unos bajos costes de mantenimiento [HAGIWARA, 2008].

La explotación ferroviaria actual en alta velocidad está formada mayoritariamente por trenes dotados de motores asíncronos. Recientemente, se ha observado la aparición en explotación de algunos trenes de alta velocidad dotados de motores síncronos de imanes permanentes. El rendimiento de estos motores supera ligeramente al de los motores asíncronos. Sin

embargo, su extensión se está viendo limitada por algunas de sus desventajas: el flujo constante proporcionado por los imanes y el elevado coste debido al aumento del precio de los imanes de tierras raras [RONANKI, 2017].

3.3 Aplicación del motor asíncrono en el tren eléctrico

El motor asíncrono trifásico está constituido por un estator y un rotor, separados por una zona denominada entrehierro. El estator es una corona cilíndrica cuya superficie interior está ranurada para alojar el arrollamiento trifásico donde se genera el campo magnético rotativo. La implementación más extendida del rotor es la jaula de ardilla, hecha a base de barras de cobre insertadas en las ranuras de un tambor cilíndrico y cortocircuitadas en ambos extremos mediante anillos. Por lo tanto, la máquina contiene dos circuitos eléctricos, el estator y el rotor, con sus correspondientes núcleos de material ferromagnético.

El motor asíncrono funciona según el principio de inducción mutua de Faraday. Al aplicar una corriente alterna trifásica de frecuencia f_s a las bobinas inductoras del estator, se produce un campo magnético rotativo. La velocidad de rotación de este campo magnético se denomina velocidad de sincronismo, n_s . La expresión (3.1) permite hallar la velocidad de sincronismo de un motor asíncrono a partir de la frecuencia de excitación f_s y de su número de polos, p .

$$n_s = \frac{120 f_s}{p} \quad (3.1)$$

Velocidad de sincronismo de un motor asíncrono de p polos

La rotación del campo magnético alrededor del rotor induce corrientes en el mismo que producen, a su vez, un campo magnético que sigue el movimiento del campo magnético originado en el estator. Por el principio de inducción mutua, se genera un par de fuerzas que hace que el rotor comience a girar.

Cuando el rotor está girando, sólo se inducen corrientes en sus arrollamientos si existe una diferencia entre su velocidad de rotación, n_r , y la velocidad de sincronismo, n_s . Por el contrario, si ambas velocidades son iguales, no hay inducción en el rotor y no se produce par

de giro. La diferencia relativa entre ambas velocidades, tal y como se expresa en (3.2), recibe el nombre de deslizamiento, σ .

$$\sigma = 1 - \frac{n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

Deslizamiento de un motor asíncrono

Como se puede ver en la expresión (3.3), el par M desarrollado por un motor asíncrono es función de su par motor crítico M_c , de su deslizamiento crítico σ_c , de la relación de resistencias a y de su deslizamiento σ . El par crítico M_c depende de la tensión de excitación U_s , de la frecuencia de excitación f_s y de las propiedades constructivas del motor. El deslizamiento crítico σ_c depende de la frecuencia de excitación f_s y de las propiedades constructivas del motor. La relación de resistencias a depende sólo de las propiedades constructivas del motor [SERRANO, 2017].

$$M = M_c \frac{2(1+a\sigma_c)}{\frac{\sigma}{\sigma_c} + \frac{\sigma_c}{\sigma} + 2a\sigma_c} \quad (3.3)$$

Par desarrollado por un motor asíncrono

En la Figura 3.2, se ha representado la característica mecánica de un motor asíncrono, es decir, el par desarrollado en función de su deslizamiento mientras permanecen constantes la tensión y la frecuencia de excitación. Como se puede observar, cuando el deslizamiento es inferior al deslizamiento crítico, el par presenta una característica muy rígida respecto a la velocidad de giro y se puede asumir que el motor asíncrono mantiene constante su velocidad de giro. Por lo tanto, mientras la velocidad de giro del rotor sea próxima a la velocidad de sincronismo, es posible extraer del motor un amplio rango de valores de par de forma estable.

Es importante notar que la zona de estabilidad de funcionamiento del motor asíncrono es simétrica a ambos lados de la velocidad de sincronismo. Esto es, la característica mecánica de un motor asíncrono dispone de un rango de funcionamiento estable que se extiende desde el deslizamiento $-\sigma_c$ hasta el deslizamiento σ_c . En los valores de deslizamiento

positivo ($\sigma > 0$) el motor funciona en régimen de tracción ($M > 0$) y en los valores de deslizamiento negativo ($\sigma < 0$) el motor funciona en régimen de frenado por recuperación ($M < 0$).

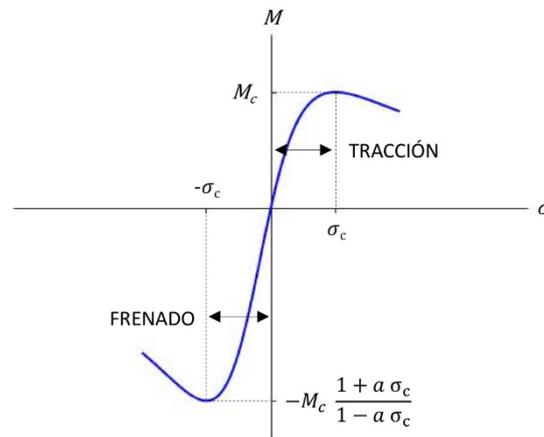


Figura 3.2. Característica mecánica de un motor asíncrono en función de su deslizamiento

En el Capítulo 2 se ha visto que un tren en circulación experimenta una resistencia al avance variable a lo largo de su recorrido. Si en un punto de su recorrido aparece un aumento de esta resistencia –por ejemplo, por el comienzo del ascenso por una rampa–, se produce un incremento de la carga mecánica aplicada al rotor y, en un primer momento, una ralentización de su velocidad de giro. Mientras el deslizamiento permanezca bajo, esto es, mientras la velocidad de giro del rotor se mantenga próxima a la velocidad de sincronismo, el par desarrollado por el motor aumentará y la velocidad se mantendrá estable.

Sin embargo, si el aumento de la resistencia al avance exigiera del motor un par mayor al nominal para su velocidad de sincronismo, el giro del rotor se ralentizaría más allá de la zona estable de funcionamiento y el deslizamiento crecería de forma irrecuperable. En este caso, para mantener la velocidad del vehículo, sería necesario controlar la frecuencia y la tensión de excitación del estator para modificar la característica mecánica del motor y obtener una respuesta adecuada. El objetivo de este control sería situar la velocidad de sincronismo próxima a la velocidad de giro del rotor para que el motor pueda permanecer dentro de la zona estable desarrollando el par de tracción deseado.

De igual forma se procedería si la resistencia al avance no variase, pero se quisiera aumentar la velocidad de circulación del tren. En este caso, sería necesario elevar la frecuencia de excitación para que la velocidad de sincronismo fuera ligeramente superior a la velocidad de giro del motor y, de esta forma, se generara un mayor par de tracción. Sin embargo, esto sólo permitiría ligeros incrementos de velocidad que suelen ser insuficientes en la explotación ferroviaria. Para obtener un par de tracción mayor, se controlaría la frecuencia y la tensión de excitación del estator y se situaría al motor en una característica mecánica adecuada.

En los trenes eléctricos actuales, el control de la frecuencia y de la tensión de excitación se lleva a cabo mediante convertidores estáticos de tracción basados en inversores de pulsos. Este control se desarrolla en dos rangos:

- Para frecuencias de excitación inferiores a su frecuencia nominal, $f_s < f_N$, el motor trabaja a flujo magnético constante. En este rango de frecuencias, el convertidor de tracción va aumentando la tensión de excitación U_s de forma proporcional a la frecuencia de excitación f_s para lograr que el par del motor permanezca constante.
- Una vez el estator está excitado a su tensión nominal U_N , debido a las limitaciones del aislamiento de los arrollamientos, sólo es posible incrementar la velocidad de giro del rotor aumentando la frecuencia de excitación por encima de la frecuencia nominal $f_s > f_N$, pero manteniendo la tensión de excitación constante $U_s = U_N$. En este rango de frecuencias, el motor trabaja a flujo magnético débil y mantiene constante su potencia [SEN, 2013].

3.4 Fuerza de tracción de un tren eléctrico

Desde el punto de vista de la fuerza de tracción disponible para la regulación de la velocidad de un tren a lo largo de una trayectoria, el convertidor estático controla la frecuencia y la tensión de excitación para seleccionar en cada momento la característica mecánica de funcionamiento del motor de tracción más adecuada en cada caso. El resultado es que la fuerza de tracción nominal que puede ofrecer el motor asíncrono de un tren es función de su velocidad de circulación y consta de dos regímenes de funcionamiento: par constante y potencia constante [NICHOLSON, 2012].

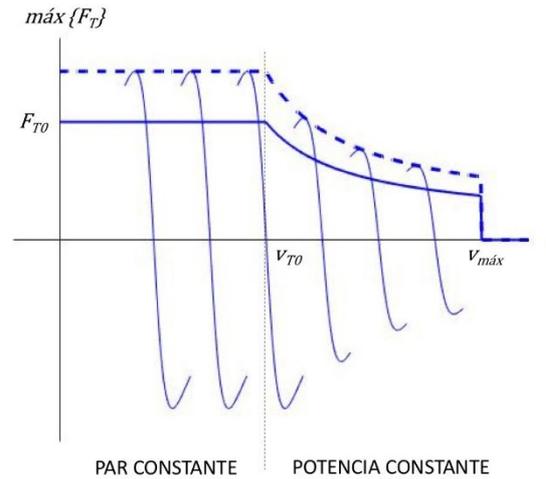


Figura 3.3. Fuerza de tracción de un tren en función de su velocidad

En la Figura 3.3, se muestra la máxima fuerza de tracción de un tren en función de su velocidad de circulación. En línea gruesa discontinua se ha representado la máxima fuerza de tracción teórica, $máx\{F_T\}$, que se obtendría a partir de la envolvente superior de las características mecánicas correspondientes a todas las frecuencias de excitación posibles. Sin embargo, tal y como se expresa en (3.4), la función de selección realizada por el convertidor estático reduce la fuerza de tracción disponible a su valor nominal para asegurar la estabilidad del motor asíncrono. Esta fuerza de tracción nominal para cada velocidad, F_T , se ha representado en línea gruesa continua.

En definitiva, como se puede observar en la expresión (3.5), el valor de la fuerza de tracción nominal para un tren según su velocidad de circulación puede ser aproximada por una función definida a tramos. Para velocidades inferiores a la velocidad base del motor de tracción v_{T0} , esto es, cuando el motor funciona en régimen de par constante, la fuerza de tracción nominal es constante, F_{T0} . Si la velocidad de circulación del tren se sitúa entre la velocidad base del motor v_{T0} y la velocidad máxima de diseño $v_{máx}$, es decir, cuando el motor funciona en régimen de potencia constante, la fuerza de tracción nominal se aproxima por una función hiperbólica. Finalmente, si la velocidad de circulación de tracción del tren supera su velocidad máxima de diseño $v_{máx}$, el motor no ejerce fuerza de tracción.

$$F_T(t) \leq máx\{F_T\} \quad (3.4)$$

$$F_T(t) = \begin{cases} F_{T0}, & v(t) \leq v_{T0} \\ F_{T0} - k_T \frac{v-v_{T0}}{v-v_{T1}}, & v_{T0} < v(t) \leq v_{m\acute{a}x} \\ 0, & v(t) > v_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad (3.5)$$

Fuerza de tracción nominal de un tren eléctrico

Los parámetros de la función de la fuerza de tracción nominal mostrados en (3.5) dependen del diseño de cada tipo de tren. En el caso de los trenes dotados de motores síncronos la función de la fuerza de tracción nominal tiene la misma forma y sus parámetros varían según las características constructivas del tren.

3.5 Fuerza de frenado de un tren eléctrico

Como se ha visto anteriormente, el motor asíncrono puede ejercer un par de frenado cuando su velocidad de giro es ligeramente superior a la velocidad de sincronismo. En este caso, la máquina de inducción se comporta como un generador de corriente y aparece un par de fuerzas en el sentido contrario a la velocidad de giro del rotor.

Cuando un tren desciende por una pendiente con una declividad pronunciada, la fuerza gravitatoria puede adquirir un valor suficientemente grande para que la resistencia al avance experimentada por el tren sea negativa. Entonces, el movimiento del tren se acelera y la velocidad de giro del rotor aumenta. Si se llega a superar la velocidad de sincronismo, el motor asíncrono empieza a actuar de freno y retiene el vehículo tratando de impedir que alcance velocidades excesivas. Si se logra el equilibrio entre la fuerza de frenado y la (negativa) resistencia al avance, se establecerá una velocidad de circulación ligeramente superior a la velocidad de sincronismo.

De forma análoga a lo que sucedía con el par de tracción, si durante el descenso el par de frenado no fuera suficiente para compensar la (negativa) resistencia al avance del tren, el deslizamiento aumentaría indefinidamente y la velocidad de giro de rotor crecería más allá de la zona estable de funcionamiento del motor. En este caso, el convertidor estático de tracción debería ajustar la frecuencia y la tensión de excitación para lograr un par de frenado mayor. Así, disminuyendo gradualmente el valor de la frecuencia de excitación se puede ir frenando el tren hasta la velocidad circulación deseada.

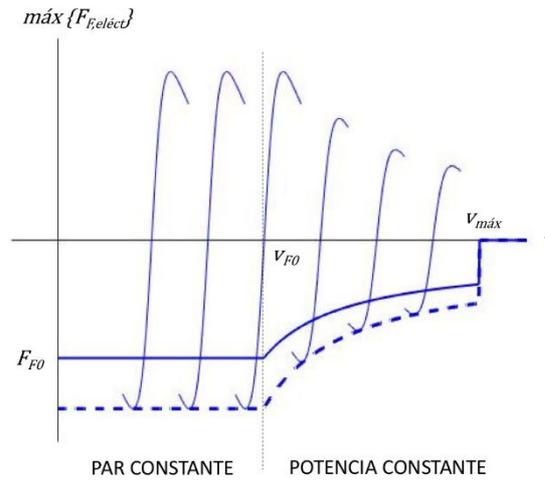


Figura 3.4. Fuerza de frenado eléctrico de un tren en función de su velocidad

En la Figura 3.4, se muestra la máxima fuerza de frenado eléctrico de un tren en función de su velocidad de circulación. En línea gruesa discontinua se ha representado la máxima fuerza de frenado eléctrica teórica, $máx \{F_{F,eléct}\}$. Sin embargo, para asegurar la estabilidad del motor asíncrono, la función de selección de la característica mecánica de frenado realizada por el convertidor estático reduce la fuerza de frenado eléctrico disponible a su valor nominal para asegurar la estabilidad del motor asíncrono. En línea gruesa continua se ha representado la fuerza de frenado eléctrico nominal, $F_{F,eléct}$.

De forma análoga al funcionamiento del motor en tracción, la expresión (3.6), aproxima la fuerza de frenado eléctrico nominal para un tren en función de su velocidad de circulación. Durante el frenado eléctrico, los motores del tren también presentan un régimen de par constante y un régimen de potencia constante.

$$F_{F,eléct} = \begin{cases} F_{F0}, & v(t) \leq v_{F0} \\ F_{F0} + k_F \frac{v-v_{F0}}{v-v_{F1}}, & v_{F0} < v(t) \leq v_{máx} \\ 0, & v(t) > v_{máx} \end{cases} \quad (3.6)$$

Fuerza de frenado eléctrico nominal de un tren eléctrico

Los parámetros de la función de la fuerza de frenado eléctrico nominal mostrados en (3.6) dependen del diseño de cada tipo de tren. En el caso de los trenes dotados de motores

síncronos la función de la fuerza de frenado eléctrico nominal tiene la misma forma y sus parámetros varían según las características constructivas del tren.

Adicionalmente, los vehículos ferroviarios de tracción eléctrica disponen también de un freno neumático para utilizar durante el servicio en caso de que la fuerza de frenado conseguida con el freno eléctrico no sea suficiente. El freno neumático es accionado a través de una circuitería neumática que finaliza en los cilindros de freno, unidos solidariamente a las zapatas de freno. Durante el frenado neumático, la fricción de las zapatas sobre los discos convierte en calor la energía de frenado.

Normalmente, la fuerza total de frenado de los trenes se controla desde un único mando que conjuga el freno eléctrico y el freno neumático. Aplicando una lógica de funcionamiento que tiene en cuenta la velocidad de circulación del tren y la fuerza total de frenado demandada en cada instante, el sistema reparte la fuerza de frenado entre el freno eléctrico y el freno neumático. Por lo general, tal y como se expresa en (3.7), estos sistemas de control priorizan el uso del freno eléctrico y sólo activan el freno neumático cuando es necesaria una fuerza de frenado mayor que la fuerza de frenado eléctrico nominal, $F_{F,eléct}$.

$$F_F(t) = \begin{cases} F_{F,eléct}(t), & F_F(t) \leq F_{F,eléct}(t) \\ \text{máx}\{F_{F,eléct}\} + F_{F,neum}(t), & F_F(t) > F_{F,eléct}(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

Fuerza de frenado de un tren eléctrico

3.6 Potencia en un tren eléctrico

Para que un tren consuma o genere potencia eléctrica en un instante determinado, es necesario que la corriente circule por su cadena de tracción. Cuando así sucede, tal y como se expresa en (3.8), el valor de la potencia eléctrica instantánea en el tren S_{tren} viene determinado por la intensidad de la corriente circulante I_{tren} y la tensión U_{tren} en su cadena de tracción.

$$S_{tren}(t) = U_{tren}(t) I_{tren}^*(t) \quad (3.8)$$

Potencia eléctrica de un tren

Dado que este estudio se centra en trenes alimentados por corriente alterna monofásica, las magnitudes eléctricas –de la expresión (3.8) y en adelante– serán representadas mediante notación fasorial. De esta forma, los módulos de los fasores I_{tren} y U_{tren} son los valores eficaces de la intensidad de corriente y la tensión en la cadena de tracción del tren, respectivamente.

Como consecuencia de las naturalezas inductivas y capacitivas de algunos de los componentes de la cadena de tracción, aparecen unos desfases temporales entre la tensión y la corriente que provocan que una parte de la potencia eléctrica no sea transformable en potencia mecánica. Esta parte recibe el nombre de potencia eléctrica reactiva Q_{tren} y se corresponde con la parte imaginaria de la potencia eléctrica compleja del tren, como se muestra en (3.9). En cambio, la potencia eléctrica activa P_{tren} guarda una relación directa con la potencia mecánica desarrollada por el tren y está representada por la parte real de la potencia eléctrica compleja.

$$S_{tren}(t) = P_{tren}(t) + j Q_{tren}(t) \quad (3.9)$$

Potencia eléctrica compleja de un tren

3.6.1 Potencia eléctrica activa

Durante la fase de tracción, la potencia eléctrica consumida por el tren es transformada en potencia mecánica mediante su cadena de tracción. Esta transformación electromecánica conlleva unas pérdidas que hacen que la potencia activa consumida por el tren P_{tren}^T sea ligeramente mayor que la potencia mecánica desarrollada. Como se muestra en (3.10), la eficiencia de esta transformación se cuantifica a través del rendimiento de la cadena de tracción del tren, η_T .

$$P_{tren}^T(t) = \frac{F_T(t) v(t)}{\eta_T} \quad (3.10)$$

Potencia activa consumida por la tracción de un tren

En la fase de frenado eléctrico, la cadena de tracción invierte su funcionamiento y genera corriente. El destino de la corriente generada pueden ser las resistencias de freno del tren, donde es convertida en calor por el efecto Joule, o la línea aérea de contacto, para que sea aprovechada por otros consumidores. En el primer caso, se habla de freno eléctrico reostático y, en el segundo, de freno eléctrico regenerativo, pues el tren actúa como un generador de potencia eléctrica.

Los límites de tensión en las líneas eléctricas encargadas de proporcionar energía al material rodante durante la operación del sistema ferroviario están establecidos en la normativa técnica [UNE-EN 50163]. Los límites $U_{mín,1}$ y $U_{máx,1}$ mostrados en la Tabla 3.1, definen el rango de valores en el que la tensión de una línea alimentada a 25 kV puede permanecer indefinidamente. Estos límites de tensión permanente sólo pueden ser sobrepasados durante un periodo de tiempo limitado a 5 minutos y siempre dentro de los límites $U_{mín,2}$ y $U_{máx,2}$, llamados límites de tensión no permanente.

Sistema	$U_{mín,2}$ (kV)	$U_{mín,1}$ (kV)	U_n (kV)	$U_{máx,1}$ (kV)	$U_{máx,2}$ (kV)
CA monofásica	17,5	19	25	27,5	29

Tabla 3.1. Tensión nominal y límite para líneas alimentadas a 25 kV, según UNE-EN 50163

La normativa técnica para la coordinación entre los sistemas de electrificación y el material rodante sólo permite la generación de potencia eléctrica por los trenes mientras la tensión en su cadena de tracción no exceda el valor de tensión máxima no permanente de la línea, $U_{máx,2}$. Si se cumple esta condición, el tren genera una potencia eléctrica que, también en este caso, constará de una componente activa y otra reactiva [UNE-EN 50388].

La potencia activa generada por el frenado eléctrico regenerativo de un tren P_{tren}^F equivale a la potencia mecánica ejercida por su freno eléctrico menos las pérdidas de potencia producidas en su cadena de tracción. Según la expresión (3.11), la eficiencia de esta transformación se cuantifica a través del rendimiento de la cadena de tracción del tren por el frenado eléctrico regenerativo, η_F .

$$P_{tren}^F(t) = \begin{cases} \frac{F_{F,eléct}(t)v(t)}{\eta_F}, & U_{tren} \leq U_{máx,2} \\ 0, & U_{tren} > U_{máx,2} \end{cases} \quad (3.11)$$

Potencia activa generada por el frenado eléctrico regenerativo de un tren

El rendimiento de la cadena de tracción de un tren puede variar ligeramente en función de los valores de la fuerza de tracción y frenado que ejerza y de la velocidad a la que circule. Sin embargo, en este estudio supondremos que la variación del rendimiento de los elementos de la cadena de tracción es despreciable. En el caso de los trenes dotados de motores asíncronos y alimentados en corriente alterna, los rendimientos típicos encontrados en la literatura para el transformador principal, el convertidor y el motor son 0,95%, 0,98% y 0,94% respectivamente. El rendimiento conjunto de la cadena de tracción de los trenes dotados de motores asíncronos y alimentados en corriente alterna se muestra en la Tabla 3.2 [DOUGLAS, 2016].

Régimen	Rendimiento
Tracción	$\eta_T = 0,858$
Frenado regenerativo	$\eta_F = 0,858$

Tabla 3.2. Rendimientos típicos de la cadena de tracción

Adicionalmente, los trenes disponen de una serie de servicios auxiliares necesarios para la seguridad de su circulación y para el confort de los viajeros. Dentro del primer grupo de servicios, llamados servicios auxiliares técnicos, se encuentran todos los equipos técnicos y los sistemas de señalización y control. Los servicios auxiliares de confort incluyen, por orden de importancia según su consumo, la climatización de los coches de viajeros, la iluminación interior del tren y el equipamiento de la cafetería.

La potencia activa total de un tren P_{tren} puede ser expresada como (3.12), ya que la potencia eléctrica consumida por sus servicios auxiliares P_{tren}^{AUX} es prácticamente constante mientras el tren está en circulación.

$$P_{tren}(t) = \begin{cases} P_{tren}^T(t) + P_{tren}^{AUX}, & \text{en tracción} \\ P_{tren}^F(t) + P_{tren}^{AUX}, & \text{en frenado} \end{cases} \quad (3.12)$$

Potencia activa total de un tren

Las especificaciones técnicas de interoperabilidad para la armonización del sistema ferroviario en la Unión Europea [UE, 2014] y la normativa técnica para la coordinación entre los sistemas de electrificación y el material rodante [UNE-EN 50388], especifican la intensidad de corriente máxima permitida a los trenes que circulan por líneas interoperables. El valor mostrado en la Tabla 3.3 es el nivel máximo de intensidad de corriente que se admite tanto en tracción como en frenado regenerativo, e incluye los servicios auxiliares. El diseño de la cadena de tracción de los trenes interoperables debe incluir un dispositivo automático para limitar la corriente máxima.

Sistema	$I_{m\acute{a}x}$ (A)
CA monofásica	1500

Tabla 3.3. Corriente máxima permitida en un tren alimentado a 25 kV

3.6.2 Potencia eléctrica reactiva

Como se ha mencionado anteriormente, solamente la componente activa de la potencia eléctrica permite su intercambio con trabajo útil. La magnitud relativa de la componente activa se mide a través del denominado factor de potencia, λ_{tren} , que es una característica propia de cada tren. El factor de potencia de los trenes juega un papel muy importante ya que cuanto más se aproxime a la unidad, mayor será el rendimiento conjunto formado por el tren y el sistema de electrificación.

La normativa para la coordinación entre los sistemas de electrificación y el material rodante establece que el factor de potencia de los trenes que circulan por líneas interoperables debe ser mayor que 0,95 cuando su potencia activa instantánea sea superior a 2 MW. En situaciones puntuales en las que la potencia activa del tren es inferior a 2 MW, se admiten peores valores instantáneos del factor de potencia, pero su valor promedio en un viaje debe ser siempre mayor que 0,85 [UNE-EN 50388].

En la práctica, tal y como se observa en la Figura 3.5, el factor de potencia de la cadena de tracción de un tren actual es prácticamente unitario en todos los regímenes de potencia y sólo toma valores más bajos cuando la potencia activa es inferior a $1/8$ de su potencia nominal [HE, 2016].

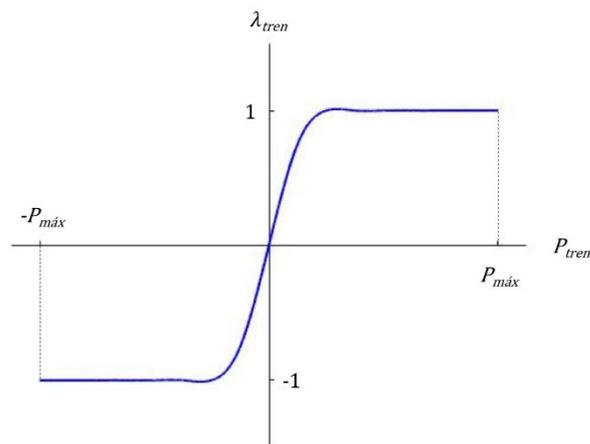


Figura 3.5. Factor de potencia de un tren en función de su potencia activa

Dado que en este estudio suponemos despreciable la distorsión armónica de la cadena de tracción de un tren, en la expresión (3.13) podemos aproximar su potencia reactiva en cada instante Q_{tren} a partir de su potencia activa P_{tren} y su factor de potencia λ_{tren} .

$$Q_{tren}(t) \approx P_{tren}(t) \sqrt{1 - \lambda_{tren}(t)^2} \quad (3.13)$$

Potencia reactiva de un tren

3.7 Energía consumida por un tren eléctrico

A través de la expresión (2.17) se ha calculado el trabajo mecánico W realizado por un tren para completar un recorrido a partir de la potencia mecánica a lo largo de su trayectoria. La conversión electromecánica que se produce en la cadena de tracción del tren se ha modelado en el presente capítulo. Mediante las expresiones (3.12) y (3.13), es posible obtener la potencia eléctrica del tren P_{tren} , que tiene en cuenta las eficiencias y los regímenes de

funcionamiento de los motores del tren. En consecuencia, la energía eléctrica neta consumida por la cadena de tracción de un tren puede ser obtenida en (3.14) recurriendo a la integración temporal de la potencia eléctrica P_{tren} a lo largo de su trayectoria.

$$E_{tren} = \int_0^T P_{tren}(t) dt \quad (3.14)$$

Energía eléctrica neta consumida por un tren

Como se ha expuesto en el presente capítulo y se ha expresado en (3.11), los motores asíncronos de los trenes eléctricos se comportan como generadores de potencia durante las fases de la trayectoria en las que aplican freno eléctrico regenerativo. Para posteriores análisis, es interesante considerar el valor de la energía eléctrica neta consumida por la cadena de tracción de un tren a lo largo de un recorrido E_{tren} como la suma de dos términos: la energía eléctrica efectivamente consumida durante las fases de tracción E_{tren}^+ y la energía eléctrica regenerada en las fases de frenado eléctrico E_{tren}^- .

$$E_{tren}^+ = \int_0^T S_{tren}(t) dt, P_{tren}(t) > 0 \quad (3.14a)$$

$$E_{tren}^- = \int_0^T S_{tren}(t) dt, P_{tren}(t) < 0 \quad (3.14b)$$

Energía eléctrica consumida (a) y regenerada (b) por un tren

3.8 Conclusiones

La mayor parte de los trenes de alta velocidad actuales están dotados de motores asíncronos y es posible evaluar su potencia eléctrica a lo largo de un recorrido a partir de su potencia mecánica. El rendimiento de la cadena de tracción y el factor de potencia, que son características propias de cada tren, permiten establecer una relación directa entre la potencia eléctrica y la potencia mecánica.

El funcionamiento como generadores de potencia de los motores asíncronos durante las fases de frenado eléctrico, hace necesario considerar la energía regenerada por los trenes eléctricos en sus trayectorias. Por tanto, cada trayectoria realizada por un tren está

caracterizada por dos valores de energía eléctrica: la energía consumida durante las fases de tracción y la energía regenerada en las fases de frenado. La energía neta consumida por el tren es la diferencia entre la energía consumida y la energía regenerada.

Las técnicas de conducción eficiente basadas exclusivamente en la potencia mecánica no proporcionan resultados válidos para los trenes con tracción eléctrica pues no consideran la energía regenerada en sus frenados. Las trayectorias óptimas, es decir, las combinaciones óptimas de las fuerzas de tracción y frenado a lo largo del recorrido resultan diferentes cuando se tiene en cuenta la energía regenerada.

3.9 Bibliografía

[DOUGLAS, 2016]. Douglas, H., Schmid, F., Roberts, C., Hillmansen, S., Evaluation of Permanent Magnet Motor Energy Saving Technology for Different Types of Railways. 2016 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), Birmingham, UK, 23-25 Aug. 2016.

[HAGIWARA, 2008]. Hagiwara, Y., Environmentally-friendly Aspects and Innovative Lightweight Traction System Technologies of the Shinkansen High-speed EMUs. IEEJ Trans 2008; 3: 176-182.

[HE, 2016]. He, Z., Zheng, Z., Hu, H., Power quality in high-speed railway systems, International Journal of Rail Transportation, 4:2, 71-97.

[KONDO, 2010]. Kondo, K., Recent Energy Saving Technologies on Railway Traction Systems. IEEJ Trans 2010; 5: 298-303.

[NICHOLSON, 2012]. Nicholson, T. J., AC and DC Traction Motors, IET Professional Development Course on Electric Traction Systems, London, 5-8 Nov. 2012, p. 53-66.

[RONANKI, 2017]. Ronanki, D., Singh, S. A., Williamson, S. S., Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems, IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 3, no. 3, pp. 724-738, Sept. 2017.

[SEN, 2013]. Sen, P. C., Principles of Electric Machines and Power Electronics, John Wiley and Sons Inc., 2013 (3 ed).

[SERRANO, 2017]. Serrano Iribarnegaray, L., Martínez Román, J. A., Máquinas Eléctricas, Universitat Politècnica de València, 2017 (4 ed.)

[STEIMEL, 2014]. Steimel, A., Electric Traction. Motive Power and Energy Supply, München, Deutscher Industrieverlag, 2014.

[UE, 2014]. Reglamento 1302/2014 de la Comisión Europea de 18 de noviembre de 2014 sobre la especificación técnica de interoperabilidad del subsistema de material rodante «locomotoras y material rodante de viajeros» del sistema ferroviario en la Unión Europea.

[UNE-EN 50163]. Aplicaciones ferroviarias. Tensiones de alimentación de las redes de tracción.

[UNE-EN 50388]. Aplicaciones ferroviarias. Alimentación eléctrica y material rodante. Criterios técnicos para la coordinación entre sistemas de alimentación (subestación) y el material rodante para alcanzar la interoperabilidad.

Capítulo 4 Consumo energético de un tren en una sección de electrificación

Lista de símbolos

R_{LAC} : Resistencia serie de la agrupación de la línea y el sustentador, en Ω .

L_{LAC} : Inductancia serie de la agrupación de la línea y el sustentador, en H.

Z_{LAC} : Impedancia serie de la agrupación de la línea y el sustentador, en $\Omega + j\Omega$.

\bar{Z}_{LAC} : Valor unitario de la impedancia serie Z_{LAC} , en $\Omega/\text{km} + j\Omega/\text{km}$.

R_C : Resistencia serie de la agrupación de los carriles y cables de retorno por tierra, en Ω .

L_C : Inductancia serie de la agrupación de los carriles y cables de retorno por tierra, en H.

Z_C : Impedancia serie de la agrupación de los carriles y cables de retorno por tierra, en $\Omega + j\Omega$.

\bar{Z}_C : Valor unitario de la impedancia serie Z_C , en $\Omega/\text{km} + j\Omega/\text{km}$.

R_{FN} : Resistencia serie del feeder negativo, en Ω .

L_{FN} : Inductancia serie del feeder negativo, en H.

Z_{FN} : Impedancia serie del feeder negativo, en $\Omega + j\Omega$.

\bar{Z}_{FN} : Valor unitario de la impedancia serie Z_{FN} , en $\Omega/\text{km} + j\Omega/\text{km}$.

δ : Parámetro del modelo físico aproximado del sistema de electrificación 2x25 kV que determina el reparto de corrientes entre los conductores de las celdas de transmisión.

ε : Parámetro del modelo físico aproximado del sistema de electrificación 2x25 kV que determina el reparto de corrientes entre los conductores de la celda ocupada por el tren.

$R_{eq,CT}$: Resistencia equivalente del circuito de tracción, en Ω .

$X_{eq,CT}$: Reactancia equivalente del circuito de tracción, en $j\Omega$.

$Z_{eq,CT}$: Impedancia equivalente del circuito de tracción, en $\Omega + j\Omega$.

$\bar{Z}_{eq,CT}$: Valor unitario de la impedancia equivalente $Z_{eq,CT}$, en $\Omega/\text{km} + j\Omega/\text{km}$.

x_{tren} : Posición de un tren, en km.

x_{SET} : Posición de una subestación eléctrica de tracción, en km.

$x_{AT,1}$: Posición del primer autotransformador de tracción, en km.

$x_{AT,2}$: Posición del segundo autotransformador de tracción, en km.

I_{tren} : Intensidad de corriente circulante por la cadena de tracción de un tren, en A.

U_{tren} : Diferencia de tensión entre los extremos de la cadena de tracción de un tren, en kV.

U_{SET} : Diferencia de tensión a la salida de una subestación eléctrica de tracción, en kV.

U_{AT} : Diferencia de tensión a la salida de un autotransformador de tracción, en kV.

P_{tren} : Potencia eléctrica activa total en un tren, en kW.

Q_{tren} : Potencia eléctrica reactiva total en un tren, en kVAR.

S_{tren} : Potencia eléctrica compleja en un tren, en kW + jkVAR.

λ_{tren} : Factor de potencia de un tren.

P_{SET} : Potencia eléctrica activa en una subestación eléctrica de tracción, en kW.

Q_{SET} : Potencia eléctrica reactiva en una subestación eléctrica de tracción, en kVAR.

S_{SET} : Potencia eléctrica compleja en una subestación eléctrica de tracción, en kW + jkVAR.

P_{CT} : Potencia eléctrica activa consumida por un circuito de tracción, en kW.

Q_{CT} : Potencia eléctrica reactiva consumida por un circuito de tracción, en kVAR.

S_{CT} : Potencia eléctrica compleja consumida por un circuito de tracción, en kW + jkVAR.

E_{tren} : Energía neta consumida por la cadena de tracción de un tren, en kWh + jkVARh.

E_{SET} : Energía neta suministrada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVARh.

E^+_{SET} : Energía suministrada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVARh.

E^-_{SET} : Energía recuperada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVARh.

E_{CT} : Pérdida de energía en un circuito de tracción, en kWh + jkVARh.

4.1 Introducción

La potencia eléctrica manejada por la cadena de tracción de un tren es intercambiada con las subestaciones eléctricas de tracción a través de la infraestructura de electrificación ferroviaria. Durante las transferencias de potencia entre la subestación eléctrica de tracción y el tren siempre se produce una pérdida de potencia debida a los consumos de los elementos que forman la infraestructura de electrificación.

Dado que las pérdidas originadas en la infraestructura de electrificación son inherentes al sistema eléctrico ferroviario, estas no deben ser ignoradas. En consecuencia, la medida completa del consumo energético individual de un tren eléctrico ha de ser realizada desde la subestación de tracción.

En este capítulo se describe el funcionamiento de los dos sistemas de electrificación más comúnmente utilizados en las redes ferroviarias de alta velocidad, el sistema 1x25 kV y el sistema 2x25 kV. A continuación, se obtienen los circuitos de tracción y las impedancias equivalentes correspondientes a un tren alimentado en ambos sistemas.

Finalmente, a través de la impedancia equivalente del circuito de tracción, se halla la expresión que permite evaluar la potencia consumida por la infraestructura de electrificación y se calcula la potencia total en la subestación eléctrica de tracción.

4.2 Electrificación en corriente alterna

La preponderancia del motor de corriente continua en los comienzos del siglo XX hizo que la mayor parte de las líneas ferroviarias electrificadas lo fueran inicialmente con este tipo de corriente. De esta manera, se lograba aligerar el equipamiento de los trenes al suministrarles la corriente en la forma adecuada para su utilización. La elección de las tensiones de 600 V, 750 V, 1,5 kV y 3 kV en las electrificaciones iniciales a corriente continua está vinculada con la tecnología de tracción disponible en el momento y su modo de control: el motor de corriente continua de excitación en serie, controlado mediante resistencias variables, cuya fuerza de tracción resultante se adaptaba bien a las necesidades de la circulación ferroviaria. Sin embargo, la transmisión de potencia hasta los trenes a tensiones tan reducidas exigía infraestructuras de electrificación costosas a fin de mitigar las elevadas pérdidas óhmicas que se producían.

Al mismo tiempo, las grandes redes ferroviarias europeas desarrollaron el sistema de electrificación a 15 kV en corriente alterna monofásica a $16 \frac{2}{3}$ Hz. Aunque esta tensión debía ser reducida posteriormente a bordo utilizando transformadores embarcados, los motores de excitación en serie de los trenes podían ser alimentados directamente a esta baja frecuencia, minimizando los problemas de conmutación. Este sistema, aplicado principalmente en los países germánicos, obligó a las administraciones ferroviarias a crear y a operar sus propias redes eléctricas a una frecuencia diferente de la frecuencia industrial.

A partir de los años 50, la evolución de la técnica, especialmente en los equipos de alta tensión y en los convertidores embarcados en los trenes, permitió la puesta a punto de la alimentación directa a los trenes en corriente alterna y a frecuencia industrial. A fin de reducir las pérdidas de potencia en la transmisión hasta el tren, se desarrolló la electrificación a 25 kV en corriente alterna monofásica. Este tipo de electrificación está ampliamente extendida actualmente en las redes ferroviarias de todo el mundo.

Con el estado de la técnica actual, la comparación entre ambos tipos de electrificación resulta claramente favorable a la corriente alterna monofásica gracias a los importantes ahorros que permite en términos de costes de inversión, operación y mantenimiento. Sin embargo, por el momento, se conservan las redes de corriente continua existentes ya que una gran parte del material rodante en operación se alimenta a través de este tipo de electrificación. Esta dualidad en la electrificación de las redes ferroviarias obliga a la fabricación de trenes bicorriente que permitan la permeabilidad entre ambos tipos de electrificación.

En la Tabla 4.1, se muestran las máximas intensidades de corriente en el pantógrafo de varios vehículos ferroviarios bicorriente en función de la red por la que circulen [CHAPAS, 2004]. Por un lado, en todas las redes se observa que la intensidad de corriente es mayor para los vehículos más potentes. Por otro lado, se aprecia claramente que la intensidad de corriente de cada vehículo se reduce cuando aumenta la tensión de alimentación de la red. En consecuencia, la elevación de la tensión de la alimentación de las redes ferroviarias es un factor especialmente importante para reducir las intensidades de corriente en los trenes más potentes.

En definitiva, debido a las altas potencias requeridas, todas las líneas ferroviarias de alta velocidad están electrificadas a 25 kV en corriente alterna monofásica a 50 Hz. En algunos países donde la frecuencia de las redes eléctricas es 60 Hz, existen líneas ferroviarias electrificadas a 25 kV en corriente alterna monofásica a 60 Hz (Japón, Corea del Sur, Taiwan, Canadá y EE.UU.) [SERRANO-JIMÉNEZ, 2017].

	1,5 kV Continua	3 kV Continua	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz
Locomotora 7 MW	4660 A	2330 A	460 A	280 A
Motriz TGV 5,4 MW	3300 A	1660 A	330 A	200 A
Automotor 2,2 MW	1460 A	735 A	145 A	88 A

Tabla 4.1. Máximas intensidades de corriente en el pantógrafo

4.3 Sistema de electrificación 1x25 kV

La aplicación más simple de la electrificación a 25 kV en corriente alterna monofásica a frecuencia industrial es el llamado sistema 1x25 kV. En la implementación más sencilla de este sistema, cada subestación eléctrica de tracción aloja un transformador monofásico cuyo primario se conectan a dos de las fases de la red de transporte del sistema de suministro eléctrico. Esto implica disponer de una línea de alimentación a lo largo del trazado ferroviario con tensiones de 110 kV o superiores y una potencia de cortocircuito suficientemente elevada en los puntos de conexión.

Con objeto de minimizar las elevadas tensiones de desequilibrio que se puedan producir entre las tres fases de la red de transporte del sistema de suministro eléctrico, los primarios del transformador de cada subestación se alimentan mediante rotación cíclica de fases. Como se muestra en la Figura 4.1, esta conexión va variando entre las subestaciones adyacentes siguiendo una secuencia de rotación de orden 3 con la que se consigue que el desfase de la tensión entre secciones consecutivas sea 120°.

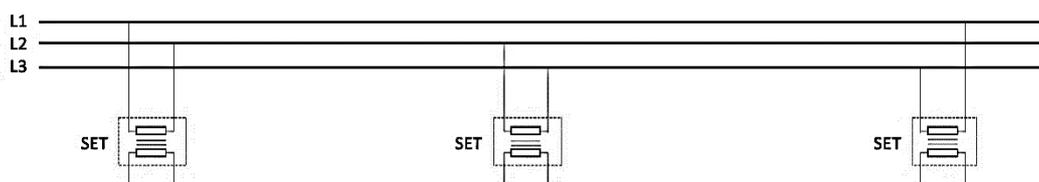


Figura 4.1. Secuencia de rotación de conexión a las fases de la red de transporte

Los dos extremos del secundario del transformador de tracción se conectan a la línea aérea de contacto y a los carriles, respectivamente. La relación de transformación en el transformador de tracción es tal que se establece una diferencia de tensión de 25 kV entre la línea aérea de contacto y los carriles.

La línea aérea de contacto, aunque mantiene su continuidad mecánica, está dividida en secciones eléctricamente aisladas mediante zonas neutras intermedias. Cada sección de la línea aérea de contacto está unida al extremo del secundario de un único transformador de tracción y las zonas neutras impiden el flujo de corriente entre los transformadores de distintas secciones. Como se puede apreciar en la Figura 4.2, las subestaciones de tracción en el sistema 1x25 kV suelen estar ubicadas en el centro de cada sección de electrificación.

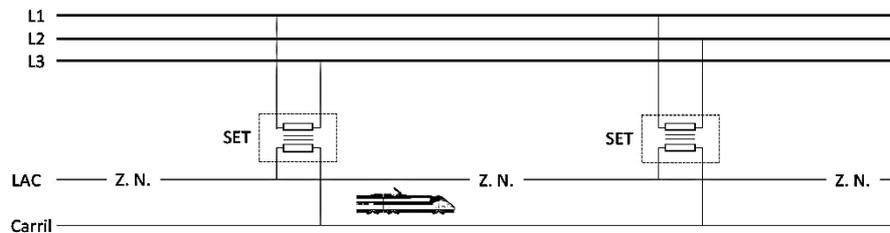


Figura 4.2. Sistema de electrificación 1x25 kV

4.3.1 Modelo de trabajo del sistema 1x25 kV

4.3.1.1 Suministro eléctrico y transformador de tracción

Cada subestación eléctrica de tracción aloja un transformador de tracción cuyo secundario alimenta una sección de electrificación. Aunque los primarios de los transformadores están conectados a la misma red de transporte del sistema de suministro eléctrico, se asume que esta red es suficientemente robusta y, por tanto, los sectores son independientes a los efectos de la determinación de tensiones, corrientes y potencias [PILO, 2003].

En el estudio de cada sección de electrificación, representamos la parte correspondiente a la subestación eléctrica de tracción y el suministro aguas arriba mediante un circuito que contiene el equivalente de Thevenin de la red de transporte del sistema de suministro eléctrico y el circuito equivalente de los arrollamientos del transformador. En este modelo, vamos a suponer despreciables la impedancia equivalente de la red de transporte, pues su valor es muy pequeño si la red es robusta, y la impedancia de circuito abierto del

transformador, que toma valores muy elevados comparados con sus impedancias de cortocircuito. En consecuencia, el circuito equivalente, mostrado en la Figura 4.3, está formado por una fuente de tensión ideal y la impedancia de cortocircuito del transformador.

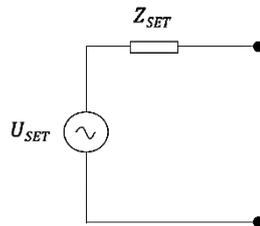


Figura 4.3. Suministro eléctrico y transformador en el sistema de electrificación 1x25 kV

4.3.1.2 Circuito de tracción

Cuando un tren circula ejerciendo una fuerza de tracción, capta corriente de la línea aérea de contacto mediante su pantógrafo y la devuelve al carril a través de sus ruedas. La cadena de tracción del tren aprovecha este paso de corriente para consumir potencia eléctrica y convertirla en potencia mecánica. En caso de que el tren aplique freno eléctrico regenerativo, se invierte el sentido de la corriente en su cadena de tracción, que fluirá desde el carril hasta la línea aérea de contacto. Entonces, la cadena de tracción genera potencia eléctrica a partir de la potencia mecánica resultante del frenado del tren.

