



Universidad
Carlos III de Madrid

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE TRACCIÓN FERROVIARIA EN CORRIENTE CONTINUA

Autor: Jesús Sáez Alegre

Tutor: Daniel Serrano Jiménez

Leganés, Junio 2016

Resumen

Palabras clave: *malla de tráfico, catenaria, subestación de tracción, flujo de potencia, Newton-Raphson, Sequential linear power flow*

El gran crecimiento experimentado por las ciudades en la actualidad implica la necesidad de mejorar y aumentar la red de transporte para poder dar servicio a una mayor población. El sistema de transporte actual se caracteriza por tener un modelo económicamente y medioambientalmente poco sostenible. El incremento de los modos de transporte alimentados eléctricamente puede ser una solución ante este problema, especialmente los colectivos como el metro, cercanías o tranvías.

La construcción de nuevas líneas ferroviarias requiere de estudio y simulación de las mismas que garantice su viabilidad técnica y económica. El objetivo principal del proyecto es el desarrollo de un modelo de simulación de un sistema de tracción eléctrica ferroviaria en DC, que arroje unos resultados precisos y realistas de la situación ferroviaria mecánica y eléctrica.

Para realizar un correcto dimensionado de la línea, el modelado del sistema que se quiere instalar es una tarea prioritaria. Debido a esta situación, el proyecto empieza realizando una introducción a la tracción eléctrica y describiendo las distintas formas en las cuales se puede realizar una electrificación ferroviaria en una ciudad, centrándose en los servicios de metro y tren de cercanías, siendo estos servicios característicos por el uso de la corriente continua. Por último se explica la forma de modelar un sistema de tráfico y los dos métodos a la hora de resolver un flujo de carga.

El resultado final es un modelo capaz de simular el tráfico de una línea férrea y obtener el resultado del flujo de potencia que genera de una forma dinámica. Asimismo el modelo permite determinar que método de resolución de la parte eléctrica es el más eficiente para este tipo de situaciones. Finalmente dicho modelo se ha implementado en la herramienta de simulación Matlab/Simulink.

De esta forma obtiene una primera imagen del estado de las tensiones en la catenaria y de la potencia absorbida por las subestaciones que genera el diseño planteado, y poder así llegar a un diseño más eficiente y a realizar una gestión energética más adecuada y sostenible.

Índice

Resumen.....	3
Índice de figuras	7
Índice de tablas	10
Capítulo 1: Introducción y objetivos	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Objetivos	11
1.3 Planificación y desarrollo	12
1.4 Presupuesto	13
1.5 Estructura de la memoria	14
Capítulo 2: Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua	17
2.1 Introducción.....	17
2.2 Sistema de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua	19
2.2.1 Subestaciones de tracción en DC	19
2.2.2 Catenaria.....	23
2.2.3 Material motor	24
2.2.4 Esquemas de electrificación en corriente continua	26
2.2.4 Comparativa ente sistemas 1x3000 Vcc y 2x3000 Vcc	28
2.2.5 Protecciones de la electrificación en corriente continua	29
Capítulo 3: Modelado y simulación del sistema de tráfico ferroviario	31
3.1 Modelado del movimiento de un tren.....	31
3.2 Simulación del movimiento de un tren	36

3.3 Resultados de la simulación de un tren.....	44
3.3 Modelado y Simulación del tráfico	50
Capítulo 4: Modelado y simulación del sistema eléctrico.....	57
4.1 Modelado del sistema eléctrico.....	57
4.2 Métodos de resolución.....	59
i. Sequential Linear Power Flow.....	60
ii. Newton-Raphson	61
iii. Simulación en Simulink.....	62
4.3 Simulación del sistema eléctrico.....	64
4.4 Comparativa Newton-Raphson y Sequential Linear Power Flow	69
Capítulo 5: Modelado y simulación del sistema ferroviario	73
5.1 Esquema del sistema ferroviario	73
5.2 Resultados.....	77
Capítulo 6: Conclusiones	83
6.1 Conclusiones	83
6.2 Trabajos futuros.....	84
Anexo	87

Índice de figuras

Figura 1. Sistema general de electrificación ferroviaria.....	17
Figura 2. Esquema de conexiones de una subestación de tracción DC [5]	21
Figura 3. Rectificador de 12 pulsos en serie [6]	22
Figura 4. Rectificador de 12 pulsos en paralelo [6].....	22
Figura 5. Elementos de la catenaria	23
Figura 6. Sistema de electrificación 1x3000 Vcc	26
Figura 7. Sistema de electrificación 2x3000 Vcc	27
Figura 8. Esquema conexión descargador de intervalos [8]	30
Figura 9. Esquema conexión protección polarizada [8]	30
Figura 10. Balance de fuerzas sobre un cuerpo libre	31
Figura 11. Curva tractiva de un tren.....	33
Figura 12. Descripción del movimiento.....	35
Figura 13. Cinemática del punto	36
Figura 14. Flujograma de malla	37
Figura 15. Flujograma del método resolutivo	39
Figura 16. Flujograma de construcción de curvas.....	40
Figura 17. Matriz malla de vuelta.....	43
Figura 18. Matriz malla de vuelta.....	43

Figura 19. Mapa de RENFE cercanías Madrid [11]	44
Figura 20. Perfil orográfico de la vía.....	47
Figura 21. Movimiento del tren	47
Figura 22. Curva de velocidad sentido de ida	48
Figura 23. Curva de velocidad sentido de vuelta	48
Figura 24. Curva de aceleración sentido de ida	48
Figura 25. Curva de aceleración sentido de vuelta	48
Figura 26. Curva de F.tracción sentido de ida	49
Figura 27. Curva de F.tracción sentido de vuelta.....	49
Figura 28. Curva de potencia sentido de ida.....	49
Figura 29. Curva de potencia sentido de vuelta.....	49
Figura 30. Matriz malla de tráfico	50
Figura 31. Malla de tráfico del sistema ferroviario	53
Figura 32. Diagrama de flujo obtención de potencia y posición.....	54
Figura 33. Matriz de posición.....	55
Figura 34. Matriz de potencia	55
Figura 35. Esquema eléctrico ferroviario	57
Figura 36. Circuito equivalente del sistema de tráfico.....	58
Figura 37. Matriz de voltajes.....	59
Figura 38. Bloque de resistencia eléctrica.....	62
Figura 39. Bloque esquemático de una subestación.....	63
Figura 40. Bloque esquemático de un tren	64
Figura 41. Diagrama descriptivo del programa implementado	65
Figura 42. Demanda de potencia trenes de ida	67
Figura 43. Demanda de potencia trenes de vuelta	67
Figura 44. Resultado del flujo de potencia catenaria de ida SLPF	67
Figura 45. Resultado del flujo de potencia catenaria de vuelta SLPF	67
Figura 46. Resultado del flujo de potencia catenaria de ida NR	68

Figura 47. Resultado del flujo de potencia catenaria de vuelta NR	68
Figura 48. Esquema eléctrico en Simulink.....	68
Figura 49. Resultado Simulink catenaria de ida.	69
Figura 50. Resultado Simulink catenaria de vuelta.	69
Figura 51. Flujograma del sistema eléctrico.....	74
Figura 52. Ejemplo de una simulación del sistema en un instante particular	76
Figura 53. Distribución de tensiones a lo largo del espacio y el tiempo catenaria de ida	77
Figura 54. Distribución de tensiones a lo largo del espacio y el tiempo catenaria de vuelta	78
Figura 55. Potencia absorbida SE-1.....	79
Figura 56. Potencia absorbida SE-2.....	80
Figura 57. Potencia absorbida SE-3.....	80
Figura 58. Potencia absorbida SE-4.....	81
Figura 59. Potencia absorbida SE-5.....	81

Índice de tablas

Tabla 1. Cronograma del proyecto.....	13
Tabla 2. Presupuesto del proyecto.....	14
Tabla 3. Tensiones de línea para los servicios de tren.....	19
Tabla 4. Comparación sistemas 1x3000 y 2x3000 Vcc.....	28
Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de electrificación.....	29
Tabla 6. Datos del recorrido.....	45
Tabla 7. Restricciones de la vía.....	45
Tabla 8. Rendimiento de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua [14].....	45
Tabla 9. Hoja de características serie 447.....	46
Tabla 10. Coeficientes específicos de resistencia al avance para trenes convencionales y de alta velocidad [15].....	46
Tabla 11. Constantes del sistema.....	46
Tabla 12. Horarios trenes de ida.....	51
Tabla 13. Horario trenes de vuelta.....	52
Tabla 14. Resultados del flujo de potencia.....	66
Tabla 15. Datos de resistencia de las ramas.....	69
Tabla 16. Resultados del flujo de potencia.....	70
Tabla 17. Tensiones nominales y sus límites permitido y duración [18].....	78

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

En las décadas recientes se ha producido un rápido crecimiento de las ciudades, y por lo tanto de los sistemas de transporte públicos. Grandes ciudades del mundo planean desarrollar sus propias redes urbanas de transporte o extender sus rutas para dar servicio al mayor número de población posible.

La contaminación medioambiental es un problema con el que las ciudades deben lidiar. Hacer crecer una ciudad de forma sostenible y eficiente, es uno de los aspectos que a día de hoy se tienen más en cuenta.

Una de las maneras con las que se puede favorecer esta nueva tendencia, es a la hora del desarrollo de la red de transporte público. Un buen servicio de transporte público supone una disminución del tráfico por carretera de vehículos particulares, lo cual supone uno de los grandes problemas de las grandes ciudades.

Además, debido a la crisis del petróleo, la locomotora eléctrica se ha convertido en un fuerte competidor a la hora de ofrecer un servicio eficiente y económico de transporte. Los beneficios de los sistemas eléctricos hacen que la tracción eléctrica sea especialmente atractiva para sistemas con una carga de tráfico densa y/o a velocidades relativamente altas [1-2]. En el caso de la corriente continua, que se emplea principalmente en el servicio de Metro y trenes de cercanías es especialmente útil para el desarrollo sostenible de las ciudades

1.2 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es construir una herramienta de simulación de un sistema de tracción eléctrica ferroviaria en DC.

Para ello primero es necesario cumplir los siguientes objetivos parciales:

- Modelar y simular un sistema de tráfico, en el cual hay que contemplar la pendiente del terreno, las velocidades máximas admisibles en cada tramo de la vía, y las limitaciones

del motor, para poder así conocer el movimiento que describe un tren en dicho trayecto, y todos los parámetros que caracterizan tal movimiento, como son velocidad, aceleración, fuerza y potencia en cada una de las posiciones en las cuales se discretiza la vía.

- Obtener un circuito eléctrico equivalente al sistema ferroviario. Cada una de las situaciones que se analizan durante la simulación genera un circuito eléctrico particular.
- Realizar un análisis de flujo de cargas a un sistema ferroviario de tal forma que se conozcan las tensiones en la catenaria a lo largo del tiempo.
- Comparar la eficacia de dos métodos para solucionar el flujo de cargas. Se realiza un primer estudio usando el método Sequential Lienar Power Flow, y a continuación mediante el convencional Newton-Raphson.

1.3 Planificación y desarrollo

Tras concretar los objetivos, se muestran las diferentes tareas realizadas para la consecución de los mismos y la elaboración del proyecto. Para planificar las tareas, se ha tenido en cuenta que el tiempo de duración del proyecto es de seis meses con una dedicación media de cuatro horas diarias.

Documentación: Recopilación y estudio de información relativa a la tracción eléctrica y el sistema ferroviario. Una comprensión del funcionamiento de un ferrocarril y de los distintos sistemas de electrificación es necesaria para poder realizar la descripción del sistema de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua.

Documentación parte mecánica: Se realiza el estudio mecánico del sistema. Se revisan los distintos aspectos que se deben tener en cuenta para un correcto modelado y se recopila información sobre el funcionamiento de los sistemas que se quieren implementar.

Modelado y simulación de la parte mecánica: De acuerdo a la información previamente recopilada, se investiga y se determinan los valores de los distintos parámetros que el sistema demanda para su modelado. Así mismo, se implementa el programa informático con la información obtenida, que permitirá la simulación del sistema de tráfico ferroviario.

Para la realización del programa, se parte del caso más sencillo posible, una vía sin pendientes, un límite de aceleración y otro de velocidad. Una vez que se consigue simular de este modo el paso de un tren, se incluyen paso a paso el resto de limitaciones del motor. Cuando ya se tiene esto completado, por último se añaden las pendientes y se realizan los retoques necesarios para que el programa funcione correctamente.

Documentación específica DC: Se realiza un estudio eléctrico del sistema y se investiga sobre los distintos métodos de resolución de flujo de cargas. Una vez determinados que métodos son

los más apropiados para el sistema que se quiere solucionar, se recopila la información necesaria sobre ellos para detallar su proceso de resolución.

Modelado y simulación de la parte eléctrica: Determinación de los elementos necesarios para la elaboración del circuito equivalente, y las distintas consideraciones que se realizan para conseguir un modelado más sencillo de elaborar e igualmente realista. Se comienza con la programación de las funciones que permiten simular los casos eléctricos.

Para la realización de la función encargada de resolver el flujo de carga, se sigue un método parecido al empleado en la parte mecánica. Se parte de un caso muy simple, y se trata de resolver por uno de los métodos. Después de esto, se modifica el programa para que sea válido para casos genéricos y no solo un sistema propuesto. Y por último se realiza la unión de ambos, de tal forma que los datos de la simulación del tráfico sean tomados por la función de resolución de flujo de potencia.

Por último, para poder determinar el método de resolución más eficiente para el sistema que se quiere analizar, se realiza la comparativa de los flujos de potencia obtenidos mediante dos métodos, Newton-Raphson y Sequential Linear Power Flow. Además se comparan los resultados de un caso concreto, con un modelo en Simulink para garantizar su veracidad.

Conclusiones: Tras obtener los resultados de la simulación, se procede a realizar comentarios en torno a las gráficas y datos derivados de la solución, y a extraer una serie de conclusiones sobre el sistema analizado, así como el planteamiento de una serie de posibles mejoras que pueden llevarse a cabo sobre el programa para realizar un análisis más exhaustivo del sistema de tráfico.

Tabla 1. Cronograma del proyecto

Tarea	Fecha de realización
Documentación general	Diciembre 2015-Enero 2016
Documentación parte mecánica	Febrero 2016
Modelado y simulación de la parte mecánica	Febrero-Abril 2016
Documentación específica DC	Marzo-Mayo 2016
Modelado y simulación de la parte eléctrica	Abril-Junio 2016
Conclusiones	Junio 2016

1.4 Presupuesto

El presupuesto del proyecto consta de dos partes principales, por un lado el coste de la mano de obra, y por otro el de los medios y el material empleado. Debido a la no necesidad de realizar ningún modelo material, el coste se ha reducido considerablemente.

El valor asciende a un total de 18080€ de los cuales 18000€ corresponden a la mano de obra, y 1100€ al software empleado. El presupuesto detallado se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Presupuesto del proyecto

Partida		Precio	Unidad	Total
Materiales y medios				
Software	Matlab&Simulink	1000 €	1	1000€
	Microsoft Office	100€	1	100€
Mano de obra				
Personal		25€/h	720	18000 €
				19100 €

El número de horas imputadas en el desglose del presupuesto es el resultado del tiempo empleado para la realización del trabajo, de forma que corresponde al periodo de tiempo comprendido entre mediados de Diciembre y a mediados de Junio, seis meses trabajados a cuatro horas diarias hace un total de 720 horas

1.5 Estructura de la memoria

El presente documento se encuentra estructurado en seis capítulos y un anexo. Para facilitar la lectura de este Trabajo de Fin de Grado, se añade un breve resumen por capítulos:

Capítulo 1: Introducción y objetivos

En este primer capítulo se explican los objetivos y las motivaciones del proyecto, la estructura que posee el trabajo, y la línea de desarrollo que se ha seguido para llevarlo a cabo.

Capítulo 2: Sistema de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua

En él se describen los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria existentes a día de hoy. Se profundiza más al detalle en los sistemas de corriente continua, explicando sus elementos y sus ventajas.

Capítulo 3: Modelado y simulación del sistema de tráfico ferroviario

Trata el aspecto mecánico de un ferrocarril, exponiendo todos los cálculos necesarios para poder reproducir unas condiciones similares a un caso real, y extraer de él los parámetros del tren que describen su movimiento y estado en cada momento, como son fuerza, potencia, velocidad y aceleración.

Además, se explica el funcionamiento del programa desarrollado para simular el trayecto de un tren sobre un trayecto, y por consiguiente la obtención de una malla de tráfico.

Capítulo 4: Modelado y simulación del sistema eléctrico

Se muestra como a partir de una situación de tráfico, se puede obtener un modelo eléctrico equivalente. Aquí se explica cómo se modelan los distintos elementos mecánicos del sistema, como son los trenes, las subestaciones y la catenaria, para su uso en el sistema eléctrico.

A parte, se describen los distintos métodos empleados para la resolución del flujo de cargas, y se comparan los resultados obtenidos tanto por el método convencional Newton-Raphson, como los que proporciona el Sequential Linear Power Flow, con un modelo implementado en Simulink, para comprobar que ambos métodos conducen a resultados fiables.

Capítulo 5: Modelado y simulación del sistema ferroviario

El capítulo cinco explica la relación directa entre el sistema mecánico y el eléctrico como dos sistemas interrelacionados y dependientes.

Esta relación es explicada de forma teórica, y de forma práctica mediante la descripción de la estructura global que presenta el programa elaborado, y la secuencia de pasos que se sigue para llegar a una solución.

Por último, se muestran los resultados obtenidos del análisis del sistema de tráfico completo para un caso particular, donde se pueden apreciar las tensiones en todo el recorrido de la catenaria, tanto de ida como de vuelta, a lo largo del periodo de tiempo analizado.

Estos resultados se usan para comprobar si la instalación realizada cumple con la norma vigente de tensiones ferroviarias admisibles.

Capítulo 6: Conclusiones

Una vez acabado este Trabajo de Fin de Grado, se detallan las conclusiones extraídas a partir de los resultados obtenidos, y se establecen posibles vías de mejora para conseguir un análisis más detallado y poder alcanzar una solución optimizada.

Capítulo 2

Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua

2.1 Introducción

Se entiende por electrificación ferroviaria el conjunto de las instalaciones necesarias para un sistema de tracción eléctrica, que hacen posible que la energía llegue al material rodante, con la potencia necesaria para que se puedan alcanzar las prestaciones definidas en el diseño de la línea [3].

Dependiendo del tipo de corriente que circula por la catenaria se pueden distinguir dos sistemas de electrificación ferroviaria: en corriente continua (DC) y en corriente alterna (AC) [4]. La existencia de estos dos sistemas supone la existencia de dos tipos de subestaciones de tracción, en continua y en alterna.

En cuanto al uso actual de cada una de estos sistemas, ADIF cuenta con una longitud aproximada 13.000 km de líneas ferroviarias, de las cuales alrededor de 1500 km están electrificados en corriente alterna a 25kV y 50 Hz, mientras que 6500 km se encuentra alimentados a corriente continua [13].

Ambos sistemas de electrificación presentan un esquema similar dentro del cual se consideran fundamentales los siguientes elementos que pueden verse en la figura 1, donde además se muestran las tensiones eléctricas nominales de funcionamiento más frecuente, tanto en corriente continua como en alterna.

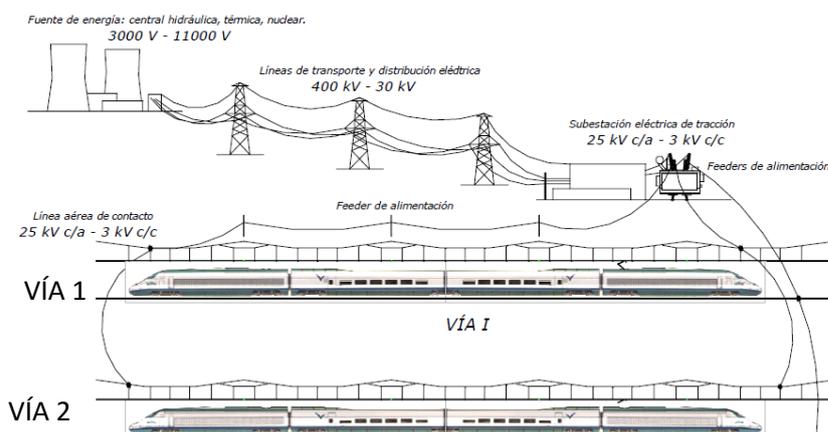


Figura 1. Sistema general de electrificación ferroviaria

- 1- Fuentes de energía o centrales de generación eléctrica: entendiéndose por tal, una instalación capaz de convertir la energía mecánica, térmica, solar o nuclear en energía eléctrica, proceso realizado por medio de máquinas rotativas. Esta generación se produce de forma masiva en determinados puntos geográficos de acuerdo a las disponibilidades de energía mecánica que mueve el alternador, que es el elemento fundamental de la central. En España la energía de salida en alternadores se hace a frecuencia industrial de 50Hz, en sistema trifásico y a tensiones comprendidas entre 3.000 y 11.000 voltios.
- 2- Líneas eléctricas de transporte en alta tensión: Tienen por función transportar y distribuir la potencia generada desde las centrales eléctricas. Dentro del sistema que constituye el sistema de transporte se encuentran las estaciones transformadoras elevadoras de la tensión de salida de la central generadora, las líneas de transmisión, las estaciones de maniobra y las estaciones transformadoras reductoras de la tensión de transporte. Mientras que el sistema de distribución consta de las redes eléctricas primarias de distribución, los bancos transformadores de servicio y las redes secundarias.

En función de la tensión de la línea, se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Primera categoría: tensión nominal superior a 66KV.
- Segunda categoría: tensión nominal comprendida entre 66 y 30KV.
- Tercera categoría: tensión nominal superior a 1KV e inferior a 30KV.

Las subestaciones de tracción eléctrica dependiendo de sus características pueden ser conectadas a cualquier tipo de línea, siendo en España lo más común, una conexión a líneas de segunda o tercera categoría

- 3- Subestaciones de tracción eléctrica: Subestaciones eléctricas conectan la red trifásica con las líneas de transporte. Adecuan la energía eléctrica provista por la red general, transformando sus características de voltaje, corriente y frecuencia para poder ser empleada en las condiciones apropiadas y determinadas según el ferrocarril y la línea que se vaya a alimentar.

Al existir dos tipos de estructura de electrificación ferroviaria, para sistemas de corriente alterna y sistemas de corriente continua; conlleva la existencia de dos tipos principales de subestaciones de tracción. Los niveles de tensión serán distintos en ambos tipos, lo cual afecta a la aparamenta y a los niveles de aislamiento.

En España, ADIF emplea las subestaciones de 3kV para sistemas de corriente continua para ferrocarriles convencionales de ancho ibérico (1.668 m), que se conectan a la red de distribución de la Compañía Suministradora, y subestaciones de 25 kV en corriente alterna a 50 Hz para líneas de Alta Velocidad y con ancho de vía internacional (1.435 m), que se conectan directamente desde la red de transporte.

- 4- Catenaria y el pantógrafo: La catenaria es la línea aérea de contacto que se monta sobre las vías del ferrocarril y permite la transmisión de la energía eléctrica al material rodante. Esta transmisión se hace posible por medio del pantógrafo, situado en la parte alta del vehículo, permite el contacto eléctrico y la conexión entre catenaria y tren.

2.2 Sistema de tracción eléctrica ferroviaria en corriente continua

La corriente continua es conveniente para la tracción ferroviaria debido a un conjunto de condiciones ventajosas que presenta el motor serie. Éstas son, un fuerte par de arranque, multiplicidad de marchas económicas y fácil regulación.

Dada la facilidad en el control de los motores de corriente continua, los inicios de los sistemas de electrificación ferroviaria españoles se hicieron con este tipo de corriente, a tensión de 1500V. Al ir aumentando la demanda de los nuevos vehículos de tracción, se decidió aumentar esta tensión hasta los 3000 V.

El objetivo es aumentar la tensión para así reducir las pérdidas y aumentar el rendimiento. Pero el aumento de la tensión por encima de los 3000V, entre otras cosas, tiene un coste asociado en equipos especiales muy elevado, que hace que para grandes potencias se implemente la corriente alterna.

Por otro lado, la corriente alterna presenta unas ventajas que no posee la corriente continua: facilidad de producción, facilidad de modificación de sus tensiones con buen rendimiento y por lo tanto la posibilidad de transportarla a grandes distancias con pérdidas menores.

A día de hoy en España, los sistemas ferroviarios de tracción eléctrica que son alimentados mediante corriente continua forman dos grandes grupos, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 3. Tensiones de línea para los servicios de tren

Grupo	Servicio	Tensión de línea	Distancia entre subestaciones
A	Metro	750 V	1.5-6 km
	Tranvía	1500 V	1.5-6 km
B	Cercanías	1500-3000 V	10-30 km
	Media distancia	1500-3000 V	10-30 km

Un sistema de tracción eléctrica ferroviario en DC consta de 3 partes principales que lo caracterizan: las subestaciones, la catenaria y el material motor. Por tratarse de un sistema de corriente continua, estos elementos pueden poseer características peculiares que se explican a continuación.

2.2.1 Subestaciones de tracción en DC

La subestación de tracción está formada por dos instalaciones claramente diferenciadas: la subestación trifásica y la subestación rectificadora.

- Subestación trifásica

Es una subestación trifásica alimentada por la red de corriente alterna. Para el caso concreto de ADIF en 3000 Vcc, la alimentación a las subestaciones de continua se realiza desde la red de distribución trifásica a tensiones entre los 15 kV y los 66 kV a 50 Hz [4].

En ella capta la energía y se acondiciona la corriente y la tensión alterna para su uso posterior en la estación de rectificación. Los elementos fundamentales que son necesarios en este tipo de subestación son:

1. Aparata de potencia: interruptores, seccionadores, transformadores de medida y protección, pararrayos autoválvulas.
2. Transformadores de potencia especiales para rectificación
3. Sistemas de servicio auxiliares en baja tensión alterna
4. Sistemas rectificador-batería para mando y control
5. Sistemas de control de protección y medida
6. Sistemas de telemando y teleseñal.

- Subestación rectificadora

Por medio de esta subestación de tracción se suministra energía al material rodante a través de la línea aérea de contacto. Los elementos necesarios en la subestación de corriente continua son:

1. Rectificadores de potencia, los cuales transforman la señal alterna en continua
2. Aparata unipolar de potencia para corriente continua: interruptores, seccionadores, transductores para medida y protección, pararrayos autoválvulas.
3. Sistemas de tensión especiales para señales de vía (control de tráfico)
4. Sistemas de puesta a tierra y vigilancia de la masa
5. Sistemas de comprobación de fallo de catenaria
6. Sistemas de control integrado, protección y medida
7. Sistemas de telemando y teleseñal.

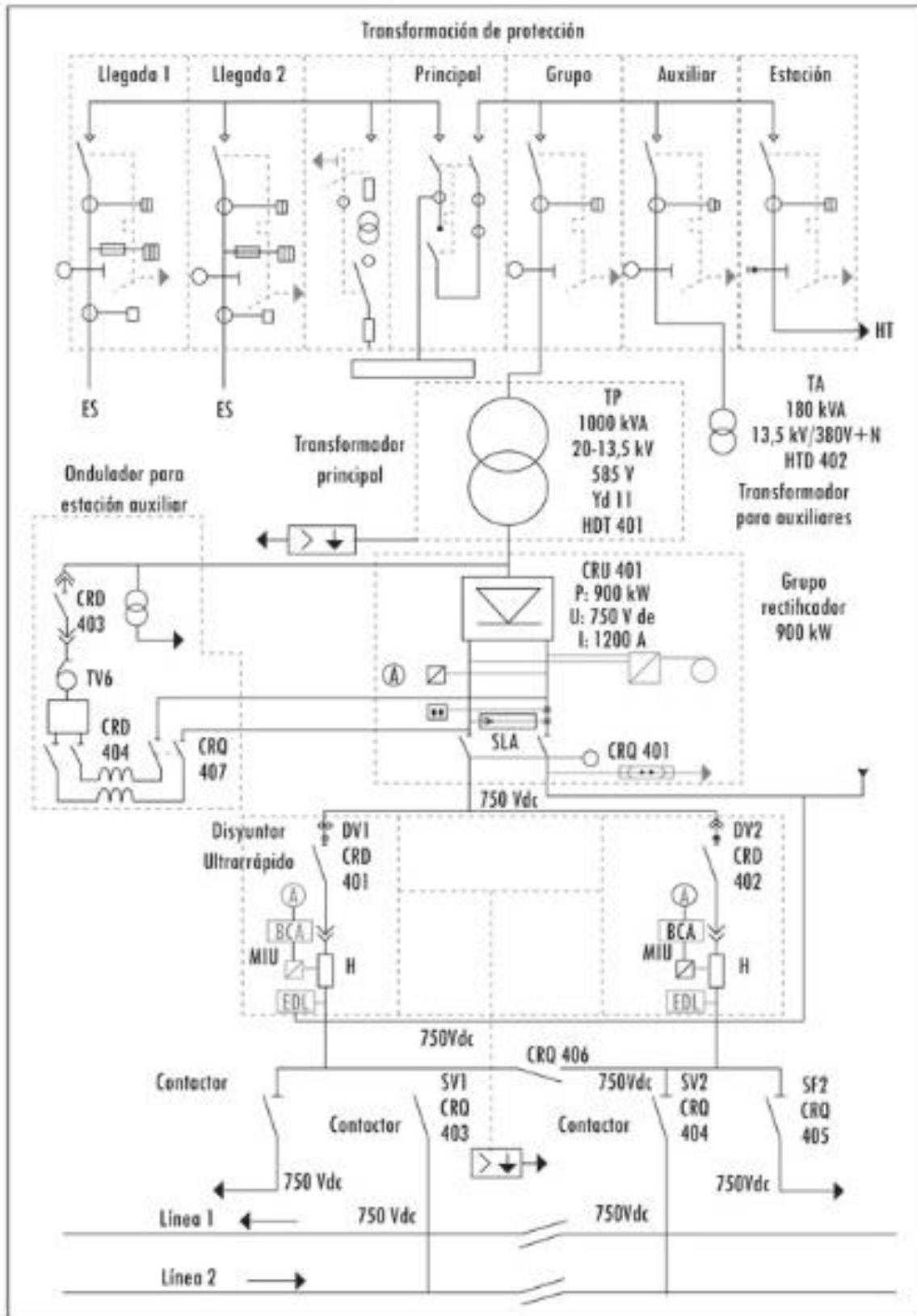


Figura2. Esquema de conexiones de una subestación de tracción DC [5]

La potencia instalada de estas subestaciones suelen ser de dos grupos rectificadores de entre 1 y 3 MW cada uno, en el caso de tranvías y metros. Para trenes de cercanías y media distancia se prefiere usar potencias de entre 3 y 6MW por la mayor demanda de potencia de estos vehículos.