Tanto durante la tracción como en el frenado eléctrico regenerativo, se establece un flujo de corriente I_{tren} entre la subestación y el tren a través de la línea aérea de contacto y el circuito de retorno. Estas dos partes forman el circuito de tracción en el sistema 1x25 kV, que se muestra en la Figura 4.4.

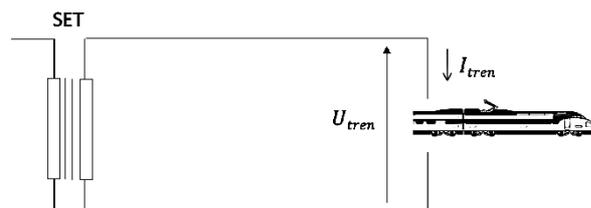


Figura 4.4. Circuito de tracción en el sistema de electrificación 1x25 kV

El circuito de retorno es la parte del circuito de tracción destinada a conducir la corriente entre las ruedas del tren y la subestación durante la tracción, y viceversa durante el frenado eléctrico regenerativo. Los carriles de rodadura son los que fundamentalmente sirven de conductores para la corriente de retorno.

Si se tiene en cuenta que la impedancia entre los carriles y la tierra es finita y que los carriles tienen una impedancia longitudinal, se comprende que una parte de la corriente de retorno circule por el terreno hasta la subestación. Estas corrientes reciben el nombre de corrientes vagabundas y sumadas a la corriente de retorno que circula por los carriles deben ser equivalentes a la corriente captada por el tren de la línea aérea de contacto.

Habitualmente, cuando la vía está soldada, la sección equivalente de cobre que aportan los carriles es suficiente para soportar las máximas intensidades de corriente esperadas. Sin embargo, para evitar la aparición de tensiones peligrosas entre el terreno y los carriles, a distancias regulares se instalan puestas a tierra de tracción, que conectan los carriles a tierra, y en determinadas ocasiones es necesario complementar el circuito de retorno con conductores de adicionales paralelos a la vía.

4.3.1.2.1 Impedancias de los conductores del circuito de tracción

Dado que la longitud típica de los sectores en el sistema 1x25 kV no supera los 30 kilómetros, es posible representar el circuito de tracción mediante un circuito equivalente de parámetros concentrados en el que se eliminan las magnitudes transversales. En consecuencia, el circuito equivalente resultante consiste en una impedancia en serie por cada conductor, tal y como se muestra en la Figura 4.5.

El paso de la corriente alterna por cada uno de los conductores del sistema de electrificación impone que para calcular su impedancia serie sea necesario considerar la resistencia y la inductancia. Antes de realizar este cálculo, se puede aplicar la hipótesis simplificativa que agrupa todos aquellos conductores que trabajan a la misma tensión nominal. Entonces, es posible sustituir cada uno de estos grupos de conductores por un único conductor, que tendrá la misma tensión y cuya corriente será la suma de las corrientes de los conductores a los que sustituye. Esos conductores reciben el nombre de conductores equivalentes, y su uso simplifica notablemente el estudio del sistema. En el caso del sistema 1x25 kV, el circuito de tracción queda reducido a dos conductores:

- LAC: conductor equivalente a la asociación de la línea aérea de contacto, el sustentador, las péndolas y el feeder de acompañamiento, si lo hubiera.
- Carril: conductor equivalente que resulta de la agrupación de los dos carriles de la vía, el terreno y los conductores de retorno adicionales, si los hubiera.

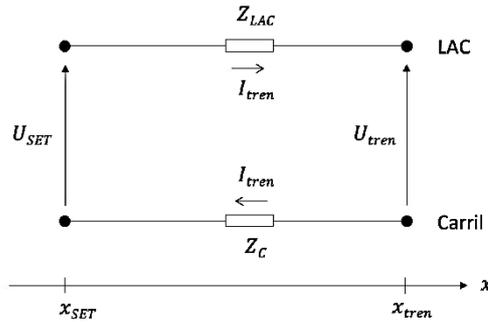


Figura 4.5. Impedancias del circuito de tracción del sistema 1x25 kV

Las resistencias de los dos conductores resultantes en el circuito equivalente son calculadas en (4.1) y (4.2) a partir de sus secciones transversales, s_{LAC} y s_C , y las resistividades de los materiales de los que estén compuestos, ρ_{LAC} y ρ_C .

$$R_{LAC} = \frac{\rho_{LAC}}{s_{LAC}} |x_{tren} - x_{SET}| \quad (4.1)$$

$$R_C = \frac{\rho_C}{s_C} |x_{tren} - x_{SET}| \quad (4.2)$$

Resistencias del circuito de tracción del sistema 1x25 kV

En cambio, la inductancia de cada conductor viene determinada por la suma de su autoinductancia y las inductancias debidas al acoplamiento magnético con el resto de conductores. Por lo tanto, para realizar el cálculo de las inductancias de los dos conductores resultantes en el circuito equivalente se recurre a las expresiones (4.3) y (4.4), donde se aplica el procedimiento de la integral de campo considerando sus radios equivalentes, r_{LAC} y r_C , y su distancia mutua, d_{LAC-C} , y asumiendo que la corriente de ida es igual a la corriente de vuelta en cada instante.

$$L_{LAC} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{LAC-C}}{r_{LAC}}\right) |x_{tren} - x_{SET}| \quad (4.3)$$

$$L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{d_{LAC-C}}{r_C}\right) |x_{tren} - x_{SET}| \quad (4.4)$$

Inductancias del circuito de tracción del sistema 1x25 kV

Conocidos los valores de la inductancia y de la resistencia de ambos conductores, las impedancias del circuito de tracción para la frecuencia de trabajo quedan determinadas en (4.5) y (4.6).

$$Z_{LAC} = R_{LAC} + j100\pi L_{LAC} \quad (4.5)$$

$$Z_C = R_C + j100\pi L_C \quad (4.6)$$

Impedancias del circuito de tracción del sistema 1x25 kV

Se debe precisar que el reparto de las corrientes circulantes por cada conductor no es constante en el tiempo, sino que varía a medida que se mueven todos los trenes presentes en una misma sección. En consecuencia, para conocer los valores exactos de las inductancias de los conductores sería necesario recalcularlos en cada instante. Sin embargo, en este estudio supondremos que esta variación de los valores de las inductancias es despreciable y utilizaremos los valores típicos que se manejan en la literatura. En la Tabla 4.2 se muestran las impedancias unitarias de los conductores de un sistema 1x25 kV típico considerando la existencia de corrientes vagabundas a través de un terreno cuya resistividad es 100 Ωm [CARMONA, 2013].

	Tipo de material	Resistencia (Ω/m)	Reactancia ($j\Omega/\text{m}$)
LAC	Cu 95 + Cu-Ag 150	$\bar{R}_{LAC} = 1,043 \times 10^{-4}$	$\bar{X}_{LAC} = 3,721 \times 10^{-4}$
Carril	Acero 60 kg/m	$\bar{R}_C = 1,262 \times 10^{-4}$	$\bar{X}_C = 3,664 \times 10^{-4}$
Cable de tierra	Al LA-110	$3,037 \times 10^{-4}$	$9,910 \times 10^{-4}$

Tabla 4.2. Impedancias unitarias en el sistema 1x25 kV en vía única

4.3.1.2.2 Impedancia equivalente del circuito de tracción

La caída de tensión entre la subestación y el tren puede ser expresada en función de una impedancia equivalente del circuito de tracción. Como se observa en (4.7), el valor de la impedancia equivalente del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$ es proporcional a la distancia entre la posición del tren $x_{tren}(t)$ y la de la subestación x_{SET} .

$$Z_{eq,CT}(t) = (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}| \quad (4.7)$$

$$R_{eq,CT}(t) = (\bar{R}_{LAC} + \bar{R}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}| \quad (4.8)$$

$$X_{eq,CT}(t) = (\bar{X}_{LAC} + \bar{X}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}| \quad (4.9)$$

Impedancia equivalente del circuito de tracción del tren en el sistema 1x25 kV

En las expresiones (4.8) y (4.9) se observa que el alejamiento del tren de la subestación eléctrica de tracción incrementa las componentes resistiva $R_{eq,CT}(t)$ y reactiva $X_{eq,CT}(t)$ de la impedancia equivalente del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$.

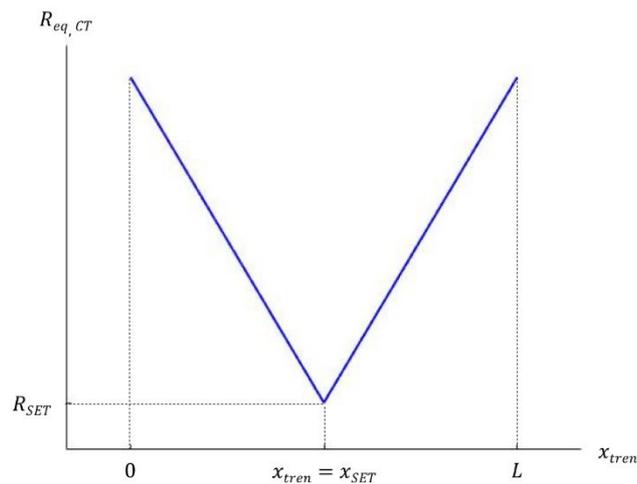


Figura 4.6. Componente resistiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción

Como se puede apreciar en la Figura 4.6, el valor de la componente resistiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción $R_{eq,CT}(t)$ a lo largo de una sección de electrificación varía proporcionalmente a la distancia entre la subestación y el tren. En los extremos de la sección el valor de $R_{eq,CT}(t)$ y en el punto central, donde se ubica la subestación de tracción, su valor es mínimo.

4.3.2 Potencia en una sección de electrificación 1x25 kV

4.3.2.1 Potencia en la subestación de tracción

En este estudio consideramos que la tensión aplicada por la subestación eléctrica de tracción U_{SET} es constante en el tiempo, ya que suponemos que se comporta como una fuente de tensión de potencia infinita.

Por otro lado, como se puede observar en la Figura 4.7, la cadena de tracción del tren se representa mediante una fuente de corriente cuya intensidad $I_{tren}(t)$ será deducida a partir de la potencia eléctrica del tren $S_{tren}(t)$ en cada instante [MONGKOLDEE, 2018].

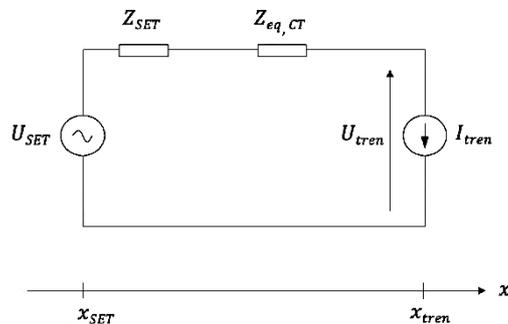


Figura 4.7. Modelo de trabajo completo del sistema 1x25 kV

Entonces, la tensión en la cadena de tracción del tren $U_{tren}(t)$ puede ser calculada aplicando la expresión (4.10) a partir de la corriente circulante a lo largo del circuito de tracción $I_{tren}(t)$, de las impedancias de los conductores, Z_{LAC} y Z_C , y de la impedancia de la subestación, Z_{SET} .

$$U_{tren}(t) = U_{SET} - \{Z_{SET} + (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}|\} I_{tren}(t) \quad (4.10)$$

Tensión en la cadena de tracción del tren, en el sistema 1x25 kV

El circuito de tracción es el medio a través del cual se transfiere la potencia eléctrica entre la subestación y la cadena de tracción del tren, y viceversa. Sin embargo, como se observa en la expresión (4.11), la potencia en la subestación S_{SET} difiere de la potencia en el tren $S_{tren}(t)$ ya que la impedancia del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$ provoca pérdidas durante la transferencia de potencia entre ambas. En consecuencia, durante la fase de tracción, la subestación debe proporcionar la potencia eléctrica demandada por la cadena de tracción del tren más la potencia perdida en el circuito de tracción. Y, a la inversa, cuando el tren realiza un frenado eléctrico regenerativo, la subestación recibe la potencia eléctrica generada por el tren menos las pérdidas debidas al circuito de tracción.

$$S_{SET}(t) = S_{tren}(t) + \{Z_{SET} + (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}|\} |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.11)$$

$$P_{SET}(t) = P_{tren}(t) + \{R_{SET} + (\bar{R}_{LAC} + \bar{R}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}|\} |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.12)$$

$$Q_{SET}(t) = Q_{tren}(t) + \{X_{SET} + (\bar{X}_{LAC} + \bar{X}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}|\} |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.13)$$

Potencia en una subestación eléctrica de tracción del sistema 1x25 kV

4.3.2.1.1 Sección en plena vía

Habitualmente, un tren circula en plena vía con su cadena de tracción funcionando en régimen de potencia constante para compensar la resistencia al avance y mantener una velocidad de crucero estable. Para que el tren pueda desarrollar su trayectoria a lo largo de una sección de electrificación, la subestación de tracción debe proporcionar la potencia que demanda su cadena de tracción más la potencia consumida por su circuito de tracción. En la parte superior de la Figura 4.8, se muestra la trayectoria de un tren circulando a velocidad de crucero por una sección de electrificación de longitud L . En la parte inferior, se puede apreciar que, a pesar de que la potencia activa en la cadena de tracción del tren $P_{tren}(t)$ es constante, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ presenta una variación debida a las pérdidas en el sistema de electrificación. En el instante t_{SET} , el tren se encuentra situado frente a la subestación haciendo que la resistencia del circuito de tracción $R_{eq,CT}(t_{SET})$

sea mínima y, en consecuencia, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t_{SET})$ también sea mínima.

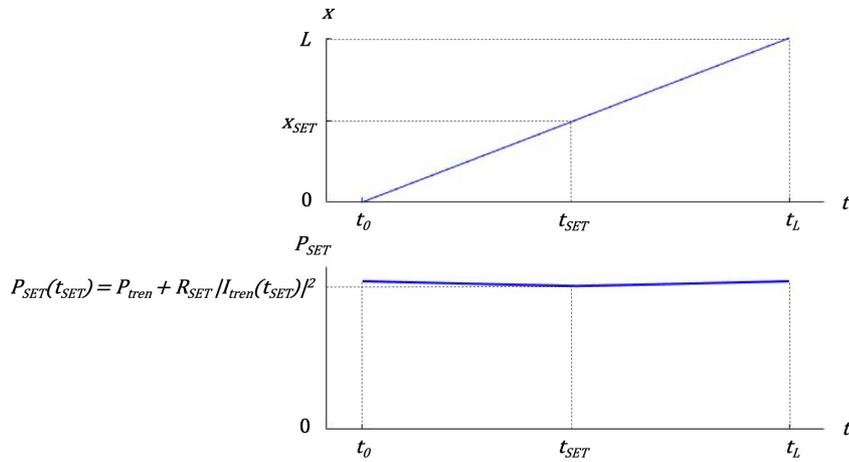


Figura 4.8. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV en plena vía

4.3.2.1.2 Sección con una estación

Para que un tren desarrolle su trayectoria por una sección de electrificación en la que hay una estación con parada, además de la fase de velocidad de crucero, debe realizar las fases de frenado y tracción. En la llegada a la estación, el tren debe aplicar el esfuerzo de frenado desde la velocidad de crucero hasta su completa detección. En la salida de la estación, el tren debe aplicar el esfuerzo de tracción hasta alcanzar la velocidad de crucero. Según se ha visto en el Capítulo 3, las características de tracción y frenado de un vehículo ferroviario dependen de su velocidad de circulación. Por este motivo, la potencia manejada por la cadena de tracción del tren será variable durante las fases de frenado y tracción.

En la Figura 4.9 se representa la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ durante el recorrido de un tren por una sección de electrificación con una parada situada en su punto medio. La trayectoria del tren dentro de la sección se inicia en el instante t_0 con una fase de crucero en la que su potencia activa $P_{tren}(t)$ es constante. A continuación, la fase de frenado se extiende desde el instante t_{F1} hasta el instante t_{F3} . Durante la fase de frenado la potencia activa del tren $P_{tren}(t)$ es negativa puesto que fluye hacia la subestación. El frenado del tren se desarrolla en dos regímenes. Inicialmente, mientras el tren circula por encima de la velocidad base de sus motores de tracción, el frenado se realiza a potencia constante. En el instante

t_{F2} , la velocidad del tren pasa a ser menor que la velocidad base de su motor y comienza el frenado en régimen de par constante durante el cual la magnitud de la potencia activa de frenado $P_{tren}(t)$ se va reduciendo. Entre los instantes t_{F3} y t_{T1} , el tren permanece parado en la estación. La fase de tracción para la salida de la estación se desarrolla también en dos regímenes. El arranque se realiza con los motores funcionando en régimen de par constante hasta que el tren alcanza su velocidad base, en el instante t_{T2} . Una vez superado este instante y hasta t_{T3} la tracción se realiza a potencia constante. Finalmente, el tren continúa en velocidad de crucero a potencia constante hasta que sale de la sección en el instante t_L .

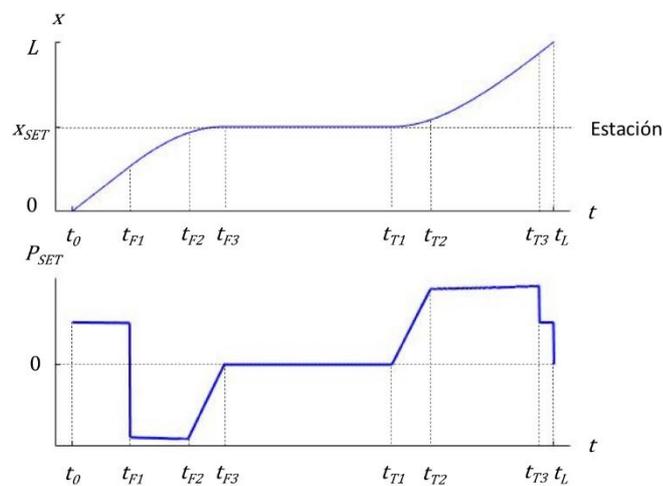


Figura 4.9. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV con estación

4.3.2.2 Potencia consumida por el circuito de tracción

La diferencia de las potencias en la subestación $S_{SET}(t)$ y en el tren $S_{tren}(t)$ es la pérdida de potencia debida a la impedancia del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$. La potencia consumida por el circuito de tracción de un tren $S_{CT}(t)$ alimentado a través de un sistema de electrificación 1x25 kV puede ser deducida a partir de (4.11). En la expresión (4.14) obtenida se observa que esta pérdida de potencia depende de la intensidad de corriente en la cadena de tracción del tren $I_{tren}(t)$ y de la distancia entre su posición $x_{tren}(t)$ y la de la subestación de tracción x_{SET} .

$$S_{CT}(t) = (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}| |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.14)$$

Potencia consumida por el circuito de tracción en el sistema 1x25 kV

La potencia consumida por el circuito de tracción $S_{CT}(t)$ tiene una doble dependencia de la distancia entre el tren y la subestación:

- La distancia aumenta la impedancia del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$, tal y como se aprecia en (4.7).
- La distancia reduce la tensión en la cadena de tracción del tren $U_{tren}(t)$ y obliga a elevar la intensidad de corriente por el circuito de tracción $I_{tren}(t)$ si se desea mantener constante la potencia en el tren $S_{tren}(t)$, como se indica en (3.8).

4.3.2.2.1 Sección en plena vía

La potencia activa manejada por la cadena de tracción de un tren $P_{tren}(t)$ que recorre una sección de electrificación a velocidad de crucero es constante. Sin embargo, como se puede ver en la parte inferior de la Figura 4.10, la potencia activa perdida en el circuito de tracción $P_{CT}(t)$ varía según la posición del tren dentro de la sección.

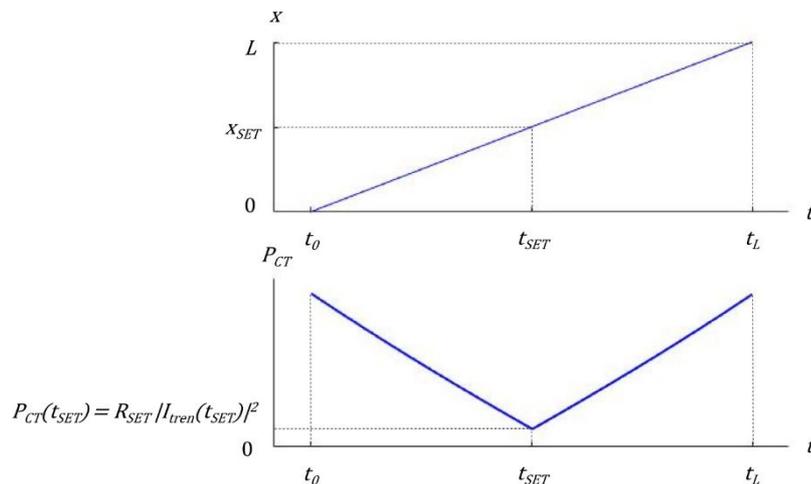


Figura 4.10. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV en plena vía

Cuando el tren circula cerca de los extremos de la sección, la potencia activa perdida $P_{CT}(t)$ es mayor. Esto es debido a que la resistencia del circuito de tracción $R_{eq,CT}(t)$ es mayor en estas posiciones, como se ha mostrado en la Figura 4.6. Por la misma razón, la potencia activa perdida $P_{CT}(t)$ es mínima en el instante t_{SET} , es decir, cuando el tren se halla frente a la subestación.

4.3.2.2.2 Sección con una estación

La pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ en el sistema de electrificación sigue las mismas fases que la potencia activa en el tren $P_{tren}(t)$, que han sido mostradas en la Figura 4.9. El tren circula a velocidad de crucero desde su ingreso en la sección de electrificación, en el instante t_0 , hasta el comienzo de su frenado de aproximación a la estación, en el instante t_{F1} . El frenado se desarrolla a potencia constante hasta el instante t_{F2} , y a par constante hasta el instante t_{F3} . La salida del tren de la estación se inicia en el instante t_{T1} . La fase de tracción se desarrolla a par constante hasta el instante t_{T2} y a potencia constante hasta el instante t_{T3} . Finalmente, el tren circula a velocidad de crucero hasta su salida de la sección en el instante t_L .

Sin embargo, en la parte inferior de la Figura 4.11 se observa que la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ difiere de la potencia activa del tren $P_{tren}(t)$ pues depende de la impedancia del sistema de electrificación $Z_{eq,CT}(t)$. En las fases de crucero se aprecia la evolución creciente o decreciente de la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ según el tren se aleje o se acerque a la subestación, respectivamente. Durante las fases de frenado y de tracción, la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ observada es mayor que en las fases de crucero, ya que la potencia activa manejada por la cadena de tracción del tren $P_{tren}(t)$ también es mayor. Adicionalmente, la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ aumenta en los puntos más alejados del centro de la sección, es decir, de la ubicación de la subestación x_{SET} . Sin embargo, al final de la fase de tracción, en los instantes previos a t_{T3} , se observa que la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ alcanza valores superiores a los del inicio de la fase de frenado, en el instante t_{F1} . Esto es debido a la mayor duración de la fase de tracción, cuyo punto final se encuentra más alejado de la subestación que el punto inicial de la fase de frenado. En consecuencia, la impedancia del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$ en el instante t_{T3} es mayor que en el instante t_{F1} .

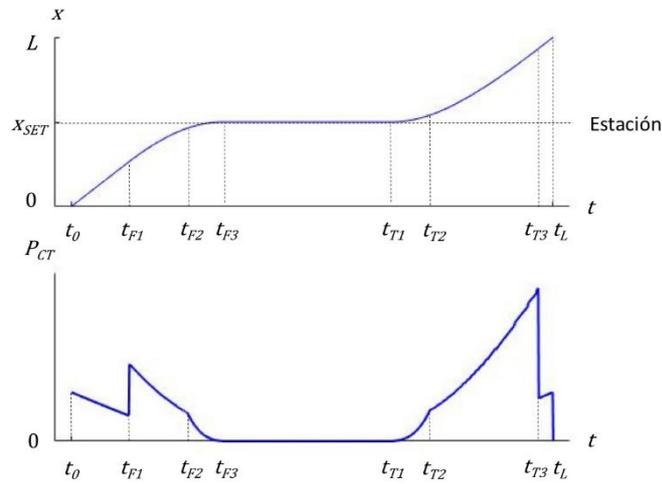


Figura 4.11. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV con estación

4.3.3 Balance energético en una sección de electrificación 1x25 kV

Para obtener una aproximación completa al valor del consumo energético individual de un tren eléctrico que recorre una sección de electrificación, se debe calcular la energía eléctrica total suministrada por la subestación eléctrica de tracción E_{SET} . De esta manera, como se expresa en (4.15), el balance energético incluye el trabajo mecánico realizado por el tren, la conversión electromecánica producida en su cadena de tracción y la pérdida de energía en el circuito de tracción E_{CT} .

$$E_{SET} = E_{tren} + E_{CT} \quad (4.15)$$

Energía neta suministrada por la subestación

4.3.3.1 Energía suministrada por la subestación

Sin embargo, se debe considerar que la variable E_{tren} contenida en la expresión (4.15) es la energía neta consumida por la cadena de tracción del tren, previamente hallada en (3.14). De forma análoga a lo propuesto para E_{tren} en las expresiones (3.14a) y (3.14b), para poder distinguir los dos modos de funcionamiento de la subestación –suministro y recuperación–, es conveniente expresar la energía neta suministrada por la estación E_{SET} como la suma de dos términos: la energía eléctrica efectivamente suministrada durante las fases de tracción del tren E_{SET}^+ y la energía eléctrica recuperada en las fases de frenado eléctrico del tren E_{SET}^- .

$$E_{SET}^+ = \int_0^T [S_{tren}(t) + S_{CT}(t)] dt, P_{SET}(t) > 0 \quad (4.15a)$$

$$E_{SET}^- = \int_0^T [S_{tren}(t) + S_{CT}(t)] dt, P_{SET}(t) < 0 \quad (4.15b)$$

Energía eléctrica suministrada (a) y recuperada (b) por la subestación

4.3.3.1.1 Sección en plena vía

Como se ha visto en la expresión (4.15), el valor de la energía eléctrica neta suministrada por una estación E_{SET} para que un tren recorra una sección de electrificación en plena vía es la suma de la energía neta consumida por su cadena de tracción E_{tren} y de la pérdida de energía en su circuito de tracción E_{CT} . Ambos sumandos se obtienen de la integración temporal de la potencia eléctrica en la cadena de tracción del tren $S_{tren}(t)$ y de la potencia consumida por el circuito de tracción $S_{CT}(t)$, respectivamente.

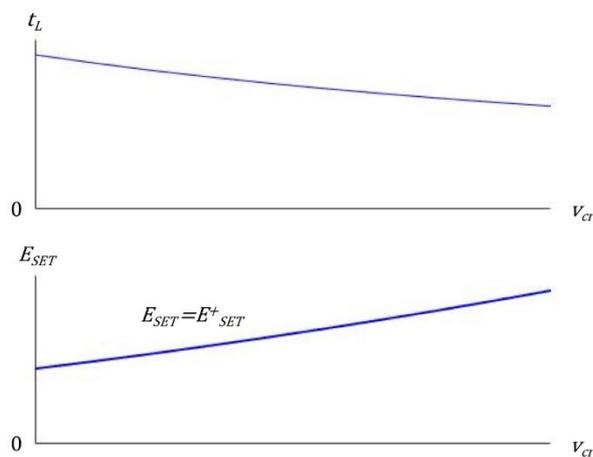


Figura 4.12. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV en plena vía

En parte superior de la Figura 4.12, se ha representado el tiempo que tarda el tren en recorrer la sección t_L para distintos valores de su velocidad de crucero v_{cr} . Como cabe esperar, cuanto mayor es la velocidad de crucero, menor es el tiempo que el tren permanece dentro de la sección. En la parte inferior de la Figura 4.12, se muestran los valores de la energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} para que el tren recorra la sección a distintas

velocidades de crucero v_{cr} . Como se puede observar, el aumento de la velocidad de crucero implica un mayor valor de la energía que debe suministrar la subestación para el recorrido del tren, aunque su duración t_L sea menor.

Dado que el tren recorre la sección en plena vía a velocidad de crucero sin frenar, la subestación no recupera energía en ningún intervalo de tiempo. En consecuencia, la energía activa neta suministrada por la estación E_{SET} coincide con la energía activa efectivamente suministrada por la subestación E^+_{SET} .

4.3.3.1.2 Sección con una estación

Como sucede en el recorrido de una sección en plena vía, en la parte superior de la Figura 4.13, se observa que el aumento de la velocidad del tren en la fase de crucero v_{cr} reduce el tiempo t_L de recorrido de una sección con estación. A diferencia del primer caso, el recorrido del tren consta de una fase de crucero en su ingreso en la sección, de una fase de frenado en su aproximación a la estación, de una fase de tracción a la salida de la estación y de una fase de crucero previa a su salida de la sección.

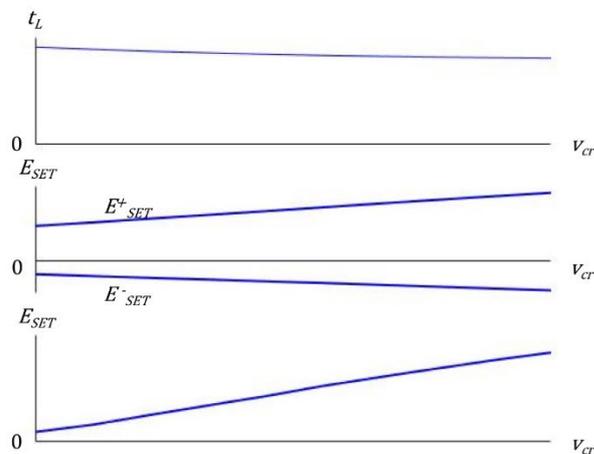


Figura 4.13. Energía activa suministrada y recuperada en una sección 1x25 kV con estación

En la parte central de la Figura 4.13, se muestra la energía activa suministrada por la subestación E^+_{SET} durante las fases de crucero y de tracción, y la energía activa recuperada por la subestación E^-_{SET} en la fase de frenado del tren. Como se puede observar, los valores absolutos de ambas energías crecen con la velocidad del tren en la fase de crucero. Cuanto mayor es la velocidad en la fase de crucero, mayor es el valor absoluto de la potencia activa

manejada por la cadena de tracción del tren $P_{tren}(t)$ durante todo el recorrido –en las fases de crucero, frenado y tracción–. Este efecto prevalece sobre la reducción de la duración del recorrido t_L , aumentando el valor absoluto de la energía activa suministrada E^+_{SET} y de la recuperada E^-_{SET} cuando el tren circula a mayor velocidad.

La energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} –resultante de la suma de la energía activa efectivamente suministrada E^+_{SET} y recuperada E^-_{SET} – es siempre positiva, pues el desplazamiento del tren a lo largo de la sección tiene un consumo energético. Como se puede observar en la parte inferior de la Figura 4.13, la energía neta suministrada por la subestación aumenta con la velocidad del tren.

4.3.3.2 Energía perdida en el circuito de tracción

Como consecuencia de la potencia consumida por el circuito de tracción $S_{CT}(t)$ durante el desplazamiento de un tren por una sección de electrificación, una parte de la energía suministrada y recuperada por la subestación se convierte en energía perdida en el circuito de tracción E_{CT} . La expresión (4.16) particulariza el valor de la energía perdida E_{CT} en el circuito de tracción durante el tiempo t_L invertido por un tren para recorrer una sección electrificada mediante el sistema 1x25 kV.

$$E_{CT} = \frac{1}{3600} \int_0^{t_L} \{Z_{SET} + (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) |x_{tren}(t) - x_{SET}|\} |I_{tren}(t)|^2 dt \quad (4.16)$$

Energía perdida en el circuito de tracción

4.3.3.2.1 Sección en plena vía

En la parte superior de la Figura 4.14 se puede comprobar que el aumento de la velocidad de circulación v_{cr} implica una disminución del tiempo que el tren está dentro de la sección y, por tanto, una disminución del tiempo t_L que la corriente $I_{tren}(t)$ circula por el circuito de tracción.

Por otro lado, el aumento de la velocidad de circulación también implica que la cadena de tracción del tren consuma más potencia y, por tanto, deba circular más intensidad de corriente $I_{tren}(t)$ por su circuito de tracción. Como se muestra en (4.16), los valores de t_L y de $I_{tren}(t)$ tienen efecto en el cálculo de la energía activa perdida en el circuito de tracción E_{CT} . En la parte inferior de la Figura 4.14 se comprueba que cuando aumenta la velocidad de

circulación el efecto del aumento de la intensidad de corriente circulante $I_{tren}(t)$ sobre la pérdida de energía E_{CT} es mayor que el efecto de la reducción del tiempo t_L . Por lo tanto, la energía activa perdida en el circuito de tracción E_{CT} de un tren que recorre una sección en plena vía aumenta con su velocidad de circulación.

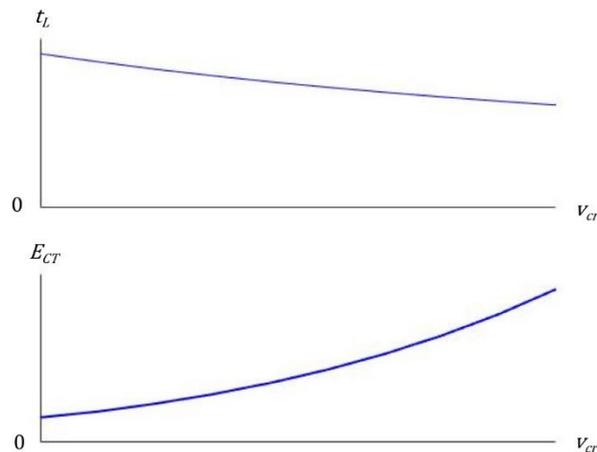


Figura 4.14. Pérdida de energía activa en una sección 1x25 kV en plena vía

4.3.3.2.2 Sección con una estación

En la parte superior de la Figura 4.15, se observa que el aumento de la velocidad del tren reduce su tiempo t_L de presencia dentro de la sección, igual que en el caso de la sección recorrida íntegramente a velocidad de crucero.

En la parte inferior de la Figura 4.15 se muestra la energía activa E_{CT} perdida en el sistema de electrificación durante el paso de un tren por una sección con una parada en su punto medio. La pérdida de energía activa en el circuito de tracción no se produce sólo en la fase de crucero de la trayectoria del tren, sino también en las fases de frenado a la llegada y tracción a la salida de la estación. A medida que aumenta la velocidad de circulación del tren, se incrementa la intensidad de corriente en su circuito de tracción $I_{tren}(t)$ en las tres fases de su trayectoria: crucero, frenado y tracción. En definitiva, la energía activa perdida en el circuito de tracción E_{CT} de un tren que recorre una sección con una parada aumenta con su velocidad de circulación.

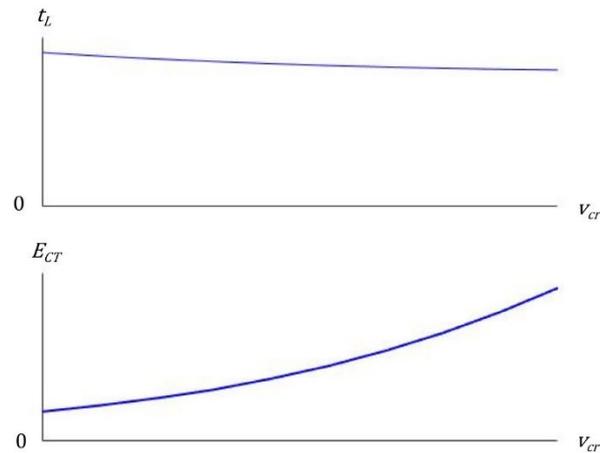


Figura 4.15. Pérdida de energía activa en una sección 1x25 kV con estación

4.4 Sistema de electrificación 2x25kV

Cuando la intensidad del tráfico ferroviario crece o aumenta la potencia de los trenes que circulan por una línea electrificada mediante el sistema 1x25 kV, las intensidades de corriente se incrementan y, por lo tanto, también lo hacen las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción. Una manera de mitigar este efecto es reducir las distancias de los trenes a las subestaciones eléctricas de tracción, acercando estas entre sí. Sin embargo, esta es una solución costosa y, en ocasiones, difícil de llevar a cabo por la inaccesibilidad de la traza ferroviaria.

El denominado sistema 2x25 kV permite aumentar la potencia disponible sin tener que reducir la distancia entre las subestaciones eléctricas de tracción. Es más, en el caso de potencias similares, el sistema 2x25 kV permite casi duplicar las distancias entre las subestaciones respecto al sistema 1x25 kV, llegando a distancias de 80 km.

Este sistema de electrificación fue ideado en 1911 y se planeó utilizarlo por primera vez en el Tokaido Shinkansen, inaugurado en 1964. Sin embargo, no fue posible llevar a cabo la configuración del sistema pues en aquellos días la comprensión de los fenómenos que sucedían en algunos de sus componentes era incompleta. Tras años de simulaciones por ordenador y pruebas de campo, la primera línea ferroviaria alimentada mediante el sistema 2x25 kV fue puesta en servicio en 1970, también en Japón [UZUKA, 2013]. Actualmente, este sistema se utiliza en Francia, Japón, España, Italia, Rusia y poco a poco se está implantando en los países que utilizan la electrificación a 25 kV en corriente alterna [ROUSSEL, 1989].

En el año 2020, la Red Ferroviaria de Interés General española dispone de 2606 kilómetros de alta velocidad en ancho estándar que han sido electrificados a 25 kV en corriente alterna. En toda esta red se ha utilizado el sistema 2x25 kV, salvo en los 491 kilómetros correspondientes a la línea de alta velocidad entre Madrid y Sevilla, y su ramal a Toledo, en los que se ha utilizado el sistema 1x25 kV [ADIF, 2021].

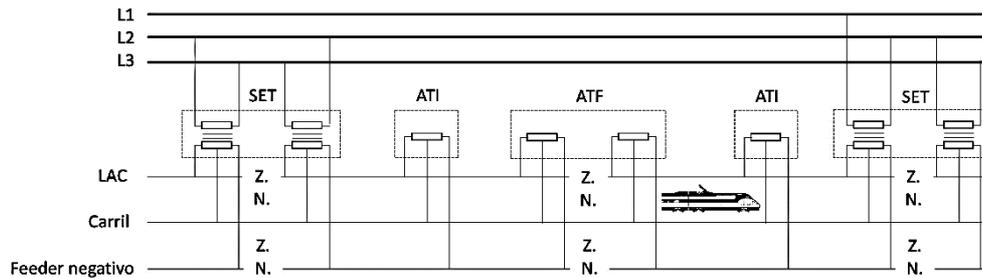


Figura 4.16. Sistema de electrificación 2x25 kV, 50 Hz

Como se observa en la Figura 4.16, a diferencia del sistema de electrificación 1x25 kV, cada subestación eléctrica de tracción del sistema 2x25 kV aloja dos transformadores de tracción que alimentan dos secciones adyacentes. En consecuencia, las secciones de electrificación en el sistema 2x25 kV reciben la alimentación desde uno de sus extremos. El primario de cada transformador de tracción está conectado a la red de transporte del sistema de suministro eléctrico. Por los mayores requisitos de potencia, a cada subestación del sistema 2x25 kV deben llegar las tres fases de la red de transporte a través de una línea de 220 kV o de 400 kV.

La relación de transformación de cada transformador de tracción es tal que entre los extremos de su secundario se genera una diferencia de tensión de 50 kV. Esta diferencia de tensión se divide en dos partes iguales entre los dos arrollamientos en serie que forman el secundario del transformador. El punto central del secundario, con igual número de espiras a ambos lados, se conecta a los carriles. Uno de los extremos del secundario se une a la línea aérea de contacto, que resulta alimentada a 25 kV respecto a los carriles, y el otro extremo se une a un tercer conductor que recorre toda la línea. Este tercer conductor recibe el nombre de feeder negativo ya queda alimentado a -25 kV respecto a los carriles, es decir, a 25 kV en oposición de fase respecto a la tensión en la línea aérea de contacto.

A lo largo de la sección alimentada por cada subestación, se sitúa una serie de autotransformadores de tracción separados entre sí por distancias similares. Los extremos de cada autotransformador de tracción se conectan a la línea aérea de contacto y al feeder negativo, y su toma central a los carriles, con un reparto de los arrollamientos tal que permita mantener casi nula la tensión de los carriles respecto a tierra. Los tramos de la infraestructura de electrificación situados entre dos autotransformadores de tracción consecutivos son denominados celdas y su longitud típica se encuentra entre 10 y 15 km.

En este sistema de electrificación, la alimentación de los trenes sigue siendo a 25 kV, 50 Hz y, por tanto, no es necesario realizar ninguna modificación en su cadena de tracción para que puedan circular por este tipo de líneas. Sin embargo, se debe notar que, en este sistema de electrificación, la alimentación es bilateral puesto que la cadena de tracción del tren intercambia corriente con los dos autotransformadores de tracción de su celda.

4.4.1 Modelo de trabajo del sistema 2x25 kV

4.4.1.1 Suministro eléctrico y transformador de tracción

De forma análoga a lo estudiado para el sistema 1x25 kV, la red de transporte del sistema de suministro eléctrico y el transformador de tracción que alimenta cada sección pueden ser representados mediante el circuito equivalente de la Figura 4.17.. El modelo empleado, por lo tanto, está formado por dos fuentes de tensión ideales y las impedancias de cortocircuito de los dos arrollamientos secundarios del transformador [HILL, 1993].

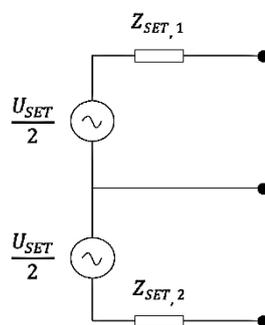


Figura 4.17. Suministro eléctrico y transformador en el sistema 2x25 kV

4.4.1.2 Circuito de tracción

Cuando el tren ejerce una fuerza de tracción, la corriente captada de la línea aérea de contacto mediante su pantógrafo es devuelta a los dos autotransformadores de tracción de su celda a través de sus ruedas y los carriles. La mayor parte de la corriente recogida por la toma central de cada autotransformador de tracción se divide entre sus dos arrollamientos, para ser devuelta a la línea aérea de contacto y al feeder negativo, y la parte restante es conducida a la celda adyacente a través de los carriles. En caso de que el tren aplique freno eléctrico regenerativo, se invierte el sentido de la corriente en su cadena de tracción, que fluirá desde el carril hasta la línea aérea de contacto.

Como se observa en la Figura 4.18, tanto durante la tracción como en el frenado eléctrico regenerativo, se establece un flujo de corriente entre la subestación y el tren que los autotransformadores van extrayendo desde los carriles hacia la línea aérea de contacto y el feeder negativo.

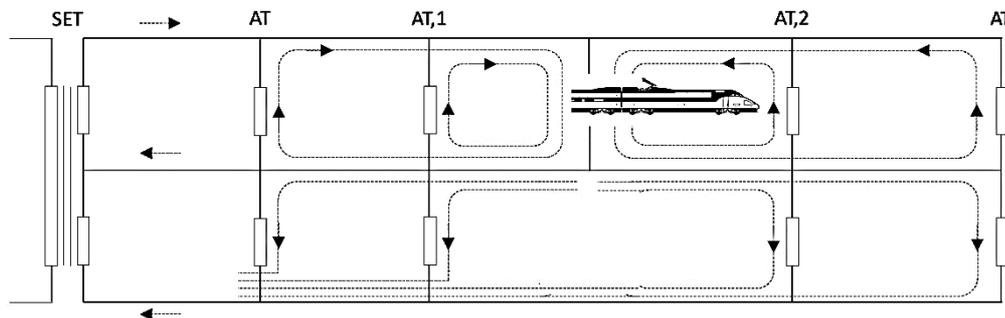


Figura 4.18. Distribución de corrientes en el sistema 2x25 kV

El elevado número de conductores y de elementos que forman el circuito de tracción del sistema 2x25 kV obliga a utilizar herramientas de computación capaces de resolver modelos matemáticos muy complejos para poder calcular todos los parámetros eléctricos de interés. Cuando la simulación del funcionamiento de un sistema ferroviario completo exige la repetición de estos cálculos en varios instantes de tiempo, se debe recurrir a modelos simplificados de este sistema de electrificación que permitan la obtención de resultados en tiempos asumibles [Hsi, 1999].

La aproximación más simple al funcionamiento de este sistema de electrificación es el modelo ideal, representado en la Figura 4.19. En este modelo se considera que la tensión en las tomas centrales de todos los autotransformadores de tracción es nula y, por lo tanto, sólo los dos autotransformadores situados en la celda ocupada por el tren conducen corriente. En consecuencia, no circula la corriente por los carriles del resto de celdas [ALLOTTA, 2013].

Cuando el tren ejerce una fuerza de tracción, la corriente captada de la línea aérea de contacto mediante su pantógrafo I_{tren} es devuelta a los dos autotransformadores de tracción de su celda a través de sus ruedas y los carriles. Esta corriente de retorno se reparte entre ambos autotransformadores de tracción, I_1 e I_2 , en función de la posición del tren en la celda. La corriente recogida por la toma central de cada autotransformador de tracción se divide en dos partes iguales: una mitad vuelve a la línea aérea de contacto y la otra retorna a la subestación eléctrica de tracción a través del feeder negativo.

Al contrario, durante un frenado eléctrico regenerativo se invierte el sentido de la corriente en su cadena de tracción y, por tanto, la corriente sale de su pantógrafo hacia la línea aérea de contacto. De forma análoga a lo ocurrido durante la tracción, la corriente proviene de los carriles bilateralmente, esto es, desde las tomas centrales de los dos autotransformadores de tracción de la celda ocupada por el tren. La corriente saliente de la toma central de ambos autotransformadores de tracción procede de sus dos arrollamientos secundarios a partes iguales: una mitad tiene su origen en la línea aérea de contacto y la otra en la subestación eléctrica de tracción a través del feeder negativo [BRENNNA, 2018].