Actualmente se usan transformadores rectificadores de 12 pulsos. Consiguen disminuir el rizado de la tensión y con ello el nivel de armónicos. Para las instalaciones con potencias iguales o mayores a 3 MW, el grupo transformador rectificador posee un primario que se conecta en triángulo a la red de Alta Tensión, y dos secundarios, uno en triángulo y otro en estrella. De esta forma se consigue un desfase de 30° entre las tensiones y una pulsación dodecafásica ($12 \times 30 = 360^\circ$). [6]

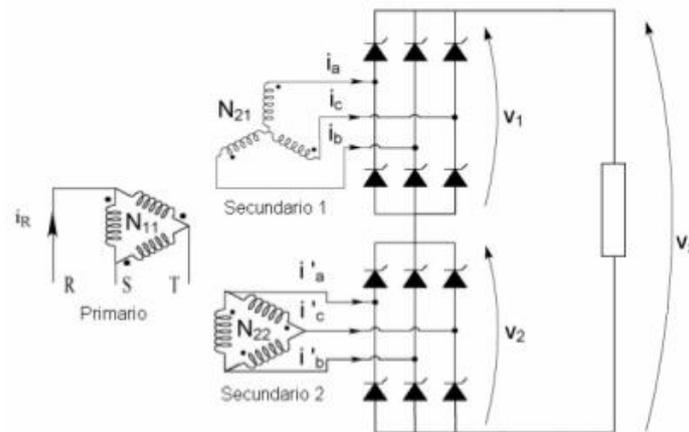


Figura 3. Rectificador de 12 pulsos en serie [6]

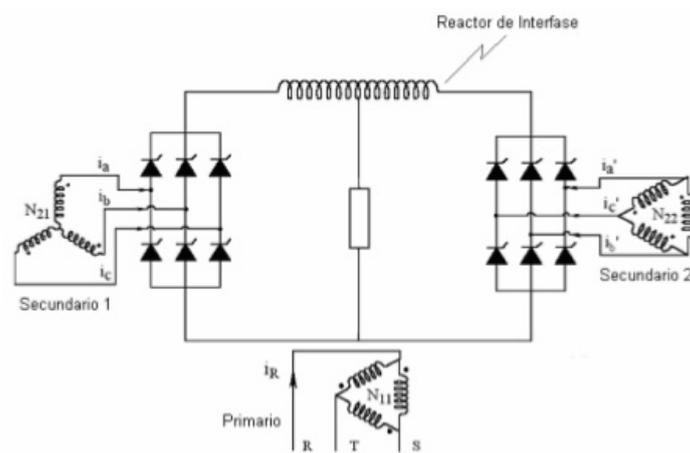


Figura 4. Rectificador de 12 pulsos en paralelo [6]

Los rectificadores que forman estas subestaciones están formados por diodos de silicio. Son de altas prestaciones pues deben estar preparados para soportar elevadas tensiones inversas y conducir grandes corrientes.

Además, a la salida de los rectificadores suelen colocarse filtros en paralelo. Estos dispositivos, formados por una bobina y un condensador en serie, anulan los armónicos que aparecen a la salida del rectificador y que podrían producir perturbaciones en los cables de comunicación.

2.2.2 Catenaria

Desde los comienzos de la electrificación, las empresas ferroviarias optaron por la alimentación a sus ferrocarriles por toma de contacto aérea, en lugar del sistema de captación por tercer carril. Surgen así dos elementos clave en la electrificación; la catenaria, como línea aérea de contacto, que suministra corriente a los vehículos eléctricos; y el pantógrafo, elemento mecánico de alimentación que debe ser capaz de seguir al hilo de contacto, suspendido de la catenaria, para tomar de ella la corriente eléctrica, salvando las variaciones de altura del plano de contacto.

La catenaria es la línea aérea de contacto que se monta sobre las vías del ferrocarril y permite la transmisión de la energía eléctrica al material rodante. Asociado a ella se encuentran los siguientes elementos que pueden verse en la figura 5.

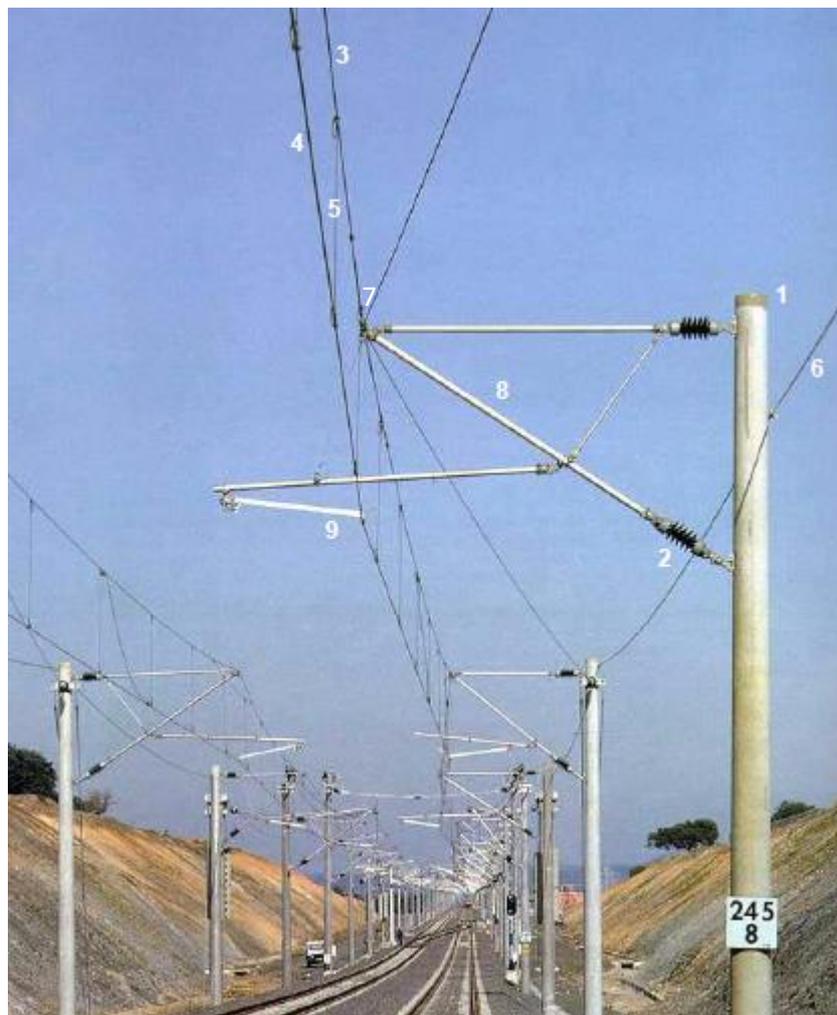


Figura5. Elementos de la catenaria

1. Postes
2. Aisladores de ménsula
3. Cable sustentador
4. Hilo de contacto
5. Péndola
6. Cable de retorno
7. Elementos de sujeción y herraje
8. Conjunto de ménsula
9. Brazo de atirantado

La catenaria es parte del circuito eléctrico de tracción, en el cual los trenes alimentados representan la carga, y en el que se distinguen dos partes fundamentales:

- Circuito aéreo positivo: Formado por la todos los cables que alimentan o ayudan al transporte de corriente, es decir, la catenaria y los feederes.
- Circuito negativo o de tierra: Circuito de retorno hacia la subestación de la corriente consumida por el tren. Este camino se forma a través de:
 1. El propio circuito de retorno del tren: cables que unen la salida de los motores a las llantas de rodadura.
 2. Los carriles de la vía.
 3. El terreno.
 4. Cable de retorno o de guarda: conductor tendido paralelo a la catenaria, situado en el lateral de los postes.
 5. Otros cables y elementos como pozos de toma de tierra, conexiones transversales, etcétera.

Por otra parte, la catenaria se encuentra dividida en distintos tramos definidos por el seccionamiento de la línea. Son los denominados cantones eléctricos. Los cantones son cada uno de los tramos de una línea de ferrocarril alimentados por la misma subestación y separados eléctricamente los uno de los otros, de modo que cada cantón está alimentado por grupos transformadores rectificadores. De esta forma, se trata de una alimentación bilateral de la línea, el tren recibe corriente de las dos subestaciones entre las que se encuentre.

2.2.3 Material motor

Según la norma UNE 25087 [19], se entiende por *material motor* a aquel material apto para circular por las líneas ferroviarias y provisto de motor para su autopropulsión y/o tracción de material rodante. Se diferencia así del *material remolcado* que es aquel que necesita ser enganchado al material motor para su desplazamiento.

Se distinguen dos tipos de material motor, el *material tractor*, destinado a remolcar otro material y que carece de capacidad para el transporte en él mismo, como es el caso de las locomotoras; y el *material automotor*, cuyo objetivo es el transporte sobre sí mismo de carga útil y que eventualmente remolca otro material.

Del mismo modo, según esta norma se entiende por *tren* al conjunto constituido por uno o varios vehículos remolcados por uno o más elementos tractores, por uno automotor, un grupo de automotores, o por extensión, un medio de tracción aislado o un vehículo automotor aislado, que circule sobre las líneas ferroviarias con un determinado número de designación.

En el caso del material motor de tracción eléctrica, son elementos mecánicos, eléctricos y neumáticos los que lo componen. Las funciones del equipo eléctrico son [20]:

- Función de potencia: El objetivo es el arranque y remolque del tren, el frenado y la inversión de la marcha. Formado por transformadores, equipos de toma de corriente, interruptor principal...
- Función de control: Regulación de la velocidad y protección automatizada frente a sobretensiones y sobreintensidades. Formado por choppers, rectificadores, convertidores...
- Funciones auxiliares: Sistemas de iluminación, refrigeración...

Los motores empleados por los ferrocarriles de tracción eléctrica son variados. Existen motores de corriente alterna monofásicos y bifásicos, y motores de corriente continua. En todos los casos, cumplen dos funciones principales [20]:

- Función de motor: Proporciona la potencia necesaria de tracción.
- Función de generador: Proporciona el esfuerzo necesario para frenar el vehículo.

Por razones de seguridad y por las propias exigencias ordinarias de la explotación, los sistemas de frenado son unas de las partes más importantes del material motor. Los principales tipos de frenado son: frenos por adherencia, pudiendo ser estos eléctricos, mecánicos o una combinación de ambos, y frenos sin adherencia. En cuanto a los frenos eléctricos, se puede distinguir entre frenos dinámicos, frenos reostáticos y frenos regenerativos, y siempre funcionando el motor como generador, fluyendo así la energía de frenado hacia la red (freno regenerativo) y disipando el excedente en resistencias (freno reostáticos)

2.2.4 Esquemas de electrificación en corriente continua

El sistema 1x3000 Vcc es el sistema más simple y comúnmente utilizado en las líneas convencionales españolas [4]. Formado por una línea aérea de 3.000 V, su principal inconveniente son las altas intensidades de circulación y las caídas de tensión asociadas a ellas.

El uso del feeder positivo y la conexión en paralelo de dos vías en los tramos de doble vía, son dos mejoras frente al inconveniente de las altas intensidades.

Como solución adicional a las dos previamente mencionadas, se recurre a la instalación de nuevas subestaciones intermedias o en su defecto a la disminución de las distancias entre las mismas. Esta solución no siempre es posible de llevar a cabo, ya que se depende de la disponibilidad de conexión de la compañía eléctrica.

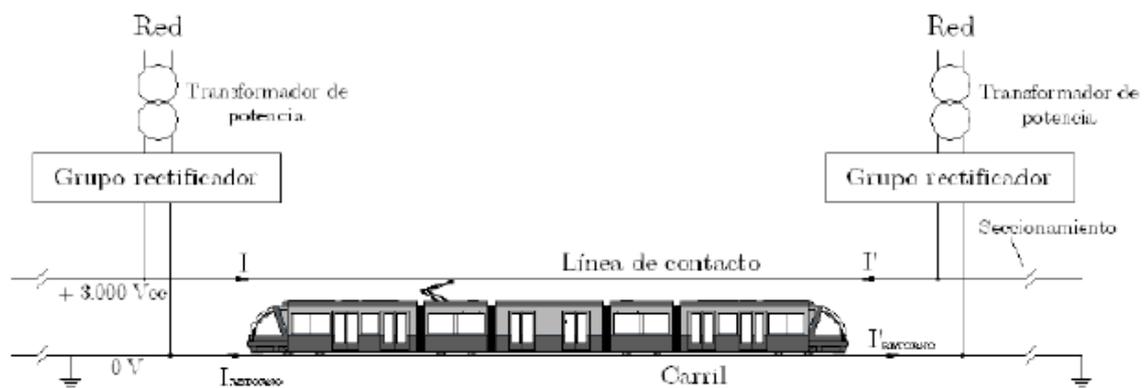


Figura 6. Sistema de electrificación 1x3000 Vcc

Por otro lado se tiene el sistema de electrificación 2x3000 Vcc. El desarrollo de este sistema surge de la necesidad de mejorar el rendimiento de las instalaciones con un tráfico ferroviario denso y una fuerte demanda energética.

El empleo de dos hilos de contacto caracteriza al sistema y le da nombre. Esta tipo de instalación con doble línea de contacto aérea mejora la captación de corriente.

Este sistema cuenta con dos tipos de feeder, el positivo y el negativo, a diferencia del sistema 1x3000 Vcc que tan solo posee feeder positivo.

La función principal del feeder negativo es conseguir que la corriente retorne por él y así reducir la corriente que toma como camino de regreso el carril. Para ello, el feeder negativo es llevado a un potencial diferente que la catenaria y se alimenta a través de grupos transformadores-rectificadores diferentes que se instalan en las subestaciones ya existentes.

Otra característica del sistema 2x3000 Vcc es la inclusión de un convertidor continua-continua por cada tramo de línea. El objetivo de este dispositivo es la reducción de la corriente circulante por la catenaria, de tal forma que se disminuyan las caídas de tensión y aumente el rendimiento global de la instalación. Esto se consigue alimentando al doble de tensión tramos de la catenaria.

A pesar de las mejoras desarrolladas en los sistemas de corriente continua, para las líneas de alta velocidad la mejor opción sigue siendo la corriente alterna. Este tipo de líneas requiere de una potencia superior a la que un sistema de corriente continua puede aportar de forma fiable y eficiente.

Para que un sistema en continua pueda proporcionar potencias elevadas, requiere de unas secciones de conductor excesivamente grandes, lo cual hace que la catenaria sea pesada y la corriente de peor calidad.

Otra desventaja es el elevado número de subestaciones que serían necesarias para poder soportar el tráfico sin grandes caídas de tensión si lo comparamos con las que son necesarias en un sistema de corriente alterna.

Por estos motivos los sistemas de electrificación ferroviaria en corriente continua se limitan al transporte en media distancia y cercanías, ya sea por metro, tranvía o ferrocarril convencional.

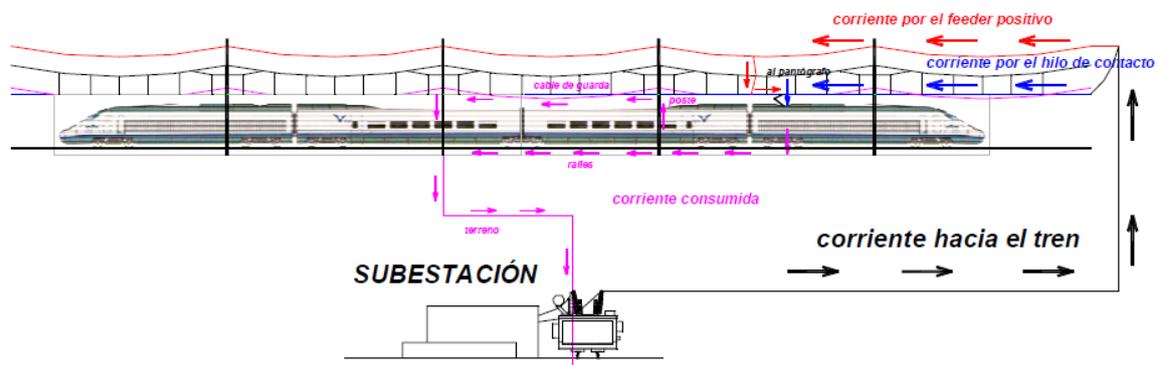


Figura 7. Sistema de electrificación 2x3000 Vcc

2.2.4 Comparativa ente sistemas 1x3000 Vcc y 2x3000 Vcc

Las distintas características de ambos sistemas, y sus diferencias, pueden verse en la tabla 3, que resume los aspectos más importantes de cada una de las instalaciones:

Tabla 4. Comparación sistemas 1x3000 y 2x3000 Vcc

	1X3.000 Vcc	2X3.000 Vcc
Líneas de alimentación	Tensión < 66kV No se producen desequilibrios en la red	Tensión < 66kV No se producen desequilibrios en la red
Subestaciones	Simples con 1 ó 2 grupos rectificadores dodecafásicos	Complejas con 1 ó 2 grupos rectificadores dobles ($\pm 3kV$) Salidas feeder con doble circuito
Distancia ente subestaciones	10 a 20 km	20 a 30 km
Equipamientos especiales	No necesarios	Extrarrápidos con capacidad de corte ante defectos entre catenaria y el feeder negativo. Equipos convertidores DC/DC
Composición catenaria	Sustentador de línea aérea de contacto y 1 hilo de contacto. Feeder positivo	Sustentador de línea aérea de contacto y 2 hilos de contacto. Feeder positivo Feeder negativo
Protecciones	Riesgo de corrosión en estructuras metálicas enterradas	Riesgo de corrosión en estructuras metálicas enterradas
Robustez y fiabilidad del sistema	Sistema con gran número de instalaciones en funcionamiento	Sistema moderno e incidente con grandes expectativas de desarrollo

A partir de las características principales mostradas, se sacan las siguientes conclusiones a cerca de las ventajas e inconvenientes que presentan los dos sistemas de electrificación en corriente continua, las cuales figuran en la tabla 4.

Tabla 5. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de electrificación

	1X3.000 Vcc	2X3.000 Vcc
VENTAJAS	<ul style="list-style-type: none"> • Un solo hilo de contacto: menor coste 	<ul style="list-style-type: none"> • Se reduce la corriente y las caídas de tensión • Mayor rendimiento
INCONVENIENTES	<ul style="list-style-type: none"> • Altas intensidades de circulación y las caídas de tensión asociadas 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 hilos de contacto: mayor coste • Mayor inversión en equipos

2.2.5 Protecciones de la electrificación en corriente continua

Se entiende por protecciones los elementos de la instalación de la línea aérea de contacto que no están asociados a la transmisión de la corriente y que realizan funciones de protección de la instalación frente a problemas como son las derivaciones, sobretensiones, cortocircuitos y vandalismo

En corriente continua las protecciones más comunes instaladas en las líneas aéreas de contacto son: Cable tierra (cable guarda), descargadores de sobretensiones, tomas de tierra, conexiones equipotenciales entre estructuras y carril, viseras, pantallas y barreras mecánicas, y frenos y bloqueos que evitan la caída de la línea en el caso de que se corte la misma o los cables de contrapesos.

Por otro lado, se tiene la aparemента propia de las instalaciones de corriente continua. Aparemента es el término que se aplica al conjunto de dispositivos de conexión, soporte, mando y protección, así como las conexiones, envolventes y soportes destinados a la producción, transporte, distribución y transformación de la energía eléctrica.

Las características principales de la aparemента son [7]:

- Nivel de aislamiento, que define la tensión asignada
- Nivel de calentamiento, que define la intensidad asignada
- Niveles de sobreintensidad asignada durante un tiempo determinado
- Poder de corte
- Poder de cierre

En el caso de corriente continua se emplea aparemента unipolar de potencia. Este equipamiento cuenta con interruptores, seccionadores, transductores para medida y protección, pararrayos autovalvulares.

Los niveles de tensión en cada uno de los tipos anteriores presentan algunas variantes que afectan particularmente a la aparemента y a los niveles de aislamiento utilizados (mayores den las subestaciones de corriente alterna)

De los equipos de protección para el sector ferroviario en DC cabe destacar:

1. Descargador de intervalos

La principal aplicación de este dispositivo es garantizar la equipontencialidad de las estructuras ferroviarias en el momento que aparezcan tensiones peligrosas. [8]

Principalmente las subidas de voltaje son consecuencia de elevados consumos no relacionados a los sistemas de tracción o faltas de la catenaria sobre las estructuras metálicas. Esto provoca elevaciones de tensión en las propias estructuras afectadas por el defecto o en el carril. Su principal aplicación es la protección de Tierra-Carril y Carril-Tierra.

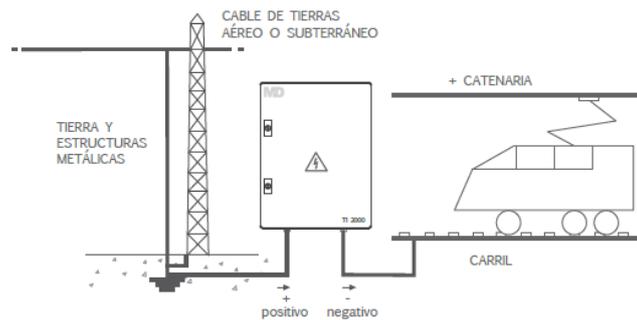


Figura 8. Esquema conexión descargador de intervalos [6]

2. Dispositivo de protección polarizada

Dispositivo cuya principal aplicación es la protección polarizada de las estructuras ferroviarias. Se asegura la detección de defectos provocados por la caída de la catenaria sobre las estructuras metálicas reconduciendo las corrientes hacia el carril (circuito de retorno), provocando así la desconexión segura de las subestaciones colindantes. [8]

Se trata de un sistema eficaz de protección catódica, al evitar la circulación de corrientes vagabundas. De este modo se evita tener los carriles de la vía puestos a tierra en lugares no deseados, eliminando así la corrosión electrolítica tanto en los electrodos de toma de tierra, como en las estructuras metálicas enterradas eléctricamente en las proximidades.

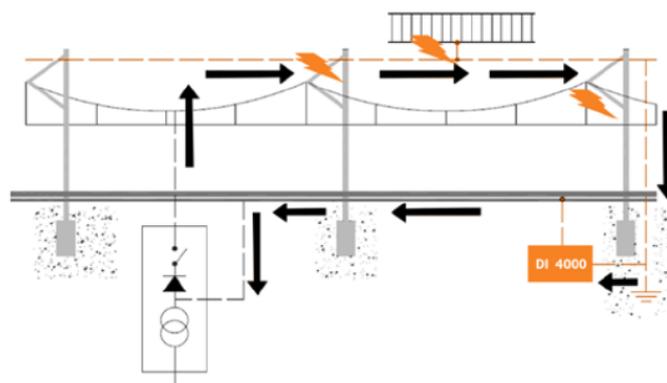


Figura 9. Esquema conexión protección polarizada [6]

Capítulo 3

Modelado y simulación del sistema de tráfico ferroviario

3.1 Modelado del movimiento de un tren

El objetivo del modelado del vehículo es la obtención de su posición, velocidad y a lo largo del tiempo. Para ello es necesario realizar un análisis dinámico del sistema

Considerando que el vehículo se está moviendo a lo largo de un trayecto ferroviario rectilíneo con pendientes positivas y negativas, el balance de fuerzas que presenta esta situación en la que se presenta en la siguiente figura:

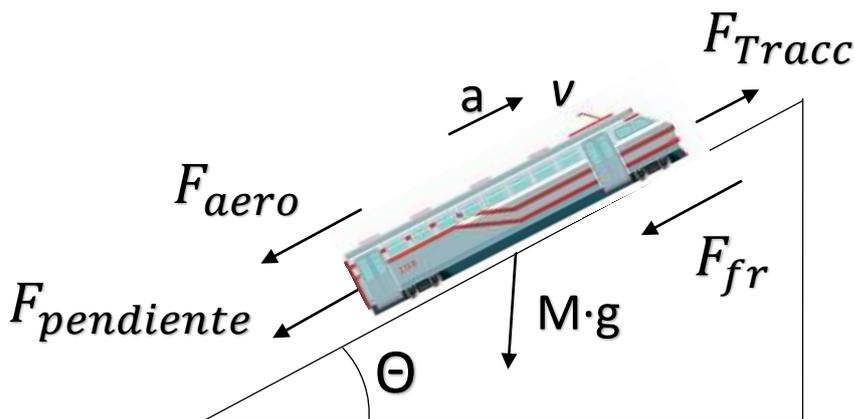


Figura 10. Balance de fuerzas sobre un cuerpo libre

Este movimiento puede ser expresado de forma matemática usando el diagrama de fuerzas sobre un cuerpo libre, el cual describe todas las fuerzas actuantes en el tren como se muestra a continuación en las ecuaciones (1) y (2).

$$F_{traccion} - F_R = m_{tren} \cdot a \quad (1)$$

$$F_R = F_{aero} + F_{pendiente} + F_{fr} \quad (2)$$

Dónde $F_{traccion}$ hace referencia a la fuerza tractiva del tren, F_R es la fuerza resistiva total que debe vencer el vehículo, F_{fr} es la fuerza de fricción, F_{aero} indica la fuerza de resistencia aerodinámica del tren, $F_{pendiente}$ hace referencia al gradiente de fuerza que sufre el tren debido a la pendiente, m_{tren} es la masa total del material rodante y a indica la aceleración del tren en ese instante de tiempo.

Las fuerzas resistivas F_R , se oponen al movimiento del tren. Estas fuerzas se pueden agrupar en tres grupos: fuerzas de fricción, fuerzas aerodinámicas, y fuerzas gravitacionales.

1. Fuerzas de fricción

También llamadas resistencia a la rodadura, expresa la resistencia al movimiento de las partes rodantes. En mayor medida es causado debido a pares de fricción como son los pares en los rodamientos, la fricción en los piñones de los engranajes, y pastillas de freno. La expresión matemática de este fenómeno es la siguiente:

$$F_{fr} = f_R \cdot W \approx (f_0 + f_1 v)W \quad (3)$$

Donde W es la carga por cada eje, f_R es un coeficiente de resistencia a la rodadura, f_0 y f_1 son dos constantes arbitrarias, y v es la velocidad del tren.

2. Fuerzas aerodinámicas

El movimiento del tren tiene lugar en un entorno inmerso en aire y la fuerza ejercida por el aire en el tren influenciará en el avance. La fuerza de resistencia aerodinámica resulta de tres efectos básicos:

- La diferencia de presiones en la parte delantera y la posterior del tren debido a la separación del flujo de aire y la creación de vórtices detrás del vehículo.
- La fricción superficial que representa la rugosidad de la superficie del vehículo.
- El flujo interno de aire que entra en las partes internas del vehículo.

De esta forma se expresa la fuerza de resistencia aerodinámica de la siguiente forma:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{aire} C_d A_F v_{aire}^2 \quad (4)$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire (kg/m^3), C_d es un coeficiente de resistencia aerodinámico, A_F es el área frontal proyectada del tren, y v_{aire} es la velocidad del aire relativa al tren.

La fuerza resistiva aerodinámica y la fuerza de fricción son propiedades de cada vehículo del tren. Tan solo pueden variar con la velocidad del tren y se puede hacer una distinción entre ellas y la fuerza debida a la pendiente, de tal forma que se puedan estudiar de una forma independiente y más conveniente. De esta forma, la combinación de ambas

fuerzas se denomina fuerza de resistencia al avance, y se puede expresar por medio de la Fórmula de Davis [9]:

$$Fr_{avance} = \alpha + \beta v + \gamma v^2 \quad (5)$$

Donde α, β y γ son los coeficiente de resistencia al avance. Es normal usar valores distintos para situaciones de túneles y de campo abierto.

3. Fuerzas gravitacionales

Hace referencia a la fuerza de gradiente en una rampa, la cual actuará en dirección opuesta al movimiento tren cuando este se encuentre cuesta arriba, y a favor del avance del tren cuando éste se encuentre cuesta abajo. Esta fuerza debida a la pendiente es constante mientras la pendiente se mantenga constante. Su representación matemática es la siguiente:

$$F_{pendiente} = \pm m_{tren} \cdot g \cdot \text{sen}\theta \quad (6)$$

Donde g es la constante gravitacional (9.81 m/s^2); θ es el ángulo de la pendiente.

Por otro lado, $F_{traccion}$ es la fuerza principal que favorece el avance del tren. Es la encargada de vencer la fuerza de resistencia al avance y de acelerar toda la masa del vehículo. Esta fuerza tiene un valor máximo que depende de las características del motor de la locomotora

Este valor máximo viene indicado en las hojas de características del fabricante del vehículo, donde además se muestra la curva característica de fuerza tractiva del vehículo a plena potencia, como la que puede verse a continuación, en la cual se puede apreciar como a bajas velocidades la fuerza de tracción está limitada al máximo posible, en lugar de tender a infinito como la ecuación de potencia indica en un principio.

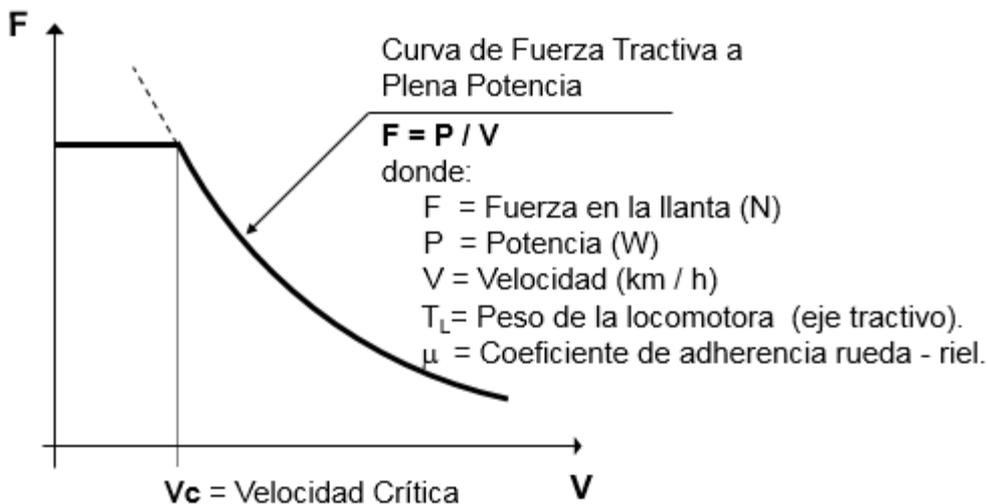


Figura 11. Curva tractiva de un tren

Del fabricante se conocen otros datos interesantes relativos al comportamiento del motor, el más importante de ellos es el rendimiento, que indica el grado de aprovechamiento de la energía entrante en forma de electricidad que posteriormente se transmite a las ruedas en forma de energía cinética de movimiento. Así como la potencia máxima que puede aportar el motor.

El valor de potencia máxima determina el dato de la velocidad crítica que puede verse en la gráfica anterior, cuanto mayor sea la potencia que puede entregar el motor, mayor será la velocidad crítica que marca el límite de fuerza máxima tracción.

Además, la potencia del motor no solo se encarga de generar una fuerza de tracción que haga que el tren pueda avanzar, sino que ha de suplir la demanda de los servicios auxiliares del vehículo y de los distintos equipos eléctricos situados en el trayecto y que forman parte de la instalación ferroviaria.

De esta forma se desprende la siguiente fórmula para la determinación de la potencia:

$$Potencia = \frac{F_t \cdot v}{\eta} + P_{ss.aa.} \quad (7)$$

Donde η es el rendimiento del motor, y $P_{ss.aa.}$, la potencia de los servicios auxiliares que también debe abastecer el tren.

Así mismo, a partir del dato de potencia máxima y de la velocidad instantánea del tren, se obtiene la siguiente fórmula para el cálculo de la fuerza de tracción:

$$F_{tracción} = (P_{máx.ac,dec} - P_{ss.aa.}) \cdot \eta / velocidad \quad (8)$$

Con el dato de la fuerza de tracción que puede ejercerse en un instante concreto, y el valor de las fuerzas resistivas totales actuantes sobre el vehículo en ese mismo momento, se puede calcular la aceleración que es capaz de ofrecer el motor:

$$a = \frac{F_{tracción} - F_R}{m_{tren}} \quad (9)$$

Por otra parte, al modelado del sistema hay que añadirle ciertas restricciones de carácter preventivo. Estas limitaciones son motivadas por la seguridad y el confort de los pasajeros. Se trata de la existencia de límites de velocidad en tramos de la vía, y unos valores máximos de aceleración y deceleración que no se pueden sobre pasar para evitar así arranques bruscos y frenadas excesivamente fuertes que afecten a la comodidad del viajero y puedan originar situaciones peligrosas.