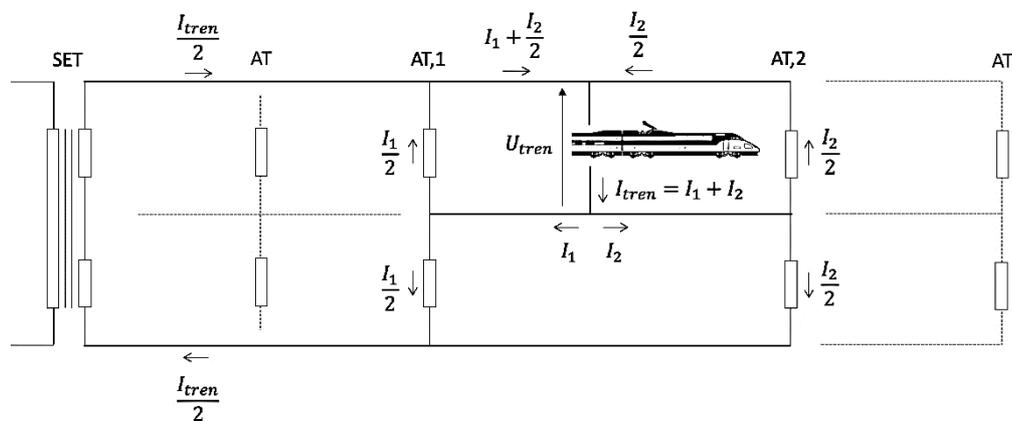


Figura 4.19. Circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo ideal)

Según este modelo ideal, tanto en el caso de la tracción como en el frenado eléctrico regenerativo, los dos autotransformadores de la celda ocupada por el tren retiran toda la corriente de los carriles y la intercambian con la subestación a través de la línea aérea de contacto y del feeder negativo de las celdas intermedias, denominadas celdas de transmisión.

Dado que, entre los dos conductores activos de las celdas de transmisión, la línea aérea de contacto y el feeder negativo, se establece una diferencia de tensión de 50 kV, por esta parte del circuito de tracción sólo es necesario que circule la mitad de la intensidad de corriente que en la cadena de tracción del tren. Este diseño del sistema de electrificación 2x25 kV reduce drásticamente las pérdidas de potencia en las celdas de transmisión, que constituyen una parte importante del circuito de tracción especialmente cuando el tren se halla alejado de la subestación.

Además, al estar en oposición de fase la tensión de estos dos conductores, las perturbaciones electromagnéticas inducidas en las instalaciones próximas por este sistema de electrificación son generalmente mucho más bajas que las inducidas por el sistema 1x25 kV.

Sin embargo, durante la operación de este sistema de electrificación, los valores de la tensión en las tomas centrales de todos los autotransformadores de tracción, aunque son bajos, no son nulos. Esto hace que una pequeña parte de la corriente circule también por los carriles de las celdas no ocupadas por el tren y por el resto de autotransformadores.

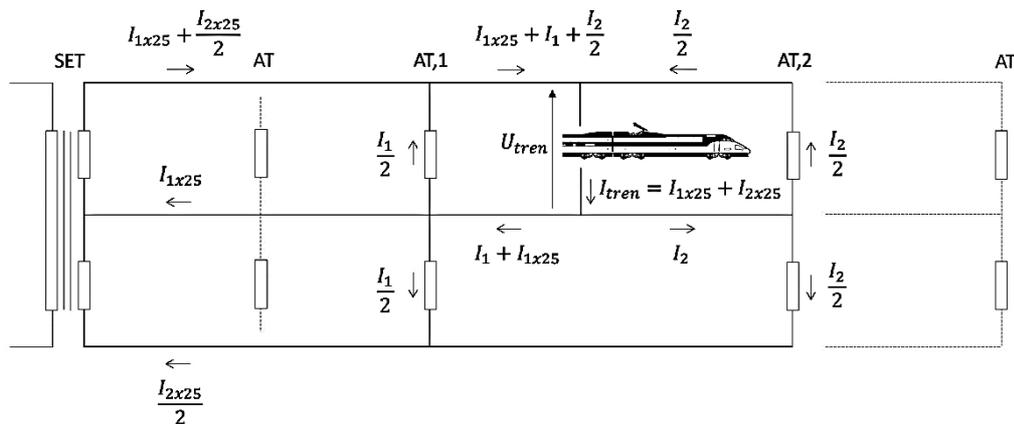


Figura 4.20. Circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo físico aproximado)

En el modelo físico aproximado que utilizaremos en este estudio, representado en la Figura 4.20, si bien se admite que existe corriente en los carriles de las celdas de transmisión, se supone que su intensidad es tan pequeña que los autotransformadores de las celdas de transmisión siguen sin conducir. Entonces, la corriente de la cadena de tracción del tren puede descomponerse en la suma de dos componentes: la corriente correspondiente al sistema 2x25 kV ideal I_{2x25} más la corriente que circula por los carriles de las celdas de transmisión I_{1x25} , que se asemejaría al funcionamiento del sistema 1x25 kV [ZANINELLI, 2010].

4.4.1.2.1 Impedancias de los conductores del circuito de tracción

Aunque los sectores de electrificación pueden alcanzar el doble de longitud que en el sistema 1x25 kV, sigue siendo válida la representación del circuito de tracción del sistema 2x25 kV mediante un circuito equivalente de parámetros concentrados. Este circuito equivalente, mostrado en la Figura 4.21, está formado por la impedancia en serie correspondiente a cada conductor [MARISCOTTI, 2007].

Agrupando en uno solo todos los conductores que trabajan a la misma tensión nominal, se puede reducir el circuito de tracción del sistema 2x25 kV a tres conductores [DOLARA, 2012]:

- LAC: conductor equivalente a la asociación de la línea aérea de contacto, el sustentador, las péndolas y el feeder de acompañamiento, si lo hubiera.
- Carril: conductor equivalente que resulta de la agrupación de los dos carriles de la vía, el terreno y los conductores de retorno por tierra adicionales, si los hubiera.
- Feeder negativo.

En el modelo físico aproximado, tal y como se expresa en (4.17), la corriente de la cadena de tracción del tren I_{tren} se divide en la suma de dos componentes: la corriente correspondiente al modelo de funcionamiento ideal del sistema I_{2x25} más la corriente que circula a través de los carriles de las celdas de transmisión I_{1x25} . El reparto de la corriente I_{tren} entre ambas componentes viene determinado en (4.18) por el parámetro δ , cuyo valor depende de las impedancias de los conductores de cada infraestructura de electrificación en particular.

$$I_{tren} = I_{1x25} + I_{2x25} \quad (4.17)$$

$$I_{1x25} = \frac{1-\delta}{1+\delta} I_{tren} \quad (4.18)$$

Reparto de corrientes en las celdas de transmisión

A partir de las expresiones (4.17) y (4.18) podemos comprobar que si parámetro δ toma el valor 1 nos encontramos ante un sistema 2x25 kV ideal, mientras que el valor 0 corresponde a un sistema 1x25 kV. Por lo tanto, el valor del parámetro δ es una medida del parecido de cada sistema 2x25 kV en particular con respecto al sistema 2x25 kV ideal.

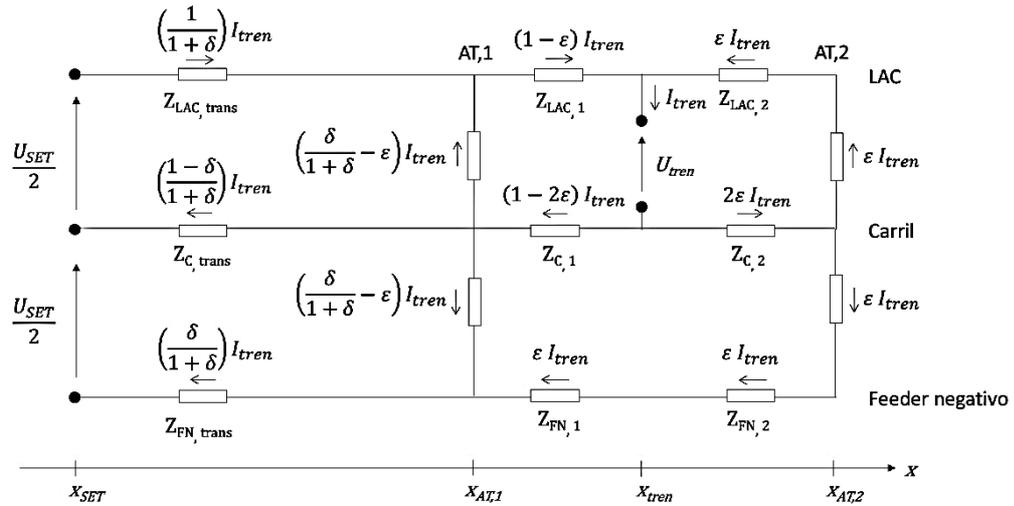


Figura 4.21. Impedancias del circuito de tracción del sistema 2x25 kV (modelo físico aprox.)

Dentro de la celda ocupada por el tren, la corriente circulante por la cadena de tracción del tren I_{tren} , se divide entre los dos autotransformadores según las corrientes I_1 e I_2 , como se indica en (4.19). El reparto de la corriente I_{tren} entre ambas componentes depende del parámetro ε , como se puede observar en las expresiones (4.20) y (4.21). El valor del parámetro ε es variable en el tiempo ya que depende de la posición del tren, x_{tren} .

$$I_{tren} = I_1 + I_2 \quad (4.19)$$

$$I_1 = 1 - 2\varepsilon(x_{tren}) I_{tren} \quad (4.20)$$

$$I_2 = 2\varepsilon(x_{tren}) I_{tren} \quad (4.21)$$

Reparto de corrientes en la celda ocupada por el tren

Tal y como se ha visto para el sistema 1x25 kV, la resistencia de cada conductor puede ser deducida a partir de sus dimensiones y su resistividad. Sin embargo, para determinar su inductancia se precisa conocer las posiciones de todos los conductores y las corrientes que circulan por todos ellos. Además, se debe tener en cuenta que en este sistema de electrificación la intensidad de la corriente que circula por cada conductor es distinta según la parte del circuito de tracción.

A lo largo de todas las celdas de transmisión la corriente que circula por cada conductor es la misma en todos sus puntos ya que, según el modelo físico aproximado, se supone nula la corriente por los autotransformadores de esta parte del circuito de tracción. Por lo tanto, la inductancia de cada conductor puede calcularse en las expresiones (4.22), (4.23) y (4.24) a partir del valor su radio, de sus distancias a los otros dos conductores y del reparto de las corrientes entre ellos.

$$L_{LAC,trans} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^{1-\delta} D_{LAC-FN}^{\delta}}{r_{LAC}} (x_{AT,1} - x_{SET}) \quad (4.22)$$

$$L_{C,trans} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^{\frac{1}{1-\delta}} D_{C-FN}^{\frac{-\delta}{1-\delta}}}{r_C} (x_{AT,1} - x_{SET}) \quad (4.23)$$

$$L_{FN,trans} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-FN}^{\frac{1}{\delta}} D_{C-FN}^{\frac{1-\delta}{\delta}}}{r_{FN}} (x_{AT,1} - x_{SET}) \quad (4.24)$$

Inductancias de los conductores en las celdas de transmisión

Observando el sentido de las corrientes en el circuito equivalente de la Figura 4.21, la celda ocupada por el tren puede ser dividida, a su vez, en dos segmentos: un primer segmento entre el tren y el autotransformador de tracción más próximo a la subestación, que en adelante denominaremos primer autotransformador de tracción (autotransformador AT,1), y un segundo segmento desde el tren hasta el autotransformador de tracción más alejado de la subestación, que recibirá el nombre de segundo autotransformador de tracción (autotransformador AT,2). Procediendo de igual manera que en las celdas de transmisión, en las expresiones (4.25)-(4.30) se obtienen las inductancias de los tres conductores en ambos segmentos de la celda ocupada por el tren.

$$L_{LAC,1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^{\frac{1-2\varepsilon}{1-\varepsilon}} D_{LAC-FN}^{\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}}}{r_{LAC}} (x_{tren} - x_{AT,1}) \quad (4.25)$$

$$L_{C,1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^{\frac{1}{2}} D_{C-FN}^{\frac{1}{2}}}{r_C} (x_{tren} - x_{AT,1}) \quad (4.26)$$

$$L_{FN,1} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-FN}^{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} D_{C-FN}^{\frac{-1-2\varepsilon}{\varepsilon}}}{r_{FN}} (x_{tren} - x_{AT,1}) \quad (4.27)$$

Inductancias de los conductores en el primer segmento de la celda del tren

$$L_{LAC,2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^2 D_{LAC-FN}^{-1}}{r_{LAC}} (x_{AT,2} - x_{tren}) \quad (4.28)$$

$$L_{C,2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-C}^{\frac{1-\varepsilon}{1-2\varepsilon}} D_{C-FN}^{\frac{-\varepsilon}{1-2\varepsilon}}}{r_C} (x_{AT,2} - x_{tren}) \quad (4.29)$$

$$L_{FN,2} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{LAC-FN}^{-1} D_{C-FN}^2}{r_{FN}} (x_{AT,2} - x_{tren}) \quad (4.30)$$

Inductancias de los conductores en el segundo segmento de la celda del tren

Conocidos los valores de las inductancias y de las resistencias de los tres conductores en cada segmento, los valores de sus impedancias para la frecuencia de trabajo quedan determinados en las expresiones (4.31), (4.32) y (4.33).

$$Z_{LAC,x} = R_{LAC,x} + j100\pi L_{LAC,x} \quad (4.31)$$

$$Z_{C,x} = R_{C,x} + j100\pi L_{C,x} \quad (4.32)$$

$$Z_{FN,x} = R_{FN,x} + j100\pi L_{FN,x} \quad (4.33)$$

Impedancias del circuito de tracción del sistema 2x25 kV

Considerando que las corrientes circulantes por cada conductor son variables en función de los movimientos de todos los trenes presentes en cada sección, tal y como se ha razonado anteriormente, para determinar los valores exactos de las inductancias de los conductores sería necesario recalcularlos en cada instante. Sin embargo, en este estudio supondremos

que la variación de los valores de las inductancias es despreciable y utilizaremos los valores típicos que se manejan en la literatura. En la Tabla 4.3 se muestran las impedancias unitarias de los conductores de un sistema 2x25 kV típico considerando la existencia de corrientes vagabundas a través de un terreno cuya resistividad es 100 Ωm [CARMONA, 2013].

	Tipo de material	Resistencia (Ω/m)	Reactancia (jΩ/m)
LAC	Cu 95 + Cu-Ag 150	$\bar{R}_{LAC} = 0,949 \times 10^{-4}$	$\bar{X}_{LAC} = 3,389 \times 10^{-4}$
Feeder negativo	Al LA-280	$\bar{R}_{FN} = 3,109 \times 10^{-4}$	$\bar{X}_{FN} = 3,604 \times 10^{-4}$
Carril	Acero 60 kg/m	$\bar{R}_C = 0,546 \times 10^{-4}$	$\bar{X}_C = 3,527 \times 10^{-4}$
Cable de tierra	Al LA-110	$2,158 \times 10^{-4}$	$3,795 \times 10^{-4}$

Tabla 4.3. Impedancias unitarias en el sistema 2x25 kV en vía única

4.4.1.2.2 Impedancia equivalente del circuito de tracción

Suponiendo que la tensión en el primer autotransformador de tracción de la celda ocupada por el tren (autotransformador AT,1 de la Figura 4.21) se divide en partes iguales entre sus dos arrollamientos y que las impedancias unitarias de los tres conductores son constantes en todas las celdas de transmisión, se puede deducir el valor del parámetro δ en la expresión (4.34). El valor del parámetro δ es una característica invariante de cada infraestructura de electrificación en particular.

$$\delta = \frac{\bar{Z}_{LAC} + 2\bar{Z}_C}{\bar{Z}_{FN} + 2\bar{Z}_C} \quad (4.34)$$

Reparto de corrientes en las celdas de transmisión del sistema 2x25 kV

Si las impedancias de los conductores LAC y Feeder negativo fueran iguales, el parámetro δ tomaría el valor unitario y no circularía ninguna corriente por los carriles de las celdas de transmisión. Este caso particular correspondería al modelo de funcionamiento ideal del sistema 2x25 kV. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 4.3, el valor típico de la impedancia unitaria del conductor LAC es más bajo, lo que da lugar a que el parámetro δ tome valores inferiores a la unidad.

Por otro lado, suponiendo que la tensión en los dos autotransformadores de tracción de la celda ocupada por el tren se reparte por igual entre sus dos arrollamientos y que las impedancias unitarias de los conductores son constantes en toda la celda, se deduce la expresión (4.35) en la que el valor del parámetro ε sólo depende de la posición del tren, x_{tren} .

$$\varepsilon(t) = \frac{\delta}{1+\delta} \frac{x_{tren}(t) - x_{AT,1}}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \quad (4.35)$$

Reparto de corrientes en la celda ocupada por el tren en el sistema 2x25 kV

Aplicando las expresiones (4.19) y (4.20) en el caso particular del modelo ideal, se comprueba que cuando el tren se encuentra al final de la celda toda la corriente de la cadena de tracción $I_{tren}(t)$ es conducida por el segundo autotransformador (autotransformador AT,2 de la Figura 4.21).

Sin embargo, hemos visto que el parámetro δ toma valores inferiores a la unidad y debemos emplear el modelo físico aproximado. Aplicando las expresiones (4.19) y (4.20) en el caso del modelo físico aproximado, se comprueba que cuando el tren se encuentra al final de la celda una parte de la corriente de la cadena de tracción $I_{tren}(t)$ todavía sigue siendo conducida por el primer autotransformador (autotransformador AT,1 de la Figura 4.21).

Tomando estos resultados, es posible expresar el valor de la caída de tensión entre la subestación y el primer autotransformador en función de una impedancia equivalente de las celdas de transmisión, $Z_{eq,trans}(t)$. Como se muestra en (4.36) y (4.37), el valor de esta impedancia equivalente de las celdas de transmisión permanece constante mientras el tren no cambie de celda.

$$Z_{eq,trans}(t) = \bar{Z}_0 (x_{AT,1} - x_{SET}) \quad (4.36)$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{LAC} \left(\frac{1}{1+\delta} \right) + \bar{Z}_C \left(\frac{1-\delta}{1+\delta} \right) \quad (4.37)$$

Impedancia equivalente de las celdas de transmisión en el sistema 2x25 kV

También es posible relacionar el valor de la caída de tensión entre el primer autotransformador y la cadena de tracción del tren con una impedancia equivalente de la celda ocupada por el tren, $Z_{eq,celda}(t)$. Como se muestra en (4.38), (4.39) y (4.40), el valor de esta impedancia equivalente de la celda ocupada por el tren está definido por una función cuadrática de la posición del tren respecto al primer autotransformador.

$$Z_{eq,celda}(t) = \bar{Z}_1 [x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{Z}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \quad (4.38)$$

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C \quad (4.39)$$

$$\bar{Z}_2 = (\bar{Z}_{LAC} + 2 \bar{Z}_C) \left(\frac{\delta}{1+\delta} \right) \quad (4.40)$$

Impedancia equivalente de la celda ocupada por el tren en el sistema 2x25 kV

Finalmente, la impedancia equivalente de todo el circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$ se obtiene en la expresión (4.41) sumando las impedancias equivalentes de las celdas de transmisión $Z_{eq,trans}(t)$ y de la celda ocupada por el tren $Z_{eq,celda}(t)$.

$$Z_{eq,CT}(t) = \bar{Z}_0 (x_{AT,1} - x_{SET}) + \bar{Z}_1 [x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{Z}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \quad (4.41)$$

$$R_{eq,CT}(t) = \bar{R}_0 (x_{AT,1} - x_{SET}) + \bar{R}_1 [x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{R}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \quad (4.42)$$

$$X_{eq,CT}(t) = \bar{X}_0 (x_{AT,1} - x_{SET}) + \bar{X}_1 [x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{X}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \quad (4.43)$$

Impedancia equivalente del circuito de tracción en el sistema 2x25 kV

Como se puede observar en las expresiones (4.42) y (4.43), las componentes resistiva $R_{eq,CT}(t)$ y reactiva $X_{eq,CT}(t)$ de la impedancia equivalente del circuito de tracción están definidas por funciones cuadráticas de la distancia del tren al primer autotransformador. Estas funciones son crecientes a medida que la distancia entre el tren y la subestación es mayor hasta los puntos intermedios de la celda donde cada una alcanza su máximo. Estos máximos locales de las componentes resistiva y reactiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción

se producen cuando el tren está situado en las posiciones (4.44) y (4.45), respectivamente. A partir de estos puntos intermedios el valor de cada función comienza a decrecer.

$$\text{máx}\{R_{eq,CT}\} \rightarrow x_{tren} = x_{AT,1} + \frac{\bar{R}_1}{2\bar{R}_2} (x_{AT,2} - x_{AT,1}) \quad (4.44)$$

$$\text{máx}\{X_{eq,CT}\} \rightarrow x_{tren} = x_{AT,1} + \frac{\bar{X}_1}{2\bar{X}_2} (x_{AT,2} - x_{AT,1}) \quad (4.45)$$

Máximos locales de la impedancia equivalente del circuito de tracción en el sistema 2x25 kV

Por consiguiente, los valores de las componentes resistiva $R_{eq,CT}(t)$ y reactiva $X_{eq,CT}(t)$ de la impedancia del circuito de tracción son fruto de dos efectos combinados. Por un lado, ambos valores tienden a aumentar a medida que el tren se aleja de la subestación como consecuencia del incremento que sufre la impedancia $Z_{eq,trans}(t)$ en (4.36). Por otro lado, los dos valores disminuyen localmente debido a que, según (4.41), la impedancia $Z_{eq,celda}(t)$ se aleja de sus máximos cuando el tren se aproxima a los autotransformadores de tracción.

En la Figura 4.22 se ha representado la evolución del valor de la resistencia equivalente del circuito de tracción $R_{eq,CT}(t)$ en función de la posición del tren $x_{tren}(t)$. Se aprecia tanto la tendencia creciente de la resistencia a medida que el tren se aleja de la subestación, como las variaciones locales de la resistencia debidas a la presencia de los autotransformadores.

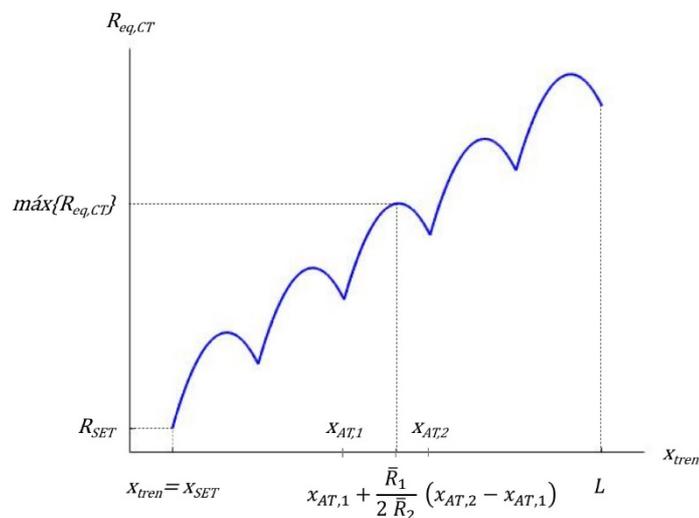


Figura 4.22. Componente resistiva de la impedancia equivalente del circuito de tracción

4.4.2 Potencia eléctrica en una sección de electrificación 2x25 kV

4.4.2.1 Potencia en la subestación de tracción

Dado que en este estudio suponemos que la subestación eléctrica de tracción se comporta como una fuente de tensión de potencia infinita, podemos considerar que la tensión aplicada a los conductores es constante en el tiempo.

Por otro lado, de manera análoga al sistema 1x25 kV, en el modelo de trabajo representado en la Figura 4.23 el tren se modela a través de una fuente de corriente cuya intensidad $I_{tren}(t)$ puede ser deducida a partir de su potencia eléctrica en cada instante [MOHAMED, 2019].

El efecto de los conductores de las celdas de transmisión queda representado por su impedancia equivalente $Z_{eq,trans}(t)$, cuyo valor definido en (4.36) permanece constante mientras el tren se encuentre dentro de la misma celda. El efecto de los autotransformadores y los conductores de la celda ocupada por el tren está reflejado en su impedancia equivalente $Z_{eq,celda}(t)$, cuyo valor definido en (4.38) es función de la posición del tren dentro de la celda. La impedancia equivalente del circuito de tracción completo $Z_{eq,CT}(t)$ equivale a la suma de ambas impedancias.

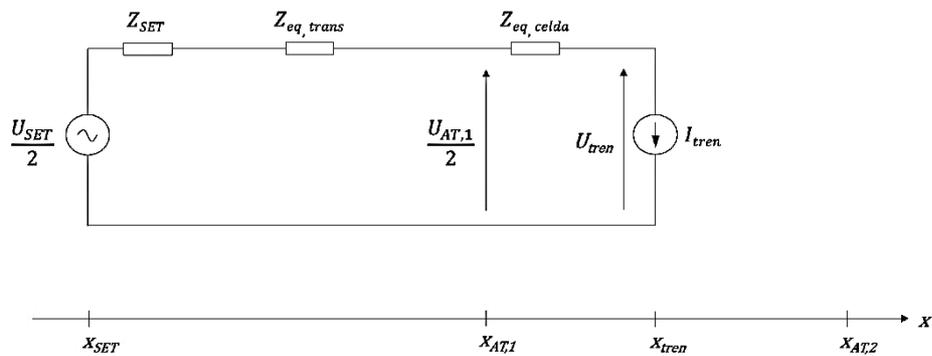


Figura 4.23. Modelo de trabajo completo del sistema 2x25 kV

En consecuencia, la tensión en la cadena de tracción del tren $U_{tren}(t)$ viene determinada por la expresión (4.46), y es función de la corriente circulante $I_{tren}(t)$, de las impedancias unitarias de los conductores y de la posición del tren dentro de la celda.

$$U_{tren}(t) = \frac{U_{SET}}{2} - [Z_{SET} + Z_{eq,CT}(t)] I_{tren}(t) \quad (4.46)$$

Tensión en la cadena de tracción del tren en el sistema 2x25 kV

El circuito de tracción es el medio a través del cual se transfiere la potencia eléctrica desde la subestación a la cadena de tracción del tren, y viceversa. En la expresión (4.47), se comprueba que la potencia suministrada por la subestación de tracción es la suma de la potencia en la cadena de tracción del tren $S_{tren}(t)$ más la potencia consumida por el circuito de tracción.

$$S_{SET}(t) = S_{tren}(t) + [Z_{SET} + Z_{eq,CT}(t)] |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.47)$$

$$P_{SET}(t) = P_{tren}(t) + [R_{SET} + R_{eq,CT}(t)] |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.48)$$

$$Q_{SET}(t) = Q_{tren}(t) + [X_{SET} + X_{eq,CT}(t)] |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.49)$$

Potencia en una subestación eléctrica de tracción en el sistema 2x25 kV

4.4.2.1.1 Sección en plena vía

Al igual que ocurre en el sistema 1x25 kV, cuando el tren circula a velocidad de crucero su cadena de tracción funciona en régimen de potencia constante. Entonces, la potencia suministrada por la subestación $S_{SET}(t)$ debe compensar la pérdida de potencia del sistema de electrificación $S_{CT}(t)$ para asegurar que el tren recibe la potencia que demanda su cadena de tracción. En la parte inferior de la Figura 4.24, se puede observar la potencia activa $P_{SET}(t)$ suministrada por una subestación a lo largo del paso del tren a velocidad de crucero por una sección electrificada mediante el sistema 2x25 kV. Dado que en este sistema de electrificación la posición de la subestación x_{SET} coincide con uno de los extremos de la sección y el tren circula alejándose hacia el extremo opuesto, la tendencia de la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ es creciente en el tiempo.

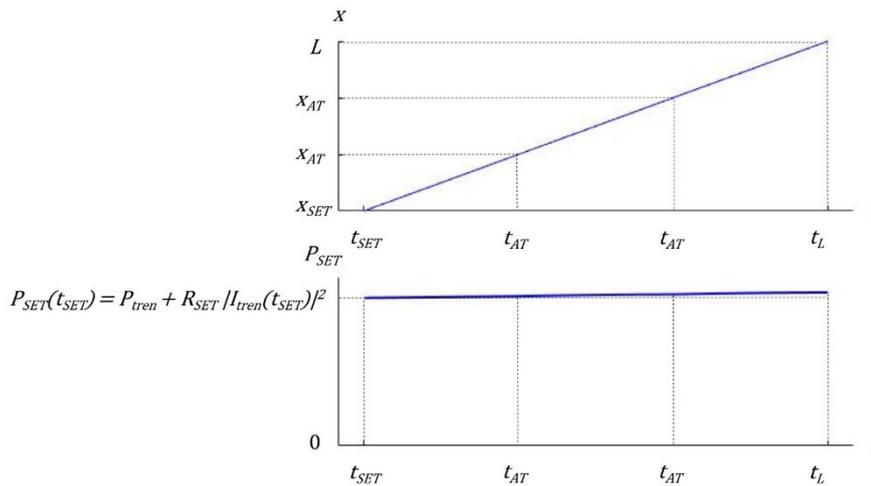


Figura 4.24. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV en plena vía

4.4.2.1.2 Sección con una estación

En la Figura 4.25 se muestra la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ durante el paso de un tren por una sección que contiene una parada en su punto medio. Los valores de la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ siguen la tendencia de los valores de la potencia activa en la cadena de tracción del tren $P_{tren}(t)$. Desde el instante t_{SET} hasta el instante t_{F1} , el tren circula a velocidad de cruce con su cadena de tracción funcionando en régimen de consumo a potencia constante. Durante la fase de frenado en la aproximación a la estación, la cadena de tracción del tren genera potencia y la transmite a la subestación. El frenado en régimen de generación a potencia constante se extiende desde el instante t_{F1} hasta el instante t_{F2} . Cuando el tren llega a la velocidad base de sus motores, en el instante t_{F2} , el frenado pasa a ser en régimen de par constante. En consecuencia, la potencia generada va decreciendo hasta la detención completa del tren en t_{F3} .

El arranque del tren en el instante t_{T1} se produce con los motores funcionando en régimen de par constante. La potencia consumida crece hasta llegar a la máxima potencia en el instante t_{T2} . Una vez superada la velocidad base de los motores, la fase de tracción continúa en régimen de potencia constante. Finalmente, en el instante t_{T3} el tren alcanza la velocidad deseada y pasa a fase de cruce con su cadena de tracción en régimen de potencia constante.

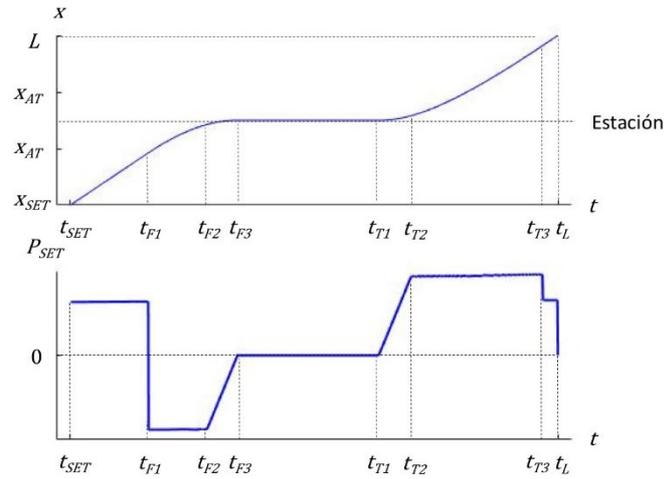


Figura 4.25. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV con estación

4.4.2.2 Potencia consumida por el circuito de tracción

La potencia consumida por el circuito de tracción $S_{CT}(t)$ de un tren alimentado a través de un sistema de electrificación 2x25 kV se obtiene a partir de (4.47), hallando la diferencia entre la potencia en la subestación $S_{SET}(t)$ y la potencia en la cadena de tracción del tren $S_{tren}(t)$. Aplicando la expresión (4.41) de la impedancia del circuito de tracción $Z_{eq,CT}(t)$ en el sistema 2x25 kV, se obtiene el valor de la potencia consumida por el circuito de tracción $S_{CT}(t)$. En la expresión (4.50) se comprueba que la pérdida de potencia $S_{CT}(t)$ depende de la intensidad de corriente en la cadena de tracción del tren $I_{tren}(t)$ y de la distancia entre la posición del tren $x_{tren}(t)$ y la posición de la subestación x_{SET} .

$$S_{CT}(t) = \left\{ \bar{Z}_0(x_{AT,1} - x_{SET}) + \bar{Z}_1[x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{Z}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \right\} |I_{tren}(t)|^2 \quad (4.50)$$

Potencia consumida por el circuito de tracción en el sistema 2x25 kV

4.4.2.2.1 Sección en plena vía

Como hemos visto en la Figura 4.24, la potencia activa $P_{SET}(t)$ suministrada por la subestación tiene una tendencia creciente en el tiempo cuando el tren se aleja. Según se observa en (4.50), esto es debido a que la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ que se produce en el circuito de tracción aumenta con la distancia entre el tren y la subestación. Sin embargo, en la parte inferior de la Figura 4.26 se aprecia que este aumento de la pérdida de potencia

activa $P_{CT}(t)$ no es monótono, sino que presenta mínimos locales en los instantes en los que la posición del tren $x_{tren}(t)$ coincide con las ubicaciones de los autotransformadores. Este patrón es consecuencia de las reducciones de la componente resistiva de la impedancia del circuito de tracción $R_{eq,CT}(t)$ en estos puntos, como ya ha sido representando en la Figura 4.22.

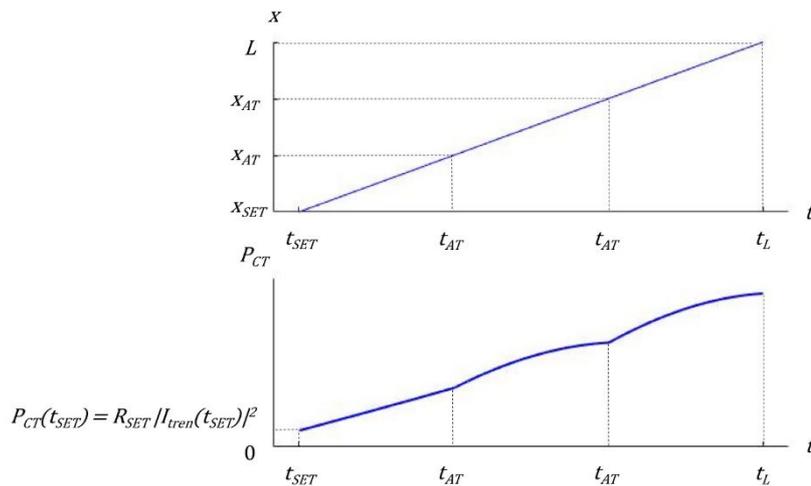


Figura 4.26. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV en plena vía

4.4.2.2.2 Sección con una estación

La potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ debe incluir la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ que se produce en la infraestructura de electrificación durante todo el recorrido del tren por la sección. En las fases de frenado y de tracción a potencia constante representadas en la parte inferior de la Figura 4.25 se aprecia un ligero aumento de la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ como consecuencia del alejamiento del tren de la subestación. En la parte inferior de la Figura 4.27, donde se representa la potencia activa perdida en el circuito de tracción $P_{CT}(t)$, se observa más claramente este efecto. En todas las fases del recorrido del tren, a medida que aumenta su distancia a la subestación, la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ crece. Comparando la fase de frenado con la de tracción, se observa que la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ es mayor en la fase de tracción, entre los instantes t_{T1} y t_{T3} , a pesar de la que potencia manejada por la cadena de tracción del tren es la misma que entre los instantes t_{F1} y t_{F3} . Esto es debido a que la fase de tracción se desarrolla en una zona más alejada de la subestación lo que implica un mayor valor de la componente resistiva $R_{eq,CT}(t)$ de la impedancia del circuito de tracción. Adicionalmente, en el instante t_{AT} , situado en la

fase de tracción a potencia constante, se observa un cambio de la pendiente de la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$. Esto es debido a que, en el instante t_{AT} , el tren cambia de celda al pasar frente a un autotransformador y se produce una reducción sustancial de la componente resistiva $R_{eq,CT}(t)$ de la impedancia del circuito de tracción.

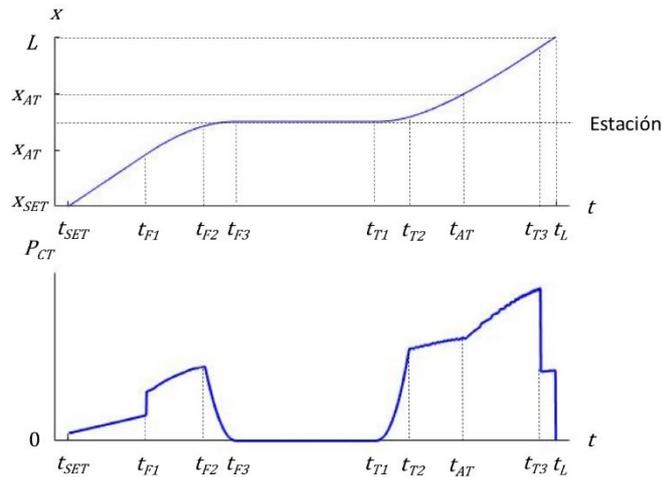


Figura 4.27. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV con estación

4.4.3 Balance energético en una sección de electrificación 2x25 kV

Como se ha expresado en (4.15), la energía neta suministrada por una subestación eléctrica de tracción E_{SET} para el paso de un tren a lo largo de una sección de electrificación equivale a la energía consumida por la cadena de tracción del tren E_{tren} más la pérdida de energía que se produce en el circuito de tracción E_{CT} .

4.4.3.1 Energía suministrada por la subestación

A fin de poder diferenciar las fases de frenado durante las que la subestación recupera energía, es preciso considerar la energía neta suministrada por la subestación E_{SET} como la suma de dos términos: la energía eléctrica efectivamente suministrada durante las fases de tracción E_{SET}^+ , expresada en (4.15a), y la energía eléctrica recuperada en las fases de frenado eléctrico E_{SET}^- , expresada en (4.15b).

4.4.3.1.1 Sección en plena vía

En parte superior de la Figura 4.28 se puede comprobar que, como ocurre en el sistema 1x25 kV, el aumento de la velocidad de circulación del tren v_{CF} implica una reducción de su tiempo de presencia dentro de la sección de electrificación, t_L .

La energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} coincide con la energía efectivamente suministrada E^+_{SET} , ya que no existe ningún frenado en el recorrido del tren por la sección. Como se puede apreciar en la parte inferior de la Figura 4.28, si la velocidad de circulación del tren por la sección es mayor, la subestación debe suministrar más energía.

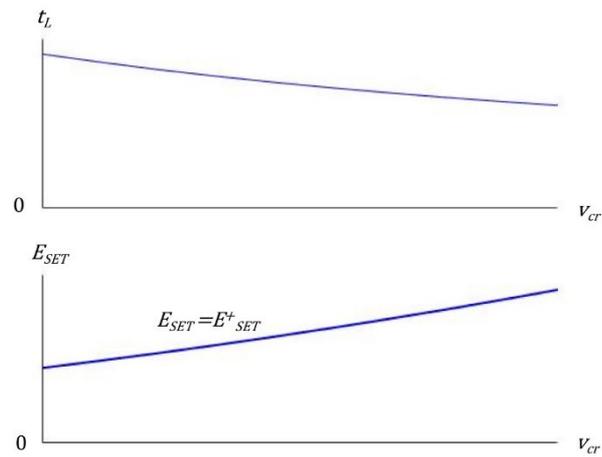


Figura 4.28. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV en plena vía

4.4.3.1.2 Sección con una estación

Como se observa en la Figura 4.29, el aumento de la velocidad en la fase de crucero v_{cr} reduce el tiempo que invierte el tren en recorrer la sección t_L y aumenta los valores absolutos de la energía activa suministrada E^+_{SET} y recuperada E^-_{SET} por la subestación.

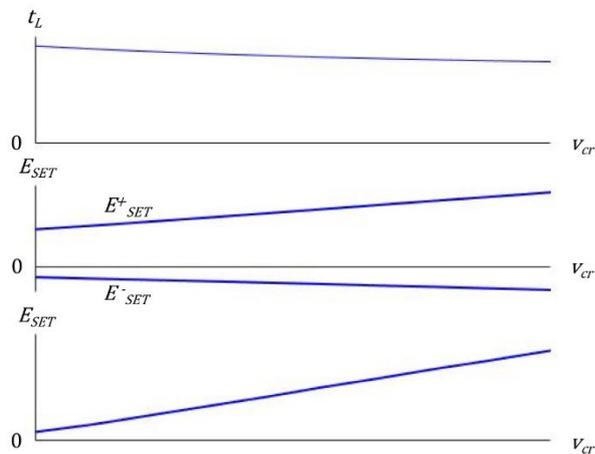


Figura 4.29. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV con estación

En la parte inferior de la Figura 4.29, se puede apreciar que la suma de ambas energías, esto es, la energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} es siempre positiva y crece con la velocidad de circulación del tren.

4.4.3.2 Energía perdida en el circuito de tracción

La expresión (4.52) indica la pérdida de energía en el circuito de tracción E_{CT} durante el tiempo t_L necesario para el paso de un tren a lo largo de una sección electrificada mediante el sistema 2x25 kV.

$$E_{CT} = \frac{1}{3600} \int_0^{t_L} \left\{ Z_{SET} + \bar{Z}_0(x_{AT,1} - x_{SET}) + \bar{Z}_1[x_{tren}(t) - x_{AT,1}] - \bar{Z}_2 \frac{[x_{tren}(t) - x_{AT,1}]^2}{x_{AT,2} - x_{AT,1}} \right\} |I_{tren}(t)|^2 dt \quad (4.52)$$

Energía perdida en el circuito de tracción

4.4.3.2.1 Sección en plena vía

En parte superior de la Figura 4.30 se puede comprobar que el tiempo de presencia dentro de la sección de electrificación t_L se reduce con el aumento de la velocidad de circulación del tren v_{cr} .

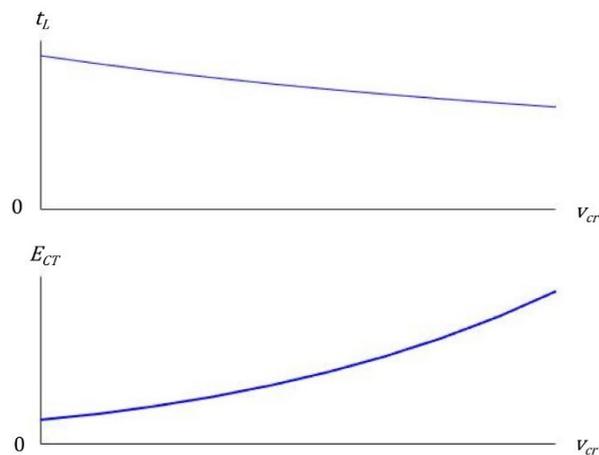


Figura 4.30. Pérdida de energía activa en una sección 2x25 kV en plena vía

Sin embargo, el aumento de la velocidad de circulación del tren eleva la potencia activa manejada por su cadena de tracción $P_{tren}(t)$ y, en consecuencia, eleva también la corriente circulante por su circuito de tracción $I_{tren}(t)$. En la parte inferior de la Figura 4.30 se aprecia que la combinación de la reducción de t_L y el aumento de $I_{tren}(t)$ a medida que aumenta la velocidad de circulación del tren da como resultado un aumento de la energía activa E_{CT} perdida en el circuito de tracción.

4.4.3.2.2 Sección con una estación

En la parte superior de la Figura 4.31 se observa que el aumento de la velocidad de cruceo v_{cr} reduce el tiempo t_L que el tren permanece dentro de la sección de electrificación.

En la parte inferior de la Figura 4.31 se muestra energía activa E_{CT} perdida en el sistema de electrificación durante el paso de un tren por una sección que contiene una parada en su punto medio. Se puede apreciar que el aumento de la velocidad de circulación del tren durante la fase de cruceo eleva la energía perdida en el circuito de tracción E_{CT} en su recorrido por la sección. Como se puede comprobar en (4.52), esto es debido al incremento de la intensidad de corriente en el circuito de tracción del tren $I_{tren}(t)$ en todas las fases de su recorrido, que provoca el aumento de su velocidad de circulación.

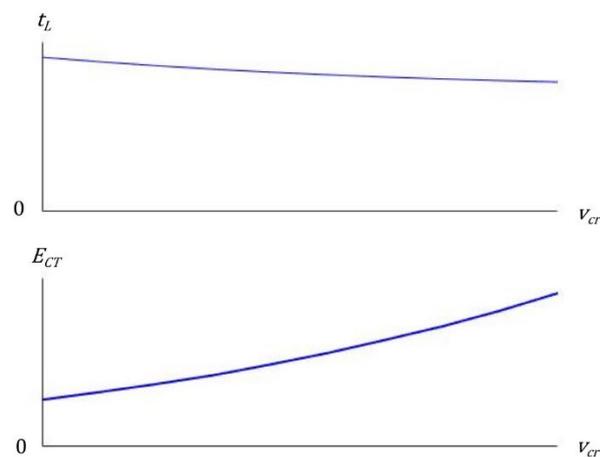


Figura 4.31. Pérdida de energía activa en una sección 2x25 kV con estación

4.5 Conclusiones

La evaluación completa de la energía eléctrica consumida por un tren debe ser realizada desde la subestación eléctrica de tracción para incluir las pérdidas que se producen en el circuito de tracción. Estas pérdidas son variables a lo largo del recorrido ya que su valor depende tanto de la potencia manejada por la cadena de tracción del tren, como de la longitud del circuito de tracción, es decir, de la distancia entre el tren y la subestación eléctrica de tracción.