Estas nuevas consideraciones han de ser tomadas en cuenta a la hora de establecer los distintos valores de velocidad y aceleración en cada instante de tiempo, que se obtienen en función de la fuerza de tracción y de la potencia que puede desarrollar el motor en cada momento.

Ha de garantizarse que ninguno de los límites se sobre pasa en ningún momento, y de ser así, el valor que entra en conflicto con la restricción ha de fijarse a su valor máximo y recalcularse el resto de parámetros en función de él.

De esta forma, dependiendo del valor de aceleración obtenido se pueden distinguir tres tipos de movimientos al tratarse de un trayecto considerado rectilíneo en toda su extensión, y por lo tanto las fórmulas para el calcular tiempos y velocidades finales son algo distintas unas de otras.

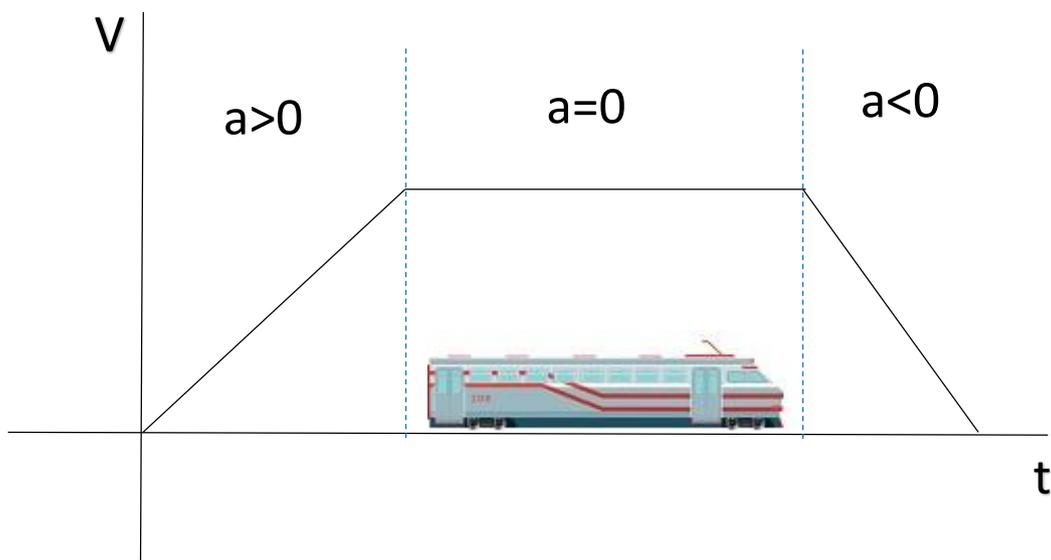


Figura 12. Descripción del movimiento

1: Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado ($a > 0$)

$$V_{f1} = \sqrt{V_0^2 + 2 \cdot a_a \cdot x_1} \quad (10) \quad t_{f1} = \frac{V_{f1} - V_0}{a_a} + t_0 \quad (11)$$

2: Movimiento rectilíneo uniforme ($a = 0$)

$$V_{f2} = V_{f1} \quad (12) \quad t_{f2} = t_{f1} + \frac{x_2}{V_{f2}} \quad (13)$$

3: Movimiento rectilíneo uniformemente decelerado ($a < 0$)

$$V_{f2} = \sqrt{V_3^2 - 2 \cdot a_d \cdot x_3} \quad (14) \quad t_{f3} = \frac{V_{f3} - V_{f2}}{a_d} + t_{f2} \quad (15)$$

3.2 Simulación del movimiento de un tren

Para la simulación del movimiento de un tren se procede con la discretización de la longitud total de la vía en distancia y la realización del análisis dinámico y cinemático anteriormente descrito a cada uno de los puntos.

Como solución simplificada al problema, el método empleado se basa en tomar un punto de la vía, en el cual el tren se encuentra en un denominado *Estado A*. De este *Estado A*, se conoce la velocidad, la posición, el tiempo, y la pendiente a la que se enfrenta y haciendo uso de las restricciones de fuerza de tracción máxima y potencia ofrecida máxima se llega a la asignación de una aceleración.

El tren pasa a un *Estado B*, que hace referencia al punto de la vía inmediatamente posterior al referente al del *Estado A* y cuya posición es conocida al ser el paso de integración (ΔS) un dato, y del cual, al conocer la aceleración del tren en ese tramo, se pueden llegar a saber su velocidad, y tiempo transcurrido entre el paso del Estado A al B (Δt).

De nuevo, para el *Estado B*, habría que obtener una aceleración que hiciese pasar al tren a un siguiente estado, y así sucesivamente hasta completar el todo trayecto. Poniendo especial atención en que todos los valores obtenidos cumplen las restricciones y limitaciones del problema.

En caso de no ser así, y obtener algún valor por encima de los límites establecidos, el parámetro en cuestión se fija a su valor máximo, y el resto de parámetros se calculan en función de este nuevo valor de tal forma que se cometa ninguna nueva violación de los límites.

Para una mayor comprensión de esta idea, en la figura 13 se trata de representar lo explicado a partir de la cinemática de un punto.

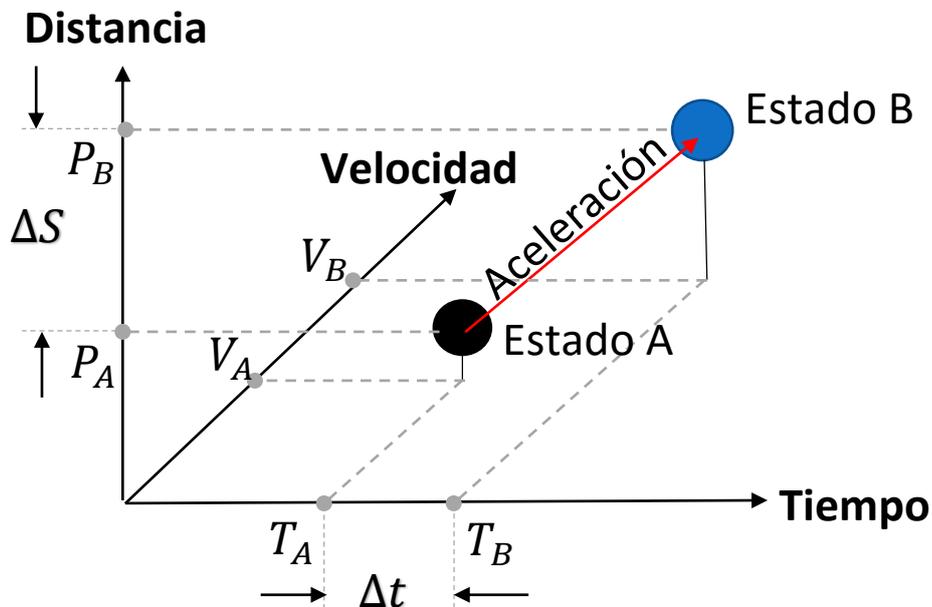


Figura 13. Cinemática del punto

Para la resolución global del problema en toda su extensión, se diseña un primer programa en Matlab encargado del modelado y la simulación de la parte mecánica, que consiga realizar todos los cálculos de forma precisa, ordena y continuada, aplicando todas las restricciones existentes en el sistema, de tal forma que se llegue a una solución clara y explicativa del problema, que muestre los resultados relativos tanto a un tren con trayecto de ida como de vuelta en forma de matrices de datos denominadas mallas.

Dicho programa, se encuentra dividido en dos grandes bloques, un primero que hace referencia al tema que se trata en este punto, la simulación del movimiento de un tren, y un segundo encargado de confeccionar a partir de los datos obtenidos en la primera parte una malla de tráfico ferroviario, cuyo funcionamiento y modelado será explicado en el punto siguiente. El programa presenta la estructura mostrada en la figura 14.

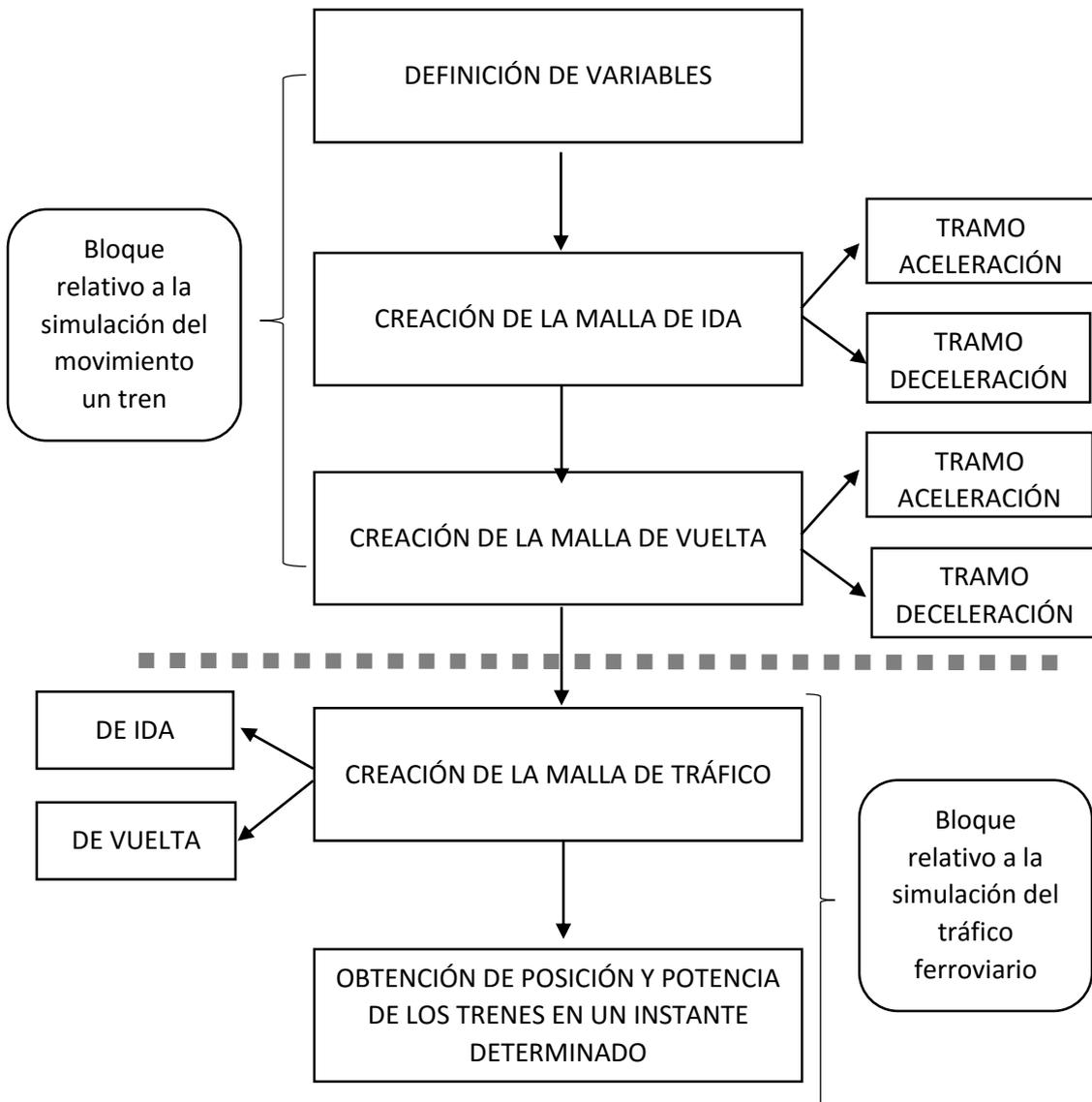


Figura 14. Flujograma de malla

A continuación se describen cada uno de los puntos referentes al bloque de la simulación del movimiento de un tren recogidos en el flujograma de la figura 14.

- **Definición de variables:**

Se trata del primer paso a dar en la construcción del algoritmo de resolución. En él se determinan todos los datos y las constantes referentes a la parte mecánica y dinámica que se van a usar posteriormente a lo largo del programa.

A la hora de implementar el programa, el parámetro más importante que se debe definir es el paso de integración usado para la discretización de la vía en distancia, denominado 'paso' en el programa. Este valor nos determina cada cuanto distancia física en la vía el programa realiza los cálculos que se le han escrito.

Es importante darle un valor suficientemente pequeño para que a la hora de hacer las operaciones entre un punto y otro se pueda considerar que los valores en ese breve espacio se mantienen dentro de los rangos permitidos, y así además, poder representar un modelo más preciso y ajustado a la realidad.

A continuación, se inicializan todos los valores que se consideran como datos en el problema. Estos datos son, el paso de integración, longitud de la vía, la orografía del terreno, la potencia máxima del motor, la fuerza máxima de tracción que éste puede ejercer, las velocidades máximas por tramo, las aceleraciones y deceleraciones máximas por tramo, la potencia máxima de regeneración admisible por la catenaria, el rendimiento del motor, la potencia de los servicios auxiliares, las posiciones de las paradas, los tiempos de parada, la masa del tren, las constantes de resistencia aerodinámicas y el valor de la gravedad.

- **Creación de la malla de ida y de vuelta:**

En este bloque se lleva a cabo la construcción de las malla de ida y de vuelta de un tren, las cuales almacenan la información del tren recogida en cada uno de los puntos en los cuales se ha discretizado la vía. Se trata de matrices independientes, calculadas una independientemente de la otra, puesto que al considerar un perfil orográfico irregular, las pendientes afectan de distinta manera al tratarse de un trayecto de ida o al ser uno de vuelta.

Una vez inicializados todos los parámetros, el método resolutivo que se emplea es el descrito con anterioridad, en el cual los parámetros de un punto se calculan a partir de los datos del anterior y un valor asignado de aceleración.

Este método ha de incluirse dentro de un proceso eficiente que permita calcular los datos que se precisen del tren a lo largo de todo el recorrido. Aplicado al caso concreto que se quiere resolver, dicho proceso presenta la siguiente línea de pensamiento mostrada en el flujograma de la figura 15.