En los sistemas de electrificación ferroviaria mediante corriente alterna monofásica revisados, la subestación de tracción puede recuperar potencia durante los frenados del tren. Este efecto debe ser tenido en cuenta y para cada posible trayectoria del tren se deben evaluar dos magnitudes energéticas diferentes: la energía suministrada y la energía recuperada por la subestación de tracción. La energía neta suministrada por la subestación de tracción se define como la suma de ambas magnitudes.

Modificando la velocidad de circulación del tren se obtienen trayectorias diferentes a lo largo de una sección de electrificación. Cuando la sección recorrida por el tren es en plena vía, la energía suministrada coincide con la energía neta suministrada pues no hay frenado de recuperación. En este tipo de sección, se ha comprobado que el aumento de la velocidad de circulación del tren implica una mayor energía suministrada por la subestación de tracción. Si el tren circula por una sección con una estación, existe energía recuperada por la subestación durante la fase de frenado del tren. Los resultados obtenidos para este otro tipo de sección, indican que el aumento de la velocidad de circulación del tren eleva los valores absolutos de la energía suministrada y de la energía recuperada, y el valor de la energía neta suministrada por la subestación de tracción.

Finalmente se debe notar que, aunque en muchos casos consideran la energía regenerada durante el frenado de los trenes, las técnicas de conducción eficiente utilizadas en la actualidad no evalúan las magnitudes energéticas en la subestación de tracción. Entonces, al no introducir la topología de electrificación y obviar en los cálculos la parte de la energía perdida en el circuito de tracción, las trayectorias obtenidas mediante estas técnicas no minimizan totalmente el consumo energético.

4.6 Bibliografía

- [ADIF, 2021]. ADIF, Declaración sobre la Red, ADIF Alta Velocidad, 2021.
- [ALLOTTA, 2013]. Allotta, B. Meccatronica. Elementi di trazione elettrica, Allotta, B., Pugi, L. Esculapio. 2013.
- [BRENNNA, 2018]. Brenna, M., Foadelli, F., Zaninelli, D., AC Systems at Mains Frequency, Electrical Railway Transportation Systems, 2018, Wiley-IEEE Press, pp. 209-219.
- [CARMONA, 2013]. Carmona, M. Sistemas de alimentación a la tracción ferroviaria. Formarail. 2013.
- [CHAPAS, 2004]. Chapas, P., Debruyne, M., Composants de l'électrotechnique en traction ferroviaire, Ed. Techniques de l'Ingénieur, 2004.
- [DOLARA, 2012]. Dolara, A., Gualdoni, M., Leva, S., Reduced multiconductor transmission line models for power quality analysis in railway systems, 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong, 2012, pp. 796-802.
- [HILL, 1993]. Hill, R. J., Cevik, I. H. On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks. IEEE Trans. on Vehicular Technologies, vol. 42 n. 3, 1993, pp. 365-372.
- [HSI, 1999]. Hsi, P.-H., Chen, S.-L., Li, R.-J. Simulating On-Line Dynamic Voltages of Multiple Trains under Real Operating Conditions for AC Railways. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, 1999.
- [MARISCOTTI, 2007]. Mariscotti, A., Pozzobon, P., Vanti, M.: Simplified Modeling of 2x25kV AT Railway System for the Solution of Low Frequency and Large-Scale Problems, IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22, (1), pp. 296-301.
- [MOHAMED, 2019]. Mohamed, B., Arbolea, P., El-Sayed, I., González-Morán, C., High-Speed 2 × 25 kV Traction System Model and Solver for Extensive Network Simulations, IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34, (5), pp. 3837-3847.
- [MONGKOLDEE, 2018]. Mongkoldeea, K., Kulworawanichpong, T., Current-based Newton-Raphson power flow calculation for AT-fed railway power supply systems. Electrical Power and Energy Systems 98 (2018) 11-22.

[PILO, 2003]. Pilo, E., Rouco, L., Fernández, A., A reduced representation of 2x25kV electrical systems for high-speed railways. Proceedings of the 2003 IEEE/ASME Joint Rail Conference April 22-24, 2003 Chicago, Illinois.

[ROUSSEL, 1989]. Roussel, H. Power supply for the Atlantic TGV high speed line. International Conference on Main Line Railway Electrification, York, UK, 1989, pp. 388-392.

[SERRANO-JIMÉNEZ, 2017]. Serrano-Jiménez, D., et al. Electrical railway power supply systems: Current situation and future trends. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, vol. 92, p. 181-192.

[UZUKA, 2013]. Uzuka, T., Faster than a speeding bullet. An overview of Japanese high-speed rail technology and electrification. IEEE Electrification Magazine, vol. 1, no. 1, 2013.

[ZANINELLI, 2010]. Zaninelli, D., Sistemi elettrici per l'alta velocità ferroviaria. Polipress. 2010.

Capítulo 5 Consumo energético de dos trenes
en una sección de electrificación

Lista de símbolos

$R_{CT,n}$: Resistencia equivalente del circuito de tracción del tren n , en Ω .

$X_{CT,n}$: Reactancia equivalente del circuito de tracción del tren n , en $j\Omega$.

$Z_{CT,n}$: Impedancia equivalente del circuito de tracción del tren n , en $\Omega + j\Omega$.

$\bar{Z}_{CT,n}$: Valor unitario de la impedancia equivalente $Z_{CT,n}$, en $\Omega/\text{km} + j\Omega/\text{km}$.

R_x : Resistencia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en Ω .

X_x : Reactancia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en $j\Omega$.

Z_x : Impedancia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en $\Omega + j\Omega$.

x_{SET} : Posición de la subestación eléctrica de tracción, en km.

$x_{PSPP,n}$: Posición del puesto de subseccionamiento y puesta en paralelo n , en km.

x_n : Posición del tren n , en km.

$\lfloor x_n \rfloor$: Posición del primer PSPP desde el tren n en sentido hacia la subestación, en km.

$\lceil x_n \rceil$: Posición del primer PSPP desde el tren n en sentido opuesto a la subestación, en km.

I_n : Intensidad de corriente circulante por la cadena de tracción del tren n , en A.

U_n : Diferencia de tensión entre los extremos de la cadena de tracción del tren n , en kV.

P_n : Potencia eléctrica activa total en el tren n , en kW.

Q_n : Potencia eléctrica reactiva total en el tren n , en kVAR.

S_n : Potencia eléctrica compleja en el tren n , en kW + jkVAR.

λ_n : Factor de potencia del tren n .

P_{SET} : Potencia eléctrica activa en la subestación eléctrica de tracción, en kW.

Q_{SET} : Potencia eléctrica reactiva en la subestación eléctrica de tracción, en kVAR.

S_{SET} : Potencia eléctrica compleja en la subestación eléctrica de tracción, en kW + jkVAR.

$P_{CT,n}$: Potencia eléctrica activa consumida por el circuito de tracción del tren n , en kW.

$Q_{CT,n}$: Potencia eléctrica reactiva consumida por el circuito de tracción del tren n , en kVAr.

$S_{CT,n}$: Potencia eléctrica compleja consumida por el circuito de tracción del tren n , en kW + jkVAr.

T : Ventana temporal de coincidencia de dos trenes en una sección, en min.

T_x : Intervalo de concurrencia de dos trenes en una sección, en min.

d : Desfase entre los tiempos de ingreso de dos trenes en una sección, en min.

$P_{CT,x}$: Potencia eléctrica activa consumida por los circuitos de tracción en concurrencia, en kW.

$Q_{CT,x}$: Potencia eléctrica reactiva consumida por los circuitos de tracción en concurrencia, en kVAr.

$S_{CT,x}$: Potencia eléctrica compleja consumida por los circuitos de tracción en concurrencia, en kW + jkVAr.

P_x : Potencia eléctrica activa de solapamiento, en kW.

Q_x : Potencia eléctrica reactiva de solapamiento, en kVAr.

S_x : Potencia eléctrica compleja de solapamiento, en kW + jkVAr.

E_n : Energía consumida por la cadena de tracción del tren n , en kWh + jkVArh.

E_{SET} : Energía neta suministrada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVArh.

E^+_{SET} : Energía suministrada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVArh.

E^-_{SET} : Energía recuperada por la subestación eléctrica de tracción, en kWh + jkVArh.

$E_{CT,n}$: Pérdida de energía en el circuito de tracción del tren n , en kWh + jkVArh.

$E_{CT,x}$: Pérdida de energía en los circuitos de tracción en concurrencia, en kWh + jkVArh.

5.1 Introducción

La circulación simultánea de dos trenes por una misma sección de electrificación es un hecho relativamente frecuente en las vías de alta velocidad. Cada vez que se produce una coincidencia de dos trenes sus circuitos de tracción se solapan. Como consecuencia de este solapamiento, el circuito de tracción de cada tren soporta una intensidad de corriente diferente a la de su cadena de tracción. Adicionalmente, las pérdidas originadas en la infraestructura de electrificación y la potencia en la subestación eléctrica de tracción son modificadas por el solapamiento de los circuitos de tracción.

Teniendo en cuenta la explotación actual de las líneas de alta velocidad, en este capítulo se analizan los solapamientos resultantes de cada posible caso de coincidencia de dos trenes en una misma sección de electrificación. Ampliando los modelos de los sistemas de electrificación para un único tren desarrollados en el Capítulo 4, se calcula la potencia en la subestación a través de la potencia de solapamiento de los circuitos de tracción. Una vez calculada la potencia en la subestación, se evalúa la pérdida de energía en la infraestructura de electrificación durante el paso de los dos trenes a lo largo de la sección.

A continuación, aplicando diversos desfases temporales entre las trayectorias de los dos servicios ferroviarios, se obtienen distintos periodos y lugares de coincidencia de ambos trenes dentro de una misma sección de electrificación. Comparando los valores de las pérdidas de energía para las distintas posibles coincidencias se encuentran las programaciones que maximizan y minimizan las pérdidas de energía en el sistema de electrificación.

Finalmente, se concluye que es posible reducir la energía que se debe suministrar al sistema ferroviario sin necesidad de modificar las trayectorias individuales de los trenes, simplemente eligiendo el desfase que optimiza la utilización de la potencia de solapamiento.

5.2 Coincidencia de dos trenes en una sección de electrificación

En los sistemas de electrificación en corriente alterna monofásica la línea se divide en secciones eléctricamente aisladas mediante zonas neutras. Cada sección de electrificación es alimentada por un único transformador, ubicado en una subestación eléctrica de tracción, que adapta la tensión de la red de transporte del sistema de suministro eléctrico a los valores adecuados para la tracción ferroviaria.

Aunque el desarrollo de los sistemas de señalización ferroviario permite reducir cada vez más el intervalo entre trenes [EMERY, 2011], las intensidades de tráfico actuales y las elevadas velocidades de circulación en las líneas de alta velocidad hacen poco probable la presencia de más de un tren por sentido en una misma sección de electrificación [KIESSLING, 2008]. Sin embargo, siempre que se crucen dos trenes que circulen en sentidos opuestos, habrá un periodo de tiempo en el que coincidan dentro de la misma sección. Denominaremos ventana temporal de coincidencia T a este intervalo de tiempo.

5.2.1 Sección en plena vía

La circulación de los trenes en plena vía consiste normalmente en el mantenimiento de una velocidad de crucero, ajustada a los límites de la operación, sin aplicación de freno. Entonces, la fuerza de tracción de los trenes es empleada únicamente para compensar la resistencia al avance.

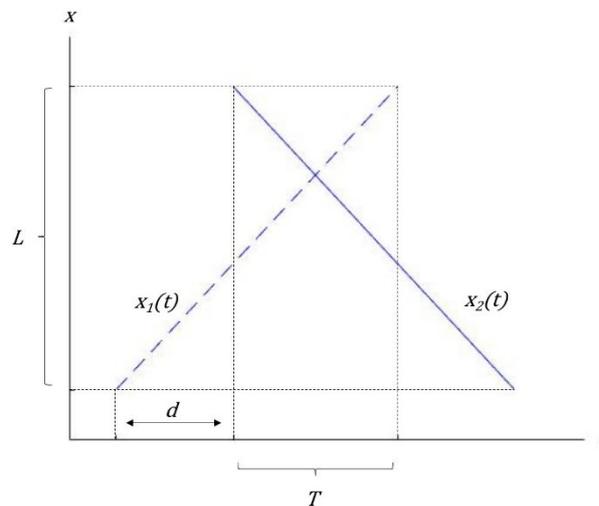


Figura 5.1. Ventana temporal de coincidencia de dos trenes en una sección en plena vía

En la Figura 5.1 se representan las trayectorias de dos trenes que recorren una sección de electrificación en plena vía circulando en sentidos opuestos. El tren 1 ingresa en la sección un tiempo d antes que el tren 2. Como se puede comprobar, la ventana temporal de coincidencia T de ambos trenes depende de la longitud de la sección de electrificación L , de la velocidad de crucero v_{cr} que sigan los trenes y del desfase d entre sus trayectorias.

Suponiendo que los dos trenes coincidentes en la sección circulan a la misma velocidad de crucero, la máxima duración de la ventana temporal de coincidencia se da cuando ambos trenes ingresan simultáneamente en la sección de electrificación. En la Tabla 5.1, se muestran las duraciones máximas de la ventana temporal de coincidencia de dos trenes de alta velocidad en una sección en plena vía, según la longitud de la sección y la velocidad de crucero.

	L = 30 km	L = 45 km
$v_{cr} = 200 \text{ km/h}$	9 min	13,5 min
$v_{cr} = 250 \text{ km/h}$	7 min	11 min
$v_{cr} = 300 \text{ km/h}$	6 min	9 min

Tabla 5.1. Duración máxima de la ventana de coincidencia en una sección en plena vía

5.2.2 Sección con una estación

En las zonas próximas a las estaciones, los trenes llevan a cabo las operaciones de tracción y frenado necesarias durante las salidas y llegadas, respectivamente. Estas operaciones son más lentas que la circulación en plena vía y alargan la permanencia de los trenes dentro de la sección de electrificación.

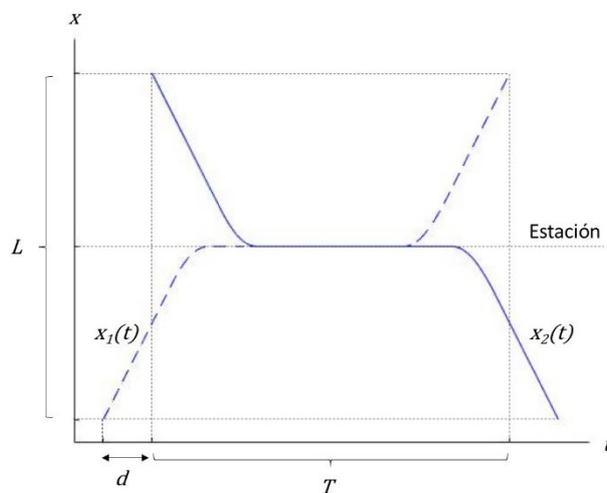


Figura 5.2. Ventana temporal de coincidencia de dos trenes en una sección con estación

En la Figura 5.2 se representan las trayectorias de dos trenes que recorren una sección de electrificación en sentidos opuestos y realizan una parada en una estación situada en el punto medio. El tren 1 ingresa en la sección un tiempo d antes que el tren 2. Por lo tanto, la ventana temporal de coincidencia se extiende desde el momento en que el tren 2 ingresa en la sección hasta que el tren 1 la abandona.

Suponiendo que los tiempos de frenado, de parada y de aceleración, y la velocidad de crucero son iguales para ambos trenes, la máxima duración de la ventana temporal de coincidencia se da cuando ambos trenes ingresan simultáneamente en la sección de electrificación. En la Tabla 5.2, se muestran las duraciones máximas de la ventana temporal de coincidencia de dos trenes de alta velocidad en una sección con una parada de 5 minutos, según la longitud de la sección y la velocidad de crucero.

	L = 30 km	L = 45 km
$v_{cr} = 200$ km/h	13,5 min	17,75 min
$v_{cr} = 250$ km/h	12,5 min	15,75 min
$v_{cr} = 300$ km/h	11,75 min	14,5 min

Tabla 5.2. Duración máxima de la ventana de coincidencia en una sección con estación

5.3 Sistema de electrificación 1x25 kV

5.3.1 Topología de electrificación

Como se ha visto en el Capítulo 4, las subestaciones del sistema 1x25 kV suelen alojar un solo transformador de tracción. En consecuencia, todas las secciones de una línea electrificada mediante el sistema 1x25 kV suelen estar alimentadas desde su punto central. En las líneas dotadas de vía doble, el secundario del transformador se conecta en paralelo a los conductores de ambas vías. Para reducir la impedancia de los conductores del sistema de electrificación y para facilitar la operación, a lo largo de cada sección –normalmente cada 10 kilómetros– se ubican varios puestos de subseccionamiento y puesta en paralelo (PSPP), como se puede observar en la Figura 5.3.

En condiciones normales de explotación, la configuración de los PSPP intermedios pone en paralelo los conductores de ambas vías para reducir las caídas de tensión y las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción de los trenes. Sin embargo, cuando aparece una falta en el sistema de electrificación, se modifica la configuración de estos puestos intermedios para aplicar el subseccionamiento que aisle el defecto y permita que el resto del sistema siga operando. En definitiva, la presencia de aparatos de maniobra en las subestaciones y en los PSPP garantiza un alto nivel de fiabilidad del sistema de electrificación. [HILL, 1994].

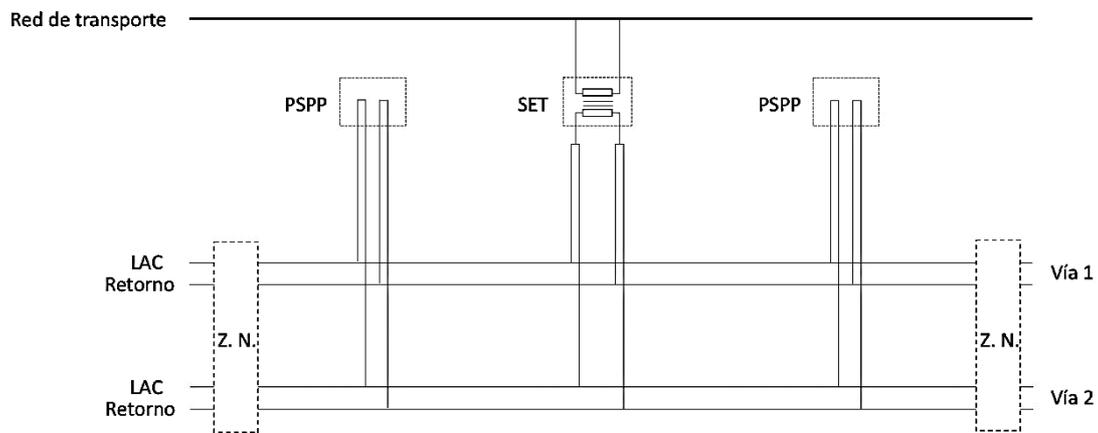


Figura 5.3. Sección de electrificación del sistema 1x25 kV con vía doble

5.3.1.1 Intervalo de concurrencia

Las secciones del sistema de electrificación 1x25 kV son alimentadas desde una subestación que normalmente está situada en el punto central, como se ha representado en la Figura 5.3. Siguiendo esta configuración, las secciones de este sistema de electrificación se extienden a ambos lados de la subestación. Si cada tren está un lado distinto de la subestación sus circuitos de tracción son independientes. Sin embargo, cuando ambos trenes están situados al mismo lado de la subestación se produce un solapamiento de sus circuitos de tracción.

Definiremos el intervalo de concurrencia T_x como el periodo de tiempo en el que se produce interacción entre los circuitos de tracción de los dos trenes presentes en la sección de electrificación. En el sistema de electrificación 1x25 kV el intervalo de concurrencia se reduce a la parte de la ventana de coincidencia en la que los dos trenes se encuentran al mismo lado de la subestación.

5.3.2 Modelo de una sección de electrificación con dos trenes

Como se ha expuesto anteriormente, suponemos que la red de transporte del sistema de suministro eléctrico es lo suficientemente robusta para ignorar la influencia que las cargas de la red eléctrica ferroviaria puedan ejercer sobre ella. En consecuencia, se puede analizar una sección de electrificación de forma independiente al resto de secciones de una línea ferroviaria. Para considerar el caso de dos trenes presentes simultáneamente en una misma sección de electrificación, circulando en sentidos opuestos y por vías distintas, se debe ampliar el modelo de trabajo desarrollado hasta el momento.

Suponiendo iguales las impedancias de los conductores de ambas vías y teniendo en cuenta la presencia de los puntos de puesta en paralelo, el circuito de tracción correspondiente a un único tren en circulación estaría formado por dos ramas paralelas que se reparten la corriente en partes iguales [MINGPRUK, 2016].

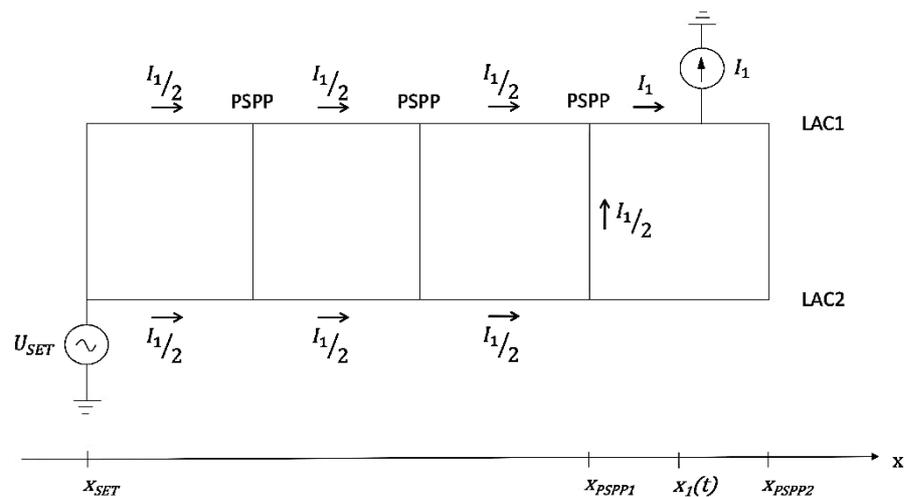


Figura 5.4. Reparto de corrientes en el circuito de tracción de un tren en vía doble

En esta topología de electrificación, el circuito de tracción representado en la Figura 5.4 se puede dividir en dos partes: las subsecciones entre la subestación y el PSPP inmediatamente anterior a la posición del tren, en las que la corriente circula en paralelo por los conductores de ambas vías, y la subsección donde se encuentra el tren, en la que la corriente circula por los conductores de una única vía. Reduciendo la primera parte del circuito de tracción

mediante la asociación en paralelo de los conductores de ambas vías, se obtiene un circuito de tracción cuya impedancia es equivalente a la de una única vía. Por lo tanto, el modelo desarrollado en el Capítulo 4 para un solo tren en vía única es igualmente válido para un solo tren en vía doble.

En la Figura 5.5 se ha representado el modelo de una sección de electrificación en vía doble por la que circulan dos trenes simultáneamente. En los modelos para un solo tren en vía única desarrollados en el Capítulo 4, se dedujo la existencia de una relación lineal entre los valores de la tensión y de la intensidad de corriente en el circuito de tracción a través de la impedancia equivalente. Esta linealidad puede ser aprovechada para aplicar el principio de superposición en el modelo con dos trenes que ahora queremos desarrollar [Hsi, 1999]. El principio de superposición nos permite conocer los valores de la tensión y de la intensidad de corriente en cualquier punto del circuito de tracción como la suma algebraica de estas mismas magnitudes debidas a cada una de las fuentes independientes actuando por separado. Igual que en los modelos de trabajo anteriormente desarrollados para un único tren en circulación, la subestación eléctrica de tracción se modela como una fuente de tensión de potencia infinita y los trenes mediante fuentes de corriente ideales cuyas intensidades se deducen a partir de sus potencias instantáneas, que han de ser previamente conocidas.

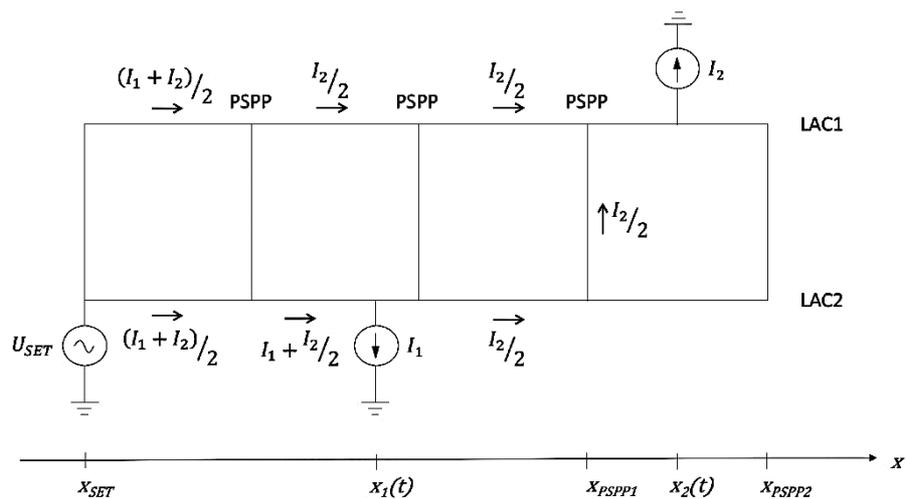


Figura 5.5. Modelo de una sección de electrificación con dos trenes en vía doble

De esta forma, se hallan las ecuaciones lineales de (5.1) que relacionan los valores de las tensiones y de las intensidades de corriente en las cadenas de tracción de los dos trenes durante el intervalo de concurrencia. La notación utilizada designa como tren 1 al tren más próximo a la subestación en cada instante. Por lo tanto, se ha de tener en cuenta el momento de cruce de ambos trenes para invertir su denominación –el tren 2 pasa a ser tren 1–.

$$\begin{bmatrix} U_1(t) \\ U_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{SET} \\ U_{SET} \end{bmatrix} - \mathbf{Z}(t) \begin{bmatrix} I_1(t) \\ I_2(t) \end{bmatrix}, t \in T_x \quad (5.1)$$

Tensiones e intensidades de corriente de los dos trenes durante el intervalo de concurrencia

Cuando sólo existe un tren en la sección de electrificación, la intensidad de corriente por su circuito de tracción y por su cadena de tracción es la misma. Sin embargo, la presencia de un segundo tren en la misma sección de electrificación hace que su circuito de tracción soporte una intensidad de corriente diferente a la de su cadena de tracción. Esto es debido a que durante el intervalo de concurrencia los circuitos de tracción de ambos trenes se solapan parcialmente y las corrientes de sus cadenas de tracción se suman en el segmento común. En consecuencia, la tensión en la cadena de tracción de cada tren también es modificada por la corriente debida la presencia del otro tren en la sección.

Si en un instante de tiempo ambos trenes se hallan ejerciendo fuerza de tracción, las corrientes de ambos circuitos de tracción fluyen en el mismo sentido y reducen mutuamente la tensión en sus cadenas de tracción. En cambio, si uno de los dos trenes realiza un frenado eléctrico regenerativo, aumenta la tensión en su cadena de tracción e invierte el sentido de su corriente. Este frenado eléctrico regenerativo contribuye a elevar la tensión en la cadena de tracción del otro tren. La matriz de impedancias expresada en (5.2) recoge esta influencia mutua entre los dos circuitos de tracción.

$$\mathbf{Z}(t) = \begin{bmatrix} Z_{SET} \\ Z_{SET} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{CT,1}(t) & Z_{12}(t) \\ Z_{21}(t) & Z_{CT,2}(t) \end{bmatrix}, t \in T_x \quad (5.2)$$

Matriz de impedancias durante el intervalo de concurrencia

La matriz de impedancias $\mathbf{Z}(t)$ es variable en el tiempo debido al movimiento de los trenes. Los valores de los términos en la diagonal principal de esta matriz son las impedancias equivalentes de los circuitos de tracción de ambos trenes. Por otro lado, denominaremos coeficientes de solapamiento a los valores de los términos en la diagonal secundaria de la matriz de impedancias. Los coeficientes de solapamiento toman los valores expresados en (5.3) y (5.4), que cuantifican la influencia mutua entre los circuitos de tracción.

$$Z_{12}(t) = \begin{cases} Z_x(t), & [x_1(t)] = [x_2(t)], t \in T_x \\ \frac{Z_{CT,1}(t) + Z_x(t)}{2}, & [x_1(t)] \neq [x_2(t)], t \in T_x \end{cases} \quad (5.3)$$

$$Z_{21}(t) = Z_x(t), t \in T_x \quad (5.4)$$

Coeficientes de solapamiento

La impedancia $Z_x(t)$ es la impedancia de solapamiento por subsecciones, es decir, la impedancia de la parte de la sección de electrificación a lo largo de la que discurre la misma intensidad corriente en paralelo por ambas vías. Entonces, la impedancia de solapamiento por subsecciones $Z_x(t)$ es la impedancia de las subsecciones completas que se encuentran entre la subestación y la posición del primer tren, es decir, del tren más próximo a la subestación.

La impedancia $Z_{CT,1}(t)$ es la impedancia del circuito de tracción completo del tren más próximo a la subestación. En consecuencia, la impedancia $Z_{CT,1}(t)$ siempre es mayor que la impedancia de solapamiento $Z_x(t)$.

Los coeficientes de solapamiento $Z_{12}(t)$ y $Z_{21}(t)$, que cuantifican la influencia mutua entre los circuitos de tracción de ambos trenes, dependen en cada instante de la posición del tren más próximo a la subestación, es decir, $x_1(t)$. Como se puede observar en (5.3), en el caso de que los dos trenes se encuentren en la misma subsección, los valores de los coeficientes $Z_{12}(t)$ y $Z_{21}(t)$ se igualan. Estos dos valores permanecen constantes mientras ambos trenes permanezcan dentro de la misma subsección.

Particularizando las expresiones (5.3) y (5.4) con las expresiones desarrolladas en el Capítulo 4 para la impedancia en el sistema de electrificación 1x25 kV, se obtienen los coeficientes de solapamiento en función de las posiciones de los trenes.

$$Z_{12}(t) = \begin{cases} (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) ([x_1(t)] - x_{SET}), & [x_1(t)] = [x_2(t)], t \in T_x \\ (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) \frac{(x_1(t) + [x_1(t)] - 2x_{SET})}{2}, & [x_1(t)] \neq [x_2(t)], t \in T_x \end{cases} \quad (5.5)$$

$$Z_{21}(t) = (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) ([x_1(t)] - x_{SET}), t \in T_x \quad (5.6)$$

Coeficientes de solapamiento en el sistema 1x25 kV

En el Capítulo 4, se han expuesto los valores típicos para las impedancias unitarias \bar{Z}_{LAC} y \bar{Z}_C de un sistema de electrificación 1x25 kV en vía única. Sin embargo, estos valores varían ligeramente en el caso de vía doble pues el número de conductores empleados y su disposición geométrica es diferente [KNESCHKE, 2004].

5.3.3 Potencia en una sección de electrificación 1x25 kV

5.3.3.1 Potencia en la subestación de tracción

Durante la operación del sistema ferroviario, cada tren desarrolla su trayectoria a lo largo de las secciones de electrificación ejerciendo fuerzas de tracción y de frenado variables en el tiempo. Estos esfuerzos son posibles por los intercambios de potencia que realiza su cadena de tracción a través del sistema de electrificación: durante la tracción consume potencia eléctrica y en el frenado eléctrico regenerativo produce potencia eléctrica. Cuando el tren circula solo por una sección de electrificación, como se ha expresado en (4.11), la potencia en la subestación $S_{SET}(t)$ está determinada por la potencia en la cadena de tracción del tren $S_n(t)$ –exigida por su trayectoria– y por la impedancia de su circuito de tracción $Z_{CT,n}(t)$ –impuesta por la topología de electrificación–.

En cambio, si dos trenes circulan simultáneamente por la sección, se produce un solapamiento de sus circuitos de tracción y los intercambios individuales de potencia de cada tren con la subestación están influidos adicionalmente por la trayectoria del otro tren. Como se puede observar en las expresiones (5.7) y (5.8), la potencia eléctrica intercambiada por cada tren con la subestación durante el intervalo de concurrencia puede ser expresada como la suma de tres términos:

1. Potencia en la cadena de tracción del tren.
2. Potencia consumida por su circuito de tracción debida exclusivamente a la corriente de su cadena de tracción.
3. Potencia debida al solapamiento con el circuito de tracción del otro tren.

$$S_{SET,1}(t) = S_1(t) + Z_{CT,1}(t) |I_1(t)|^2 + Z_{12}(t) I_2(t) I_1^*(t), t \in T_x \quad (5.7)$$

$$S_{SET,2}(t) = S_2(t) + Z_{CT,2}(t) |I_2(t)|^2 + Z_{21}(t) I_1(t) I_2^*(t), t \in T_x \quad (5.8)$$

Potencia intercambiada entre cada tren y la subestación durante el intervalo de concurrencia

El primer término de las expresiones (5.7) y (5.8) corresponde a la potencia en la cadena de tracción de cada tren, cuyo valor depende exclusivamente de la trayectoria seguida. El segundo término representa la pérdida ocasionada en el circuito de tracción de cada tren durante el intercambio de potencia con la subestación. El tercer término modifica esta pérdida de potencia por la influencia del otro tren presente en la sección de electrificación.

Sumando las expresiones (5.7) y (5.8) se obtiene la potencia en la subestación eléctrica de tracción, que puede ser formulada en la expresión (5.9) como la suma de las potencias en las cadenas de tracción de ambos trenes, $S_1(t)$ y $S_2(t)$, más la potencia total consumida por ambos circuitos de tracción en concurrencia, $S_{CT,x}(t)$.

$$S_{SET}(t) = S_1(t) + S_2(t) + S_{CT,x}(t), t \in T_x \quad (5.9)$$

Potencia en la subestación durante el intervalo de concurrencia

5.3.3.1.1 Sección en plena vía

Cuando los trenes circulan en plena vía, generalmente su velocidad suele ser constante y sus motores funcionan en régimen de tracción a potencia constante. Por tanto, si dos trenes coinciden en una misma sección de electrificación en plena vía, las potencias activas consumidas por sus cadenas de tracción $P_n(t)$ serán constantes durante sus recorridos. Sin embargo, las pérdidas de potencia activa que se originen en sus circuitos de tracción serán variables en el tiempo pues dependerán de la distancia de cada tren a la subestación y de la

superposición que se produzca. Como se puede comprobar en las trayectorias de ambos trenes, representadas en la parte superior de la Figura 5.6, el intervalo de concurrencia T_x comienza en el instante t_3 , cuando el tren 2 ingresa en la sección, y finaliza en el instante t_6 , cuando el tren 1 abandona la sección. Entre estos dos instantes de tiempo, t_3 y t_6 , ambos trenes permanecen en el mismo lado de la subestación y sus circuitos de tracción se solapan. La potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ durante el intervalo de concurrencia equivale a la suma de las potencias activas en la cadena de tracción de cada tren $P_n(t)$, más la potencia activa consumida por los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$. En la parte inferior de la Figura 5.6, se observan dos discontinuidades de la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ en los instantes t_4 y t_5 . Como se detallará en el análisis de la potencia activa consumida por los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$, representada en la Figura 5.8, estas discontinuidades tienen su origen en los cambios de subsección de los trenes.

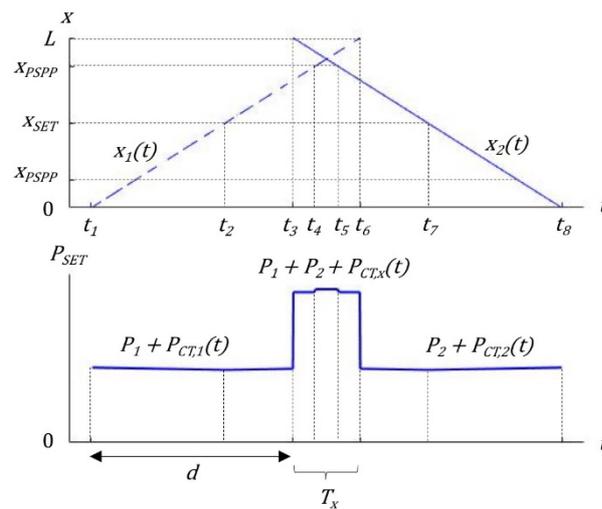


Figura 5.6. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV en plena vía

Fuera del intervalo de concurrencia, la potencia activa que suministra la subestación $P_{SET}(t)$ corresponde a la suma de la potencia activa consumida por la cadena de tracción del tren presente en la sección P_n , más la pérdida de potencia activa en su circuito de tracción, $P_{CT,n}(t)$. Esta pérdida de potencia activa es variable en el tiempo debido a la variación de la impedancia del circuito de tracción $Z_{CT,n}(t)$ por el movimiento de cada tren. Como se aprecia en la parte inferior de la Figura 5.6, desde el instante t_1 hasta el instante t_3 sólo circula el

tren 1, y la pérdida de potencia activa $P_{CT,1}(t)$ se hace mínima en el instante t_2 , es decir, cuando el tren 1 pasa por delante de la subestación. De igual manera, entre los instantes t_6 y t_8 sólo circula el tren 2 y la pérdida de potencia activa es mínima cuando pasa por delante de la subestación, en el instante t_7 .

5.3.3.1.2 Sección con una estación

Un tren que circula por una sección de electrificación que contiene una estación con parada lo hará en uno de estos tres posibles estados: tracción a la salida de la estación, velocidad de crucero o frenado en la aproximación a la estación. Cuando dos trenes coinciden en una misma sección electrificación, sólo se producirá solapamiento de sus circuitos de tracción si ambos trenes se encuentren en circulación simultánea en el mismo lateral de la sección, es decir, al mismo lado de la subestación.

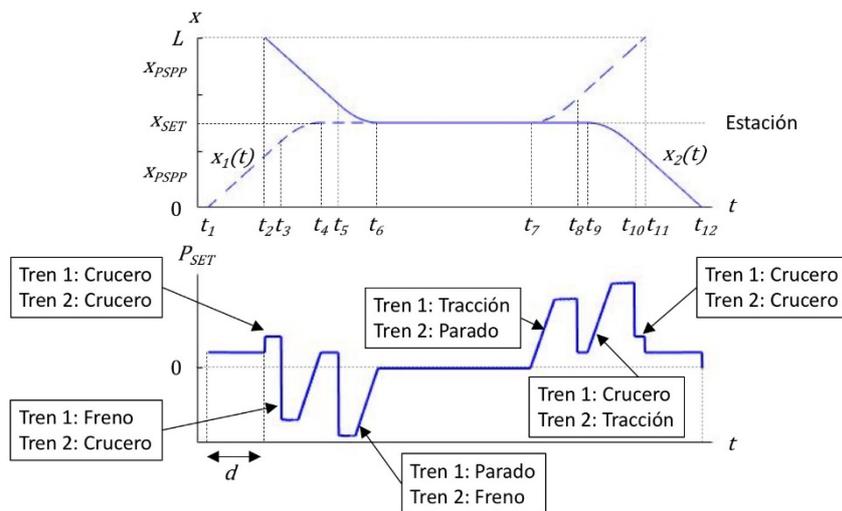


Figura 5.7. Potencia activa en la subestación de una sección 1x25 kV con estación

En parte inferior de la Figura 5.7, se identifican cuatro intervalos en los que sobresalen los valores de la potencia activa $P_{SET}(t)$ manejada por la subestación eléctrica. Por orden cronológico, en la parte superior de la Figura 5.7 se pueden asociar estos intervalos a los siguientes eventos: entre los instantes t_3 y t_4 la frenada en la llegada del tren 1 a la estación, entre los instantes t_5 y t_6 la frenada en la llegada del tren 2 a la estación, entre los instantes t_7 y t_8 la tracción del tren 1 en la salida de la estación y entre los instantes t_9 y t_{10} la tracción del tren 2 en la salida de la estación. Adicionalmente, se observan dos intervalos –uno, entre los instantes t_2 y t_3 , y otro, entre los instantes t_{10} y t_{11} – en los que ambos trenes circulan a

velocidad de crucero. La parte central de la Figura 5.7, entre los instantes t_6 y t_7 , se corresponde con el periodo de tiempo durante el que los dos trenes están parados en la estación.

Esta combinación de las trayectorias de los dos trenes da lugar a una ventana temporal de coincidencia entre los instantes t_2 y t_{11} . Sin embargo, ambos trenes se encuentran a distinto lado de la subestación durante toda la ventana temporal de coincidencia. El cruce de las dos trayectorias se produce durante la parada de ambos trenes, en la ubicación de la subestación, no dando lugar al solapamiento de sus circuitos de tracción en ningún momento. En definitiva, no existe intervalo de concurrencia entre los dos trenes y, en el cálculo de la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$, se consideran las potencias activas consumidas por cada circuito de tracción individualmente, $P_{CT,n}(t)$.

5.3.3.2 Potencia consumida por los circuitos de tracción

Fuera del intervalo de concurrencia, es decir, cuando no existe solapamiento de los circuitos de tracción la potencia consumida por el circuito de tracción de cada tren $S_{CT,n}(t)$ se evalúa mediante la expresión (4.14). Dentro del intervalo de concurrencia, por el contrario, el solapamiento de los circuitos de tracción obliga a considerar las expresiones (5.7) y (5.8). En la expresión (5.10), deducida a partir de las anteriores, se observa que la potencia consumida por dos circuitos de tracción en concurrencia $S_{CT,x}(t)$ consiste en la suma de las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción debidas a las corrientes propias más las ajenas.

$$S_{CT,x}(t) = Z_{CT,1}(t) |I_1(t)|^2 + Z_{CT,2}(t) |I_2(t)|^2 + S_x(t), t \in T_x \quad (5.10)$$

Potencia consumida por ambos circuitos de tracción durante el intervalo de concurrencia

Denominamos potencia de solapamiento $S_x(t)$ a la parte de las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción que tiene su origen en la circulación de corrientes ajenas. La expresión (5.11) recoge el valor de la potencia de solapamiento $S_x(t)$ durante el intervalo de concurrencia de dos trenes en una misma sección de electrificación.

$$S_x(t) = \begin{cases} 2 |I_1(t)|^2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} Z_x, & [x_1(t)] = [x_2(t)], t \in T_x \\ 2 |I_1(t)|^2 \left[\operatorname{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} Z_x(t) + \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \frac{Z_{CT,1}(t) - Z_x(t)}{4} \right], & [x_1(t)] \neq [x_2(t)], t \in T_x \end{cases} \quad (5.11)$$

Potencia de solapamiento de los circuitos de tracción

Si, en un determinado instante, los dos trenes presentes en la sección ejercen fuerza de tracción, los dos flujos de corriente $I_1(t)$ e $I_2(t)$ se dirigen desde la subestación hacia los trenes. Como se puede comprobar en (5.11), la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es positiva. Aplicando este resultado en (5.10), se concluye que aumenta la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,x}(t)$. En consecuencia, debe aumentar la potencia activa total P_{SET} que se suministra desde la subestación, tal y como se observa en (5.9). De forma análoga, si ambos trenes realizan simultáneamente un frenado eléctrico regenerativo, los dos flujos de corriente $I_1(t)$ e $I_2(t)$ son conducidos desde los trenes hacia la subestación. La potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ según (5.11) también resulta positiva en este caso, y la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,x}(t)$ expresada en (5.10) se incrementa. Como se puede comprobar en (5.9), el solapamiento hace que la potencia activa total $P_{SET}(t)$ recibida por la subestación se reduzca.

Sin embargo, si uno de los trenes se encuentra en tracción y el otro en frenado eléctrico regenerativo, los flujos de corriente $I_1(t)$ e $I_2(t)$ se establecen con sentidos opuestos. Entonces, el solapamiento de ambos circuitos de tracción hace posible la transmisión de potencia desde la cadena de tracción del tren generador –el que frena– hacia la del tren consumidor –el que ejerce tracción–. Como se puede comprobar en (5.11), la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ resulta negativa en este caso, lo que contribuye a reducir la pérdida activa en los circuitos de tracción $P_{CT,x}(t)$, según (5.10). En la expresión (5.9), se comprueba que el solapamiento en este caso produce un ahorro en la potencia activa total $P_{SET}(t)$ que debe suministrar la subestación.

En la Tabla 5.3 se resume el efecto del solapamiento de los dos circuitos de tracción sobre la potencia activa de solapamiento. Cuando las corrientes de ambas cadenas de tracción siguen el mismo sentido, la potencia activa de solapamiento es positiva y se produce una pérdida adicional de potencia activa en el sistema eléctrico ferroviario. En cambio, si los sentidos de las corrientes son opuestos, la potencia activa de solapamiento es negativa y se reduce la potencia activa total en la subestación, suponiendo un ahorro de potencia en el sistema eléctrico ferroviario.

	$\text{Re} \{I_1(t)\} > 0$	$\text{Re} \{I_1(t)\} < 0$
$\text{Re} \{I_2(t)\} > 0$	$P_x(t) > 0$	$P_x(t) < 0$
$\text{Re} \{I_2(t)\} < 0$	$P_x(t) < 0$	$P_x(t) > 0$

Tabla 5.3. Potencia activa de solapamiento en función de las corrientes $I_1(t)$ e $I_2(t)$

En la parte superior de (5.11), se observa que la potencia de solapamiento $S_x(t)$ permanece constante cuando ambos trenes circulan dentro de una misma subsección y las corrientes en sus cadenas de tracción, $I_1(t)$ e $I_2(t)$, no varían. Por el contrario, en la parte inferior de (5.11), se puede apreciar que cuando los dos trenes están en distintas subsecciones la potencia de solapamiento $S_x(t)$ varía, aunque las intensidades en sus cadenas de tracción, $I_1(t)$ e $I_2(t)$, sean constantes.

Como se observa en (5.11), además de las corrientes en ambos circuitos de tracción, las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$ también determinan la magnitud de la potencia de solapamiento $S_x(t)$. Los valores instantáneos de las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$ dependen de la posición del tren más próximo a la subestación, $x_1(t)$. Cuando los dos trenes coinciden en una zona alejada de la subestación, las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$ toman valores elevados y, en consecuencia, la potencia de solapamiento $S_x(t)$ aumenta. Al contrario, si la zona de coincidencia de ambos trenes se sitúa en las proximidades de la subestación, los valores de las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$ son bajos y se reduce potencia de solapamiento $S_x(t)$.

Para el caso concreto del sistema de electrificación 1x25 kV, el valor de la impedancia de solapamiento $S_x(t)$ mostrado en (5.12) se obtiene particularizando la expresión general (5.11) con las expresiones desarrolladas en el Capítulo 4.

$$S_x(t) = \begin{cases} 2 |I_1(t)|^2 (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) \text{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} ([x_1(t)] - x_{SET}), & [x_1(t)] = [x_2(t)], t \in T_x \\ 2 |I_1(t)|^2 (\bar{Z}_{LAC} + \bar{Z}_C) \left[\text{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} ([x_1(t)] - x_{SET}) + \right. \\ \left. + \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \frac{x_1(t) - [x_1(t)]}{4} \right], & [x_1(t)] \neq [x_2(t)], t \in T_x \end{cases} \quad (5.12)$$

Potencia de solapamiento de los circuitos de tracción en el sistema 1x25 kV

5.3.3.2.1 Sección en plena vía

En la parte superior de la Figura 5.8, se representan las mismas trayectorias que en la Figura 5.6, correspondientes a dos trenes que recorren una sección en plena vía electrificada según el sistema 1x25 kV. El intervalo de concurrencia se sitúa en el centro del intervalo temporal representado, es decir, entre los instantes t_3 y t_6 . Fuera del intervalo de concurrencia no existe solapamiento de los circuitos de tracción de los dos trenes y, entonces, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,n}(t)$ sólo depende de la distancia de cada tren a la subestación.

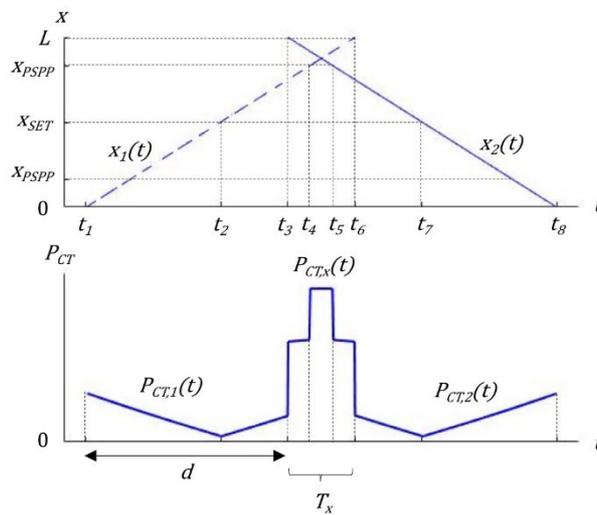


Figura 5.8. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV en plena vía

Durante el intervalo de concurrencia, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ equivale a la suma de la potencia consumida por las cadenas de tracción de ambos trenes, $P_1 + P_2$, más las pérdidas de potencia activa en los circuitos de tracción en concurrencia, $P_{CT,x}(t)$. Dado que ambos trenes ejercen fuerza de tracción simultáneamente, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es positiva. Como se puede ver en parte inferior de la Figura 5.8, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,x}(t)$ varía en el tiempo por el movimiento de los trenes. La evolución de $P_{CT,x}(t)$ observada es el resultado de una doble influencia: la variación continua de $x_1(t)$ y la variación discontinua debida a los saltos de $\lfloor x_1(t) \rfloor$ en cada cambio de subsección del tren más cercano a la subestación. Como se puede apreciar en (5.12), cada paso de un tren por un PSPP produce una discontinuidad

en la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ y, en consecuencia, también en la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$. En la parte superior de la Figura 5.8 se pueden identificar los instantes de las trayectorias en los que se producen las dos discontinuidades observadas en la pérdida de potencia activa: en el instante t_4 , cuando el tren 1 pasa a la subsección más alejada de la subestación, y en el instante t_5 , cuando el tren 2 –que, tras el cruce de ambos trenes, se ha convertido en el tren más cercano a la subestación– pasa a la subsección más cercana a la subestación.

Entre los intervalos t_4 y t_5 , en la parte central del intervalo de concurrencia T_x , la pérdida de potencia activa $P_{CT,x}(t)$ es prácticamente constante pues la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ casi no varía. Dentro del intervalo de concurrencia, a ambos lados de su parte central, se identifican dos subintervalos temporales. En el subintervalo entre los instantes t_3 y t_4 , se observa que la pérdida de potencia activa $P_{CT,x}(t)$ aumenta con el tiempo. Esto es debido al aumento de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ a medida que el tren 1 se aleja de la subestación. Por el contrario, en el subintervalo entre los instantes t_5 y t_6 se observa una reducción de la pérdida de potencia activa $P_{CT,x}(t)$. En este caso, el tren 2 –que ya es el tren más próximo a la subestación tras el cruce de ambos trenes– se acerca a la subestación y, por tanto, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ disminuye.

5.3.3.2.2 Sección con una estación

Las trayectorias representadas en la parte superior de la Figura 5.9 son las mismas que en la Figura 5.7. Esta combinación de trayectorias, correspondientes a dos trenes que recorren una sección 1x25 kV con una estación en su punto medio, da lugar a una ventana temporal de coincidencia entre los instantes t_2 y t_{11} . Sin embargo, ambos trenes se encuentran a distinto lado de la subestación durante toda la ventana temporal de coincidencia. En consecuencia, no existe intervalo de concurrencia, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es nula en todo momento y la potencia activa consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,n}(t)$ es debida exclusivamente a las corrientes propias de cada tren.

En la parte inferior de la Figura 5.9 se puede observar que las pérdidas en los circuitos de tracción presentan tendencias de crecimiento según la evolución de la distancia de cada tren a la subestación y, al no haber solapamiento, no aparece ninguna discontinuidad.

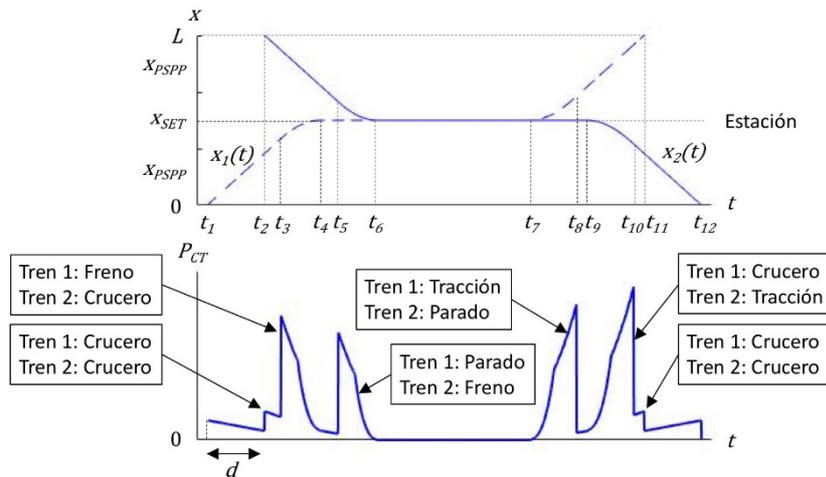


Figura 5.9. Pérdida de potencia activa en una sección 1x25 kV con estación

Entre los instantes t_2 y t_3 ambos trenes circulan a velocidad de crucero acercándose a la subestación, dando lugar a unas pérdidas de potencia activa en sus circuitos de tracción $P_{CT,n}(t)$ decrecientes en el tiempo. Durante el frenado del tren 1, entre los instantes t_3 y t_4 , la pérdida de potencia activa en su circuito de tracción $P_{CT,1}(t)$ se reduce por dos causas. En primer lugar, la reducción de la distancia entre el tren y la subestación hace que la tendencia de la pérdida de potencia activa $P_{CT,1}(t)$ sea decreciente. En segundo lugar, como ha sido analizado en el Capítulo 4 y se puede apreciar claramente en la parte inferior de la Figura 5.7, el frenado del tren 1 se desarrolla en dos regímenes: una fase inicial con potencia constante y una fase final con par constante, en la que la potencia se va reduciendo. En la parte inferior de la Figura 5.9, se aprecia la caída de la pérdida de potencia activa $P_{CT,1}(t)$ a medida que se reduce la potencia activa de frenado $P_1(t)$ en la fase final correspondiente al régimen de par constante. El frenado del tren 2 se desarrolla de forma análoga entre los instantes t_5 y t_6 . La pérdida de potencia activa total $P_{CT}(t)$ representada en la parte inferior de la Figura 5.9 es menor en este caso ya que el tren 1 se encuentra detenido en la estación y por su circuito de tracción no circula corriente.

Entre los instantes t_7 y t_8 se produce la salida del tren 1 de la estación con una tracción que se desarrolla en dos fases: inicialmente a par constante, con potencia activa $P_1(t)$ decreciente, y después a potencia activa $P_1(t)$ constante. La pérdida de potencia activa en el circuito de tracción $P_{CT,1}(t)$ aumenta en todo momento debido a que el tren 1 se aleja de la subestación. En la parte inferior de la Figura 5.9 se aprecia que el aumento de $P_{CT,1}(t)$ es más rápido durante el régimen de par constante pues el incremento de la potencia activa del tren $P_1(t)$

implica un aumento de la corriente circulante por su circuito de tracción $I_1(t)$. La salida del tren 2 de la estación se produce entre los instantes t_9 y t_{10} y es similar en términos de pérdida de potencia. Los valores obtenidos para la pérdida de potencia activa total $P_{CT}(t)$ son mayores durante la salida del tren 2 pues se deben sumar las pérdidas debidas al circuito de tracción del tren 1, que circula a velocidad de crucero. Finalmente, entre los instantes t_{10} y t_{11} , ambos trenes circulan a velocidad de crucero alejándose de la subestación. En consecuencia, se observa una tendencia creciente de la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción.

5.3.4 Balance energético en una sección de electrificación 1x25 kV

Cuando dos trenes pasan por una sección de electrificación sin que se produzca solapamiento de sus circuitos de tracción, es decir, sin que exista intervalo de concurrencia, el balance energético de cada tren con la subestación puede ser analizado independientemente a través de la expresión (4.15) presentada en el Capítulo 4. En este caso, el balance energético en la subestación de tracción equivale a la suma de los balances energéticos individuales correspondientes al paso de cada tren.

Por el contrario, si durante el paso de los dos trenes por la sección se produce solapamiento de sus circuitos de tracción, el balance energético en la subestación de tracción debe ser analizado diferenciando dos periodos de tiempo: el intervalo de concurrencia, correspondiente a la parte de la ventana temporal de coincidencia en la que hay solapamiento de los circuitos de tracción, y el intervalo de tiempo restante que necesitan los dos trenes para completar su recorrido por la sección de electrificación.

5.3.4.1 Energía suministrada por la subestación

En caso de que los dos trenes recorran la sección de electrificación sin producirse un intervalo de concurrencia, la energía neta suministrada por la subestación puede ser obtenida mediante la expresión (4.15). Denominaremos $E_{SET,0}$ a la energía neta suministrada por la subestación para el paso de los dos trenes a lo largo de la sección de electrificación cuando no existe intervalo de concurrencia.

La energía neta suministrada por la subestación durante el intervalo de concurrencia, tal y como se expresa en (5.13), se corresponde con la suma de dos términos:

1. Energía consumida por las cadenas de tracción de los dos trenes presentes en la sección, E_1 y E_2 .
2. Pérdida de energía en los circuitos de tracción en concurrencia, $E_{CT,x}$.

El primer término depende exclusivamente de la trayectoria individual de cada tren, cuyo desarrollo establece unívocamente su consumo energético individual. El segundo término depende de la superposición de los circuitos de tracción, que resulta de la combinación espacio-temporal de las trayectorias de ambos trenes.

$$E_{SET} = E_1 + E_2 + E_{CT,x}(d) \quad (5.13)$$

Energía neta suministrada por la subestación dentro del intervalo de concurrencia

Por otro lado, considerando aquellas fases de frenado de uno de los trenes durante las que la subestación puede recuperar energía, se puede expresar la energía neta suministrada por la subestación E_{SET} como la suma de dos términos: la energía eléctrica efectivamente suministrada durante las fases de tracción E_{SET}^+ y la energía eléctrica recuperada en las fases de frenado eléctrico E_{SET}^- . Fuera del intervalo de concurrencia estos dos términos se obtienen a través de las expresiones (4.15a) y (4.15b). Dentro del intervalo de concurrencia estos dos términos se calculan en (5.13a) y (5.13b).

$$E_{SET}^+ = \int_0^T [S_1(t) + S_2(t) + S_{CT,x}(t)] dt, P_{SET}(t) > 0 \quad (5.13a)$$

$$E_{SET}^- = \int_0^T [S_1(t) + S_2(t) + S_{CT,x}(t)] dt, P_{SET}(t) < 0 \quad (5.13b)$$

Energía eléctrica suministrada (a) y recuperada (b) por la subestación dentro del intervalo de concurrencia

5.3.4.1.1 Sección en plena vía

En la parte superior de la Figura 5.10, se muestra la duración el intervalo de concurrencia T_x para cada posible valor del desfase d entre los tiempos de ingreso de ambos trenes en una sección de electrificación del sistema 1x25 kV. Un desfase positivo indica que el tren que ingresa en la sección desde la posición 0 lo hace antes que el tren que ingresa por el extremo

opuesto, es decir, desde la posición L . Al contrario, un desfase negativo indica que el tren que avanza desde la posición L es el primero en ingresar. Dado que ambos trenes circulan a la misma velocidad y la subestación está situada en el punto medio de la sección de electrificación, la duración del intervalo de concurrencia es una función par respecto al desfase d .

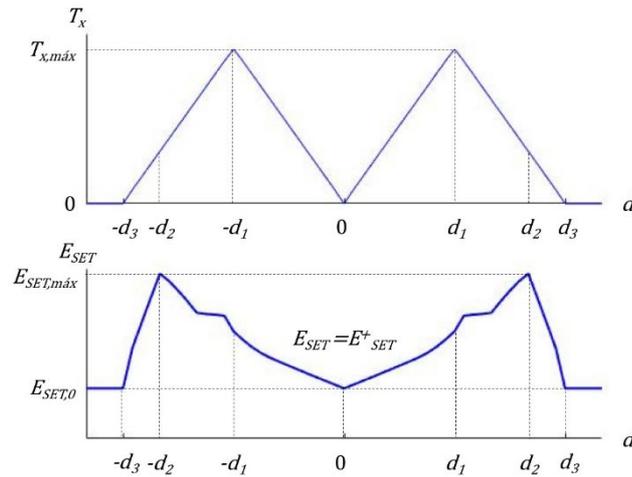


Figura 5.10. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV en plena vía

Como se puede observar en parte superior de la Figura 5.12, cuando el desfase d es nulo, no existe intervalo de concurrencia. Esto es debido a que ambos trenes ingresan simultáneamente en la sección y se cruzan en el punto medio de la sección. En consecuencia, no existe ningún instante en el que se encuentren en el mismo lateral de la subestación. A medida que aumenta el desfase d , el primer tren pasa por el punto medio de la sección antes que el segundo, dando lugar a un breve intervalo de concurrencia en el que ambos trenes coinciden en el mismo lateral de la subestación. La duración del intervalo concurrencia T_x aumenta con el desfase d hasta llegar a un máximo en el desfase d_1 . La duración máxima del intervalo de concurrencia $T_{x,máx}$ se produce cuando el ingreso del segundo tren en la sección coincide con el paso del primer tren por el punto medio de la sección. El desfase d_1 es el tiempo que necesita el primer tren para recorrer la mitad de la sección.

Para desfases superiores a d_1 , el segundo tren ingresa en la sección más tarde del paso del primer tren por el punto medio de la sección. En consecuencia, si el desfase es superior a d_1 se reduce la duración del intervalo de concurrencia. Esta reducción continúa con el aumento

del desfase hasta que se llega al desfase d_3 , que hace desaparecer el intervalo de concurrencia. Dado que este desfase d_3 es el tiempo que tarda el primer tren en recorrer toda la sección, no se produce ningún instante en el que ambos trenes coincidan dentro de la sección. Los desfases superiores a d_3 no generan ningún intervalo de concurrencia.

En la parte inferior de la Figura 5.10, se muestra la energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} para el paso de los dos trenes por la sección a velocidad de crucero. Dado que los trenes no llevan a cabo ningún frenado en sus trayectorias, la energía neta suministrada por la subestación E_{SET} coincide con la energía efectivamente suministrada E^+_{SET} . Por otro lado, la energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} es una función par respecto al desfase d ya que ambos trenes circulan a la misma velocidad y la subestación está situada en el punto medio de la sección de electrificación.

Como se puede observar en la parte inferior de la Figura 5.10, en los escenarios correspondientes a desfases donde no sucede ningún intervalo de concurrencia la energía activa neta suministrada es $E_{SET,0}$. En el resto de escenarios, se aprecia una variación entre la energía activa neta suministrada con el valor del desfase d . Esto es debido a la variación que experimentan las pérdidas de energía en los circuitos de tracción E_{CT} con el desfase d , tal y como se expresa en (5.13).

5.3.4.1.2 Sección con una estación

En la parte superior de la Figura 5.11, se muestra la duración del intervalo de concurrencia T_x en el paso de dos trenes por una sección de electrificación del sistema 1x25 kV con una estación en su punto central. Teniendo en cuenta que la subestación en el sistema 1x25 kV está situada en el centro de la sección y que ambos trenes realizan trayectorias simétricas, la duración del intervalo de concurrencia T_x debe ser una función par respecto al desfase d .

Como se observa en la parte superior de la Figura 5.11, cuando el desfase d es nulo la duración del intervalo de concurrencia es nula. Esto se debe a que ambos trenes llegan y salen al mismo tiempo de la estación y, por tanto, se hallan constantemente en lados distintos de la subestación de tracción. Si el desfase d toma valores pequeños el primer tren sale de la estación mientras el segundo tren sigue detenido, dando lugar a un breve intervalo de concurrencia. En la parte superior de la Figura 5.11, se observa que a medida que el desfase d crece, la duración del intervalo de concurrencia T_x aumenta hasta llegar a su valor máximo $T_{x,máx}$ en el desfase d_1 . Este desfase d_1 es el tiempo que necesita el primer tren para recorrer la mitad de la sección, es decir, para llegar a la estación situada en el punto central.

Debido a los tiempos de parada del primer y del segundo tren en la estación, la duración del intervalo de concurrencia se mantiene en su valor máximo $T_{x,máx}$ entre el desfase d_1 y el desfase d_4 . En el escenario originado por el desfase d_4 la salida de la sección del primer tren coincide con la llegada a la estación del segundo tren. Cuando el desfase es superior a d_4 , el primer tren sale de la sección antes de la llegada del segundo tren a la estación y, en consecuencia, la duración del intervalo de concurrencia comienza a reducirse. Finalmente, para los desfases superiores a d_6 , que es el tiempo que necesita el primer tren para recorrer toda la sección, la duración del intervalo de concurrencia es nula.

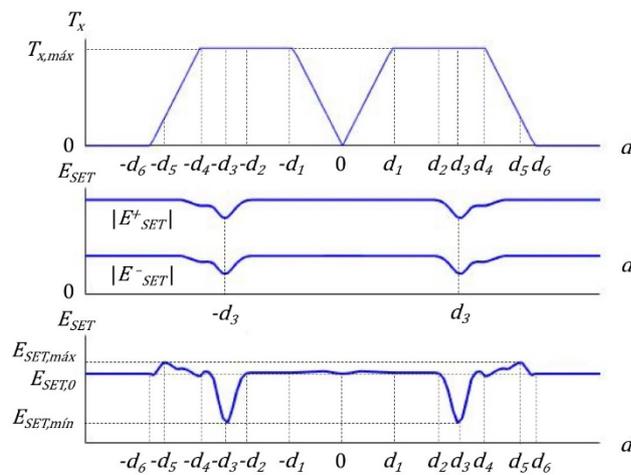


Figura 5.11. Energía activa suministrada en una sección 1x25 kV con estación

Las energías activas –neta suministrada por la subestación E_{SET} , suministrada por la subestación E_{SET}^+ y recuperada por la subestación E_{SET}^- – son funciones pares respecto al desfase d ya que las trayectorias de ambos trenes son simétricas respecto al punto medio de la sección de electrificación, que coincide con la ubicación de la subestación. En la parte central de la Figura 5.11, se muestran el valor absoluto de la energía activa suministrada por la subestación E_{SET}^+ –resultante de los intervalos de tiempo en los que la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ es positiva–, y el valor absoluto de la energía activa recuperada por la subestación E_{SET}^- –cuando la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ es negativa–. En una primera aproximación, se observa que los valores absolutos de ambas energías activas –la suministrada y la recuperada– tienen valores estables en todos los escenarios, salvo cuando el desfase entre los tiempos de ingreso en la sección de ambos trenes es d_3 . El escenario generado por este desfase contiene un intervalo de tiempo durante el que se produce una

coincidencia temporal total de la salida de la estación del primer tren y la llegada a la estación del segundo tren. Durante este intervalo de tiempo, aparece un aprovechamiento local –por parte del primer tren– de la potencia de frenado del segundo tren y se reducen las transferencias de potencia entre la subestación y ambos trenes. En consecuencia, los valores absolutos de la energía activa suministrada E_{SET}^+ y recuperada por la subestación E_{SET}^- son mínimos para este escenario.

En la parte inferior de la Figura 5.11, se representa la energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} para los distintos valores del desfase d . Como se puede apreciar, la mínima energía activa neta suministrada se produce en el escenario originado por el desfase d_3 . Esto es debido a que este escenario contiene un periodo de tiempo en el que el segundo tren –que está frenando en su aproximación a la estación– transfiere potencia al primer tren –que está aplicando tracción en la salida de la estación–. Durante este periodo de tiempo, se reduce la longitud de los circuitos de tracción –aparece un circuito de tracción entre ambos trenes– y, en consecuencia, se minimizan las pérdidas de energía activa E_{CT} . En definitiva, la energía activa neta que ha de suministrar la subestación E_{SET} para el movimiento de ambos trenes a lo largo de la sección –que es la suma de la energía activa consumida por las cadenas de tracción de los trenes y la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción, según la expresión (5.13)– también se hace mínima para este escenario.

En cuanto a los escenarios correspondientes a los desfases que no propician la aparición de intervalos de concurrencia, en la parte inferior de la Figura 5.11 se observa que la energía activa neta suministrada es $E_{SET,0}$. En el resto de escenarios, se aprecia una ligera variación de la energía activa neta suministrada con el valor del desfase d . Esto es debido a la variación que experimentan las pérdidas de energía en los circuitos de tracción E_{CT} con el desfase d , tal y como se expresa en (5.13).

5.3.4.2 Energía perdida en los circuitos de tracción

Las expresiones (5.14), (5.15) y (5.16) resumen la energía perdida en los circuitos de tracción tras el paso de dos trenes por una sección de electrificación. Estas expresiones se obtienen de la suma de la energía perdida dentro y fuera del intervalo de concurrencia.

$$E_{CT}(d) = E_{CT,1} + E_{CT,2} + E_{CT,x}(d) \quad (5.14)$$

$$E_{CT,n} = \frac{1}{3600} \int_{t \notin T_x} S_{CT,n}(t) dt, n = 1,2 \quad (5.15)$$

$$E_{CT,x}(d) = \frac{1}{3600} \int_{t \in T_x} S_{CT,x}(t) dt \quad (5.16)$$

Pérdida de energía por el paso de dos trenes por una sección

Denominaremos $E_{CT,0}$ a la pérdida de energía producida en los circuitos de tracción tras el paso de los dos trenes a lo largo de la sección de electrificación sin haberse producido un intervalo de concurrencia.

5.3.4.2.1 Sección en plena vía

La energía perdida en el sistema de electrificación E_{CT} durante el recorrido de dos trenes a lo largo de una sección debe ser calculada diferenciando el intervalo de concurrencia y los intervalos en los que sólo circula uno de los trenes. En la parte superior de la Figura 5.12, se muestra la duración del intervalo de concurrencia T_x en una sección en plena vía del sistema 1x25 kV recorrida por dos trenes a la misma velocidad de crucero en función del desfase d . Como se ha analizado en la Figura 5.10, la duración del intervalo de concurrencia T_x es una función par del desfase d entre los tiempos de ingreso de ambos trenes en la sección.

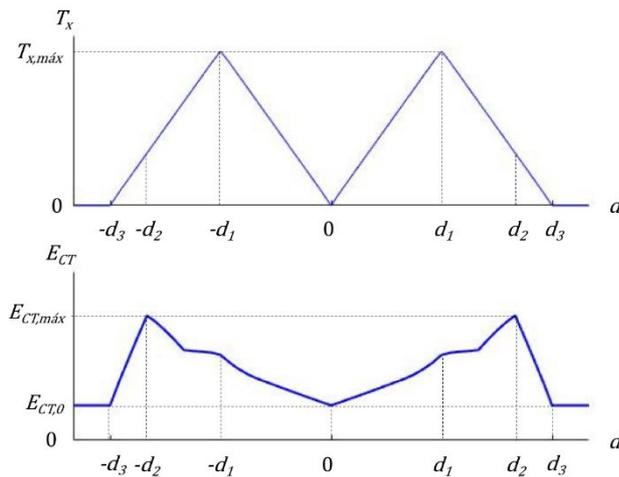


Figura 5.12. Energía activa perdida en una sección 1x25 kV en plena vía

Tal y como se observa en la parte inferior de la Figura 5.12, la energía perdida en los circuitos de tracción E_{CT} es también una función par. Esto es debido a que los dos trenes circulan a la misma velocidad y la subestación está en el centro de la sección de electrificación. Cuando el desfase es nulo –ambos trenes ingresan en la sección al mismo tiempo– o cuando el desfase es superior a d_3 –el tiempo que necesita el primer tren para salir de la sección–, no existe intervalo de concurrencia y, por tanto, la energía perdida en los circuitos de tracción es $E_{CT,0}$.

En el caso de que exista intervalo de concurrencia, como se aprecia en la expresión (5.16), la energía perdida en los circuitos de tracción E_{CT} depende de dos factores: la duración del intervalo de concurrencia T_x y los valores de las impedancias $Z_{CT,1}(t)$ y $Z_x(t)$ durante el intervalo de concurrencia. Por un lado, cuanto mayor es la duración del intervalo de concurrencia T_x , mayor es la pérdida de energía E_{CT} . Como se observa en la parte superior de la Figura 5.12, la máxima duración del intervalo de concurrencia se obtiene para el desfase d_1 . Por otro lado, se ha de tener en cuenta que a medida que el desfase d crece por encima de d_1 , la zona donde circulan los trenes durante el intervalo de concurrencia se aleja de la subestación. Esto provoca que las impedancias $Z_{CT,1}(t)$ y $Z_x(t)$ sean mayores durante el intervalo de concurrencia. El efecto combinado del aumento de los valores de las impedancias durante el intervalo de concurrencia y de la reducción de la duración del intervalo de concurrencia a medida que el desfase d crece por encima de d_1 , hace que el máximo de la energía perdida E_{CT} no se dé exactamente en el desfase d_1 –el desfase que hace máxima la duración del intervalo de concurrencia–, sino en el desfase d_2 , que es ligeramente mayor.

5.3.4.2.2 Sección con una estación

La duración del intervalo de concurrencia T_x en el paso de dos trenes por una sección con una estación en su punto central depende del desfase d entre los tiempos de ingreso en la sección de cada tren. Como se ha analizado en la Figura 5.11, teniendo en cuenta que la subestación en el sistema 2x25 kV está situada en el centro de la sección y que ambos trenes realizan trayectorias simétricas, la duración del intervalo de concurrencia T_x debe ser una función par respecto al desfase d .

Dado que la subestación de tracción está situada en el centro de la sección, ambos trenes circulan a la misma velocidad y realizan la parada en el centro de la sección, la energía perdida en los circuitos de tracción E_{CT} es también una función par respecto al desfase d . Como se observa en la parte inferior de la Figura 5.13, cuando la duración del intervalo de concurrencia T_x es nula la energía activa perdida en los circuitos de tracción toma el valor $E_{CT,0}$.

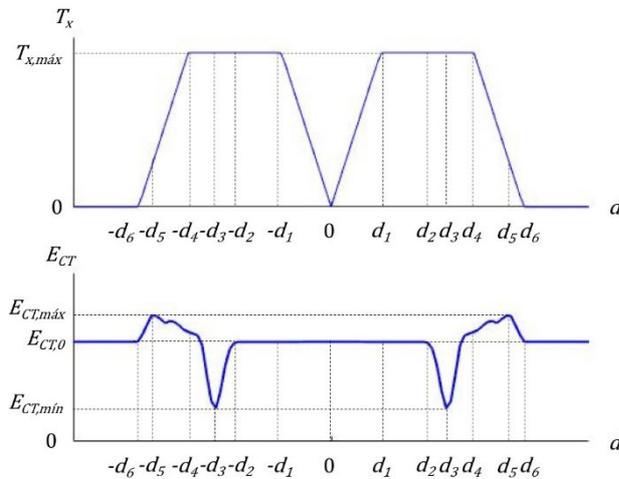


Figura 5.13. Energía activa perdida en una sección 1x25 kV con estación

Si el desfase d es menor que d_1 , esto es, el tiempo que necesita el primer tren para recorrer la mitad de la sección y detenerse en la estación, la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción también es $E_{CT,0}$. Esto es debido a que durante los intervalos de concurrencia generados por los desfases menores que d_1 , el segundo tren entra en la sección cuando el primer tren ya se encuentra detenido en la estación. En consecuencia, durante el intervalo de concurrencia sólo circula corriente por el circuito de tracción del segundo tren y la potencia activa de solapamiento en los circuitos de tracción $P_x(t)$ es nula.

El desfase d_2 hace coincidir el inicio de la tracción de salida del primer tren de la estación con el final del frenado de llegada del segundo tren. Entonces, entre los desfases d_1 y d_2 el primero de los dos trenes sigue detenido en la estación y, por tanto, la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción sigue siendo $E_{CT,0}$.

Cuando el desfase d es superior a d_2 , la tracción de salida del primer tren de la estación y el frenado de llegada del segundo tren coinciden parcialmente, haciendo que la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ sea negativa durante una parte del intervalo de concurrencia. Esto reduce la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción E_{CT} por debajo de $E_{CT,0}$. Como se observa en la parte inferior de la Figura 5.13, la pérdida de energía activa decrece con el aumento del desfase hasta su valor mínimo $E_{CT,min}$ en el desfase d_3 , es decir, cuando la coincidencia de la tracción del primer tren y del frenado del segundo tren es total.

Para desfases superiores a d_3 , la coincidencia de la tracción y del frenado durante el intervalo de concurrencia vuelve a ser parcial, pues el inicio de la salida del primer tren de la estación se produce antes del comienzo del frenado del segundo tren. En consecuencia, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ aumenta su valor a lo largo del intervalo concurrencia y la pérdida de energía activa E_{CT} crece por encima de su valor mínimo $E_{CT,min}$.

El punto de inflexión que se observa en la energía activa perdida E_{CT} entre los desfases d_3 y d_4 se corresponde con el momento en que desaparece la coincidencia parcial de la tracción y el frenado. A partir de este punto de inflexión, la salida del primer tren de la estación finaliza antes del inicio del frenado del segundo tren. Entonces, el frenado del segundo tren se desarrolla mientras el primer tren circula a velocidad de crucero, es decir, cuando la corriente en su circuito de tracción $I_1(t)$ es menor. El crecimiento observado de la energía activa perdida E_{CT} con el desfase d a partir de este punto de inflexión es más lento. Esto se debe a que el crecimiento está provocado exclusivamente por el aumento de las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$ y, en consecuencia, por el mayor valor de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ a medida que la zona de coincidencia de ambos trenes durante el intervalo de concurrencia está más alejada de la subestación.

La salida del primer tren de la sección coincide con la llegada del segundo tren a la estación cuando el desfase es d_4 , por tanto, la duración del intervalo de concurrencia se reduce para valores superiores del desfase d . Por un lado, el aumento de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ a medida que ambos trenes se alejan de la subestación durante el intervalo de concurrencia y, por otro, la reducción de la duración del intervalo de concurrencia T_x , origina la aparición del máximo de la pérdida de energía activa $E_{CT,max}$ cuando el desfase alcanza d_5 .

A partir del desfase d_5 , el efecto de la reducción de la duración del intervalo de concurrencia sobre la energía activa perdida E_{CT} prevalece sobre el efecto del aumento de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$. En consecuencia, la energía perdida E_{CT} decrece a medida que el desfase toma valores superiores a d_5 .

Finalmente, si el desfase es superior a d_6 —el tiempo que necesita el primer tren para recorrer completamente la sección—, no existe intervalo de concurrencia y la pérdida de energía E_{CT} se reduce a $E_{CT,0}$.

5.4 Sistema de electrificación 2x25 kV

5.4.1 Topología de electrificación

En la configuración típica del sistema 2x25 kV cada subestación aloja dos transformadores de tracción que alimentan dos secciones de electrificación. Estas dos secciones adyacentes están separadas por una zona neutra. En este diseño, todas las secciones de la línea reciben su alimentación desde uno de sus extremos [BRENNA, 2010].

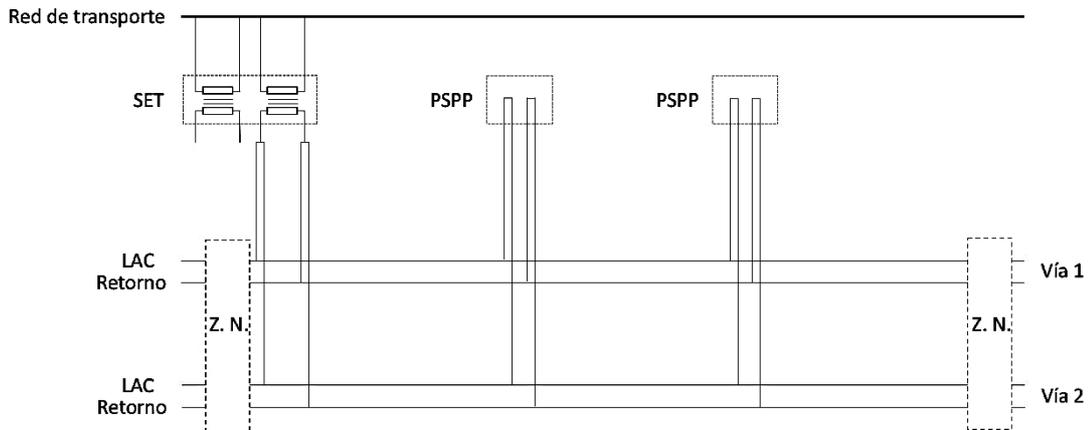


Figura 5.14. Sección de electrificación del sistema 2x25 kV con vía doble

Como se ha expuesto en el Capítulo 4, una de las características del sistema de electrificación 2x25 kV es la instalación de varios autotransformadores de tracción a lo largo de cada sección. En la Figura 5.14, donde se ha representado la configuración de este sistema de electrificación para una línea ferroviaria dotada de vía doble, se observa que la puesta en paralelo de los conductores de ambas vías se realiza en todos los emplazamientos de los autotransformadores. Por lo tanto, las ubicaciones de los puestos de subseccionamiento y puesta en paralelo (PSPP) en el sistema de electrificación 2x25 kV coinciden con las posiciones de los autotransformadores [CAPASSO, 2009].

5.4.1.1 Intervalo de concurrencia

Dado que los transformadores de tracción en el sistema 2x25 kV alimentan lateralmente las secciones de electrificación, el solapamiento de los circuitos de tracción de dos trenes coincidentes en una sección del sistema 2x25 kV se produce durante toda la ventana temporal de coincidencia. En consecuencia, el intervalo de concurrencia T_x y la ventana de

coincidencia T de dos trenes en una sección son equivalentes en el sistema de electrificación 2x25 kV.

5.4.2 Modelo de una sección de electrificación con dos trenes

Recuperando las expresiones de la impedancia del sistema de electrificación 2x25 kV desarrolladas en el Capítulo 4 y aplicándolas en (5.3) y (5.4), se deducen las expresiones (5.17) y (5.18) para los valores de los coeficientes de solapamiento $Z_{12}(t)$ y $Z_{21}(t)$. Estos coeficientes cuantifican la influencia mutua entre los circuitos de tracción de los dos trenes durante su intervalo de concurrencia en una sección del sistema 2x25 kV.

$$Z_{12}(t) = \begin{cases} \bar{Z}_0 ([x_1(t)] - x_{SET}), & [x_1(t)] = [x_2(t)], t \in T_x \\ \bar{Z}_0 ([x_1(t)] - x_{SET}) + \frac{Z_1}{2} (x_1(t) - [x_1(t)]) - \frac{Z_2}{2} \frac{(x_1(t) - [x_1(t)])^2}{[x_1(t)] - [x_1(t)]}, & [x_1(t)] \neq [x_2(t)], t \in T_x \end{cases} \quad (5.17)$$

$$Z_{21}(t) = \bar{Z}_0 ([x_1(t)] - x_{SET}), t \in T_x \quad (5.18)$$

Coeficientes de solapamiento en el sistema 2x25 kV

En el caso del sistema de electrificación 2x25 kV en doble vía, los valores de las impedancias unitarias \bar{Z}_0 , \bar{Z}_1 y \bar{Z}_2 deben ser calculadas teniendo en cuenta los conductores de ambas vías y su disposición geométrica [CHEN, 2016]. Por lo tanto, los valores de las impedancias unitarias manejados para el sistema 2x25 kV en vía doble son ligeramente diferentes a los mostrados en el Capítulo 4.

5.4.3 Potencia en una sección de electrificación 2x25 kV

5.4.3.1 Potencia en la subestación de tracción

Siguiendo la expresión general (5.9), la potencia en la subestación $S_{SET}(t)$ equivale a la suma de las potencias en las cadenas de tracción de ambos trenes, $S_1(t)$ y $S_2(t)$, más la potencia total consumida por ambos circuitos de tracción en concurrencia, $S_{CT,x}(t)$.

5.4.3.1.1 Sección en plena vía

En la parte superior de la Figura 5.15 se muestran las trayectorias de dos trenes que recorren una sección 2x25 kV a velocidad de crucero en sentidos opuestos. Para realizar estos recorridos a velocidad de crucero, la potencia activa en la cadena de tracción de cada tren P_n es constante. El intervalo de concurrencia generado por estas trayectorias se extiende desde el instante t_2 hasta el instante t_7 .

En el Capítulo 4, se ha comprobado que la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ a un tren que circula solo en plena vía corresponde a la suma de la potencia activa consumida por su cadena de tracción P_n más la pérdida de potencia activa en su circuito de tracción $P_{CT,n}(t)$. Este es el caso de los dos intervalos temporales situados fuera del intervalo de concurrencia, que se pueden identificar en la parte superior de la Figura 5.15. Entre los instantes t_1 y t_2 , y entre los instantes t_7 y t_8 , la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ es ligeramente variable en el tiempo. Esto es debido a que, aunque la potencia activa consumida por cada tren P_n es constante, la pérdida de potencia activa en cada circuito de tracción $P_{CT,n}(t)$ depende de la distancia de cada tren a la subestación.

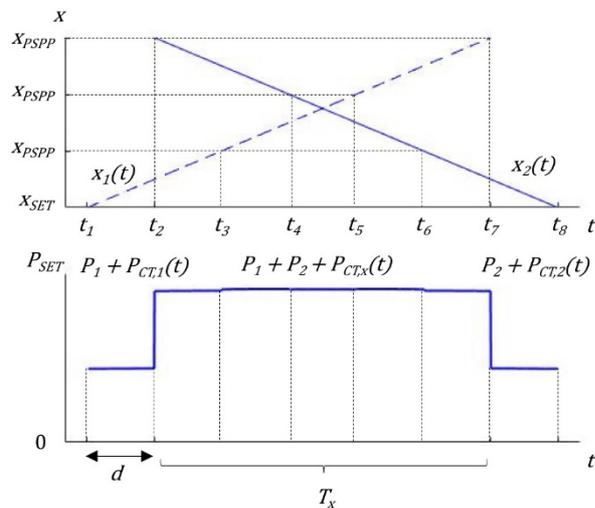


Figura 5.15. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV en plena vía

Durante el intervalo de concurrencia, que se extiende desde el instante t_2 hasta el instante t_7 , la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ corresponde a la suma de la potencia activa consumida por las cadenas de tracción de ambos trenes P_n más las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$. En la parte inferior de la

Figura 5.15, se observan cuatro discontinuidades en el valor de la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$ dentro del intervalo de concurrencia. Como se detallará en el análisis de la potencia activa consumida por los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,X}(t)$, representada en la Figura 5.17, estas discontinuidades tienen su origen en los cambios de subsección de los trenes.

5.4.3.1.2 Sección con una estación

En la parte inferior de la Figura 5.16, se ha representado la potencia activa suministrada por la subestación eléctrica de tracción $P_{SET}(t)$ que alimenta una sección por la que circulan los dos trenes en sentidos opuestos realizando una parada en la estación situada en el punto medio. Como se puede observar en la parte superior de la Figura 5.16, las trayectorias de ambos trenes se han programado de tal manera que la salida de la estación del tren 1 coincida con la llegada del tren 2.

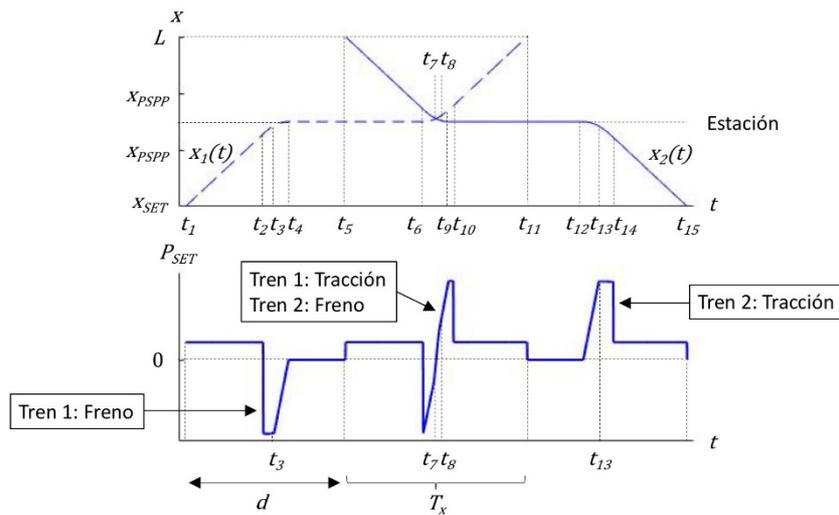


Figura 5.16. Potencia activa en la subestación de una sección 2x25 kV con estación

Por orden cronológico, en la Figura 5.16 se identifican los siguientes intervalos de tiempo: entre los instantes t_1 y t_2 el tren 1 circula a velocidad de crucero, entre los instantes t_2 y t_4 se produce el frenado de llegada del tren 1 a la estación, entre los instantes t_5 y t_6 el tren 2 circula a velocidad de crucero, entre los instantes t_6 y t_{10} coinciden la salida del tren 1 de la estación y la llegada del tren 2, entre los instantes t_{10} y t_{11} el tren 1 circula a velocidad de crucero, entre los instantes t_{12} y t_{14} se produce la salida del tren 2 de la estación y, finalmente,

entre los instantes t_{14} y t_{15} el tren 2 circula a velocidad de crucero. En la parte inferior de la Figura 5.16 se han indicado explícitamente los intervalos de llegada y salida de los dos trenes.

Entre los instantes t_2 y t_4 , el frenado del tren 1 hace que la subestación de tracción sea receptora de potencia, es decir, que la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ sea negativa. En el instante t_3 el tren 1 cambia su régimen de frenado de potencia constante a par constante, como se puede apreciar en la parte inferior de la Figura 5.16.

Entre los instantes t_6 y t_{10} , se produce la coincidencia de la llegada del tren 2 a la estación y la salida del tren 1. En el instante t_6 el tren 2 comienza a frenar en régimen de potencia constante, lo que hace que la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ sea negativa. Inmediatamente, el tren 1 sale de la estación con tracción en régimen de par constante, haciendo que aumente progresivamente el valor de la potencia activa en su cadena de tracción $P_1(t)$ y en la subestación $P_{SET}(t)$. Este efecto puede ser observado entre los instantes t_6 y t_7 en la parte inferior de la Figura 5.16. En el instante t_7 , el frenado del tren 2 cambia su régimen a par constante, reduciendo gradualmente la magnitud de la potencia activa en su cadena de tracción $P_2(t)$. Dado que el tren 2 se encuentra en frenado, el signo de $P_2(t)$ es negativo. Entonces, la reducción de la magnitud de $P_2(t)$ a partir del instante t_7 provoca que se acelere el aumento de la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$. En el instante t_8 , la tracción del tren 1 cambia su régimen y la potencia activa en su cadena de tracción $P_1(t)$ pasa a ser constante. Como se puede apreciar en la parte inferior de la Figura 5.16, esto provoca una desaceleración en el aumento de la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$. En el instante t_9 , el tren 2 se detiene en la estación y la potencia activa en su cadena de tracción $P_2(t)$ se hace nula. En consecuencia, entre los instantes t_9 y t_{10} , la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ se estabiliza pues la tracción del tren 1 se desarrolla en régimen de potencia constante.

Entre los instantes t_{12} y t_{14} , la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ es positiva porque el tren 2 se encuentra saliendo de la estación. Desde el instante t_{12} hasta el instante t_{13} , la tracción del tren 2 se desarrolla en régimen de par constante y la potencia activa en la subestación $P_{SET}(t)$ aumenta progresivamente. Entre los instantes t_{13} y t_{14} la potencia activa en la subestación se estabiliza pues el régimen de tracción del tren 2 pasa a ser de potencia constante.

Finalmente, los intervalos correspondientes a la fase de crucero de ambos trenes pueden ser fácilmente identificados por ser periodos de tiempo en los que la potencia en la subestación $P_{SET}(t)$ es distinta de cero y estable.

El efecto de la variación de las distancias entre los trenes y la subestación es apenas apreciable en la parte inferior de la Figura 5.16 debido a que la escala de representación está adaptada a las magnitudes de $P_{SET}(t)$. Sin embargo, el impacto de estas distancias es mucho mayor en la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT}(t)$ como se puede apreciar en la parte inferior de la Figura 5.18.