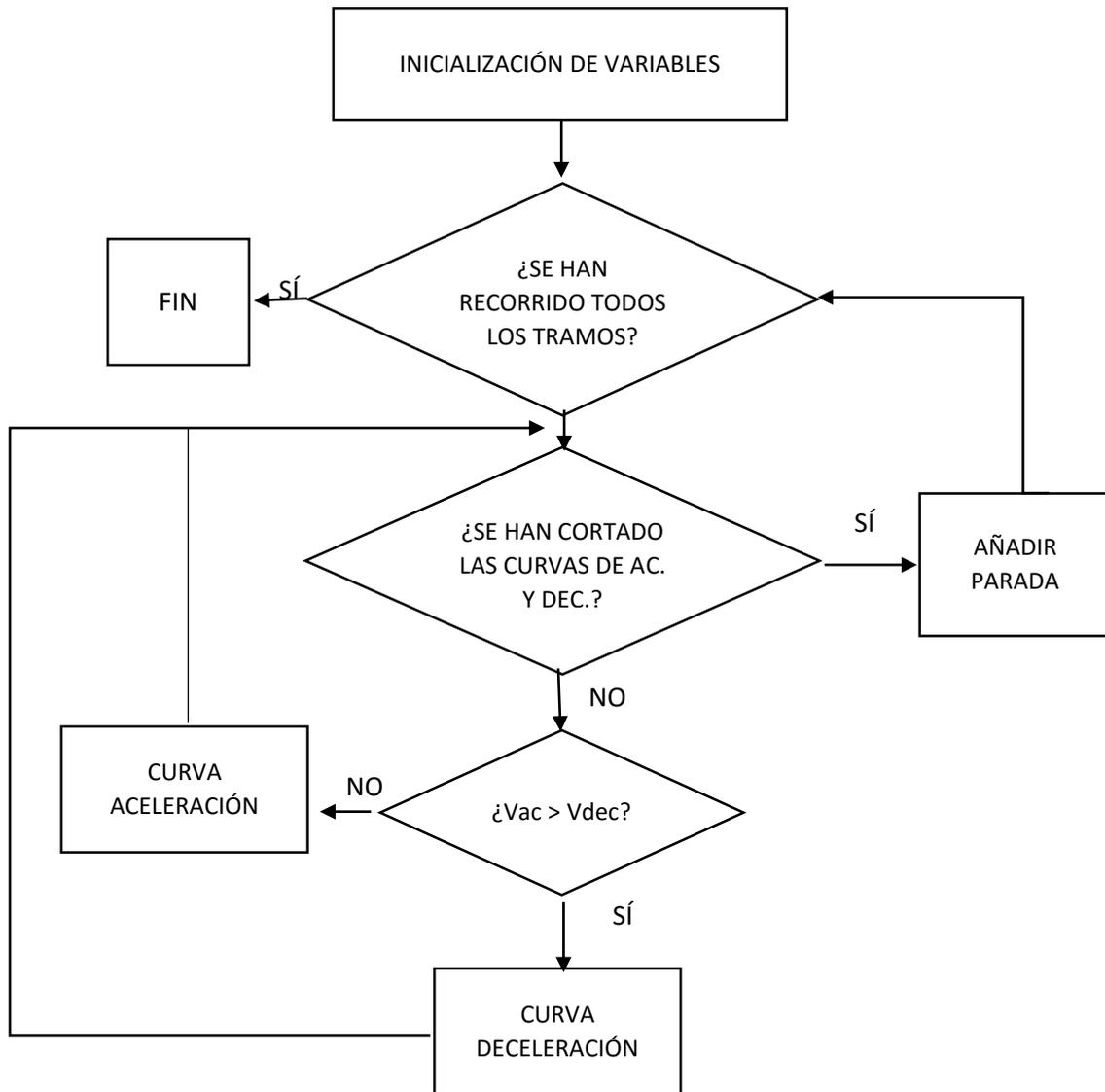


Figura 15. Flujoograma del método resolutivo

Para construir las curvas que caracterizan el trayecto de un tren, se empieza identificando las posiciones de las paradas, y tomando el trayecto total como el conjunto de tramos en los que lo dividen las paradas. El método de resolución empleado para cada tramo es el mismo. De tal forma que recorriendo todos los tramos a lo largo de la longitud de la vía se consigue rellenar toda una matriz de malla.

Dentro de cada tramo se distinguen otros dos: el tramo en el que el tren está acelerando y el tramo en el que decelera. Estos dos tramos se representan mediante las curvas de aceleración y deceleración respectivamente. Lo que se pretende con la creación de la malla de ida es construir dichas curvas, calculando sus valores para cada paso de discretización. La curva de aceleración se construye desde la posición de la parada inicial y aumentando, mientras que la curva de deceleración parte de la posición de la parada siguiente y va recorriendo el tramo hacia atrás.

Para ello se utilizan dos índices, el “i” para recorrer las posiciones en las que el tren está acelerando, y el “j” para recorrer las posiciones en las que el tren está frenando. Las curvas dejan de construirse cuando se hayan cortado. El comienzo del tramo se representa con la variable “posini”, que almacena la fila de la matriz “malla de ida” que contiene la posición correspondiente al inicio del tramo. La variable “posfin” almacena la fila de “malla de ida” que contiene la posición que se corresponde con el fin del tramo. Por lo tanto las variables “posini” y “posfin” se actualizan cada vez que se finaliza un tramo.

Una vez actualizadas estas variables se construyen las curvas hasta que éstas se corten, es decir, hasta que el índice “posfin-j” sea superior al “posini+i”.

La construcción de las curvas se basa en el diagrama de flujo recogido en la figura 16.

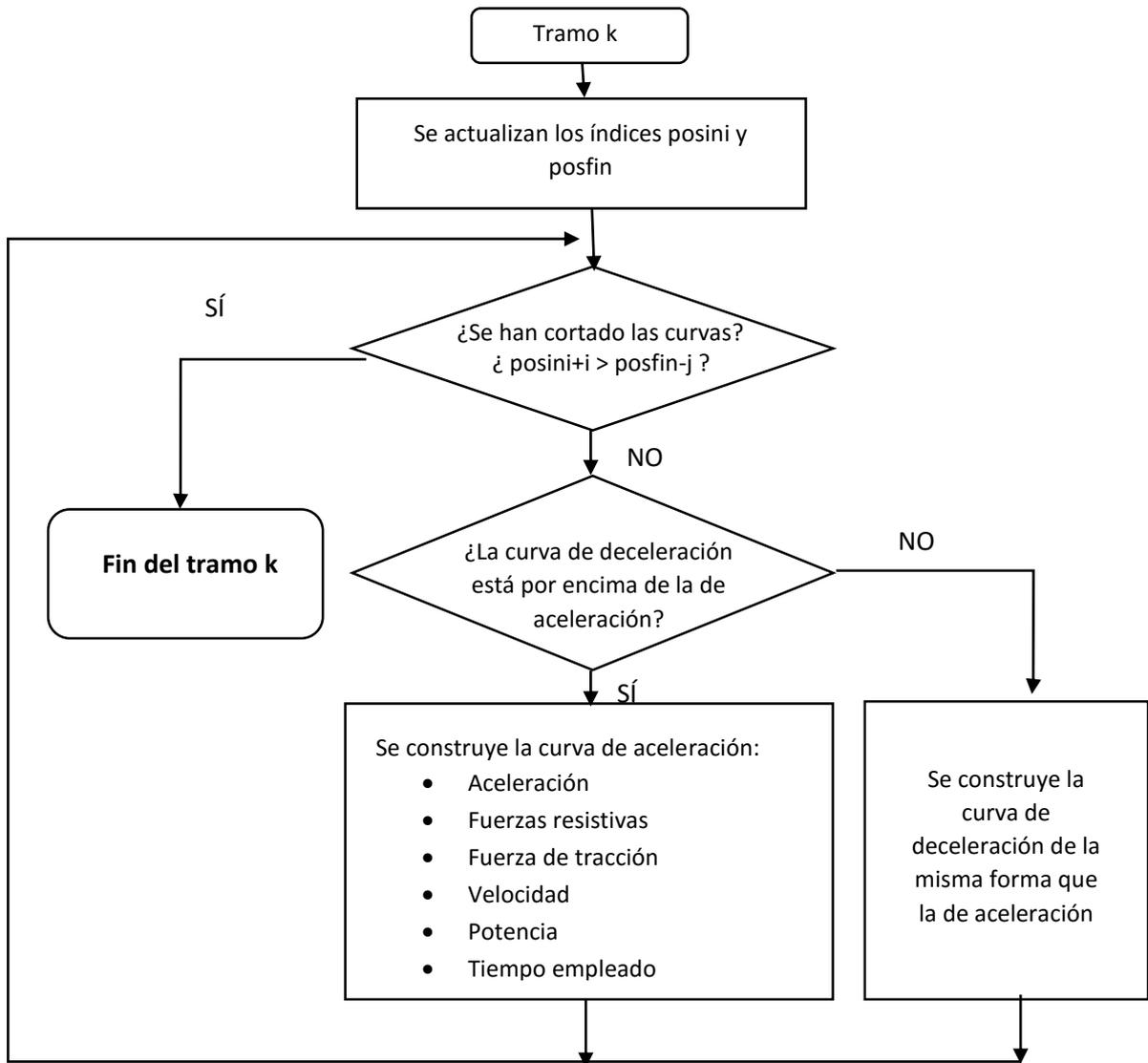


Figura 16. Flujograma de construcción de curvas

El programa está diseñado de tal forma que en cada iteración tan solo se vaya añadiendo un nuevo punto, bien a una curva o a la otra, sin llegar a calcular las dos curvas el mismo punto.

Para garantizar que las curvas se encontrarán en una situación factible, es decir, que en el momento que hay que empezar a frenar (último punto de la curva de aceleración) la velocidad sea superior que la del punto siguiente inmediato (último punto calculado de la curva de deceleración), el criterio empleado para elegir qué punto de la curva se calcula en la siguiente iteración es: mientras que el último dato de velocidad de deceleración sea menor que el último dato de aceleración, se calcula un nuevo punto de la curva de deceleración; y en el caso en el que la curva de aceleración esté por debajo de la de deceleración, será la de aceleración la que será calculada.

En la construcción de las curvas, es importante destacar que para cada punto, se calcula la aceleración, fuerzas resistivas y de tracción y potencia consumida para ese punto, así como la velocidad y el incremento en el tiempo, que se almacenarán en el punto siguiente.

Para cada punto de la curva que se está calculando en cada momento, se comienza obteniendo las fuerzas resistivas y la fuerza de tracción, limitándola al valor máximo fijado en la definición de variables. Una vez calculadas las fuerzas se calcula la aceleración del tren en ese punto.

Para determinar la aceleración posible en cada punto, se comienza obteniendo el valor de las fuerzas resistivas que actúan sobre el tren en esa situación. A continuación, se usa la curva característica del tren de Fuerza-Velocidad, de tal forma que conociendo la velocidad en ese instante, se puede obtener la fuerza de tracción que puede desarrollar el tren en esa situación. Si se supera la fuerza máxima indicada, se fija el valor a ese punto, se recalcula la potencia que ofrece el motor bajo esas condiciones, y se obtiene un valor para la aceleración:

$$a = \frac{F_{tracción} - F_R}{m_{tren}} \quad (16)$$

Antes de poder seguir con la construcción de la curva, se realizan las comprobaciones de las distintas restricciones para los valores calculados en ese punto. De existir algún desajuste con respecto a los límites, se procede del mismo modo que ya se ha explicado con anterioridad, fijando tal parámetro al valor máximo permitido, y calculando los demás en función de éste nuevo valor.

En base a esta aceleración calculada y la velocidad de ese punto, se puede saber qué tipo de movimiento lleva el tren: rectilíneo uniforme o rectilíneo uniformemente acelerado.

- **Caso A: MRUA**

1- La aceleración que puede ofrecer el tren es positiva:

- A. El tren, ya sea debido a poseer una potencia suficiente o encarar una pendiente favorable, puede dar una aceleración superior a la máxima, y por lo tanto para ese instante se fija una aceleración igual a la máxima posible para no sobrepasar el límite de velocidad ni el de aceleración.
- B. el tren debido a falta de potencia o una pendiente desfavorable, el tren no puede dar la aceleración máxima, y por lo tanto la aceleración que posee en ese instante es la que puede dar siendo la fuerza de tracción aportada por el tren máxima.

2- La aceleración que puede ofrecer el tren es negativa:

- A. La aceleración que puede ofrecer el motor debido a una situación de pendiente desfavorable, es negativa. En tal caso se asigna la aceleración que pide el motor, y el tren comenzará de decelerar, manteniendo la fuerza de tracción máxima.

- **Caso B: MRU**

En este caso la velocidad alcanzada por el tren es ya la máxima, y por lo tanto condiciona la aceleración del tren, forzándola a ser cero aun por pudiendo ofrecer el tren por su potencia una aceleración mayor.

La situación más peculiar que puede darse dentro de este caso, es aquella en la cual la pendiente es favorable, y la velocidad que lleva el tren en ese momento es máxima. El tren debe retenerse, ofreciendo una aceleración nula pero ejerciendo una fuerza de tracción que se opone al movimiento.

Si el tren sigue un MRUA es necesario comprobar si la velocidad de las curvas sufre un cambio de tendencia, es decir, que en la curva de aceleración llegue un momento a partir del cual la velocidad en lugar de seguir aumentado o permanecer constante disminuye (sin haber llegado aún a la curva de deceleración), para evitar que se produzcan saltos de velocidad en las intersecciones entre las curvas de aceleración y deceleración cuando estas se corten.

Esta peculiaridad es debido a la existencia de pendientes, ya que cambios bruscos en la inclinación del terreno pueden causar que el motor no responda como se espera de él.

La solución a este problema es borrar los datos de los puntos de la curva contraria a la que se ha identificado el cambio de tendencia en la velocidad, hasta el punto en el cual las velocidades sean lo más similares posible. De esta forma se evitan grandes saltos de velocidades que no serían coherentes con la lógica del movimiento del tren.

Una vez completado este proceso para todos los tramos, se obtiene la malla de un tren. Destacar que el algoritmo implementado es válido tanto para el cálculo de los trenes con sentido de ida, como para los trenes con sentido de vuelta, de tal forma que la solución final a la que se llega es una malla de ida y una malla de vuelta.

En el caso del tren con sentido de vuelta, el método de proceder es el mismo, con la única diferencia que las pendientes cambian de signo, y cuando en un caso es favorable al avance, en el otro se opone, y al revés.

Al final de la simulación se obtienen dos matrices con los datos de interés, que presenta la siguiente estructura:

$$\text{Malla de ida} = \left[\begin{array}{cccccccccccc} t & \Delta t & x & h & m & Fr_{avance} & v & a & F_{res} & F_{trac} & P & F_{pend} \end{array} \right]$$

Figura 17. Matriz malla de ida

$$\text{Malla de vuelta} = \left[\begin{array}{cccccccccccc} t & \Delta t & x & h & m & Fr_{avance} & v & a & F_{res} & F_{trac} & P & F_{pend} \end{array} \right]$$

Figura 18. Matriz malla de vuelta

Donde las variables presentadas representan:

t: Tiempo

Δt : Incremento de tiempo

X: Posición en la vía

h: Altura

m: Pendiente

v: Velocidad

a: Aceleración

Fr_{aero} : Fuerza de resistencia al avance

F_{pend} : Fuerza resistiva de la pendiente

F_{trac} : Fuerza de tracción

P: Potencia

F_{res} : $F_{pend} + Fr_{aero}$

3.3 Resultados de la simulación de un tren

Para realizar un estudio realista del comportamiento de un tren a lo largo de un trayecto, se ha escogido un tramo de vía ferroviaria de cercanías de RENFE Madrid, el cual se trata de un sistema de electrificación 2x3000 V en corriente continua.

Este tramo seleccionado corresponde a las estaciones comprendidas entre Méndez Álvaro y Chamartín, por donde realizan un servicio directo entre ambas estaciones los trenes de las líneas C10, C1 y C7.



Figura 19. Mapa de RENFE cercanías Madrid [10]

En cuanto al modelo del tren seleccionado es el correspondiente a la serie 447. Se trata de una unidad eléctrica alimentada a 3.000 Vcc, construida para el servicio en línea de RENFE, cuyos fabricantes mecánicos son CAF y Alstom, y sus fabricantes eléctricos son Siemens, ABB y Adtranz.[11]

Por otro lado, el tipo de catenaria escogido es el CA-160, empleado por RENFE en su servicio de cercanías en Madrid. Que consta de un sustentador de $Cu\ 150\ mm^2$, y dos hilos de contacto de $Cu\ 107\ mm^2$, lo cual hace que posea unas características eléctricas resistivas de $0.0051\ \Omega/km$, y permite velocidades de hasta 160 km/h.[12]

De acorde a los datos obtenidos de las hojas de características del modelo de tren seleccionado, se han introducido los siguientes parámetros en el programa:

- Datos del recorrido: Parte de la línea de Renfe C10, C1 y C7, recogidos en la tabla 6

Tabla 6. Datos del recorrido

Paradas	Posición (m)	Tiempo de parada (s)	Altitud (m)
Mendez Álvaro	0	30	599
Atocha	2500	30	618
Recoletos	4500	30	649
Nuevos Ministerios	7500	30	683
Chamartín	10800	30	718
Longitud total de la vía	10800 m		
Paso de discretización	1 m		

- Restricciones de la vía: Mostradas en la tabla 7 [13]

Tabla 7. Restricciones de la vía

Tramo	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración máxima (m/s^2)	Aceleración mínima (m/s^2)
Estación 1-2	120	0.5	-1
Estación 2-3	120	0.5	-1
Estación 3-4	120	0.5	-1
Estación 4-5	120	0.5	-1

- Rendimiento: tipo de motor de la serie 447, Asíncrono AC [11]. Explicado en la tabla 8

Tabla 8. Rendimiento de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua [14]

	Motor cc (500Kw)	Motor cc (1500Kw)	Síncrono ac (500Kw)	Síncrono ac (1500Kw)	Asíncronos ac	Imanes permanentes
Transformador	0.99	0.99	1	1	1	1
Convertidor	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Motor	0.915	0.935	0.93	0.945	0.95	0.98
Reductora (2etapas)	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Rendimiento total	0.86998	0.88899	0.8932	0.9076	0.9124	0.94119

- Características mecánicas del tren [13]: ($P_{reg}=0.3P_{tren}$) Recogidas en la tabla 9.