5.4.3.2 Potencia consumida por los circuitos de tracción

La potencia consumida por los dos circuitos de tracción en concurrencia $S_{CT,x}(t)$ se ha expresado en (5.10) como la suma de las pérdidas de potencia en los circuitos de tracción debidas a las corrientes propias más las ajenas. Estas últimas pérdidas reciben el nombre de potencia de solapamiento, $S_x(t)$. Particularizando la expresión general de la potencia de solapamiento (5.11) con los coeficientes de solapamiento deducidos en (5.18), se obtiene la expresión (5.19) para potencia de solapamiento $S_x(t)$ en el sistema de electrificación 2x25 kV.

$$S_x(t) = \begin{cases} 2 |I_1(t)|^2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} \bar{Z}_0(|x_1(t)| - x_{SET}), & |x_1(t)| = |x_2(t)|, t \in T_x \\ 2 |I_1(t)|^2 \left\{ \operatorname{Re} \left\{ \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \right\} \bar{Z}_0(|x_1(t)| - x_{SET}) + \right. \\ \left. + \frac{I_2(t)}{I_1(t)} \left[\frac{\bar{Z}_1}{4} (x_1(t) - |x_1(t)|) - \frac{\bar{Z}_2}{4} \frac{(x_1(t) - |x_1(t)|)^2}{|x_1(t)| - |x_1(t)|} \right] \right\}, & |x_1(t)| \neq |x_2(t)|, t \in T_x \end{cases} \quad (5.19)$$

Potencia de solapamiento de los circuitos de tracción en el sistema 2x25 kV

5.4.3.2.1 Sección en plena vía

En la parte superior de la Figura 5.17 se han representado las mismas trayectorias que en la Figura 5.15, correspondientes a dos trenes que recorren una sección 2x25 kV en plena vía en sentidos opuestos. Durante el intervalo de concurrencia, que se extiende desde el instante t_2 hasta el instante t_7 , ambos trenes ejercen fuerza de tracción. En consecuencia, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es positiva y, como se ha expresado en (5.10), contribuye a elevar la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$. El valor de esta pérdida de potencia varía en cada instante debido a la evolución temporal de las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$, es decir, debido al movimiento de los trenes. Como se puede ver en la parte superior de la Figura 5.17, los trenes realizan cuatro cambios de subsección durante el intervalo de concurrencia. Estos cambios de subsección se

producen en los instantes t_3 , t_4 , t_5 y t_6 , es decir, cada vez que uno de los trenes pasa por un PSPP. Como se puede apreciar en (5.19), cada cambio de subsección origina una discontinuidad en la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$. A través de (5.10) estas discontinuidades se trasladan la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$, representada en la parte inferior de la Figura 5.17.

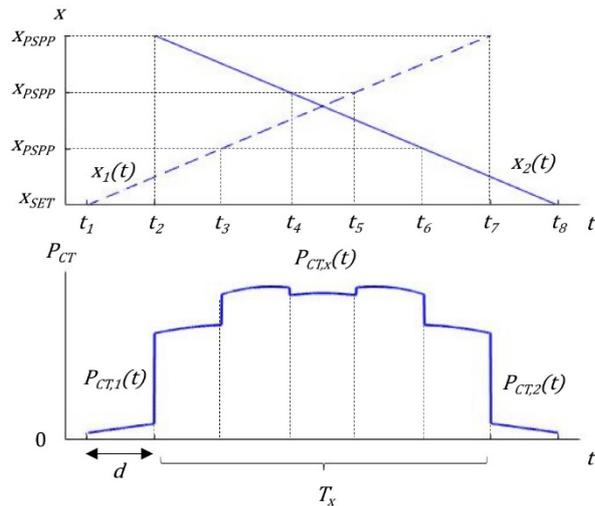


Figura 5.17. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV en plena vía

En el instante t_3 , el tren 1 pasa por el primer PSPP provocando un salto incremental en la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ y también, por tanto, en la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$. En el instante t_4 , el tren 2 entra en la misma subsección que el tren 1. Esto produce un escalón de reducción en la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ y, en consecuencia, también en la pérdida de potencia activa $P_{CT,x}(t)$. A partir del cruce de ambos trenes, la simetría de sus trayectorias explica los cambios que se producen en los instantes t_5 y t_6 y la evolución temporal de la pérdida de potencia activa $P_{CT,x}(t)$.

En cambio, entre los instantes t_3 , t_4 , t_5 y t_6 no se produce ningún paso por los PSPP. Durante estos subintervalos de tiempo, como se puede observar en (5.11), la evolución del valor de la potencia de solapamiento $S_x(t)$ viene determinado por la impedancia $Z_{CT,1}(t)$, ya que la impedancia $Z_x(t)$ permanece constante. Esto puede ser comprobado en la parte inferior de la Figura 5.17, donde se aprecia que la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ durante en estos subintervalos varía con la distancia entre la subestación y el tren más próximo.

5.4.3.2.2 Sección con una estación

La parte superior de la Figura 5.18 muestra las mismas trayectorias que la Figura 5.16, correspondientes a dos trenes que recorren una sección 2x25 kV y realizan una parada en su punto medio. Análogamente al análisis realizado sobre la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$, en la parte inferior de la Figura 5.18 se puede apreciar el efecto de la programación de las trayectorias de ambos trenes sobre la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT}(t)$.

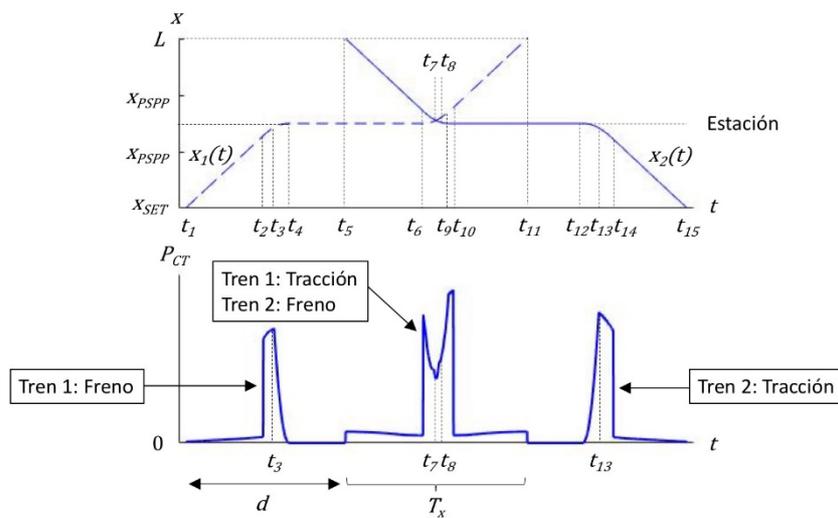


Figura 5.18. Pérdida de potencia activa en una sección 2x25 kV con estación

Fuera del intervalo de concurrencia, las trayectorias de ambos trenes constan de las siguientes secuencias. El tren 1 circula a velocidad de crucero entre los instantes t_1 y t_2 , realiza el frenado de llegada a la estación entre los instantes t_2 y t_4 , y está detenido en la estación entre los instantes t_4 y t_5 . El tren 2 realiza una trayectoria simétrica acercándose a la subestación de tracción desde el extremo contrario de la sección: está detenido en la estación entre los instantes t_{11} y t_{12} , ejerce tracción para la salida de la estación entre los instantes t_{12} y t_{14} , y circula a velocidad de crucero entre los instantes t_{14} y t_{15} .

Durante los intervalos de tiempo en los que los trenes circulan a velocidad de crucero la potencia activa en sus cadenas de tracción $P_n(t)$ es constante. Sin embargo, como se puede comprobar en la parte inferior de la Figura 5.18, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción de los trenes $P_{CT,n}(t)$ crece con su distancia a la subestación. El frenado del tren 1 se produce en dos regímenes: frenado de potencia $P_1(t)$ constante entre los instantes t_2 y t_3 ,

y reducción gradual de la potencia $P_1(t)$ de frenado durante el régimen de par constante, entre los instantes t_3 y t_4 . En el subintervalo correspondiente al frenado en régimen de potencia constante la pérdida de potencia en el circuito de tracción $P_{CT,1}(t)$ crece en el tiempo, ya que el tren 1 se aleja de la subestación. La reducción gradual de la potencia de frenado durante el régimen de par constante hace que efecto del alejamiento del tren 1 sobre la pérdida de potencia en su circuito de tracción no sea apreciable en la parte inferior de la Figura 5.18. La salida del tren 2 de la estación se desarrolla en dos regímenes: potencia de tracción $P_2(t)$ creciente en el régimen de par constante, entre los instantes t_{12} y t_{13} , y potencia de tracción $P_2(t)$ constante entre los instantes t_{13} y t_{14} . En el primer subintervalo, la pérdida de potencia activa en el circuito de tracción $P_{CT,2}(t)$ es creciente pues prevalece el efecto del aumento de la potencia de tracción $P_2(t)$ sobre el acercamiento del tren 2 a la subestación. En el segundo subintervalo, la pérdida de potencia activa en el circuito de tracción $P_{CT,2}(t)$ es decreciente ya que la cadena de tracción del tren 2 funciona a potencia constante y se reduce su distancia a la subestación.

En la parte inicial de intervalo de concurrencia, entre los instantes t_5 y t_6 , la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es nula y la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ se produce exclusivamente en el circuito de tracción del tren 2 sin solapamiento. La pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ es decreciente en el tiempo pues el tren 2 se acerca a la subestación.

En la parte central del intervalo de concurrencia, entre los instantes t_6 y t_9 , las corrientes circulantes por los circuitos de tracción de ambos trenes siguen sentidos opuestos, pues el tren 1 ejerce fuerza de tracción para salir de la parada y el tren 2 frena para detenerse. Como se ha visto en la Tabla 5.3, cuando los sentidos de las corrientes $I_1(t)$ e $I_2(t)$ son opuestos, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es negativa. Esta potencia negativa contribuye a reducir la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción en solapamiento $P_{CT,x}(t)$ y, en consecuencia, también en la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET}(t)$.

Entre los instantes t_6 y t_7 el tren 2 comienza su frenado en régimen de potencia constante mientras el tren 1 arranca en régimen de par constante. Durante este subintervalo el tren 2 transmite potencia al tren 1 haciendo aparecer una potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ negativa que reduce la pérdida de potencia activa en el sistema de electrificación $P_{CT}(t)$. Progresivamente, la potencia de tracción del tren 1 va aumentando hasta llegar a la máxima potencia de tracción. Este aumento progresivo eleva gradualmente la magnitud de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$, que es negativa, reduciendo en paralelo la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$. En el instante t_7 , el tren 2 cambia de régimen de frenado y comienza a

reducir la potencia activa de frenado $P_2(t)$. Por lo tanto, en el instante t_7 se llega al máximo de la potencia activa de solapamiento negativa $P_x(t)$ y al mínimo de la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$. Entre los instantes t_7 y t_8 , el tren 2 pasa a frenar en régimen de par constante mientras el tren 1 continúa con la tracción en régimen de potencia constante. Entonces, la reducción de la potencia activa de frenado $P_2(t)$ del tren 2 hace que la magnitud de la potencia de solapamiento negativa $P_x(t)$ disminuya y aumente la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT}(t)$. Entre los instantes t_8 y t_9 , la tracción del tren 1 cambia de régimen y la potencia activa en su cadena de tracción $P_1(t)$ permanece constante, mientras que la potencia activa de frenado $P_2(t)$ del tren 2 sigue disminuyendo. En consecuencia, la potencia de solapamiento negativa $P_x(t)$ continúa reduciéndose hasta desaparecer en el instante t_9 , momento en que el tren 2 se detiene en la estación.

En la parte final de intervalo de concurrencia, entre los instantes t_9 y t_{10} , la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es nula y la pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ se produce exclusivamente en el circuito de tracción del tren 1 sin solapamiento. La pérdida de potencia activa $P_{CT}(t)$ es creciente en el tiempo pues el tren 1 se aleja de la subestación.

5.4.4 Balance energético en una sección de electrificación 2x25 kV

La energía neta suministrada por una subestación de tracción E_{SET} para el paso de dos trenes por una sección de electrificación es la suma de las energías consumidas por las cadenas de tracción de los trenes más las pérdidas en sus circuitos de tracción. Este cálculo debe ser realizado por separado en los intervalos de tiempo sin concurrencia, a través de la expresión (4.15), y en los intervalos de concurrencia donde hay solapamiento de los circuitos de tracción, utilizando la expresión (5.13).

5.4.4.1 Energía suministrada por la subestación

Considerando aquellas fases de frenado de uno de los trenes durante las que la subestación puede recuperar energía, la energía neta suministrada por la subestación E_{SET} puede ser expresada como la suma de dos términos: la energía eléctrica efectivamente suministrada durante las fases de tracción E_{SET}^+ y la energía eléctrica recuperada en las fases de frenado eléctrico E_{SET}^- . Fuera del intervalo de concurrencia, estos dos términos se obtienen a través

de las expresiones (4.15a) y (4.15b). Dentro del intervalo de concurrencia, estos dos términos se calculan en (5.13a) y (5.13b).

5.4.4.1.1 Sección en plena vía

En el sistema de electrificación 2x25 kV la subestación de tracción suele estar localizada en un extremo de la sección y, por lo tanto, el intervalo de concurrencia es idéntico a la ventana temporal de coincidencia de los dos trenes dentro de la sección. Dado que en las trayectorias consideradas ambos trenes circulan a la misma velocidad en sentidos opuestos, la duración del intervalo de concurrencia es una función par respecto al desfase d entre sus tiempos de ingreso en la sección.

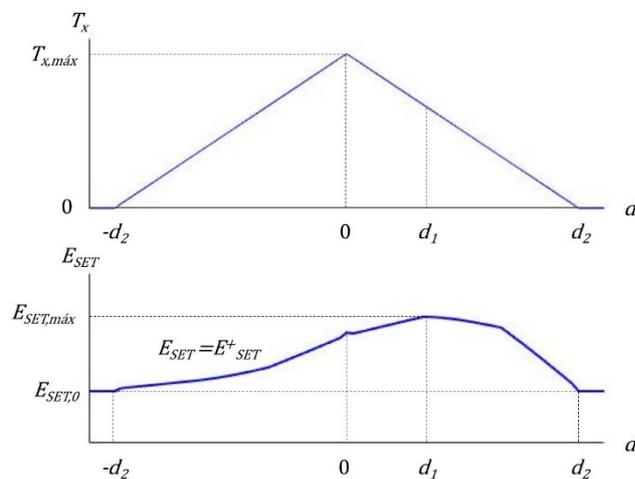


Figura 5.19. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV en plena vía

Como puede observarse en la parte superior de la Figura 5.19, cuando el desfase es nulo, la duración del intervalo de concurrencia es máxima $T_{x,máx}$ y su valor equivale al tiempo que tardan ambos trenes en recorrer la sección en sentidos opuestos. A medida que el desfase crece, la duración del intervalo de concurrencia T_x se reduce hasta hacerse nula en el desfase d_2 . Para desfases superiores o iguales a d_2 , que es el tiempo que tarda el primer tren en recorrer la sección, el intervalo de concurrencia desaparece.

En la parte inferior de la Figura 5.19, se muestra la energía activa neta suministrada por la subestación para los distintos valores del desfase d entre los tiempos de ingreso en la sección de los dos trenes. Dado que las potencias activas en las cadenas de tracción de ambos

trenes $P_n(t)$ son positivas durante todo su recorrido, la energía activa neta suministrada E_{SET} coincide con la energía activa efectivamente suministrada por la subestación E^+_{SET} .

Como se aprecia en la parte inferior de la Figura 5.19, para todos los escenarios en los que existe intervalo de concurrencia, la energía activa neta suministrada E_{SET} toma valores superiores a $E_{SET,0}$ –valor correspondiente a la ausencia de concurrencia–. Esto es debido a que los trenes circulan por la sección sin aplicar el freno y, por lo tanto, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es positiva durante todo el intervalo de concurrencia. Adicionalmente, se observa que los valores de la energía activa neta suministrada son mayores para los desfases positivos. Se debe tener en cuenta que la subestación de tracción del sistema 2x25 kV está situada en uno de los extremos de la sección. Entonces, si la concurrencia de los trenes se produce cuando circulan por la zona más alejada de la subestación, las impedancias de los circuitos de tracción son mayores. En consecuencia, los desfases positivos provocan una mayor pérdida de energía activa en los circuitos de tracción E_{CT} y una mayor energía activa neta que debe ser suministrada E_{SET} .

El valor máximo de $E_{SET,max}$ se observa en el escenario correspondiente al desfase d_1 . En este escenario, se alcanza el máximo de la energía activa perdida en los circuitos de tracción E_{CT} , por el efecto combinado de la reducción de la duración del intervalo de concurrencia T_x y del aumento del valor de las impedancias en la zona de coincidencia de los trenes a medida que aumenta el desfase d .

5.4.4.1.2 Sección con una estación

Como se puede observar en la parte superior de la Figura 5.20, la duración del intervalo de concurrencia T_x de dos trenes que recorren una sección a la misma velocidad y realizando una parada en su punto medio, es una función par respecto al desfase d entre sus tiempos de ingreso. Sin embargo, la energía activa suministrada E_{SET} no es una función par respecto al desfase d debido a que la subestación de tracción en el sistema 2x25 kV está ubicada en uno de los extremos de la sección.

En la parte central de la Figura 5.20, se observa que los valores de la energía activa suministrada E^+_{SET} y recuperada por la subestación E^-_{SET} presentan ligeras variaciones con el desfase d . Los valores absolutos de estas energías siguen la misma tendencia y se hacen máximos con el desfase nulo, es decir, cuando las trayectorias de ambos trenes a lo largo de la sección son simétricas. En este escenario, las fases de cruce, tracción y frenado de ambos trenes suceden simultáneamente obligando a que toda la energía manejada por las cadenas

de tracción de los trenes sea intercambiada con la subestación. Al contrario, cuando el desfase entre ambos trenes toma los valores $-d_1$ y d_1 , los valores absolutos de la energía activa suministrada y recuperada por la subestación alcanzan mínimos locales. En estos dos escenarios, el desfase hace coincidir la salida del primer tren de la estación con la llegada del segundo tren a la estación permitiendo un transvase de energía entre ambos trenes. En consecuencia, los valores absolutos de la energía activa suministrada y recuperada por la subestación se hacen mínimos en estos dos escenarios.

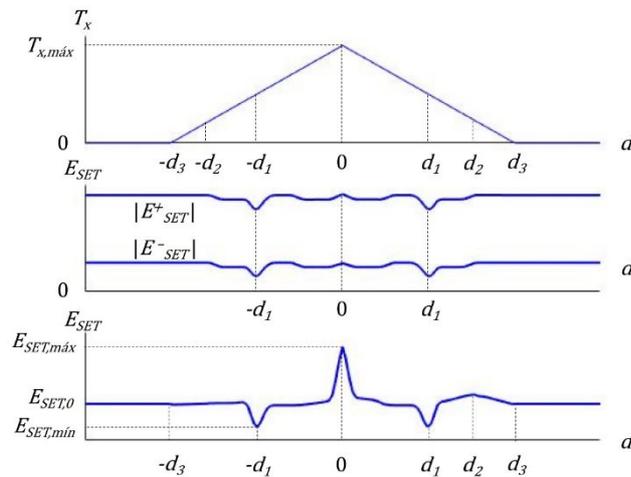


Figura 5.20. Energía activa suministrada en una sección 2x25 kV con estación

La energía activa neta suministrada por la subestación E_{SET} , mostrada en la parte inferior de la Figura 5.20, presenta el máximo y los dos mínimos locales correspondientes a los escenarios analizados para el desfase nulo, $-d_1$ y d_1 , respectivamente. La ligera variación de los valores de E_{SET} con el desfase d que se puede apreciar –incluido el máximo local en el desfase d_2 – es debida a la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción E_{CT} .

5.4.4.2 Energía perdida en los circuitos de tracción

Tal y como se expresa en (5.14), el desfase d entre los tiempos de ingreso de los dos trenes en la sección no influye en la energía consumida por sus cadenas de tracción, pero define los intervalos de concurrencia y determina la pérdida de energía en los circuitos de tracción E_{CT} .

5.4.4.2.1 Sección en plena vía

Como puede observarse en la parte superior de la Figura 5.21 y se ha analizado en la parte superior de la Figura 5.19, la duración del intervalo de concurrencia es una función par respecto al desfase d y es máxima cuando el desfase es nulo.

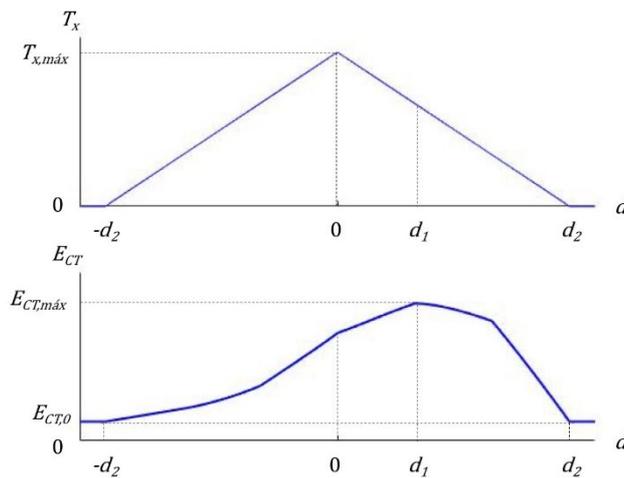


Figura 5.21. Energía activa perdida en una sección 2x25 kV en plena vía

Como se comprueba en la parte inferior de la Figura 5.21, para los desfases que impiden la aparición del intervalo de concurrencia la pérdida de energía activa es constante e igual a $E_{CT,0}$. Sin embargo, cuando existe intervalo de concurrencia la energía perdida en el sistema de electrificación viene determinada por su duración T_x y por los valores de la potencia de solapamiento $S_x(t)$ durante la concurrencia. A diferencia de lo observado en el sistema de electrificación 1x25 kV, la ubicación de la subestación de tracción en uno de los extremos de la sección 2x25 kV hace que la distribución de las impedancias no sea simétrica. Por lo tanto, la energía activa perdida E_{CT} en el sistema de electrificación 2x25 kV no puede ser una función par respecto al desfase d entre los tiempos de ingreso de los dos trenes.

En la parte inferior de la Figura 5.21 se observa que las pérdidas de energía activa E_{CT} son mayores para desfases positivos, es decir, cuando se retrasa la entrada del tren que ingresa por el extremo más alejado de la subestación de tracción. Esto es debido a que los valores de las impedancias durante el intervalo de concurrencia son mayores cuando los desfases son positivos, es decir, cuando la zona de coincidencia de ambos trenes está más alejada de

la subestación. Esto contribuye a elevar el valor de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ durante el intervalo de concurrencia, como se muestra en (5.19).

Por un lado, a medida que se retrasa la entrada del tren que ingresa por el extremo más alejado de la subestación de tracción, la zona de coincidencia de ambos trenes se aleja y aumentan los valores de las impedancias $Z_x(t)$ y $Z_{CT,1}(t)$. Por otro lado, cuanto mayor es este desfase positivo entre los tiempos de ingreso de los dos trenes, menor es la duración del intervalo de concurrencia T_x . Estos dos efectos combinados separan el máximo de la energía activa perdida $E_{CT,máx}$ del desfase de máxima duración del intervalo de concurrencia, es decir, del desfase nulo y lo sitúan en el desfase positivo d_1 .

5.4.4.2.2 Sección con una estación

Como se puede observar en la parte inferior de la Figura 5.22, la pérdida de energía en el sistema electrificación E_{CT} no es una función par respecto al desfase d debido a que la subestación de tracción en el sistema 2x25 kV está ubicada en uno de los extremos de la sección.

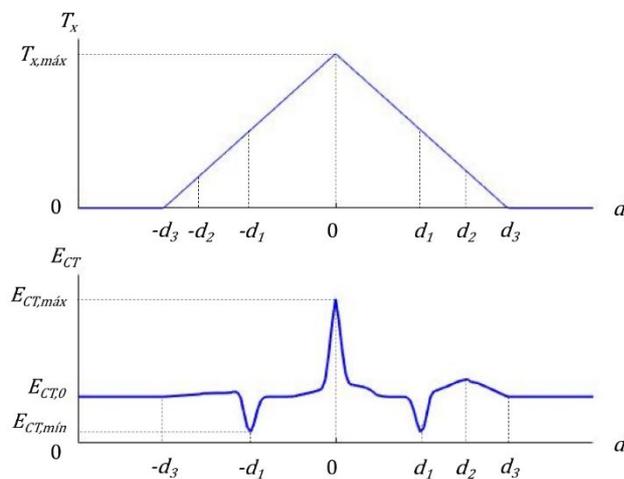


Figura 5.22. Energía activa perdida en una sección 2x25 kV con estación

En la parte inferior de la Figura 5.22, se observa que cuando el desfase es nulo, es decir, cuando los dos trenes ingresan simultáneamente en la sección la pérdida de energía activa alcanza su máximo valor $E_{CT,máx}$. Para este desfase, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ es positiva durante todo el intervalo de concurrencia, ya que coinciden las fases de cruce,

frenado y tracción de ambos trenes. Esta coincidencia contribuye a elevar la potencia activa perdida en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$.

Cuando el desfase d entre los dos trenes es pequeño, la pérdida de energía activa E_{CT} decrece al sumarse dos efectos: la reducción de la duración del intervalo de concurrencia T_x y la pérdida de alineamiento temporal de las fases de la trayectoria de ambos trenes. Esta reducción de la pérdida de energía activa E_{CT} continúa hasta la llegada al mínimo $E_{CT,min}$ en el desfase d_1 . Para este desfase d_1 , la fase de tracción en la salida de la estación del tren 1 coincide con la fase de frenado de llegada a la estación del tren 2, lo que maximiza la potencia activa de solapamiento negativa $P_x(t)$. Esta coincidencia contribuye a reducir la potencia activa perdida en los circuitos de tracción en concurrencia $P_{CT,x}(t)$.

A medida que el desfase crece por encima de d_1 , vuelven a sumarse dos efectos: la reducción de la duración del intervalo de concurrencia T_x y la progresiva pérdida de la coincidencia de la tracción del tren 1 y el frenado del tren 2. El primero de los efectos provoca la reducción de la pérdida de energía activa E_{CT} mientras que el segundo contribuye a aumentarla. Estos dos efectos combinados dan lugar al máximo local de la energía activa perdida E_{CT} observado en el desfase d_2 .

Finalmente, entre los desfases d_2 y d_3 , la reducción de la duración del intervalo de concurrencia se impone y la pérdida de energía activa E_{CT} disminuye cuando aumenta el desfase. Finalmente, para desfases superiores a d_3 no se produce la concurrencia de ambos trenes en la sección.

5.5 Conclusiones

En este capítulo se propone un modelo para evaluar la energía que debe suministrar una subestación eléctrica de tracción para el paso de dos trenes que coinciden dentro de una sección de electrificación. A partir de las trayectorias previamente programadas de los dos trenes se determinan unívocamente los consumos energéticos de sus cadenas de tracción. Añadiendo el conocimiento de la topología de electrificación de la sección por la que circulan, se calculan las pérdidas energéticas impuestas por el sistema de electrificación. Para finalizar el cómputo de la energía que ha de suministrar la subestación, se evalúa el efecto causado por el solapamiento de los circuitos de tracción de ambos trenes durante su recorrido por la sección.

El intervalo de concurrencia de dos trenes en una sección de electrificación es el resultado de la ventana temporal de coincidencia de sus trayectorias. A cada posible intervalo de concurrencia le corresponde una diferente combinación espacio-temporal de las potencias manejadas por las cadenas de tracción de los trenes. A través de los modelos de los sistemas de electrificación, se ha comprobado que el perfil temporal de la potencia en la subestación eléctrica de tracción y en los circuitos de tracción dependen del intervalo de concurrencia.

Mediante el ajuste del desfase temporal entre las trayectorias de los dos trenes, es posible generar escenarios con distintos intervalos de concurrencia. A cada escenario le corresponde un valor de la energía suministrada por la subestación eléctrica de tracción y un valor de la energía perdida en los circuitos de tracción. Aplicando este método, se han evaluado estas energías en todos los posibles escenarios generados por la circulación simultánea de dos trenes en una sección de electrificación. En el caso de una sección en plena vía recorrida a velocidad de crucero por ambos trenes, la coincidencia de ambos trenes implica siempre un mayor valor de la energía suministrada por la subestación de tracción respecto al escenario de no coincidencia. En este tipo de sección, la energía suministrada por la subestación de tracción se maximiza en un único escenario. Por otro lado, la coincidencia de ambos trenes en una sección con una estación puede incrementar o reducir el valor de la energía suministrada por la subestación de tracción respecto al escenario de no coincidencia. En este otro tipo de sección, la energía suministrada por la subestación de tracción se minimiza en los dos escenarios que favorecen el flujo de potencia directo entre ambos trenes y se maximiza en el escenario que impide esta transferencia.

En definitiva, existe la posibilidad de encontrar un escenario de explotación que reduzca la energía eléctrica que ha de ser suministrada por una subestación de tracción a una sección de electrificación simplemente cambiando el horario de los trenes y sin necesidad de modificar los perfiles de velocidad previamente establecidos.

5.6 Bibliografía

[BRENNNA, 2010]. Brenna, M., Foadelli, F. Zaninelli, D., Electromagnetic Model of High Speed Railway Lines for Power Quality Studies, IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25, (3), pp. 1301-1308.

[CAPASSO, 2009]. Capasso, A., Ciucciarelli, D. I. M., Lauria, S. An integrated methodology for 2x25 kV, 50 Hz traction system calculation. Ingegneria Ferroviaria, nov. 2009, pp. 979-998.

[CHEN, 2016]. Chen, Y., White, R., Fella, T., Hillmansen, S., Weston, P., Multi-conductor model for AC railway train simulation, IET Electrical Systems in Transportation, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 67-75.

[EMERY, 2011]. Emery, D., Headways on High Speed Lines, World Congress on Railway Research, May 22-26, 2011, Lille.

[HILL, 1994]. Hill, R. J., Electric railway traction. Part 3. Traction power supplies, Power Engineering Journal, 1994, vol. 8, no. 6, pp. 275-286.

[HSI, 1999]. Hsi, P.-H., Chen, S.-L., Li, R.-J. Simulating on-line dynamic voltages of multiple trains under real operating conditions for AC railways. IEEE transactions on power systems, 1999, vol. 14, no. 2, p. 452-459.

[KIESSLING, 2008]. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., Vega T. Líneas de contacto para ferrocarriles electrificados. Planificación, Diseño, Instalación, Mantenimiento, Buchdruckerei und Verlag, 2008.

[KNESCHKE, 2004]. Kneschke, T., Mbika, P., Determination of traction power distribution system impedances and susceptances for AC railroad electrification systems, ASME/IEEE Joint Rail Conference, 2004, pp. 27-34.

[MINGPRUK, 2016]. Mingpruk, N., Leeton, U., Kulworawanichpong, T., Modeling and simulation of voltage unbalance in AC electric railway systems using MATLAB/Simulink, 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2016, pp. 13-18.

Capítulo 6 Análisis de un plan de transporte cadenciado

Lista de símbolos

R_x : Resistencia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en Ω .

X_x : Reactancia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en $j\Omega$.

Z_x : Impedancia de solapamiento por subsecciones de los circuitos de tracción, en $\Omega + j\Omega$.

$x_{SET,n}$: Posición de la subestación eléctrica de tracción de la sección n , en km.

$x_{PSP,n,m}$: Posición del puesto de subseccionamiento y puesta en paralelo m de la sección n , en km.

$x_{AT,n,m}$: Posición del autotransformador m de la sección n , en km.

$x_{AC,n}$: Posición del tren que presta el servicio n entre la estación A y la estación C, en km.

$x_{CA,n}$: Posición del tren que presta el servicio n entre la estación C y la estación A, en km.

$P_{SET,n}$: Potencia eléctrica activa en la subestación eléctrica de tracción de la sección n , en kW.

$Q_{SET,n}$: Potencia eléctrica reactiva en la subestación eléctrica de tracción de la sección n , en kVAR.

$S_{SET,n}$: Potencia eléctrica compleja en la subestación eléctrica de tracción de la sección n , en kW + jkVAR.

$P_{CT,n}$: Potencia eléctrica activa consumida por los circuitos de tracción en la sección n , en kW.

$Q_{CT,n}$: Potencia eléctrica reactiva consumida por los circuitos de tracción en la sección n , en kVAR.

$S_{CT,n}$: Potencia eléctrica compleja consumida por los circuitos de tracción en la sección n , en kW + jkVAR.

N_{AC} : Número de servicios de un plan de transporte cadenciado entre las estaciones A y C.

N_{CA} : Número de servicios de un plan de transporte cadenciado entre las estaciones C y A.

T_C : Tiempo de cadencia del plan de transporte, en min.

T_D : Tiempo de desfase entre la salida de dos servicios consecutivos en sentidos opuestos, en min.

$E_{SET,n}$: Energía neta suministrada por la subestación en la sección n, en kWh + jkVARh.

$E^+_{SET,n}$: Energía suministrada por la subestación en la sección n, en kWh + jkVARh.

$E^-_{SET,n}$: Energía recuperada por la subestación en la sección n, en kWh + jkVARh.

$E_{CT,n}$: Pérdida de energía en los circuitos de tracción en la sección n, en kWh + jkVARh.

E_{SET} : Energía activa neta consumida por el plan de transporte, en MWh/día.

E^+_{SET} : Energía activa importada por el plan de transporte, en MWh/día.

E^-_{SET} : Energía activa exportada por el plan de transporte, en MWh/día.

E_{CT} : Pérdida de energía activa en los circuitos de tracción por el plan de transporte, en MWh/día.

CE_{SET} : Coste económico de la energía consumida por el plan de transporte, en €/día.

6.1 Introducción

La explotación ferroviaria consiste básicamente en el seguimiento por parte de los trenes de las trayectorias programadas para los servicios ofertados sobre una línea. El proceso de programación del tráfico ferroviario debe atender simultáneamente a la demanda de transporte y a las limitaciones de la capacidad de la infraestructura y de los recursos disponibles. Con frecuencia, la programación de los servicios en líneas ferroviarias de alta velocidad se realiza tomando como base un módulo temporal que se repite periódicamente dando lugar a un plan de transporte cadenciado.

En este capítulo se propone un método para calcular la energía consumida por el sistema ferroviario durante la operación de un plan de transporte cadenciado. La estructura temporal repetitiva de este plan de transporte facilita el cálculo del consumo energético pues es suficiente con realizar la evaluación dentro de un módulo temporal. El consumo energético en todo el intervalo de tiempo de estudio se completa replicando el resultado obtenido para el módulo temporal siguiendo el patrón periódico del plan de transporte.

El método propuesto consiste en obtener el consumo energético en diferentes escenarios del plan de transporte. La variación del desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos da lugar a diferentes escenarios en los que aparecen distintos intervalos de concurrencia a lo largo del recorrido. En consecuencia, cada escenario evaluado tiene un consumo energético diferente a pesar de ofertar el mismo número de servicios.

Finalmente, seleccionando el desfase temporal óptimo se halla la programación del plan de transporte cadenciado que consume la mínima cantidad de energía.

6.2 Programación de un plan de transporte cadenciado

La elaboración de un plan de transporte ferroviario es un proceso de gran complejidad que se inicia con la respuesta a la demanda, continúa con el análisis de las restricciones a la operación y finaliza con la programación de los servicios [CORDEAU, 1998].

La estimación de la demanda de viajeros es la base de todo el proceso de programación. Tradicionalmente, la estimación de la demanda se ha basado principalmente en recogidas manuales de datos, por ejemplo, mediante encuestas a viajeros para estimar los patrones de viaje origen-destino. Sin embargo, estos métodos son costosos y poco fiables, ya que los

resultados obtenidos pueden estar sujetos al sesgo e incluso al error. Actualmente la mayoría de los sistemas de transporte ferroviario urbano disponen de sistemas automáticos de conteo de viajeros y de sistemas automáticos de validación de billetes. Los sistemas automáticos de conteo de viajeros se utilizan para computar el número de viajeros que suben y bajan de los trenes en las estaciones. Estos sistemas de conteo utilizan detectores instalados en las puertas de acceso a los trenes que registran los pasos de entrada y salida de los viajeros. Con los sistemas automáticos de validación de billetes, los viajeros han de validar sus títulos de transporte para poder entrar y salir de las estaciones. Ambos tipos de sistemas proporcionan una información precisa sobre los flujos de viajeros a los operadores ferroviarios [ZHAO, 2007].

En una primera aproximación, se proponen los recorridos a ser cubiertos y la frecuencia nominal de cada servicio. El grado de libertad es limitado debido a las restricciones en la operación impuestas por el tamaño del parque de trenes con los que se vaya a prestar el servicio, por sus prestaciones dinámicas y por la capacidad de la infraestructura sobre la que circularán.

Al tratarse de un movimiento guiado por los carriles, es preciso tener en cuenta que los trenes sobre una misma vía sólo pueden adelantarse o cruzarse entre sí a través de dispositivos situados en lugares fijos, denominados aparatos de vía. Además, debido a la relativamente baja adherencia entre las ruedas de los trenes y los carriles, las distancias de frenado de los trenes son considerablemente largas. Esto obliga a que los vehículos ferroviarios circulen con suficiente separación temporal entre sí para garantizar la seguridad. En consecuencia, la programación de las marchas de todos los trenes que circulan sobre una misma línea ferroviaria es una tarea compleja que debe ser abordada en conjunto para hacer posible el reparto eficiente y seguro de la capacidad de transporte. Esta programación ha de incluir los horarios de todas las operaciones auxiliares necesarias para la circulación de los trenes (paradas técnicas, cruces en vía única, acoplamientos, etc.).

En definitiva, la programación de la operación ferroviaria ha de conjugar la respuesta al patrón de demanda previamente estimado con las prestaciones dinámicas reales de los trenes que vayan a prestar cada servicio y las características de los trazados por los que vayan a circular. El resultado de este proceso de programación debe ser un conjunto de marchas de circulación factibles, seguras y compatibles entre sí [HANSEN, 2008].

6.2.1 Marcha tipo de un tren

Durante su movimiento a lo largo de una línea ferroviaria, cada tren regula su velocidad desarrollando una trayectoria individual que se ve influenciada por varios factores. Por un lado, los agentes meteorológicos y las condiciones del entorno físico obligan ocasionalmente a reducir la velocidad de circulación. Por otro lado, el estado de la vía no permanece inalterable, sino que va sufriendo una degradación constante, haciendo que se establezcan limitaciones de velocidad en algunos trayectos de la línea. Además, en las circulaciones en las que el maquinista regula manualmente la velocidad del tren, el estilo de conducción debe ser considerado como un factor más que influye en la trayectoria realizada.

En la Figura 6.1, se ha representado la trayectoria de un tren $x(t)$ –entendida como una función continua que representa la posición del tren en la vía en cada instante de tiempo– y su marcha programada –que recoge la secuencia discreta de puntos en la vía cuya hora de paso debe ser cumplida por el tren–. La explotación ferroviaria exige que las trayectorias de los trenes cumplan las marchas programadas, a menos que existan causas imprevistas que lo impidan. Por lo tanto, el flujo de los trenes por la infraestructura ferroviaria no es totalmente libre y se reduce considerablemente la variedad de las trayectorias posibles que un tren puede desarrollar en su recorrido.

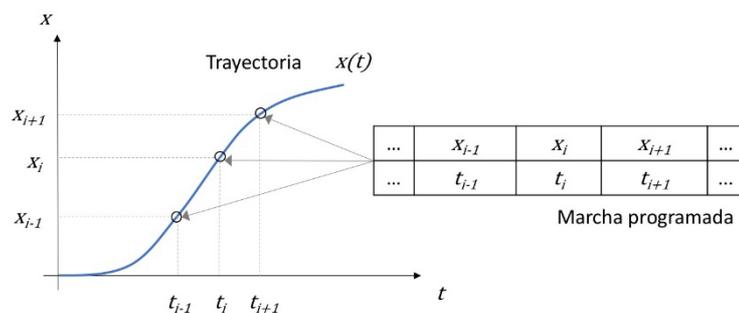


Figura 6.1. Marcha programada y trayectoria de un tren

Para asegurar la robustez de los horarios ofertados, las marchas programadas tienen que ser factibles y reproducibles bajo diversas condiciones de explotación. Por este motivo, deben incluir unos márgenes temporales de reserva suficientes que permitan mantener el cumplimiento de los horarios programados ante la aparición de ligeras perturbaciones.

En las recomendaciones de la UIC relativas a los márgenes de regularidad que deben ser incorporados en los horarios para garantizar la puntualidad del servicio [UIC, 2000], se definen los siguientes conceptos:

- a) Tiempo de marcha base. Es el tiempo mínimo para recorrer un tramo de una determinada línea, con una cierta carga, considerando los siguientes factores:
 - La conducción del tren por parte del maquinista.
 - Las prestaciones dinámicas ofrecidas por el material motor.
 - La velocidad permitida por el trazado.
 - La resistencia al avance.
 - La adherencia.
 - La alimentación de la corriente de tracción.
- b) Margen de regularidad. Representa un tiempo adicional al tiempo de marcha de base para compensar los retrasos debidos a:
 - Los trabajos periódicos de conservación de las instalaciones que son susceptibles de ser planificados y modulados.
 - Los posibles tiempos perdidos a causa de incidentes técnicos a nivel de explotación, condiciones meteorológicas adversas, estacionamientos elevados en estaciones por una elevada afluencia de viajeros, etc.
- c) Margen suplementario. Representa un incremento de tiempo destinado a compensar los retrasos debidos a la realización de trabajos importantes en las instalaciones y durante un periodo prolongado de tiempo. También se incluyen los retrasos que se producen en grandes nudos ferroviarios por causa de las operaciones de maniobra que se derivan de la configuración de su infraestructura.
- d) Tiempo de marcha tipo. Es la suma del tiempo de la marcha de base más los márgenes de regularidad y suplementarios que se añadan.

6.2.2 Capacidad de la infraestructura

El principio básico que garantiza el movimiento seguro de los trenes por las líneas ferroviarias es el bloqueo de vía. A través de este mecanismo, se asegura la circulación exclusiva de un solo tren por cada segmento de vía, denominado cantón, y se evitan eventuales colisiones frontales o por alcance. Así, para que un tren pueda circular por un cantón, debe existir garantía de que éste se encuentre libre y haya sido bloqueado para impedir que otro tren lo utilice simultáneamente. Como se observa en la Figura 6.2, al aplicar el bloqueo de vía sólo

a un cantón y no a la línea completa, es posible la circulación de sucesivos trenes a medida que los trenes precedentes abandonan el cantón y se libera.

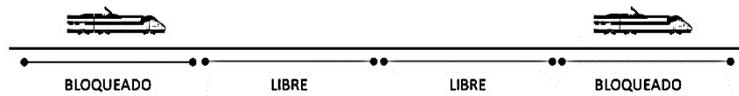


Figura 6.2. Bloqueo de cantones en una línea ferroviaria

Una vez definidas las marchas tipo correspondientes a todos los servicios programados sobre una misma línea, es preciso organizarlas temporalmente para que se ajusten a los bloqueos que exige la vía. En este proceso se puede recurrir a modificar ligeramente los tiempos de las marchas tipo, a través de pequeñas variaciones de los márgenes suplementarios, a fin de lograr la compatibilidad entre todas las marchas previstas sobre la vía. A medida que se incrementa el número de servicios programados sobre una vía, aparece una mayor dificultad para satisfacer los objetivos comerciales inicialmente previstos para cada uno (horario, tiempo de viaje, etc.).

Para poder llevar a cabo con éxito la compatibilización de las marchas de todos los servicios programados sobre una línea, se deben conocer previamente los límites de la intensidad de tráfico que ésta puede cursar, es decir, su capacidad. La capacidad de una línea ferroviaria puede ser calculada a partir de la mínima distancia segura a la que pueden circular dos trenes consecutivos en un mismo sentido y por una misma vía. Esta distancia es la necesaria para evitar un alcance tras un frenado de emergencia del tren precedente.

En las vías modernas el sistema de señalización habitualmente empleado es el denominado bloqueo automático en vía doble, controlado desde un sistema central sin intervención humana. La circulación de los trenes en vía doble permite la organización por separado de los tráficos de ambos sentidos dividiendo el problema de la programación de las marchas en dos problemas independientes. El control automático del tráfico en estas líneas aumenta considerablemente su capacidad debido a los menores tiempos de establecimiento y liberación de bloqueo en los cantones [GENOVESI, 2006]. En el caso de las vías de alta velocidad, se suelen utilizar cantones móviles que definen zonas seguras por delante y por detrás que se desplazan a medida que el tren avanza. En comparación con un sistema de regulación mediante cantón fijo, el cantón móvil permite que la distancia entre dos trenes

consecutivos sea menor a la misma velocidad de servicio, aumentando así la capacidad de transporte [UIC, 2008]. Este sistema de regulación necesita una comunicación continua con los trenes para conocer en todo momento sus ubicaciones exactas y sus velocidades. A partir de esta información, el centro de regulación de tráfico calcula y transmite a cada tren su autorización de movimiento [TAKEUCHI, 2003].

6.2.3 Estructura temporal de un plan de transporte cadenciado

Un plan de transporte cadenciado es el resultado de una programación de servicios para una relación ferroviaria entre un origen y un destino en el que los horarios de los trenes se repiten cíclicamente. La elaboración de una oferta de transporte de este tipo se simplifica ya que el trabajo de programación se desarrolla solamente sobre un módulo temporal de duración reducida. Adicionalmente, desde el punto de vista de los viajeros, resulta ventajoso disponer de una oferta continua de servicios a lo largo de la jornada cuyos horarios son fáciles de memorizar. Los horarios cadenciados son frecuentes en las líneas dedicadas exclusivamente al transporte de viajeros por las que circulan trenes de similares prestaciones dinámicas, especialmente en líneas de alta velocidad [YANG, 2010].