Tabla 9. Hoja de características serie 447

Masa a plena capacidad	Masa en vacío	Pmax	Pregenacion	Ftracc. max	P serv.aux
216100 kg	162500 kg	2.40 MW	0.72MW	230 KN	1.3 KW

- Coeficientes de resistencia al avance, tabla 10.

Tabla 10. Coeficientes específicos de resistencia al avance para trenes convencionales y de alta velocidad [15]

Tren unidad	Masa en vacío t	Coeficientes específicos		
		A $\frac{daN}{T}$	B $\frac{daN}{T(km/h)}$	C $\frac{daN}{T(km^2/h^2)}$
Trenes convencionales				
Locomotora tipo BB	80	1.25	0.01	3.75×10^4
Locomotora tipo CC	120	1.20	0.01	2.5×10^4
2 loc+6 coches	400	1.15	0.00975	2.875×10^4
Clásico viajeros	Variable	1.5-2	0	2.222×10^4
Mercancías bogies	Variable	1.5-2	0	2.5×10^4
Clásico mercancías	Variable	1.5-2	0	6.25×10^4
Trenes autopropulsado de viajeros				
TDR	99	1.59	0.00268	3.75×10^{-4}
Alarís	177	2.50	0.09	3.75×10^{-4}
Trenes de alta velocidad				
TGV Sud Est	418	0.562	0.00739	1.28×10^{-4}
TGV Réseau	416	0.649	0.00739	1.226×10^{-4}
TGV Atlantique	490	0.776	0.00796	1.153×10^{-4}
TGV Dúplex	424	0.637	0.00755	1.262×10^{-4}
ICE 3 Regional (4c)	231	0.735	0.00654	1.474×10^{-4}
AVE	416	0.702	0.00923	1.198×10^{-4}
Talgo 350 (s102)	357	0.790	0.00622	1.482×10^{-4}
ICE 3 (s 103)	426	0.733	0.00525	1.223×10^{-4}

Tratándose del tren de la serie 447 de un tren autopropulsado de viajeros, sus valores de los coeficientes serán cercanos a los del TDR y el Alarís. Pero por ser el TDR un vehículo de un Tren Regional Diésel, y el Alarís un tren de tracción eléctrica que ofrece servicio entre las estaciones de Puerta de Atocha y Valencia-Nord [16], se considera que los coeficientes del tren seleccionado para este caso, mostrados en la tabla 11, se asemejarán más a los del tren Alarís.

Tabla 11. Constantes del sistema

Aerodinámicas			Gravedad
A	B	C	G
$2.05 \frac{daN}{T}$	$0.07 \frac{daN}{T(km/h)}$	$0.000375 \frac{daN}{T(km^2/h^2)}$	$9.81 m/s^2$

Para estos datos los resultados son los que se muestran a continuación, donde las paradas se marcan con líneas verticales rojas, y se muestra la diferencia existente entre los resultados obtenidos de la simulación de un tren de ida, gráficas de la izquierda, y uno de vuelta, gráficas de la derecha:

– **Perfil del terreno y posición**

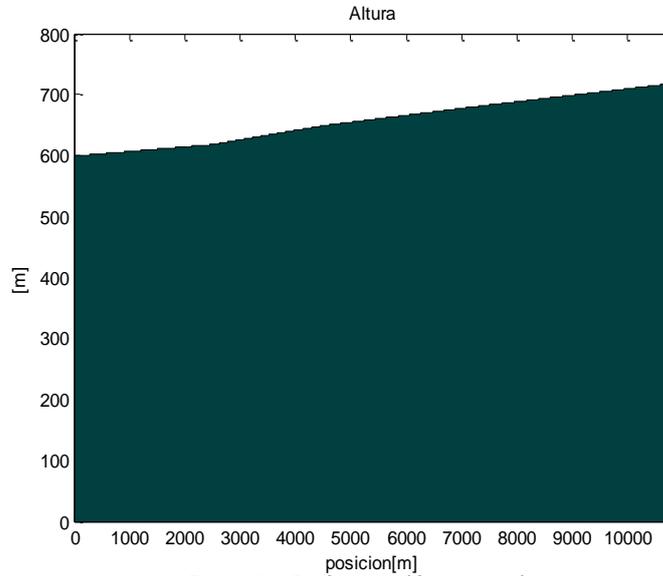


Figura 20. Perfil orográfico de la vía

Para el tramo seleccionado, el perfil orográfico obtenido es el que se presenta, con pendiente desfavorable durante todo el recorrido de ida, y favorable para los trenes de vuelta.

En cuanto a la posición de los trenes a lo largo del tiempo, en azul el de ida y en rojo el de vuelta, se puede observar cómo avanza el vehículo y el movimiento que describe a lo largo del tiempo. Además, se hace presente el efecto que tiene la pendiente, puesto que las curvas descritas son ligeramente distintas, y la duración de ambos trayectos es diferente.

Destacar que el tren de vuelta, como marca la lógica en un principio, por poseer una pendiente favorable tarda menos tiempo en recorrer el trayecto. Este efecto no solo se debe al desnivel, sino que el resto del conjunto de restricciones existentes en el sistema considerado también influye, pudiendo darse el caso opuesto según lo estrictas que sean estas restricciones y los coeficientes de resistencia al avance que se consideren.

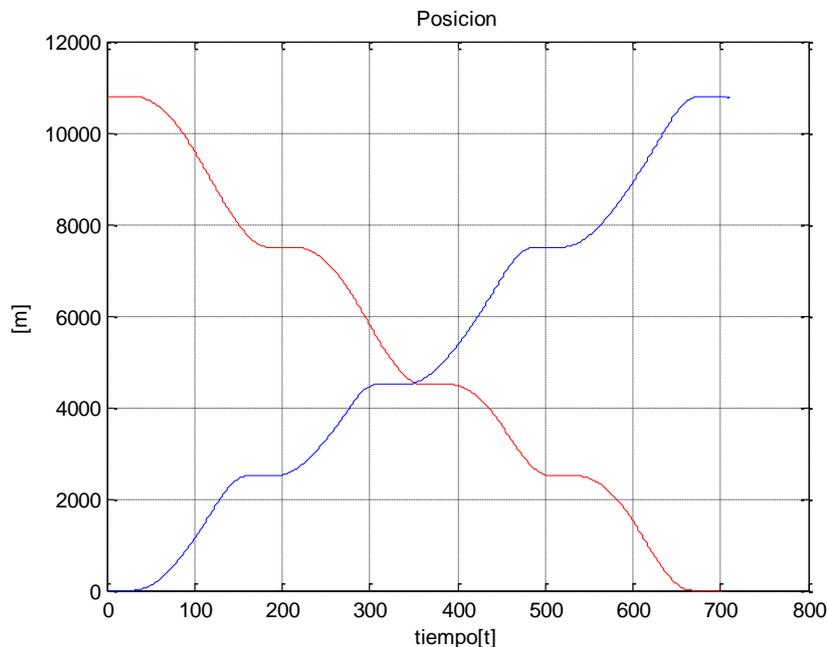


Figura 21. Movimiento del tren

– **Velocidades**

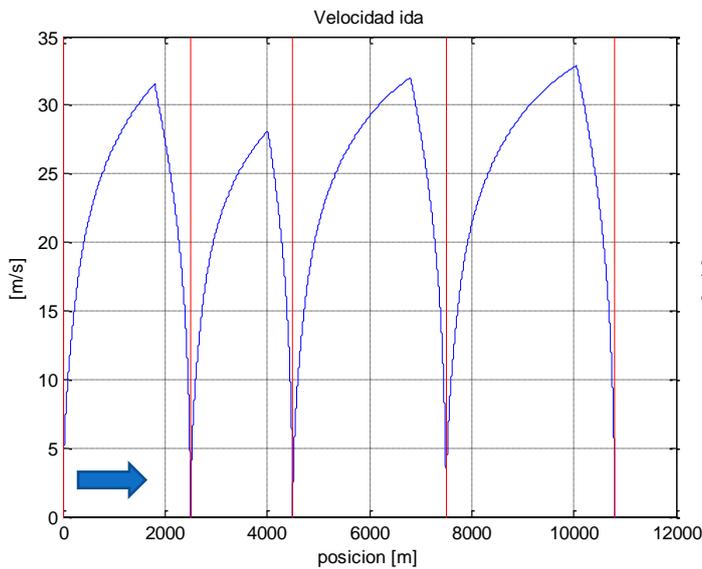


Figura 22. Curva de velocidad sentido de ida

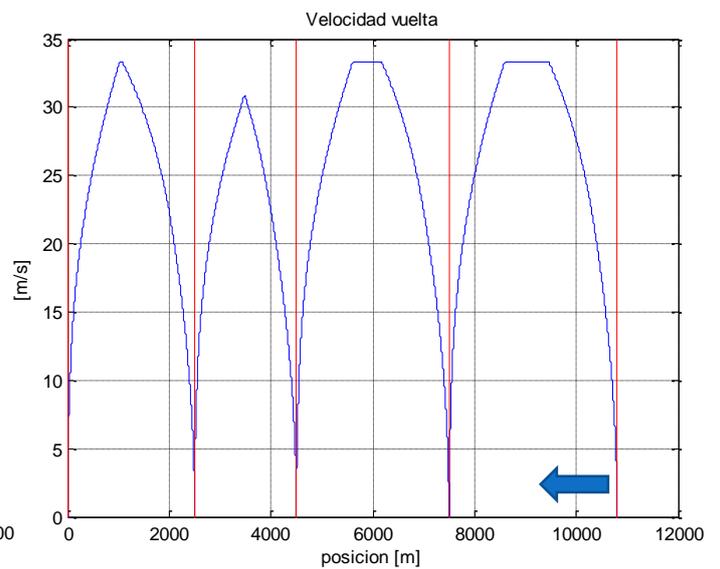


Figura 23. Curva de velocidad sentido de vuelta

– **Aceleraciones**

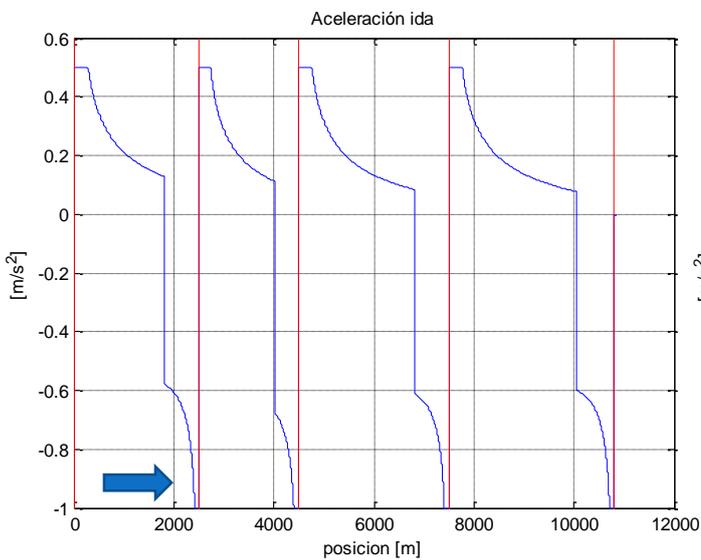


Figura 24. Curva de aceleración sentido de ida

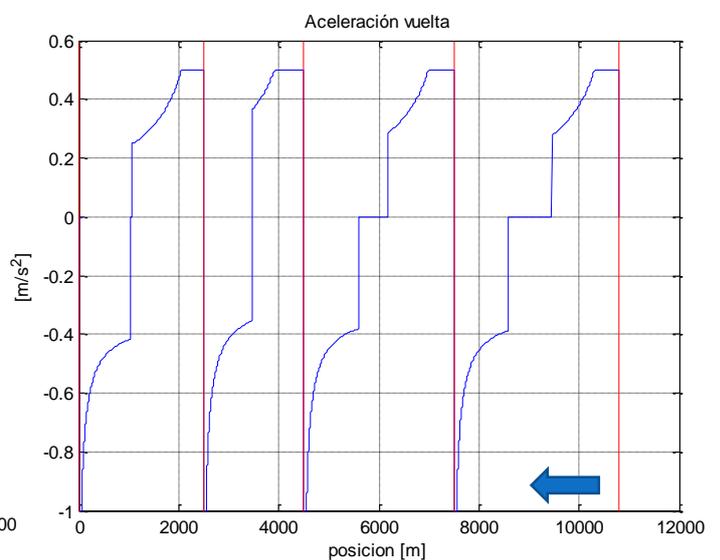


Figura 25. Curva de aceleración sentido de vuelta

Observando las gráficas de velocidad y aceleración, se puede apreciar la relación entre ambas curvas en ambos casos. La velocidad aumenta o disminuye en mayor o menor medida según el valor de la aceleración y la curva descrita, así como a velocidad constante, se aprecia que la aceleración es nula.

En cuanto a la diferencia entre ambos recorridos, se aprecia como en el recorrido de vuelta el tren alcanza velocidades más altas en menos tiempo, llegando a circular a la máxima velocidad en varios tramos. Esto es debido a que es capaz de aportar una aceleración máxima durante más tiempo gracias a la pendiente favorable, pero el periodo de deceleración es mayor ya que debe contrarrestar la propia aceleración de la colina mientras que a la ida el propio desnivel ayuda al frenado.