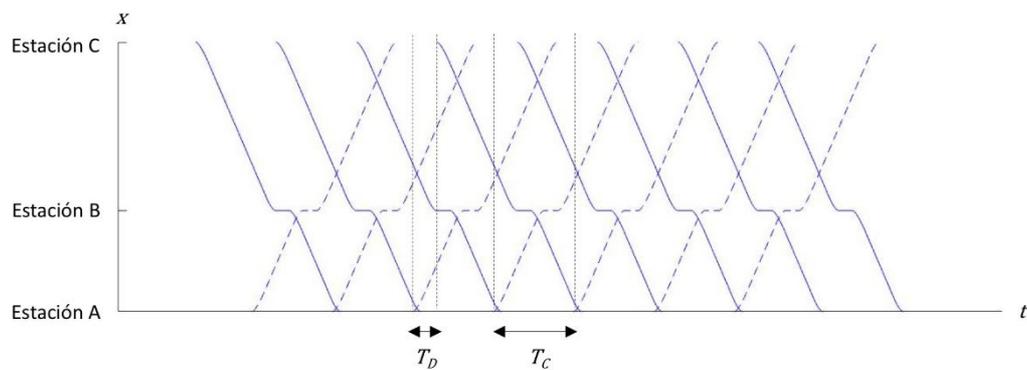


Figura 6.3. Gráfico de marchas programadas de un plan de transporte cadenciado

En la Figura 6.3 se representa el gráfico de marchas programadas de un plan de transporte cadenciado para una relación ferroviaria de media distancia sobre una línea dedicada al transporte de viajeros en alta velocidad. Este gráfico es una representación cartesiana de las marchas tipo, es decir, las trayectorias teóricas de todos los trenes que deben circular por una línea a lo largo de un intervalo de tiempo. En el eje de abscisas se representa la escala

temporal y en el eje de ordenadas la escala espacial donde se indican las estaciones. Cada una de las líneas representa la marcha programada de un servicio. Las líneas con trazo discontinuo representan los servicios AC—desde la estación A hasta la estación C— y las líneas con trazo continuo, los servicios CA, que circulan en sentido opuesto. Tanto los servicios AC como los servicios CA realizan una parada intermedia en la estación B.

Como se puede apreciar en la Figura 6.3, todos los servicios de un mismo sentido siguen la misma marcha tipo, que se repite con una cadencia. El tiempo de separación entre dos servicios consecutivos en el mismo sentido T_C es equivalente a la duración del módulo temporal de repetición o tiempo de cadencia del plan de transporte. Por otro lado, el tiempo transcurrido entre la salida de un servicio AC y el siguiente servicio CA es el desfase T_D . En definitiva, un plan de transporte cadenciado como el representado está determinado por la marcha tipo en cada sentido y los tiempos de cadencia T_C y de desfase T_D .

Las expresiones (6.1) y (6.2) contienen las trayectorias programadas en ambos sentidos de los servicios que forman un plan de transporte cadenciado con un tiempo de cadencia T_C y un tiempo de desfase T_D . Este plan de transporte está formado por N_{AC} servicios AC, y N_{CA} servicios CA, en sentido opuesto. El desfase T_D es el periodo de tiempo entre la salida de un servicio AC y la salida del siguiente servicio CA.

$$x_{AC,n}(t) = x_{AC,tipo}(t - n T_C), n = 1 \dots N_{AC} \quad (6.1)$$

$$x_{CA,n}(t) = x_{CA,tipo}(t - n T_C - T_D), n = 1 \dots N_{CA} \quad (6.2)$$

Trayectorias programadas de un plan de transporte cadenciado

Las marchas tipo programadas $x_{AC,tipo}(t)$ y $x_{CA,tipo}(t)$, incluyendo los tiempos de parada en las estaciones, y su frecuencia de repetición son el resultado de un proceso de programación que atiende a la demanda de viajeros, compatibiliza el uso de todos los recursos disponibles y se ajusta a la capacidad de la infraestructura. En la literatura se encuentran numerosos trabajos sobre la optimización de un plan de transporte cadenciado a través de la modificación de las marchas tipo o del tiempo de cadencia T_C . En estos trabajos se trata de lograr una programación suficientemente robusta, con un tiempo de viaje atractivo y un número de trenes acotado [PEETERS, 2001].

Si bien un cambio en las marchas tipo programadas o en su tiempo de cadencia T_C implica una modificación sustancial del plan de transporte, una variación en el desfase T_D no modifica en esencia los servicios ofertados y no compromete los recursos disponibles. Por lo tanto, el desfase T_D es un parámetro que se puede variar sin afectar a las optimizaciones que se hayan podido realizar previamente sobre el plan de transporte. Dada la estructura temporal periódica de un plan de transporte cadenciado, el rango de variación del parámetro T_D se puede extender desde cero hasta el tiempo de cadencia T_C .

6.3 Consumo energético de un plan de transporte cadenciado

A continuación, se evaluará la repercusión de la variación del valor del tiempo de desfase T_D en el consumo energético de un plan de transporte cadenciado. Esta evaluación se llevará a cabo sin alterar la capacidad de transporte ofertada. Por lo tanto, no se modificarán las marchas tipo de los trenes ni el tiempo de cadencia T_C del plan de transporte.

A modo de ejemplo, la evaluación de la influencia del desfase T_D sobre el consumo energético se realizará sobre el plan de transporte cadenciado representado en la Figura 6.3. Consideraremos que los servicios prestados en este plan de transporte se desarrollan sobre un recorrido de 180 kilómetros, horizontal, recto y al aire libre. Como se muestra en la Figura 6.4, las estaciones A, B y C están situadas en los puntos kilométricos 0, 67,5 y 180, respectivamente.

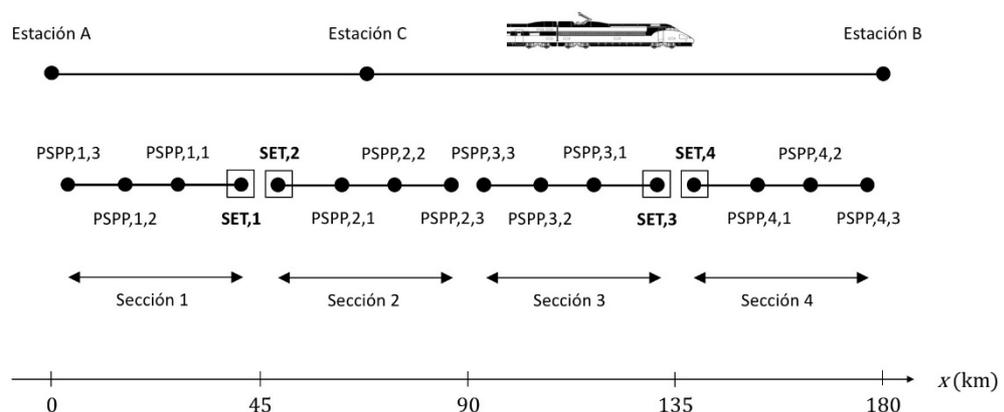


Figura 6.4. Recorrido de los servicios e infraestructura de electrificación

Para hacer posible la compatibilidad de todos los trenes circulantes a lo largo de este recorrido, la trayectoria de cada tren debe respetar la marcha tipo programada. Por simplicidad, en este estudio se considera que todos los trenes que parten de la estación A hacia la estación C siguen la trayectoria tipo $x_{AC,tipo}(t)$ y el movimiento de todos los trenes en sentido contrario se ajusta a la trayectoria tipo $x_{CA,tipo}(t)$. Como se ha expuesto en el Capítulo 2 y se ha expresado en (2.15), el cumplimiento de estas trayectorias exige que cada tren regule la fuerza de tracción y frenado $F_{TF}(t)$ y supere la resistencia al avance total que experimenta. En este caso de estudio, los trenes sólo deben afrontar la resistencia básica al avance R_{tren} , pues circulan por un recorrido horizontal, recto y al aire libre, y, en consecuencia, la resistencia debida a la infraestructura R_{infra} es nula.

Para prestar los servicios de este plan de transporte cadenciado se ha seleccionado un parque de trenes homogéneo, similar a los utilizados actualmente en los servicios de media distancia sobre redes ferroviarias de alta velocidad [RENFE, 2020]. El parque empleado está formado por trenes idénticos, de una longitud de 105,52 metros, una masa en vacío de 228,8 toneladas y una capacidad de 238 plazas. Cada tren está compuesto por cuatro coches no articulados y cada coche consiste en una caja soportada por dos bogies de dos ejes. La cadena de tracción de este tipo de tren, tal y como se ha presentado en el Capítulo 3, es alimentada desde la catenaria a una tensión de 25 kV y en corriente alterna a 50 Hz. La corriente de la línea aérea de contacto es captada desde uno de los pantógrafos situados en los coches extremos del tren y es conducida hasta sus unidades de tracción. Cada coche del tren dispone de una unidad de tracción, que está formada por un convertidor de tracción y dos motores asíncronos. Cada motor asíncrono está conectado, a través de una reductora, al eje más próximo del centro de la caja del coche. En definitiva, todos los bogies del tren tienen un eje motor y, por tanto, la tracción de este tren es distribuida. La potencia continua total en las ruedas del tren es 4000 kW y la velocidad máxima de circulación es 250 km/h. Adicionalmente, este tipo de tren cuenta con freno eléctrico regenerativo que actúa sobre los ejes motores. Durante la operación, el freno de servicio conjuga el frenado eléctrico y el frenado neumático.

La infraestructura de electrificación encargada de proporcionar la potencia eléctrica a los trenes que circulan por el recorrido considerado en este estudio está formada por cuatro secciones del sistema 2x25 kV. Como se ha explicado en el Capítulo 5 y se puede observar en la Figura 6.4, cada sección de electrificación del sistema 2x25 kV es alimentada desde un extremo por una subestación de electrificación SET, n y está dotada de varios puestos de

subseccionamiento y puesta en paralelo PSPP, n,m , que alojan los autotransformadores AT, n,m , respectivamente. En este caso de estudio, cada sección dispone de tres PSPP, n,m uniformemente distribuidos en toda su longitud. Las operaciones de mantenimiento del sistema de electrificación no tienen influencia sobre las trayectorias de los trenes puesto que son ejecutadas fuera del horario de prestación de servicio.

La base teórica desarrollada en este capítulo y en los capítulos precedentes, nos permite afrontar el estudio eléctrico de un plan de transporte cadenciado con dos herramientas que facilitan su simplificación. Como veremos a continuación, estas herramientas de análisis reducen el problema del cálculo del consumo energético de un plan de transporte cadenciado a un conjunto de cálculos acotados en el tiempo y en el espacio.

6.3.1 Análisis temporal

Por un lado, la estructura temporal periódica de un plan de transporte cadenciado facilita la reducción del estudio de las magnitudes eléctricas de interés a un intervalo de tiempo de duración T_C . Para conocer los valores de estas magnitudes fuera del intervalo de tiempo estudiado sólo hay que replicar los valores obtenidos siguiendo la cadencia de repetición.

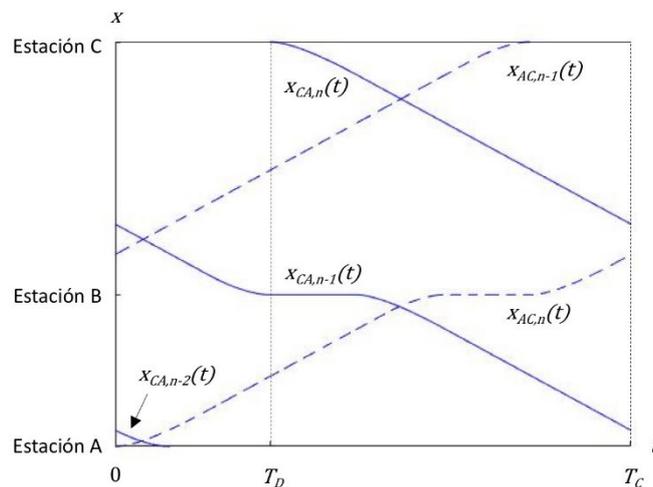


Figura 6.5. Intervalo de estudio de un plan de transporte cadenciado

En la Figura 6.5 se representa el intervalo de estudio elegido para el plan de transporte cadenciado de la Figura 6.3. Este intervalo de estudio elegido se extiende entre los instantes

de salida de dos trenes AC consecutivos. Sin embargo, dada la estructura temporal cíclica de este plan de transporte, podría haberse elegido cualquier otro intervalo cuya duración fuera T_C .

Como se puede observar en la Figura 6.5, el intervalo temporal de estudio contiene las trayectorias completas de un servicio en cada sentido. Cada una de estas dos trayectorias completas no pertenece a un único servicio, sino que es el resultado de la composición a partir de las trayectorias parciales de varios servicios que circulan simultáneamente durante el intervalo de estudio. Por lo tanto, en el intervalo temporal entre 0 y T_C , la trayectoria completa de un servicio AC está formada por las trayectorias parciales $x_{AC,n-1}(t)$ y $x_{AC,n}(t)$, y la trayectoria completa de un servicio CA se obtiene de la composición de las trayectorias parciales $x_{CA,n-2}(t)$, $x_{CA,n-1}(t)$ y $x_{CA,n}(t)$.

La variación del parámetro T_D da lugar a diferentes disposiciones de las trayectorias parciales entre la estación C y la estación A, pero su composición siempre resulta en la trayectoria completa de un servicio CA dentro del intervalo de estudio.

6.3.2 Análisis espacial

Por otro lado, en los modelos desarrollados en los capítulos precedentes se ha asumido que la red de transporte del sistema de suministro eléctrico es suficientemente robusta y no se ve afectada por las variaciones de las cargas del sistema eléctrico ferroviario provocadas por el movimiento de los trenes. En consecuencia, el cálculo de las magnitudes eléctricas puede realizarse independientemente para cada sección de electrificación. Esto permite descomponer espacialmente el estudio eléctrico de la línea ferroviaria por secciones, siguiendo su topología de electrificación.

En la Figura 6.6 se muestra el análisis espacial aplicado sobre el intervalo de estudio obtenido previamente del análisis temporal, considerando que el plan de transporte cadenciado se desarrolla sobre la infraestructura ferroviaria electrificada en cuatro secciones mediante el sistema 2x25 kV representada en la Figura 6.4.

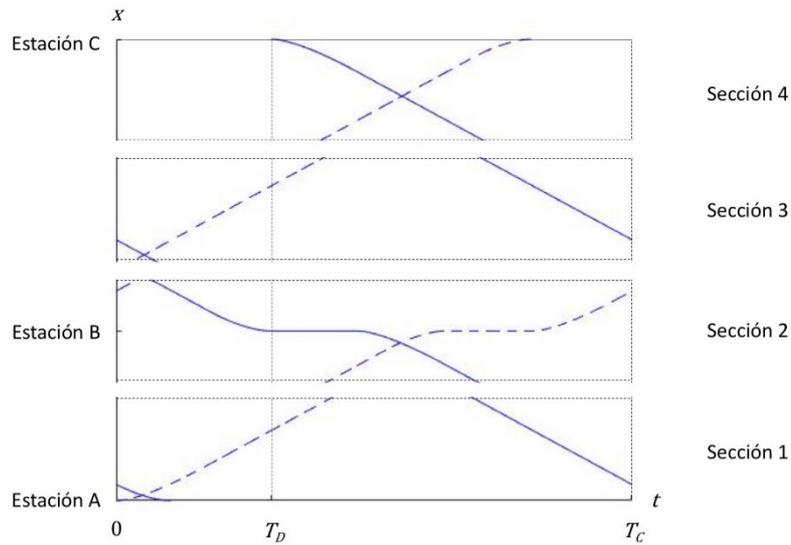


Figura 6.6. Descomposición espacial del intervalo de estudio

En definitiva, el estudio eléctrico de una línea ferroviaria sobre la que opera un plan de transporte cadenciado puede reducirse al cálculo independiente de las magnitudes eléctricas en cada sección de electrificación durante un intervalo de tiempo de duración T_C . Mediante las expresiones (6.3) y (6.4) se obtienen las trayectorias parciales de la programación del plan de transporte que deben ser incluidas en el estudio de una sección de electrificación cuya longitud es L .

$$x_{AC,n}(t) = x_{AC,tipo}(t - n T_C), n \in [1, N_{AC}], t \in [0, T_C], x \in [0, L] \quad (6.3)$$

$$x_{CA,n}(t) = x_{CA,tipo}(t - n T_C - T_D), n \in [1, N_{CA}], t \in [0, T_C], x \in [0, L] \quad (6.4)$$

Trayectorias incluidas en el estudio de una sección

6.3.3 Potencia en las secciones de electrificación

6.3.3.1 Potencia en las subestaciones de tracción

Tal y como se ha comprobado en el Capítulo 5, una parte de la potencia en los transformadores de las subestaciones de tracción de cada sección es consumida por los circuitos de tracción. Cuando coinciden dos trenes dentro de una misma sección, el valor de esta pérdida de potencia en el sistema de electrificación está influido por la superposición de

sus circuitos de tracción y, por tanto, depende de la combinación espacial y temporal de sus trayectorias.

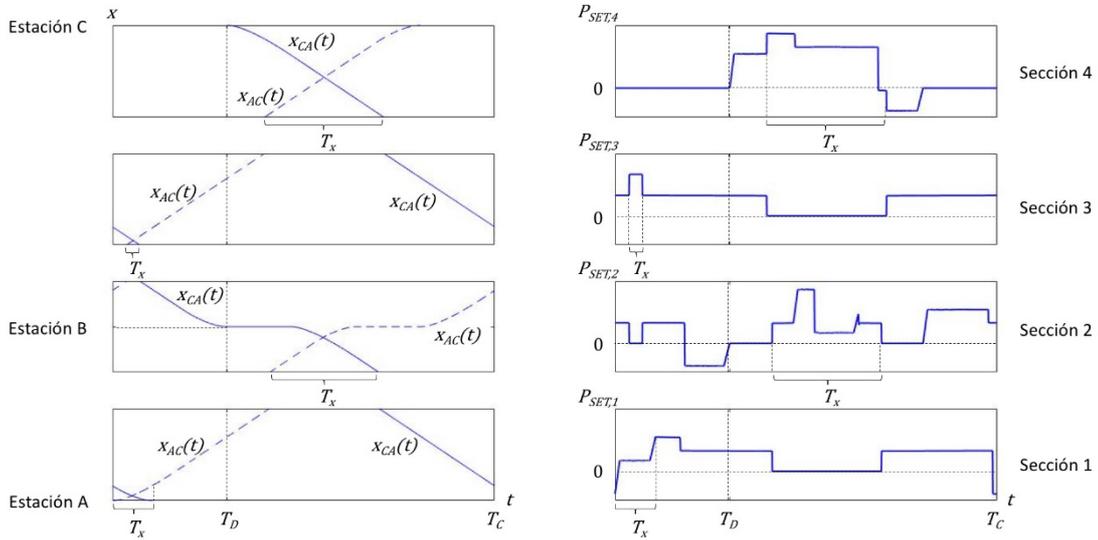


Figura 6.7. Trayectorias y potencia activa en las subestaciones eléctricas de tracción

En la parte izquierda de la Figura 6.7 se representan las trayectorias parciales resultantes del análisis espacial y temporal del plan de transporte cadenciado considerado en este capítulo. En cada una de las cuatro secciones de electrificación se identifica el intervalo de concurrencia generado por estas trayectorias. Estos intervalos de concurrencia son el resultado del valor concreto del desfase T_D representado en la Figura 6.6. La elección de otro valor para el desfase T_D originaría otros intervalos de concurrencia en las secciones. En la parte derecha de la Figura 6.7 se ha representado la potencia activa en las cuatro subestaciones de tracción $P_{SET,n}(t)$ que alimentan respectivamente las cuatro secciones del recorrido durante el intervalo temporal comprendido entre 0 y T_C .

En la Figura 6.8 se representan en detalle las trayectorias y la potencia activa en la subestación de la primera sección de electrificación $P_{SET,1}(t)$ durante el intervalo temporal de estudio comprendido entre 0 y T_C . La infraestructura de electrificación de esta primera sección está formada por la subestación de tracción SET,1, situada en $x_{SET,1}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSP,1,m}$. La estación A, cuya posición se indica en la Figura 6.7, está situada en el extremo opuesto a la subestación. Como se puede apreciar en la parte izquierda de la Figura 6.8, el intervalo de concurrencia T_x originado por el

desfase T_D en esta primera sección se extiende entre los instantes 0 y t_3 . En este intervalo de concurrencia se produce la coincidencia de la salida de un tren AC desde la estación A con el frenado de llegada de un tren CA a la misma estación. En la potencia activa en la subestación eléctrica de tracción $P_{SET,1}(t)$, representada en la parte derecha de la Figura 6.8, se pueden identificar tres subintervalos de tiempo dentro del intervalo de concurrencia. Entre los instantes 0 y t_1 , el tren AC comienza la tracción en régimen de par constante y mientras el tren CA frena en régimen de potencia constante. Durante este subintervalo de tiempo, la cadena de tracción del tren AC demanda progresivamente más potencia. En los instantes iniciales, el frenado del tren CA es suficiente para suministrar toda la potencia que demanda el tren AC y la potencia activa en la subestación $P_{SET,1}(t)$ es negativa. Sin embargo, hay un instante en que la potencia activa en la subestación $P_{SET,1}(t)$ pasa a ser positiva. A partir de ese instante, la cadena de tracción del tren AC recibe potencia desde el frenado del tren CA y desde la subestación. Entre los instantes t_1 y t_2 , el frenado a máxima potencia del tren CA coincide con la tracción a máxima potencia del tren AC. Entre los instantes t_2 y t_3 , el tren CA ha reducido su velocidad y pasa a frenar en régimen de par constante mientras que el tren AC sigue acelerando a la máxima potencia. En consecuencia, la reducción de la potencia de frenado del tren CA hace aumentar gradualmente la potencia activa que debe suministrar la subestación al tren AC. En el instante t_3 el tren CA llega a la estación A y finaliza el intervalo de concurrencia. Entre los instantes t_3 y t_4 , la subestación debe aportar toda la potencia que demanda el tren AC, que sigue acelerando en régimen de potencia constante. A continuación, entre los instantes t_4 y t_5 , el tren AC circula a velocidad de crucero, su cadena de tracción maneja una potencia constante y la potencia activa en la subestación $P_{SET,1}(t)$ permanece estable. A partir del instante t_5 y hasta el instante t_6 , no circula ningún tren por la sección y, en consecuencia, la potencia activa en la subestación $P_{SET,1}(t)$ es nula.

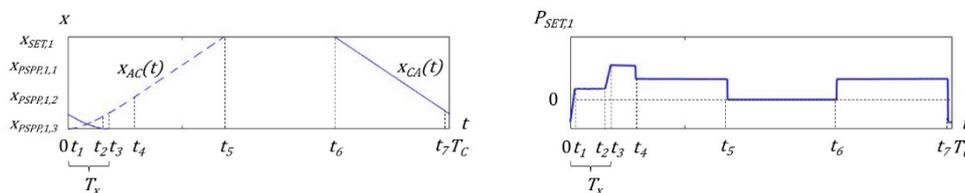


Figura 6.8. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 1

En la parte final del intervalo de estudio representado en la Figura 6.8, se observa la aproximación de un tren CA a la estación A. En el instante t_6 el tren CA ingresa en la primera sección circulando a velocidad de crucero y en el instante t_7 el tren CA comienza a frenar en régimen de potencia constante. En consecuencia, la potencia activa en la subestación $P_{SET,1}(t)$ es positiva entre los instantes t_6 y t_7 , y pasa a ser negativa a partir del instante t_7 . Al finalizar el intervalo temporal de estudio, en el instante T_C , el tren CA está frenando en régimen de potencia constante.

La infraestructura de electrificación de la segunda sección, indicada en la Figura 6.9, está formada por la subestación de tracción SET,2, situada en $x_{SET,2}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,2,m}$. La estación B, cuya posición se indica en la Figura 6.7, está situada en el punto medio de esta segunda sección. En la parte inicial del intervalo de estudio, entre los instantes 0 y t_1 , se observa la circulación en fase de crucero de un tren AC y la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ es positiva y estable. Entre los instantes t_1 y t_2 , no circula ningún tren por la sección y la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ es nula. En el instante t_2 , un tren CA ingresa en la sección y circula en fase de crucero hasta el instante t_3 . Por tanto, entre los instantes t_2 y t_3 , la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,2}(t)$ es estable. A continuación, en el instante t_3 , el tren CA inicia la fase de frenado en su aproximación a la estación B. Este frenado se desarrolla en régimen de potencia constante, entre los instantes t_3 y t_4 , y en régimen de par constante, entre los instantes t_4 y t_5 . Estos dos regímenes son apreciables en la potencia activa recibida por la subestación $P_{SET,2}(t)$. Hasta el instante t_6 , la potencia activa en la subestación es nula pues el tren CA se encuentra detenido en la estación B.

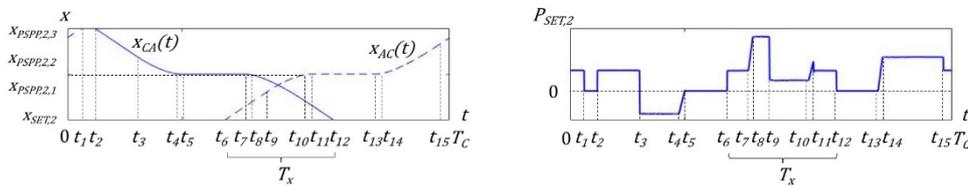


Figura 6.9. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 2

Como se puede observar en la Figura 6.9, el intervalo de concurrencia T_x originado por el desfase T_D en la segunda sección comprende el periodo de tiempo entre los instantes t_6 y t_{12} . Durante este intervalo de concurrencia se desarrolla la salida de un tren CA de la estación B

y la llegada de un tren AC a la misma estación. La secuencia de eventos puede ser identificada analizando las trayectorias y la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ representadas en la Figura 6.9. En el instante t_6 , el tren AC ingresa en la sección a velocidad de crucero y la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ es prácticamente constante. En el instante t_7 , el tren AC sigue en fase de crucero y el tren CA comienza su salida de la estación B en régimen de tracción a par constante. Entonces, la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ es creciente hasta que, en el instante t_8 , el tren CA alcanza la velocidad base de sus motores de tracción. Desde el instante t_8 hasta el instante t_9 , la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$ es estable pues el tren CA acelera en régimen de potencia constante y el tren AC sigue en fase de crucero. En el instante t_9 , el tren AC comienza a frenar en régimen de potencia constante mientras el tren CA sigue acelerando en régimen de potencia constante. En esta situación, la cadena de tracción del tren CA recibe potencia del frenado del tren AC y de la subestación. Los valores de estas potencias permanecen estables entre los instantes t_9 y t_{10} . En el instante t_{10} , el tren AC pasa a frenar en régimen de par constante y, en consecuencia, la subestación debe incrementar gradualmente la potencia activa $P_{SET,2}(t)$ suministrada para atender a la potencia demandada por el tren CA, que sigue acelerando a potencia constante. En el instante t_{11} , coinciden los finales de la aceleración del tren CA y del frenado del tren AC. En consecuencia, entre los instantes t_{11} y t_{12} , se observa que la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,2}(t)$ se estabiliza, ya que el tren AC está detenido en la estación B y el tren CA circula en fase de crucero. A partir del instante t_{12} , el tren CA circula fuera de la sección y, hasta el instante t_{13} , la potencia activa en la subestación es nula pues el tren AC permanece detenido en la estación B.

La salida de la estación B del tren AC se produce en el instante t_{13} , con una fase de tracción a par constante hasta el instante t_{14} y una fase de potencia constante hasta el instante t_{15} . Finalmente, hasta el instante T_c , el tren AC circula a velocidad de crucero.

La infraestructura de electrificación de la tercera sección está formada por la subestación de tracción SET,3, situada en $x_{SET,3}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSP,3,m}$. En la Figura 6.10 se observa que el desfase T_D elegido para las trayectorias del plan de transporte cadenciado genera un intervalo de concurrencia T_x breve en esta tercera sección. Por un lado, entre el instante 0 y el instante t_2 , un tren CA circula en fase de crucero dentro de esta sección. Por otro lado, un tren AC circula en fase de crucero dentro de esta sección entre los instantes t_1 y t_3 . La combinación de ambas trayectorias da lugar al intervalo de concurrencia observado entre los instantes t_1 y t_2 . La potencia activa en la subestación $P_{SET,3}(t)$

es estable durante las trayectorias de ambos trenes y prácticamente dobla su valor en su intersección, es decir, durante el intervalo de concurrencia.

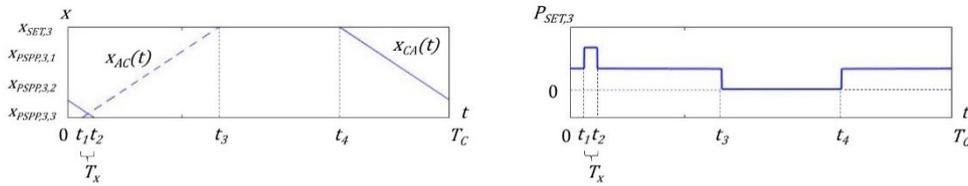


Figura 6.10. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 3

Entre los instantes t_3 y t_4 , no circula ningún tren dentro de la sección y, por tanto, la potencia activa en la subestación $P_{SET,3}(t)$ es nula. A partir del instante t_4 y hasta el instante T_C , un tren CA circula en fase de crucero por la sección. En consecuencia, la potencia activa en la subestación $P_{SET,3}(t)$ toma un valor positivo y estable.

Como en el resto de secciones que completan el recorrido entre las estaciones A y C, en la parte izquierda de la Figura 6.11 se muestra que la infraestructura de electrificación de la cuarta sección está formada por la subestación de tracción SET,4, situada en $x_{SET,4}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,4,m}$. La estación C, cuya posición se indica en la Figura 6.7, está situada en el extremo opuesto a la subestación. El valor del desfase T_D elegido para el plan de transporte cadenciado origina un intervalo de concurrencia T_x que se puede apreciar en la parte central del intervalo de estudio.

Desde el instante 0 hasta el instante t_1 , no circula ningún tren por la cuarta sección. En el instante t_1 , se observa la salida de un tren CA de la estación C, que se desarrolla a par constante hasta el instante t_2 y a potencia constante hasta el instante t_4 . Durante la fase de régimen de tracción a potencia constante, en el instante t_3 , un tren AC ingresa en la sección dando lugar al inicio del intervalo de concurrencia. El tren AC circula en fase de crucero y, en consecuencia, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,4}(t)$ se incrementa en el instante t_3 . En el instante t_4 , el tren CA finaliza la fase de tracción y comienza a circular a velocidad de crucero. Entonces, la potencia demandada por la cadena de tracción del tren CA se reduce y, en consecuencia, disminuye la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,4}(t)$ también. A continuación, entre los instantes t_4 y t_5 , la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,4}(t)$ permanece prácticamente constante pues ambos

trenes circulan en fase de crucero. En el instante t_5 , el tren AC comienza a frenar en régimen de potencia constante y se aprecia una reducción drástica de la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,4}(t)$ hasta un valor negativo. Entre los instantes t_5 y t_6 , el tren AC regenera suficiente potencia en su frenado para alimentar la cadena de tracción del tren CA y devolver la parte restante a la subestación. En el instante t_6 , el tren CA sale de la sección y finaliza el intervalo de concurrencia.

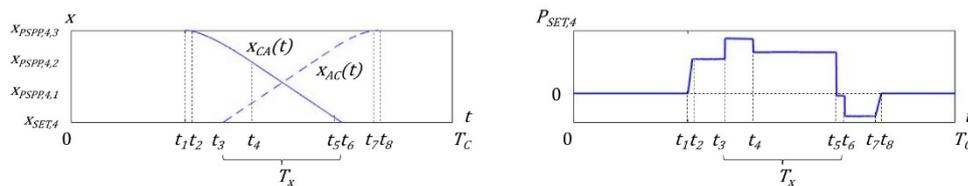


Figura 6.11. Trayectorias y potencia activa en la subestación de la sección 4

El frenado del tren AC en régimen de potencia constante continúa hasta el instante t_7 , momento en el que pasa a frenar en régimen de par constante. La potencia activa que recibe la subestación $P_{SET,4}(t)$ por el frenado del tren AC se va reduciendo hasta su detención en la estación C, en el instante t_8 . Finalmente, hasta el instante T_C no circula ningún tren por la cuarta sección.

6.3.3.2 Potencia consumida por los circuitos de tracción

El valor elegido para el desfase T_D entre los tiempos de salida del tren AC y del tren CA determina los intervalos de concurrencia representados en la Figura 6.12. En cada intervalo de concurrencia, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,n}(t)$ es la consumida por las cadenas de tracción de ambos trenes $P_n(t)$ más la pérdida de potencia activa que se produce en los circuitos de tracción en solapamiento $P_{CT,x}(t)$. Fuera de los intervalos de concurrencia, la potencia activa suministrada por la subestación $P_{SET,n}(t)$ es la consumida por la cadena de tracción de cada tren en circulación $P_n(t)$ más la pérdida de potencia activa en su circuito de tracción $P_{CT,n}(t)$.

En la Figura 6.12, se muestran las trayectorias parciales de los trenes y las pérdidas de potencia activa $P_{CT,n}(t)$ en las cuatro secciones de electrificación para el mismo valor del desfase T_D elegido y representado en la Figura 6.7. Los resultados mostrados para la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,n}(t)$ se obtienen a partir del mismo análisis

espacial y temporal del plan de transporte que ha sido realizado para los resultados presentados previamente para la potencia activa en las subestaciones de tracción $P_{SET,n}(t)$.

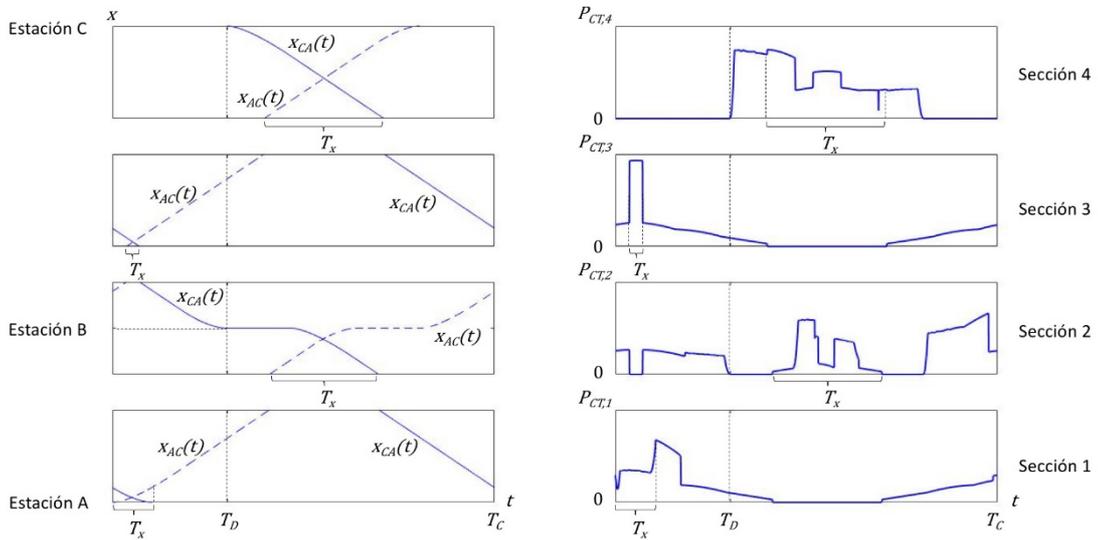


Figura 6.12. Trayectorias y pérdida de potencia activa en las secciones de electrificación

En la Figura 6.13 se representan en detalle las trayectorias y la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción de la primera sección de electrificación $P_{CT,1}(t)$ durante el intervalo temporal de estudio comprendido entre 0 y T_C . La infraestructura de electrificación de esta primera sección está formada por la subestación de tracción SET,1, situada en $x_{SET,1}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,1,m}$. La estación A, cuya posición se indica en la Figura 6.12, está situada en el extremo opuesto a la subestación, es decir, coincidiendo con la posición del PSPP,1,3.

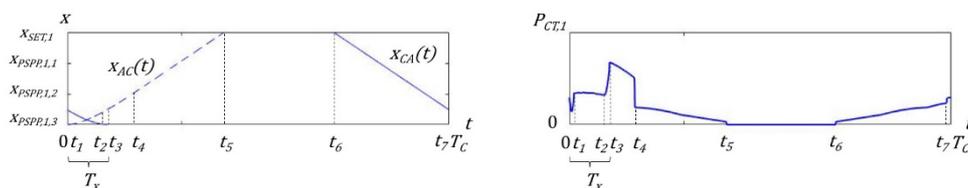


Figura 6.13. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 1

Como se puede apreciar en la parte izquierda de la Figura 6.13, el intervalo de concurrencia T_x originado por el desfase T_D en esta sección se extiende entre los instantes 0 y t_3 . Durante este intervalo de concurrencia coinciden la salida de un tren AC desde la estación A y el frenado de llegada de un tren CA a la misma estación.

En la parte derecha de la Figura 6.13, se observa que la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ entre los instantes 0 y t_1 es decreciente. Esto es debido a que en el instante 0 el tren CA se encuentra frenando en régimen de potencia constante y el tren AC comienza a ejercer tracción en régimen de par constante, es decir, elevando progresivamente la potencia en su cadena de tracción. En consecuencia, en el instante 0, parte de la potencia emitida por el tren CA es recibida por la subestación ya que su valor es superior a la potencia que puede admitir la cadena de tracción del tren AC. A medida que avanza la fase de tracción del tren AC, aumenta la cantidad de potencia que puede recibir proveniente del frenado del tren CA. Esto provoca que la potencia activa consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ se vaya reduciendo pues el valor negativo de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ va aumentando. Entre los instantes t_1 y t_2 , las cadenas de tracción de ambos trenes funcionan en régimen de potencia constante –el tren AC en tracción y el tren CA en frenado– y, por tanto, la pérdida de potencia en los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ se estabiliza. Entre los instantes t_2 y t_3 , el frenado del tren CA pasa a ser en régimen de par constante y la potencia en su cadena de tracción se reduce progresivamente. En consecuencia, el valor negativo de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ también se reduce y aumenta la potencia activa consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$. El tren CA se detiene en la estación A en el instante t_3 .

Entre los instantes t_3 y t_4 , ya fuera del intervalo de concurrencia, aunque el tren AC continúa su fase de tracción a potencia constante, se observa que la potencia consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ decrece. Esto es debido a que el tren AC circula acercándose hacia la subestación. En el instante t_4 el tren AC finaliza su fase de tracción y comienza a circular a velocidad de crucero. Dado que la potencia que consume la cadena de tracción en la fase de crucero es menor que en la fase de tracción, se observa una reducción puntual de la potencia consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ en el instante t_4 . A continuación, hasta la salida del tren AC de esta primera sección en el instante t_5 , la potencia consumida por los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ se va reduciendo a medida que el tren se acerca a la subestación.

En el instante t_6 , un tren CA entra en esta primera sección por el extremo en el que está ubicada la subestación $x_{SET,1}$. El tren CA circula a velocidad de crucero y, por tanto, la potencia

manejada por su cadena de tracción es constante. Sin embargo, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$ crece en el tiempo debido a que el tren CA se aleja de la subestación. En el instante t_7 , el tren CA comienza a frenar en su aproximación a la estación A. La potencia generada durante el frenado es superior a la potencia de tracción consumida durante la fase de crucero. En consecuencia, en el instante t_7 se incrementa puntualmente la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,1}(t)$.

En la Figura 6.14 se representan las trayectorias parciales y la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción de la segunda sección $P_{CT,2}(t)$ resultantes del análisis temporal y espacial del plan de transporte considerado. La infraestructura de electrificación de esta segunda sección está formada por la subestación de tracción SET,2, situada en $x_{SET,2}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,2,m}$. La estación B, cuya posición se indica en la Figura 6.12, está situada en el punto medio de la sección. El intervalo de concurrencia T_x se extiende desde el instante t_6 hasta el instante t_{12} . En el análisis de la potencia activa en la subestación $P_{SET,2}(t)$, realizado previamente sobre la Figura 6.9, se han identificado seis subintervalos dentro del intervalo de concurrencia: entre los instantes t_6 y t_7 el tren AC circula en crucero, en el instante t_7 el tren CA comienza su tracción a par constante y se simultanea con el crucero del tren AC, en el instante t_8 la tracción del tren CA pasa a potencia constante mientras el tren AC sigue en crucero, en el instante t_9 el tren AC empieza su frenado a potencia constante y la tracción del tren CA sigue a potencia constante, en el instante t_{10} el frenado del tren AC pasa a par constante y tracción del tren CA continúa a potencia constante, en el instante t_{11} el tren AC se detiene y en el instante t_{12} el tren CA finaliza su fase de tracción y pasa a circular en crucero.

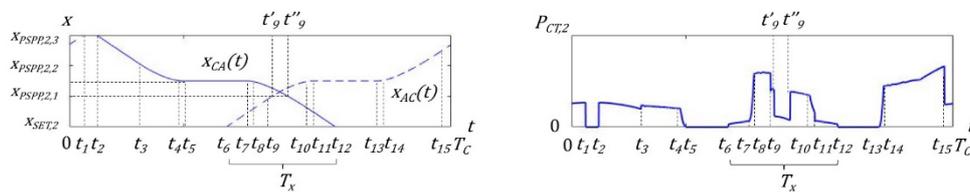


Figura 6.14. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 2

En la parte izquierda de la Figura 6.14, dentro del cuarto subintervalo, se han marcado los dos instantes de tiempo t'_9 y t''_9 correspondientes a los pasos de los dos trenes por el PSPP,2,1. Como se ha visto en el Capítulo 5, cada vez que el tren más próximo a la subestación

pasa por un PSPP dentro del intervalo de concurrencia, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ y, por tanto, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,2}(t)$ sufren una discontinuidad. Dado que entre estos dos instantes de tiempo ambos trenes se encuentran dentro de la misma subsección, el valor negativo de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ se eleva y, en consecuencia, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,2}(t)$ se reduce. Este efecto puede ser observado en la parte derecha de la Figura 6.14, entre los instantes t_9' y t_9'' .

Fuera del intervalo de concurrencia, sólo circula un tren dentro de esta segunda sección de electrificación y la tendencia de la pérdida de potencia en los circuitos de tracción $P_{CT,2}(t)$ observada en la Figura 6.14 es creciente o decreciente según el tren se aleje o se acerque a la subestación, respectivamente. Entre los instantes 0 y t_1 , se observa que un tren AC circula a velocidad de crucero dentro de esta segunda sección alejándose de la subestación. Entre los instantes t_2 y t_5 , se identifica la trayectoria de un tren CA, que se acerca a la subestación. Desde el instante t_2 este tren CA circula a velocidad de crucero aproximándose a la estación B y en el instante t_3 inicia su frenado. El frenado de este tren CA se desarrolla a potencia constante entre los instantes t_3 y t_4 , y finaliza a par constante entre los instantes t_4 y t_5 . Entre los instantes t_{13} y T_C , un tren AC sale de la estación B. La fase de tracción de este tren AC se desarrolla a par constante hasta el instante t_{14} y a potencia constante hasta el instante t_{15} . El cambio de pendiente de la pérdida de potencia activa $P_{CT,3}$, observado entre los instantes t_{14} y t_{15} , se debe al paso de este tren AC frente al autotransformador situado en el PSPP,2,2. Finalmente, desde el instante t_{15} hasta el instante T_C , este tren AC circula a velocidad de crucero.

El análisis temporal y espacial en la tercera sección del plan de transporte considerado da como resultado las trayectorias parciales y la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,3}(t)$ representadas en la Figura 6.15. La infraestructura de electrificación de esta tercera sección está formada por la subestación de tracción SET,3, situada en $x_{SET,3}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,3,m}$.

Las trayectorias resultantes del análisis espacial y temporal originan un breve intervalo de concurrencia T_x entre los instantes t_1 y t_2 , en el que un tren AC y un tren CA circulan a velocidad de crucero dentro de la sección. En la parte derecha de la Figura 6.15, se puede apreciar que la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,3}(t)$ durante el intervalo de concurrencia es superior a la suma de las pérdidas de potencia activa en el instante inmediatamente anterior a t_1 y en el instante inmediatamente posterior a t_2 , es

decir, cuando sólo circula uno de los trenes. Esta diferencia, como se puede observar en la expresión (5.10), es debida a la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$. Dado que las corrientes en los circuitos de tracción de ambos trenes siguen el mismo sentido y los trenes circulan por una zona alejada de la subestación durante el intervalo de concurrencia, la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ toma un valor positivo y elevado.

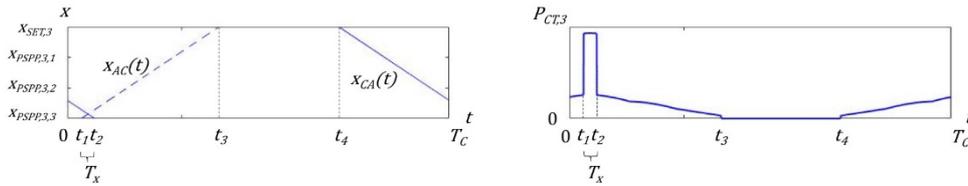


Figura 6.15. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 3

La tendencia de la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,3}(t)$ fuera del intervalo de concurrencia que se observa en la parte derecha de la Figura 6.15, se corresponde con la evolución de las posiciones de los trenes, $x_{AC}(t)$ y $x_{CA}(t)$, respecto a la posición de la subestación $x_{SET,3}$. Todos los movimientos de los trenes fuera del intervalo de concurrencia en esta tercera subsección se desarrollan a velocidad de cruce. Entre los instantes 0 y t_1 , y entre los instantes t_4 y T_C , dos trenes CA se alejan de la subestación, respectivamente. Entre los instantes t_2 y t_3 un tren AC se acerca a la subestación.

Las trayectorias parciales y la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,4}(t)$ en la cuarta sección han sido representadas en la Figura 6.16. La infraestructura de electrificación de esta cuarta sección está formada por la subestación de tracción SET,4, situada en $x_{SET,4}$, y tres autotransformadores de tracción, ubicados en $x_{PSPP,4,m}$. La estación C, cuya posición se indica en la Figura 6.12, está situada en el extremo opuesto a la subestación, es decir, coincidiendo con la posición del PSPP,4,3.

En esta cuarta sección de electrificación, el intervalo de concurrencia T_x comienza en el instante t_3 , con la entrada en la sección del tren AC, y finaliza en el instante t_6 , con la salida de la sección del tren CA. En los instantes t_4' y t_4'' se producen dos pasos por el PSPP,4,1 del tren más próximo a la subestación dentro del intervalo de concurrencia. En estos pasos, como se observa en la Figura 6.16, la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,4}(t)$ sufre una discontinuidad, originada por la discontinuidad de la potencia

activa de solapamiento $P_x(t)$. Entre estos dos instantes de tiempo, ambos trenes se encuentran circulando a velocidad de cruceo en la misma subsección y el valor de la potencia activa de solapamiento $P_x(t)$ se eleva. En consecuencia, en la parte derecha de la Figura 6.16 se observa que la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,4}(t)$ se eleva entre los instantes t_4' y t_4'' .

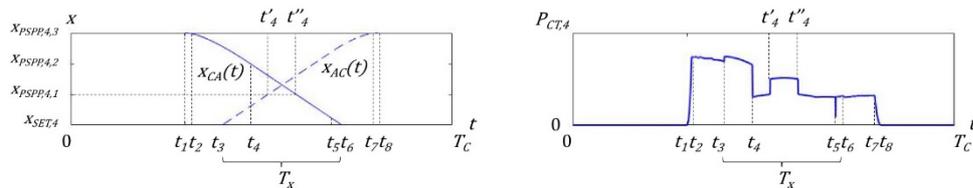


Figura 6.16. Trayectorias y potencia consumida por los circuitos de tracción en la sección 4

Fuera del intervalo de concurrencia, en la Figura 6.16 se observa la salida de un tren CA de la estación C, entre los instantes t_1 y t_3 , y la llegada de un tren AC a la estación C, entre los instantes t_6 y t_8 . En las fases de tracción y frenado a par constante de ambos trenes, la variación observada en la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,4}(t)$ está relacionada con la potencia manejada por sus cadenas de tracción. Sin embargo, en las fases de tracción y frenado a potencia constante se aprecia claramente la influencia de la distancia entre cada tren y la subestación en la pérdida de potencia activa en los circuitos de tracción $P_{CT,4}(t)$.

6.3.4 Balance energético en las secciones de electrificación

Cada valor del desfase T_D da lugar a un escenario diferente del plan de transporte cadenciado, con unas trayectorias y unos intervalos de concurrencia propios en cada una de las secciones de electrificación. El balance energético resultante será diferente, por tanto, para cada uno de estos escenarios. En la Figura 6.6, se puede apreciar que el rango de valores posibles del desfase T_D se extiende a lo largo de todo el intervalo de estudio, es decir, desde 0 hasta T_C . Dada la estructura periódica del plan de transporte cadenciado, los valores de T_D superiores a T_C dan lugar a escenarios repetidos, es decir, ya incluidos en el rango entre 0 y T_C . Entonces, la evaluación de la influencia del desfase T_D en el balance energético en las secciones de electrificación debe incluir todos los escenarios generados por los valores entre 0 y T_C .

6.3.4.1 Energía suministrada por las subestaciones

6.3.4.1.1 Energía neta suministrada

La energía neta suministrada por las cuatro subestaciones de tracción $E_{SET,n}$ para el paso de los trenes durante el intervalo de estudio se obtiene de la suma de las energías consumidas por sus cadenas de tracción más las pérdidas producidas en sus circuitos de tracción. Este cálculo debe ser realizado, individualmente para cada sección, aplicando la expresión (4.15) en los intervalos de tiempo sin concurrencia y la expresión (5.13) en los intervalos de concurrencia donde hay solapamiento de los circuitos de tracción.

En la Figura 6.17, se han representado los valores de la energía activa neta suministrada $E_{SET,n}$ por las cuatro subestaciones obtenidos de la simulación de todos los escenarios posibles del plan de transporte sobre la infraestructura representada en la Figura 6.4 y con un tiempo de cadencia T_C de 30 minutos. Considerando que el rango de posibles valores del desfase T_D se extiende desde 0 hasta 30 minutos, se han simulado los 30 escenarios de operación correspondientes a variaciones de un minuto en el valor de T_D .

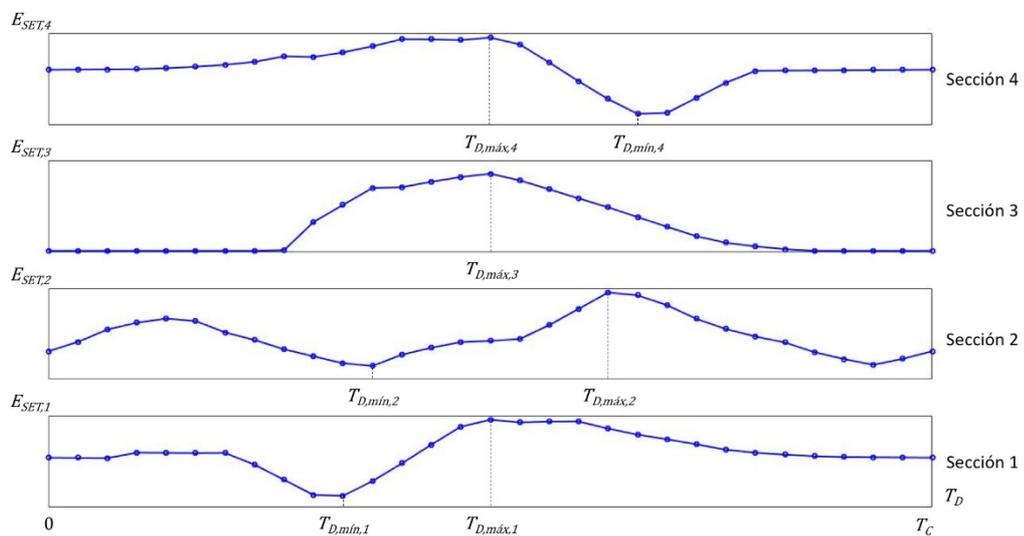


Figura 6.17. Energía activa neta suministrada por las subestaciones en función de T_D

Como cabe esperar en una sección en plena vía, la energía activa neta suministrada por la subestación SET,3 toma su valor mínimo en todo el conjunto de escenarios donde no hay concurrencia y presenta un único escenario que maximiza $E_{SET,3}$. Este escenario es el

generado por el desfase $T_{D,máx,3}$. Cada una de las secciones que contiene una estación –las secciones 1, 2 y 4–, tiene un escenario de máximo y otro de mínimo valor de la energía activa neta suministrada, correspondientes a los desfases $T_{D,máx,n}$ y $T_{D,mín,n}$ respectivamente. Estos resultados son consistentes con lo expuesto en el Capítulo 5.

6.3.4.1.2 Energía suministrada y energía recuperada

La energía neta suministrada por la subestación de tracción $E_{SET,n}$ durante el intervalo de estudio en cada sección de electrificación puede ser descompuesta en la suma de la energía efectivamente suministrada $E^+_{SET,n}$ –cuando la potencia activa en la subestación $P_{SET,n}$ es positiva– y la energía recuperada $E^-_{SET,n}$ –cuando $P_{SET,n}$ es negativa–. Como se ha expuesto en el Capítulo 4 y en el Capítulo 5, los valores de $E^+_{SET,n}$ y $E^-_{SET,n}$ fuera del intervalo de concurrencia deben ser obtenidos a través de las expresiones (4.15a) y (4.15b), respectivamente, y dentro del intervalo de concurrencia mediante las expresiones (5.13a) y (5.13b), respectivamente.

En la Figura 6.18, se han representado los valores de la energía activa suministrada $E^+_{SET,n}$ y recuperada $E^-_{SET,n}$ por las cuatro subestaciones obtenidos mediante la simulación de todos los escenarios posibles del plan de transporte sobre la infraestructura representada en la Figura 6.4 y con un tiempo de cadencia T_c de 30 minutos. Atendiendo al rango de posibles valores del desfase T_D , se han simulado los 30 escenarios de operación correspondientes a variaciones de un minuto, desde 0 hasta 30 minutos, en el valor de T_D .

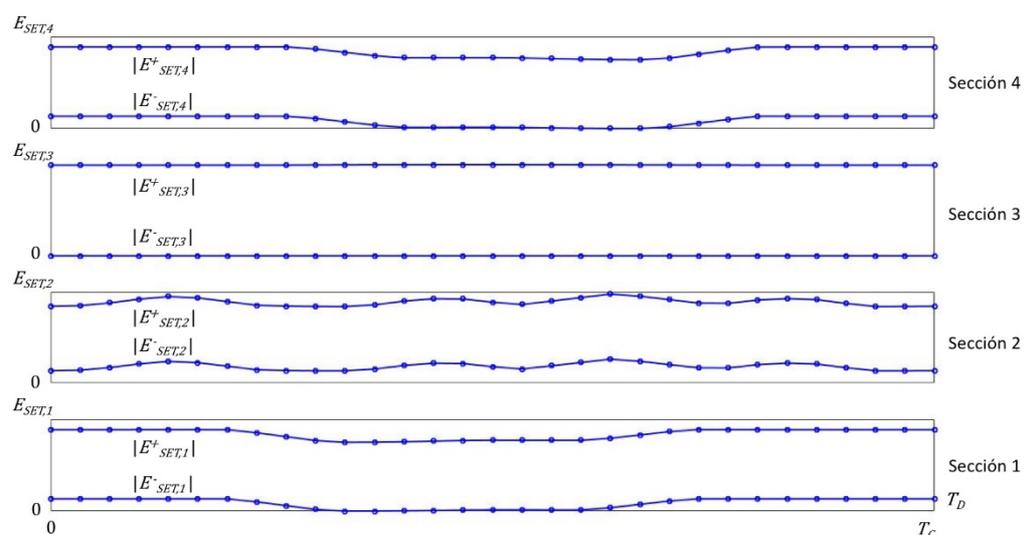


Figura 6.18. Energía activa suministrada y recuperada por las subestaciones en función de T_D

Como se puede observar, para los distintos escenarios –valores de T_D – simulados, la energía activa recuperada por las subestaciones $E_{SET,n}^-$ toma valores diversos en el caso de las secciones 1, 2 y 4, mientras que es constantemente nula para la sección 3. Esto es debido a que la sección 3 es una sección en plena vía en la que los trenes no realizan ninguna fase de frenado. Adicionalmente, en el caso de las secciones 1, 2 y 4, se puede apreciar que la variación de los valores absolutos de la energía activa suministrada $E_{SET,n}^+$ y de la recuperada $E_{SET,n}^-$ por las subestaciones sigue el mismo patrón. Estos resultados son consistentes con lo expuesto en el Capítulo 5.

6.3.4.2 Energía perdida en los circuitos de tracción

En la Figura 6.19, se han representado los valores de la energía activa perdida en los circuitos de tracción $E_{CT,n}$ en las cuatro secciones de electrificación obtenidos de la simulación de todos los escenarios posibles del plan de transporte sobre la infraestructura representada en la Figura 6.4 y con un tiempo de cadencia T_C de 30 minutos. Dado que el rango de posibles valores del desfase T_D se extiende desde 0 hasta 30 minutos, se han simulado los 30 escenarios de operación correspondientes a variaciones de un minuto en el valor de T_D .

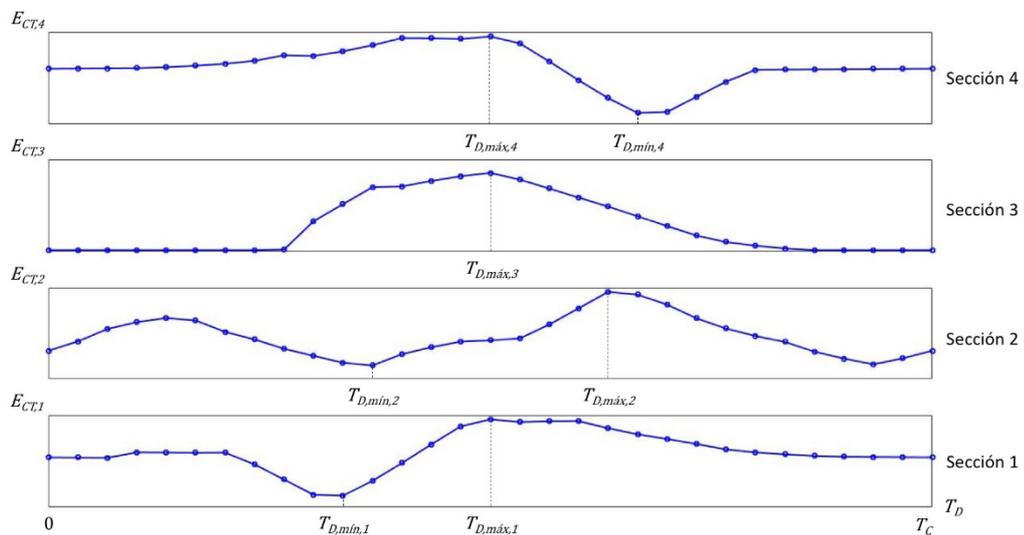


Figura 6.19. Energía activa perdida en los circuitos de tracción en función de T_D

Como se puede observar, el valor del desfase T_D afecta de manera diferente a la pérdida de energía activa en cada sección $E_{CT,n}$ pero sigue los mismos patrones representados en la

Figura 6.17 para la energía activa neta suministrada $E_{SET,n}$. Así, existen valores del desfase T_D que reducen las pérdidas en unas secciones, pero las elevan en otras secciones. Estos resultados son consistentes con lo expuesto en el Capítulo 5.

En la Figura 6.19 se ha identificado el desfase $T_{D,máx,3}$, que maximiza la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción de la sección 3, y los desfases, $T_{D,min,n}$ y $T_{D,máx,n}$, que minimizan y maximizan respectivamente la pérdida de energía activa en los circuitos de tracción en las secciones 1, 2 y 4. Los valores de estos desfases coinciden con los representados en la Figura 6.17, pues la energía activa neta suministrada $E_{SET,n}$ y la pérdida de energía activa $E_{CT,n}$ tienen el mismo perfil de variación respecto al desfase T_D . En la Tabla 6.1 se muestran los valores de los desfases correspondientes a los escenarios de máxima y mínima energía activa neta suministrada, esto es, de máxima y mínima pérdida de energía activa.

	$T_{D,min}$ (min)	$T_{D,máx}$ (min)
Sección 1	10	15
Sección 2	11	19
Sección 3	-	15
Sección 4	20	15

Tabla 6.1. Escenarios de máxima y mínima energía neta suministrada

6.3.5 Balance energético total

La evaluación del consumo energético total de cada escenario del plan de transporte cadenciado debe realizarse mediante la consolidación de los valores de energía obtenidos para las cuatro subestaciones de tracción SET,n. Los valores así obtenidos para el intervalo de estudio de duración T_C deben extenderse al periodo de explotación del plan de transporte.

6.3.5.1 Energía consumida por el sistema ferroviario

6.3.5.1.1 Energía neta consumida

En cada escenario, la energía neta suministrada por las subestaciones es equivalente a la energía consumida por las cadenas de tracción de los trenes circulantes más las pérdidas de energía originadas en la infraestructura de la electrificación. La energía consumida por las

cadena de tracción de los trenes circulantes es siempre la misma, pues el intervalo de estudio contiene dos trayectorias completas –una en cada sentido– en todos los escenarios. Sin embargo, la energía perdida en las secciones de electrificación es diferente para cada escenario, ya que depende de los intervalos de concurrencia producidos por cada desfase T_D . La suma de ambas energías es la energía activa neta suministrada por cada subestación $E_{SET,n}$ cuyo valor, para cada uno de los 30 escenarios simulados, ha sido representado en la Figura 6.17.

Denominamos energía activa neta consumida por el plan de transporte E_{SET} a la suma de los valores de la energía activa neta suministrada por las cuatro subestaciones $E_{SET,n}$ a lo largo de una jornada de explotación. Para llevar a cabo el cálculo de esta magnitud, se ha considerado un periodo de explotación de doce horas durante el que se repite periódicamente el módulo temporal estudiado, cuya duración T_C es de 30 minutos.

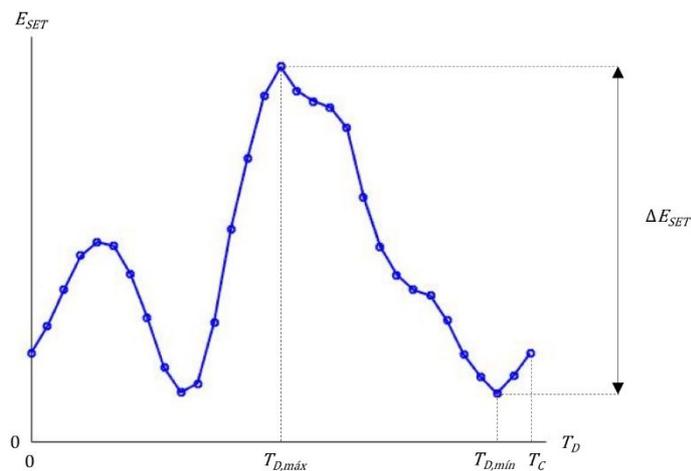


Figura 6.20. Energía activa neta consumida por el plan de transporte en función de T_D

En la Figura 6.20 ha sido representado el valor de la energía activa neta consumida por el plan de transporte para cada uno de los 30 escenarios simulados. En todos los escenarios se mantiene la capacidad de transporte ofertada, pues no varía la periodicidad de los servicios ni el tiempo de viaje. Sin embargo, como se puede comprobar en la Figura 6.20, existe un escenario que minimiza, y otro que maximiza, la energía activa neta consumida por el plan de transporte. Estos dos escenarios corresponden a los desfases $T_{D,mín}$ y $T_{D,máx}$, respectivamente.

En la Tabla 6.2, se indican los valores de los desfases T_D y de la energía activa neta consumida por el plan de transporte E_{SET} , correspondientes a los escenarios de máximo y mínimo consumo. En principio, estos dos escenarios son diferentes a los escenarios de mínima y máxima energía activa neta suministrada en cada una de las secciones de electrificación. Sin embargo, en la Tabla 6.1 se observa que el escenario correspondiente al desfase T_D de 15 minutos coincide con el de máxima la energía activa neta $E_{SET,n}$ suministrada por las subestaciones de las secciones 1, 3 y 4. Para este plan de transporte, esta coincidencia y el peso relativo de la energía activa neta suministrada por estas tres subestaciones concentran el máximo de la energía activa neta consumida por el plan de transporte E_{SET} en el escenario correspondiente al desfase T_D de 15 minutos.

Escenario	T_D (min)	E_{SET} (MWh/día)	ΔE_{SET} (MWh/día)
Mínima energía neta consumida	28	80,13	-0,40
Máxima energía neta consumida	15	80,53	0

Tabla 6.2. Energía activa neta consumida por el plan de transporte

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 6.2, se puede comprobar que la diferencia entre la máxima y mínima energía activa neta consumida por el plan de transporte es 0,40 MWh/día. Por lo tanto, la elección del desfase T_D adecuado durante la programación de los servicios del plan de transporte puede suponer hasta 0,40 MWh/día de reducción en la energía activa neta consumida.

6.3.5.1.2 Energía importada y energía exportada

La energía suministrada por cada subestación $E^+_{SET,n}$ es la energía que efectivamente se importa desde la red de transporte del sistema de suministro eléctrico hacia el sistema eléctrico ferroviario. Al contrario, la energía recuperada por cada subestación E^-_{SET} es la energía que se exporta desde el sistema eléctrico ferroviario hacia la red de transporte del sistema de suministro eléctrico. Los valores de la energía activa suministrada $E^+_{SET,n}$ y de la recuperada $E^-_{SET,n}$ por cada subestación en cada uno de los 30 escenarios simulados han sido representados en la Figura 6.18.

Denominamos energía activa total importada por el plan de transporte E^+_{SET} a la suma de los valores de la energía activa suministrada $E^+_{SET,n}$ por las cuatro subestaciones a lo largo de una jornada de explotación. Análogamente, denominamos energía activa total exportada por el plan de transporte E^-_{SET} a la suma de los valores de la energía activa recuperada $E^-_{SET,n}$ por las cuatro subestaciones a lo largo de una jornada de explotación. Se ha considerado un periodo de explotación de doce horas durante el que se repite periódicamente el módulo temporal estudiado, cuya duración T_C es de 30 minutos.

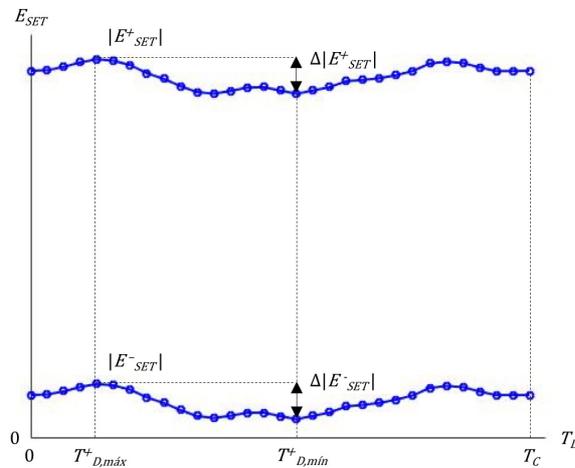


Figura 6.21. Energía activa importada y exportada por el plan de transporte en función de T_D

En la Figura 6.21 se han representado los valores de ambas energías para cada uno de los 30 escenarios simulados. Como se puede observar, el escenario correspondiente al desfase $T^+_{D,máx}$ maximiza los valores absolutos de ambas energías. Este escenario es el que supone una mayor importación y exportación de energía a través de las subestaciones de tracción. Al contrario, en el escenario correspondiente al desfase $T^+_{D,mín}$ se consigue el máximo aprovechamiento de la energía importada dentro del sistema eléctrico ferroviario y se minimiza el intercambio de energía con la red de transporte del sistema suministro eléctrico.

En la Tabla 6.3, se indican los valores de los desfases T_D y de la energía activa importada E^+_{SET} y exportada E^-_{SET} por el plan de transporte, correspondientes a los escenarios de máxima y mínima transferencia de energía. Análogamente a lo sucedido con la energía activa neta

consumida por el plan de transporte, los desfases T_D correspondientes a estos dos escenarios dependen de la combinación de los valores obtenidos en las secciones.

Escenario	T_D (min)	E^+_{SET} (MWh/día)	E^-_{SET} (MWh/día)	$\Delta E^+_{SET} $ (MWh/día)	$\Delta E^-_{SET} $ (MWh/día)
Mínima transferencia de energía	16	85,29	-4,78	-8,50	-8,70
Máxima transferencia de energía	4	93,79	-13,48	0	0

Tabla 6.3. Energía activa importada y exportada por el plan de transporte

De los resultados mostrados en la Tabla 6.3 se puede deducir que la diferencia entre los escenarios de máxima y mínima transferencia de energía es de 8,50 MWh/día en la energía activa importada y 8,70 MWh/día en la energía activa exportada. Por lo tanto, la elección del desfase adecuado en la programación de los servicios del plan de transporte puede suponer hasta 17,20 MWh/día de reducción en la transferencia de energía activa –en la suma de los valores absolutos de la energía activa importada y exportada–.

6.3.5.2 Energía perdida en el sistema ferroviario

La energía activa perdida en los circuitos de tracción de cada sección $E_{CT,n}$, mostrada en la Figura 6.19, depende de la concurrencia de circulaciones ocasionada por cada valor del desfase T_D . En cada sección de electrificación, por tanto, una parte de la energía activa neta suministrada $E_{SET,n}$ es consumida por las cadenas de tracción de los trenes y otra se pierde en el sistema de electrificación. La primera parte es invariante en todos los escenarios y la segunda parte toma valores diferentes en cada escenario. Por este motivo, se ha observado que los escenarios de mínima y máxima energía activa neta coinciden con los escenarios de mínima y máxima pérdida de energía activa, respectivamente.

Denominamos energía activa perdida en el sistema ferroviario por el plan de transporte E_{CT} a la suma de los valores de la energía activa perdida $E_{CT,n}$ en las cuatro subestaciones a lo largo de una jornada de explotación. Se ha considerado un periodo de explotación de doce horas durante el que se repite periódicamente el módulo temporal estudiado, cuya duración T_C es de 30 minutos. En la Figura 6.22, se ha representado el valor de esta pérdida de energía para cada uno de los 30 escenarios simulados. Como se puede comprobar, existe

un escenario que minimiza, y otro que maximiza, la energía activa neta perdida en el sistema ferroviario por el plan de transporte. Estos dos escenarios corresponden a los desfases $T_{D,min}$ y $T_{D,máx}$, respectivamente.

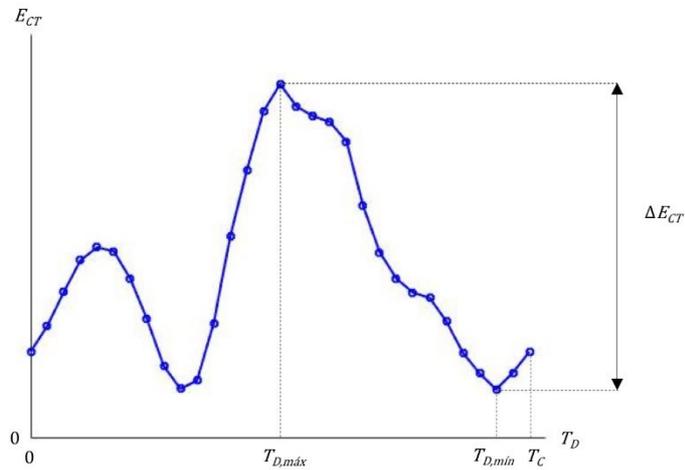


Figura 6.22. Energía activa perdida por el plan de transporte en función de T_D

En la Tabla 6.4, se indican los valores de los desfases T_D y de la energía activa perdida por el plan de transporte E_{CT} , correspondientes a los escenarios de máxima y mínima pérdida. Estos dos escenarios son coincidentes con los escenarios de mínima y máxima energía activa neta consumida por el plan de transporte E_{SET} , tal y como cabe esperar de la descomposición de la energía neta como la suma de la energía consumida por las cadenas de tracción de los trenes y la energía perdida en los circuitos de tracción.

Escenario	T_D (min)	E_{CT} (MWh/día)	ΔE_{CT} (MWh/día)
Mínima energía perdida	28	1,33	-0,40
Máxima energía perdida	15	1,73	0

Tabla 6.4. Energía activa perdida en el sistema de electrificación por el plan de transporte

A partir de los resultados mostrados en la Tabla 6.4, se puede comprobar que la elección del desfase adecuado en la programación de los servicios puede suponer hasta 0,40 MWh/día

de reducción en la energía activa neta perdida en el sistema de electrificación por el plan de transporte. Este ahorro en la pérdida de energía activa es el que ocasiona la reducción en la energía activa neta consumida que se muestra en la Tabla 6.2.

6.3.6 Coste económico de la energía

El coste de la energía consumida por el transporte ferroviario es soportado por los operadores de transporte dentro de sus gastos de explotación. Los acuerdos de suministro con las compañías comercializadoras de energía eléctrica establecen el precio de la energía importada al sistema eléctrico ferroviario. Respecto a la energía exportada, se ha de tener en cuenta que la devolución de la potencia regenerada en los frenados puede ocasionar problemas en la red de transporte del sistema de suministro eléctrico. El alto contenido armónico de la potencia regenerada y el desequilibrio entre las fases pueden ser una fuente de pérdida de fiabilidad en la red [HE, 2019]. Cuando no existe inconveniente técnico, los acuerdos de suministro con las compañías comercializadoras de energía eléctrica permiten la exportación de la energía regenerada desde el sistema eléctrico ferroviario, aunque el precio de esta energía exportada suele ser inferior al de la energía importada [ADIF, 2021].

Entonces, como se observa en (6.5), el coste económico de la energía consumida CE_{SET} por el plan de transporte puede ser expresado en una primera aproximación como una función lineal de la energía importada E_{SET}^+ y de la energía exportada E_{SET}^- .

$$CE_{SET} = p_{imp} E_{SET}^+ + p_{exp} E_{SET}^- \quad (6.5)$$

Coste económico de la energía

En la práctica, el precio de la energía exportada desde el sistema eléctrico ferroviario p_{exp} se sitúa entre el valor nulo –cuando no es posible la exportación de energía– y el precio de la energía importada p_{imp} –cuando la retribución por la energía exportada es máxima–. En el caso particular de que el precio de la energía exportada p_{exp} sea nulo, el mínimo y el máximo coste económico de la energía coinciden con los escenarios de mínima y máxima transferencia de energía, respectivamente. Para el plan de transporte estudiado, los valores del desfase T_D de ambos escenarios se muestran en la Tabla 6.3. En el caso opuesto, es decir,

si el precio de la energía exportada p_{exp} es el mismo que el precio de la energía importada p_{imp} , el mínimo y el máximo coste económico de la energía se dan en los escenarios mínima y máxima energía neta consumida, respectivamente. Los valores del desfase T_D para estos escenarios se encuentran en la Tabla 6.2.

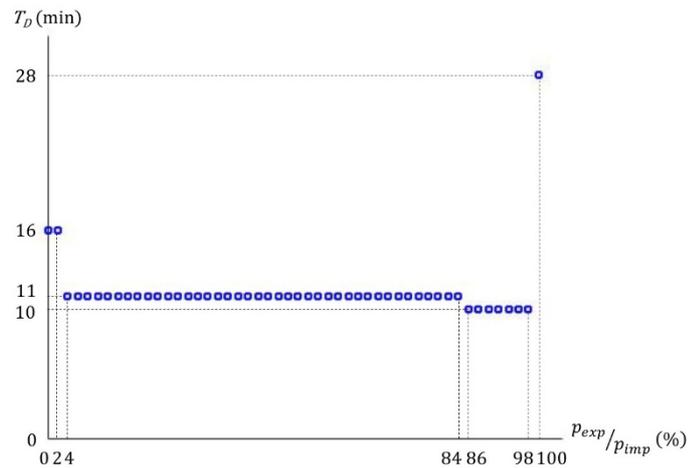


Figura 6.23. Escenario de mínimo coste económico de la energía

En la Figura 6.23, se representa el valor del desfase T_D correspondiente al escenario de mínimo coste económico de la energía en función de la relación entre el precio de energía exportada e importada. Como se puede observar, el escenario del mínimo coste económico cuando la energía exportada no es retribuida coincide con el escenario de mínima transferencia de energía. El desfase T_D de este escenario es 16 minutos y coincide con el valor expuesto en la Tabla 6.3. Asimismo, cuando el precio de la energía exportada es el mismo que el precio de la energía importada, el escenario de mínimo coste económico es el escenario de mínima energía neta consumida. El desfase T_D de este escenario es 28 minutos y coincide con el valor expuesto en la Tabla 6.2. Cuando la energía exportada es retribuida a precios intermedios entre ambos extremos, existen dos escenarios de mínimo coste económico: desfase T_D de 11 minutos si la relación entre ambos precios se sitúa entre el 3% y el 85%, y desfase T_D de 10 minutos cuando la relación entre ambos precios se sitúa entre el 85% y el 99%.

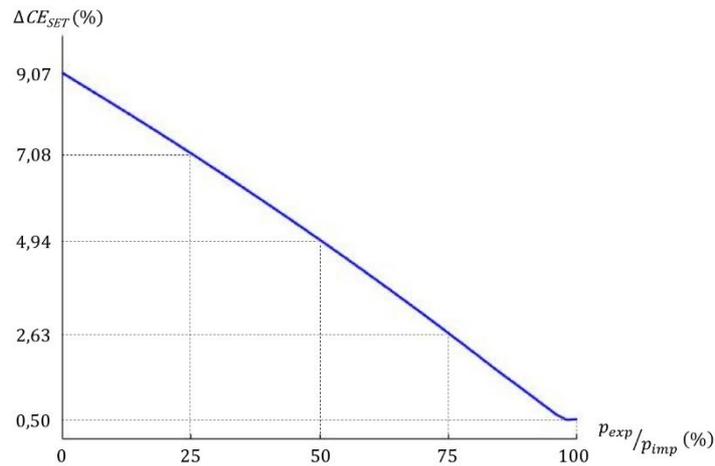


Figura 6.24. Ahorro económico en el escenario de mínimo coste

En la Figura 6.24, se muestra el ahorro que se puede conseguir seleccionando el escenario de mínimo coste económico de la energía en función de la relación entre los precios de la energía exportada y de la energía importada. Como se puede observar, en el caso extremo en el que el precio de la energía exportada p_{exp} es nula, el ahorro del 9,07% proviene de la selección del escenario de mínima transferencia de energía, detallado en la Tabla 6.3. En el caso opuesto en el que el precio de la energía exportada p_{exp} es el mismo que el de la energía importada p_{imp} , el ahorro del 0,5% se logra en el escenario de mínima energía neta consumida, detallado en la Tabla 6.2. Para los valores del precio de la energía exportada entre estos dos extremos, se observa que el ahorro económico que se puede conseguir –mediante la selección del escenario adecuado– es mayor cuanto menor es la retribución de la energía exportada.

6.4 Conclusiones

En el Capítulo 6 se evalúa el consumo energético de diversos escenarios de explotación de un plan de transporte cadenciado. La programación de servicios basada en planes de transporte cadenciados es relativamente frecuente en las redes ferroviarias actuales. Los servicios programados en ambos sentidos siguen un patrón repetitivo cuya frecuencia de repetición se fija de acuerdo a la capacidad de transporte ofertada.

El desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos es un parámetro que puede ser modificado sin afectar ni al número de servicios programados ni sus perfiles de velocidad.

Por tanto, la variación del desfase temporal no cambia la energía consumida individualmente por los trenes. Entonces, cada valor del desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos da lugar a un escenario de explotación diferente en el que se originan unos intervalos de concurrencia de los trenes coincidentes dentro las secciones de electrificación. De acuerdo con los resultados obtenidos en el Capítulo 5, se ha comprobado que los cambios en los intervalos de coincidencia no influyen en la energía consumida individualmente por los trenes, pero determinan las pérdidas de energía en el sistema de electrificación.

A través de la evaluación y la comparación de las pérdidas de energía ocasionadas por cada valor del desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos, se han encontrado los escenarios de explotación del plan de transporte que consumen la mínima y la máxima energía. Estos resultados sugieren que, a través del análisis de las pérdidas en el sistema de electrificación, es posible obtener un ahorro de la energía consumida simplemente desplazando temporalmente el horario de los trenes que circulan en uno de los sentidos. Los ahorros máximos que se pueden obtener mediante esta técnica están limitados pues tienen su origen en la reducción de las pérdidas de energía en el sistema de electrificación, cuyos valores son una parte acotada del consumo energético total. Sin embargo, el cambio de los horarios de los servicios es una actividad frecuente en el transporte ferroviario y no tiene prácticamente costes asociados. Adicionalmente, esta medida es compatible con otras medidas de ahorro relativas a la búsqueda de los perfiles de velocidad óptimos para los servicios ferroviarios.

Por otro lado, también se ha podido comprobar que los intervalos de concurrencia causados por algunos escenarios de operación favorecen el flujo de potencia entre los trenes concurrentes y, por tanto, permiten un reaprovechamiento de la energía regenerada durante los frenados dentro del sistema eléctrico ferroviario. En cambio, en otros escenarios de operación no existen intervalos de concurrencia durante los cuales se pueda producir el flujo directo de la potencia regenerada desde un tren que frena a otro tren en circulación. Al no ser posible el flujo directo entre trenes en estos escenarios, la energía regenerada por el tren que frena debe ser recuperada por la subestación y la energía demandada por el tren en tracción debe ser suministrada por la subestación. Mediante la evaluación y la comparación de la energía importada y exportada para cada valor del desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos, se han encontrado los escenarios de explotación del plan de transporte que minimizan y maximizan la transferencia de energía.

En el caso de que la retribución económica por la energía exportada por el sistema eléctrico ferroviario –resultante de los frenados eléctricos regenerativos de los trenes no aprovechados dentro del sistema eléctrico ferroviario– tenga un precio diferente al de la energía importada, el escenario de máximo ahorro energético puede diferir del escenario de mínimo coste económico de la energía. En este caso, el coste económico de la energía asociado a cada escenario se obtiene restando del coste de la energía importada la retribución por la energía exportada. A través de la evaluación y la comparación de la energía importada y exportada para cada valor del desfase temporal entre los servicios en ambos sentidos, se ha encontrado el escenario de explotación del plan de transporte que maximiza el ahorro económico. Adicionalmente, se ha comprobado que este escenario de máximo ahorro económico difiere según el valor de la relación entre los precios de la energía exportada y de la energía importada.

6.5 Bibliografía

- [ADIF, 2021]. ADIF, Declaración sobre la Red, ADIF Alta Velocidad, 2021.
- [CORDEAU, 1998]. Cordeau, J.-F., Toth, P., Vigo, D. A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. *Transportation Science*, vol. 32, no. 4, pp. 380-404, 1998.
- [GENOVESI, 2006]. Genovesi, P., Ronzino, C. D., Flows and capacity in double track railway lines - A calculation model, 2006.
- [HANSEN, 2008]. Hansen, I. A., and Pachl, J. Railway Timetable & Traffic: Analysis, Modelling, simulation. *Railway Gazette International*, vol. 164, no. 2, 2008.
- [HE, 2019]. He, X., Ren, H., Lin, J., Han, P., Wang, Y., Peng, X., Shu, Z. Power Flow Analysis of the Advanced Co-Phase Traction Power Supply System. *Energies*, 12, no. 4, 2019.
- [PEETERS, 2001]. Peeters, L., Kroon, L. A cycle based optimization model for the cyclic railway timetabling problem. *Computer-aided scheduling of public transport*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. p. 275-296.
- [RENFE, 2020]. Renfe Data, Fichas de nuestros trenes. Fichas con información técnica y enlaces a fotos y vídeos de nuestros trenes. Renfe Operadora, 2020.
- [TAKEUCHI, 2003]. Takeuchi, H., Goodman, C. J., Sone, S. Moving block signalling dynamics: performance measures and re-starting queued electric trains. *IEE Proceedings-electric power applications*, 2003, vol. 150, no. 4, pp. 483-492.
- [UIC, 2000]. UIC, UIC Leaflet 451-1. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping - Recovery margins, 4th Edition, International Union of Railways, Paris, 2000.
- [UIC, 2008]. UIC, Influence of ETCS on line capacity - Generic study, International Union of Railways, Paris, 2008.
- [YANG, 2010]. Yang, D., Nie, L., Tan, Y., He, Z., Zhang, Y. Working out an incomplete cyclic train timetable for high-speed railways by computer. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2010, vol. 114, p. 889-900.
- [ZHAO, 2007]. Zhao, J., Rahbee, A., Wilson, N. Estimating a Rail Passenger Trip Origin-Destination Matrix Using Automatic Data Collection Systems. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, vol. 22, pp. 376-387.

Capítulo 7 Conclusiones

7.1 Conclusiones

En la presente tesis se ha desarrollado un modelo mecánico y un modelo eléctrico para el estudio de los flujos de potencia y de la energía consumida dentro del sistema ferroviario. A través del primer modelo, se obtienen las magnitudes mecánicas resultantes de la trayectoria de un tren que circula por una infraestructura cuyas resistencias al avance son conocidas. El segundo modelo maneja la transformación electromecánica que se produce en la cadena de tracción del tren y la topología del sistema de electrificación para hallar las magnitudes eléctricas.

El software matemático Matlab® ha sido utilizado para codificar ambos modelos matemáticos y transformarlos en algoritmos de simulación capaces de reproducir escenarios realistas de explotación ferroviaria. Las simulaciones de esta tesis se han centrado en la operación de trenes de alta velocidad por infraestructuras ferroviarias alimentadas mediante corriente alterna monofásica. En los modelos manejados para el comportamiento dinámico del tren y para el funcionamiento de la infraestructura de electrificación se ha incluido el cumplimiento de la normativa contenida en las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad del sistema ferroviario. En las simulaciones realizadas se ha tenido en cuenta el frenado regenerativo de los trenes, la reversibilidad de los flujos de potencia en las subestaciones y se han incluido escenarios de explotación donde hay concurrencia de trenes dentro de una misma sección de electrificación. Por un lado, las simulaciones han facilitado el análisis de los flujos de potencia que se producen entre los elementos del sistema ferroviario durante la explotación. Por otro lado, las simulaciones han permitido evaluar la pérdida de energía producida en el sistema de electrificación que, dado su carácter inherente al transporte ferroviario electrificado, debe ser computada en el consumo energético.

Los algoritmos desarrollados han sido aplicados a la simulación de un plan de transporte cadenciado. Mediante la simulación recurrente de varias programaciones del plan de transporte se ha podido demostrar que es posible lograr ahorros en el consumo energético simplemente ajustando los horarios de salida de los servicios ferroviarios. Estos ahorros provienen de la reducción de las pérdidas de energía en el sistema de electrificación como consecuencia de la selección de un escenario en el que se produce un mejor aprovechamiento de los flujos de potencia dentro del sistema eléctrico ferroviario. Aunque los ahorros potenciales de esta técnica son limitados, pues se actúa únicamente sobre la pérdida de energía en el sistema de electrificación, su aplicación presenta dos ventajas importantes. En primer lugar, la implantación de esta técnica es inmediata y no tiene

prácticamente costes asociados pues sólo exige una ligera modificación de los horarios de los servicios ferroviarios existentes. Estos cambios de horario no amplían ni reducen la capacidad de transporte ofertada. En segundo lugar, esta técnica es compatible con las técnicas de ahorro energético basadas en la optimización de los perfiles de velocidad de los trenes que realizan los servicios.

Se debe notar que el método expuesto en esta tesis se centra en la búsqueda de un escenario de operación que minimice la pérdida de energía en el sistema de electrificación a partir de unas trayectorias previamente establecidas. Con esta estrategia se pretende proponer un método de ahorro directamente aplicable a la operación sin afectar al cumplimiento de las restricciones operativas que existan. Por este motivo, no se ha permitido la modificación de las trayectorias de los servicios en el proceso de optimización. Adicionalmente, esta estrategia puede ser aplicada en la búsqueda del escenario de operación de mínimo consumo a partir de trayectorias previamente optimizadas a nivel individual. En cambio, si estuviera abierta la posibilidad de modificación de las trayectorias individuales de los servicios, el proceso de búsqueda debería seleccionar trayectorias y desfases hasta conseguir el escenario de operación de mínimo consumo energético. Se debe tener en cuenta que en este caso el espacio de búsqueda se amplía notablemente y, por tanto, este proceso de optimización conjunta tendría una mayor complejidad computacional.

7.2 Aportaciones de esta tesis

Las principales aportaciones de esta tesis son las siguientes:

- Desarrollo de una herramienta de simulación de la explotación ferroviaria capaz de trabajar con escenarios definidos por los siguientes parámetros: las trayectorias programadas de los trenes, las características mecánicas de los trenes, las capacidades de tracción y frenado de los trenes, las resistencias al avance debidas a la infraestructura, la conversión electromecánica en la cadena de tracción de los trenes, la topología y las características de los conductores del sistema de electrificación.
- Análisis detallado de los flujos de potencia entre los elementos del sistema ferroviario, resultantes de la simulación de diversos escenarios de explotación sobre infraestructuras electrificadas mediante los sistemas 1x25 kV y 2x25 kV. Como

aportación novedosa, dentro de estos análisis se incluyen escenarios en los que se produce la concurrencia de trenes dentro de una misma sección de electrificación.

- Evaluación del consumo energético de los escenarios de explotación simulados, desglosando la parte correspondiente a la pérdida de energía debida al sistema de electrificación. Publicación del artículo científico “Influence of the rail electrification system topology on the energy consumption of train trajectories” en la revista IET Renewable Power Generation, exponiendo la relevancia del valor de esta pérdida de energía y su importancia en el cálculo del perfil de velocidad de mínimo consumo energético de los trenes.
- Exploración de la posibilidad de la reducción del consumo energético de un plan de transporte cadenciado siguiendo una estrategia basada en la programación eficiente de los horarios de los servicios. Análisis de la variación de la pérdida de energía en el plan de transporte con el desfase entre los servicios ferroviarios en sentidos opuestos. Obtención del escenario de mínimo consumo energético y del escenario de mínimo coste económico de la energía, a través de la modificación del desfase entre servicios opuestos.

7.3 Futuras líneas de investigación

El modelo eléctrico a partir del que se ha desarrollado el algoritmo de simulación contiene dos simplificaciones sobre el funcionamiento de la cadena de tracción. Por un lado, el modelo considera que el rendimiento de la conversión electromecánica es constante en todos los regímenes de funcionamiento. Esta consideración se apoya en trabajos de investigación referenciados. Por otro lado, el modelo asume que el sistema formado por la cadena de tracción y el circuito de tracción tiene un comportamiento lineal y, en consecuencia, no existe contenido armónico. La gran mayoría de los artículos referenciados en los que se simula un escenario de operación trabajan con esta asunción. Sin embargo, es interesante comprobar si la utilización de un modelo eléctrico más complejo –sin estas dos simplificaciones– tiene relevancia a efectos de la evaluación de los consumos energéticos.

El plan de transporte cadenciado que se ha simulado tiene unas condiciones de operación concretas para las que se han obtenido los resultados mostrados. Para adquirir un mayor conocimiento del potencial de ahorro de energía que la técnica de programación óptima, es conveniente ampliar los casos de simulación. Esta ampliación podría basarse en la diversificación de algunas condiciones de operación, tales como el material rodante que

presta los servicios, los perfiles geométricos de la infraestructura por la que circulan los trenes, el sistema de electrificación y el tiempo de cadencia de los servicios.

En los escenarios simulados se ha asumido que las trayectorias efectivamente realizadas por los trenes coinciden con las trayectorias programadas para los servicios. Sin embargo, los escenarios reales de explotación ferroviaria son diferentes a los escenarios programados. En ausencia de contingencias, las diferencias entre ambos escenarios son ligeras, aleatorias y se deben fundamentalmente a la conducción manual de los trenes. Para aproximar los escenarios simulados a la realidad y evaluar su efecto sobre los resultados de ahorro energético, el modelo debe ser ampliado para tratar el movimiento de los trenes como un proceso estocástico.