Fuerzas de tracción

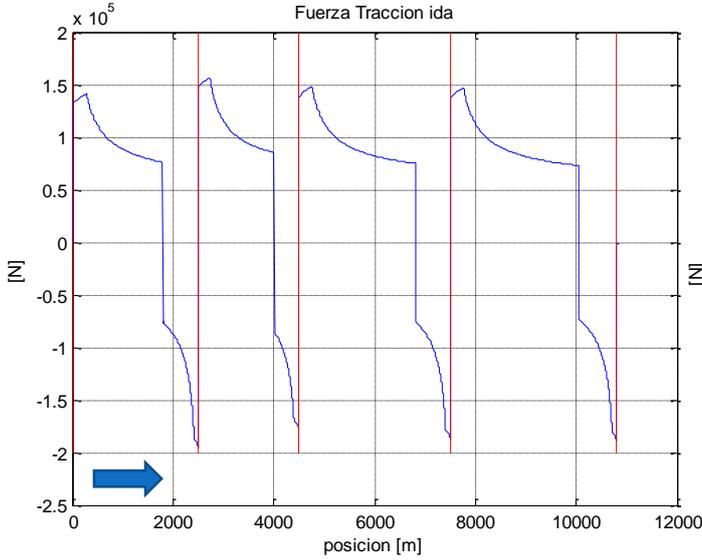


Figura 26. Curva de F. tracción sentido de ida

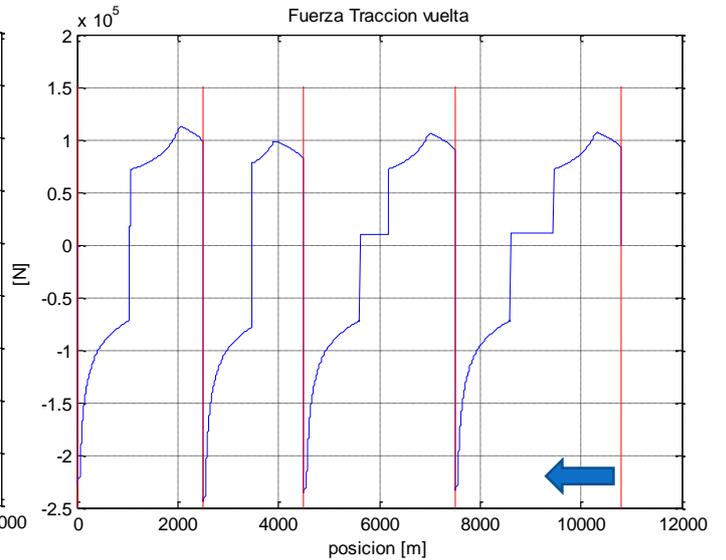


Figura 27. Curva de F. tracción sentido de vuelta

— Potencias

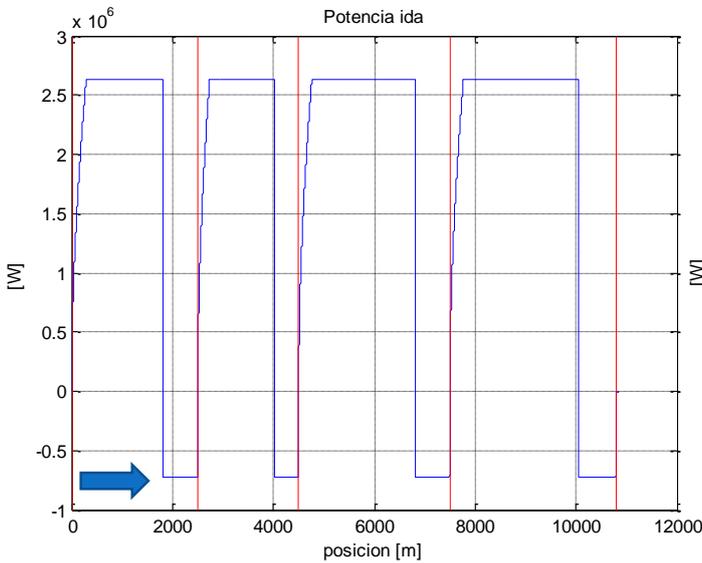


Figura 28. Curva de potencia sentido de ida

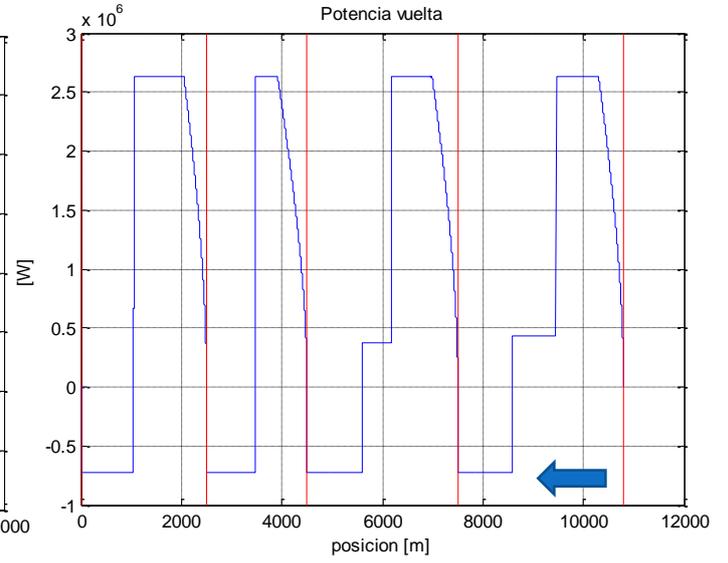


Figura 29. Curva de potencia sentido de vuelta

Las fuerza de tracción y aceleración guardan una estrecha relación como puede verse en la similitud entre sus gráficas, destacando que en los tramos de aceleración constante, la fuerza de tracción es lineal, y como al alcanzar la velocidad máxima, la fuerza tractiva disminuye, únicamente teniendo que vencer la resistencia al avance.

Del mismo modo que se aprecian unos valores de fuerza tractiva mayores en el sentido de ida, debido al efecto adverso de la pendiente.

De las gráficas de potencia se puede deducir la explicación a las curvas obtenidas de fuerza de tracción. Se observa como a potencia constante, la fuerza de avance que ejerce el tren describe una curva parabólica, fruto de la consideración tomada que se describe en la figura 10. Mientras que para valores lineales de fuerza tractiva, se obtiene una respuesta lineal de la potencia.

Destacar, que debido al interés en la interacción entre el vehículo y la parte eléctrica del sistema, la potencia que se muestra durante el periodo de frenado está limitada al valor máximo de regeneración que admite la línea aérea de contacto, a pesar de que la potencia que realmente genera el motor por sus características para la resolución del problema y la generación del resto de gráficas puede llegar a ser más negativa.

3.3 Modelado y Simulación del tráfico

Una vez conocidas las características de un tren en su trayecto de ida y de vuelta, el objetivo es determinar un sistema de tráfico ferroviario, indicando cuántos trenes saldrán de la estación y sus horarios de salida, a lo largo de un día. En este punto se trata último bloque que muestra el flujograma de malla.

- **Creación de la malla de tráfico:**

A partir de unos horarios introducidos, haciendo distinción entre los trenes de ida y los de vuelta, el programa simula la situación de tráfico planteada, suponiendo que todos los trenes de ida poseen las mismas características a lo largo del trayecto, y que todos los trenes de vuelta también presentan los mismos datos característicos entre sí.

De esta forma, el resultado obtenido de este bloque es una matriz similar a las mallas de ida y de vuelta, que contiene la toda información punto a punto de todos los trenes que han circulado por la vía en el intervalo de tiempo marcado. Esta nueva matriz contiene los mismos parámetros que las dos anteriores, solo que se incluyen dos columnas más, una para identificar el sentido del tren, y otra con el identificador de número de cada tren.

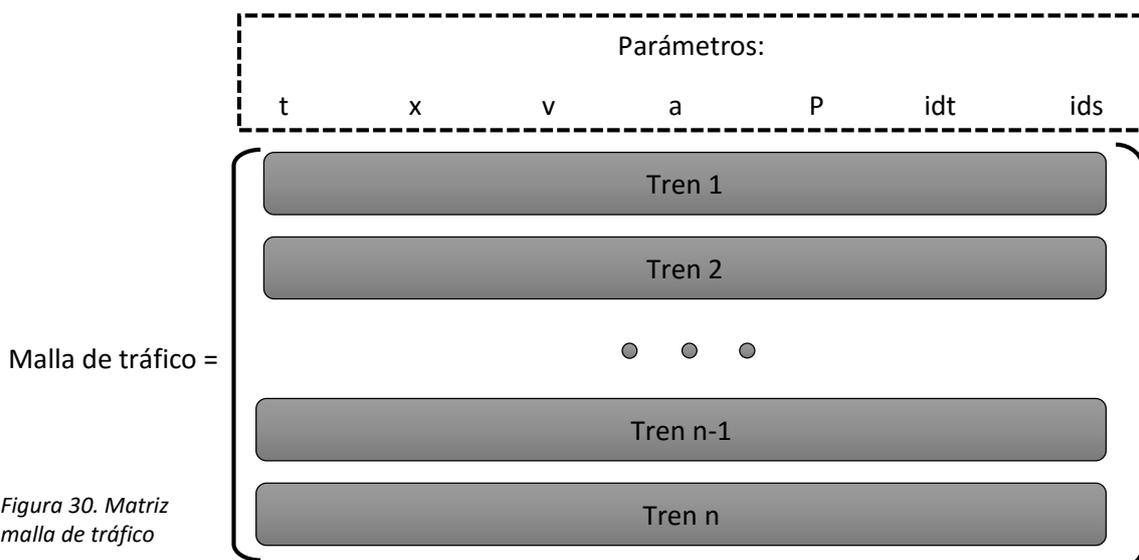


Figura 30. Matriz malla de tráfico

Donde *idt*, es el identificado de tren, e *ids* es el identificador de sentido.

Para ajustar más el modelo a la realidad se toman los horarios que publica RENFE cercanías Madrid, en su página web, para el tramo de vía ferroviaria que se ha seleccionado previamente, durante un periodo de tiempo suficiente para ser considerado significativo.

De este modo, el horario de salida de trenes obtenido para el intervalo de tiempo de 8:00-12:00 y día 5 de mayo de 2016 (Jueves), considerado como hora punta, es el mostrado en las tablas 12 y 13.

Tabla 12. Horarios trenes de ida

HORARIOS IDA	Línea	Origen: Méndez Álvaro	Destino: Chamartín
Horario de salida	C1	Tren 1	08:06
	C10	Tren 2	08:08
	C10	Tren 3	08:15
	C10	Tren 4	08:20
	C10	Tren 5	08:31
	C10	Tren 6	08:37
	C1	Tren 7	08:40
	C10	Tren 8	08:46
	C10	Tren 9	08:51
	C10	Tren 10	09:02
	C10	Tren 11	09:06
	C1	Tren 12	09:09
	C10	Tren 13	09:15
	C10	Tren 14	09:20
	C10	Tren 15	09:32
	C10	Tren 16	09:36
	C1	Tren 17	09:39
	C10	Tren 18	09:45
	C10	Tren 19	10:01
	C10	Tren 20	10:07
	C1	Tren 21	10:09
	C10	Tren 22	10:16
	C10	Tren 23	10:30
	C10	Tren 24	10:36
	C1	Tren 25	10:39
	C10	Tren 26	10:45
	C10	Tren 27	11:01
	C10	Tren 28	11:06
	C1	Tren 29	11:10
	C10	Tren 30	11:15

	C10	Tren 30	11:31
	C10	Tren 32	11:36
	C1	Tren 33	11:39
	C10	Tren 34	11:45

Tabla 13. Horario trenes de vuelta

HORARIOS VUELTA	Línea	Origen: Chamartín	Destino: Méndez Álvaro
Horario de salida	C10	Tren 1	08:04
	C1	Tren 2	08:11
	C10	Tren 3	08:20
	C7	Tren 4	08:23
	C10	Tren 5	08:34
	C1	Tren 6	08:41
	C10	Tren 7	08:49
	C7	Tren 8	08:55
	C10	Tren 9	09:04
	C1	Tren 10	09:11
	C10	Tren 11	09:19
	C7	Tren 12	09:25
	C10	Tren 13	09:33
	C1	Tren 14	09:41
	C10	Tren 15	09:50
	C7	Tren 16	09:54
	C10	Tren 17	10:04
	C1	Tren 18	10:11
	C10	Tren 19	10:19
	C7	Tren 20	10:24
	C10	Tren 21	10:34
	C1	Tren 22	10:41
	C10	Tren 23	10:49
	C7	Tren 24	10:55
	C10	Tren 25	11:03
	C1	Tren 26	11:13
	C10	Tren 27	11:19
	C7	Tren 28	11:24
	C10	Tren 29	11:34
	C1	Tren 30	11:41
	C10	Tren 31	11:49
	C7	Tren 32	11:55

- **Resultados de la simulación del tráfico ferroviario**

Para el tramo de vía seleccionado, el horario escogido, y el tráfico ferroviario mostrado anteriormente correspondiente a un tráfico alto, la malla de tráfico del sistema, es la siguiente:

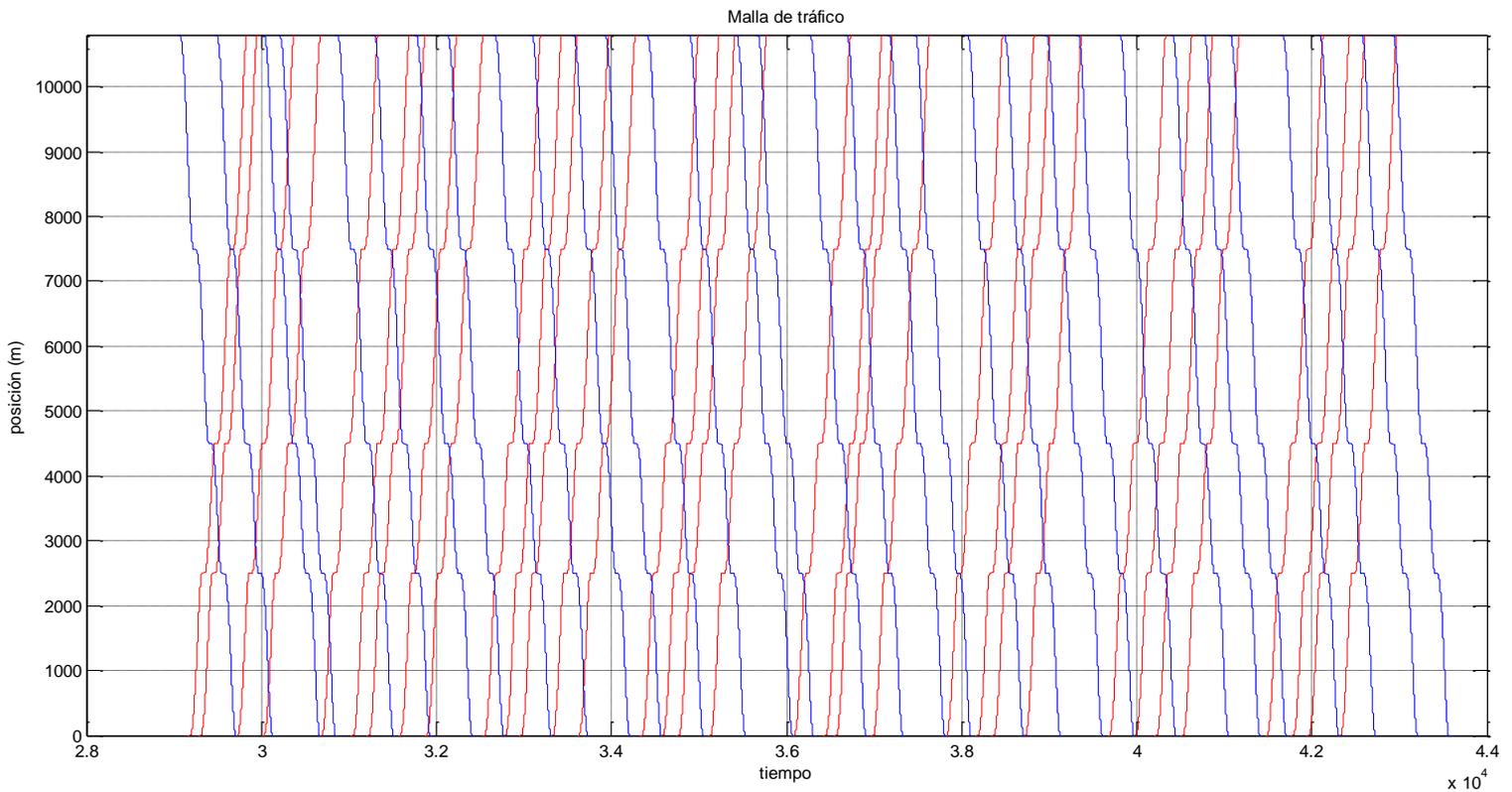


Figura 31. Malla de tráfico del sistema ferroviario

En rojo se aprecian los trenes de ida, y en azul los correspondientes a los poseedores de un sentido de vuelta. Esto permite conocer qué trenes se encuentran en circulación en un momento dado, dónde se sitúan y hacia dónde se dirigen.

- **Obtención de la posición y la potencia de los trenes en un instante determinado**

Por último, en cuanto a la parte mecánica del problema, se implementa una función capaz de devolver la posición y la potencia de los trenes en circulación en un instante marcado. Los trenes pueden ser tanto de ida como de vuelta, y el esquema seguido es el que se presenta a en la figura 32.

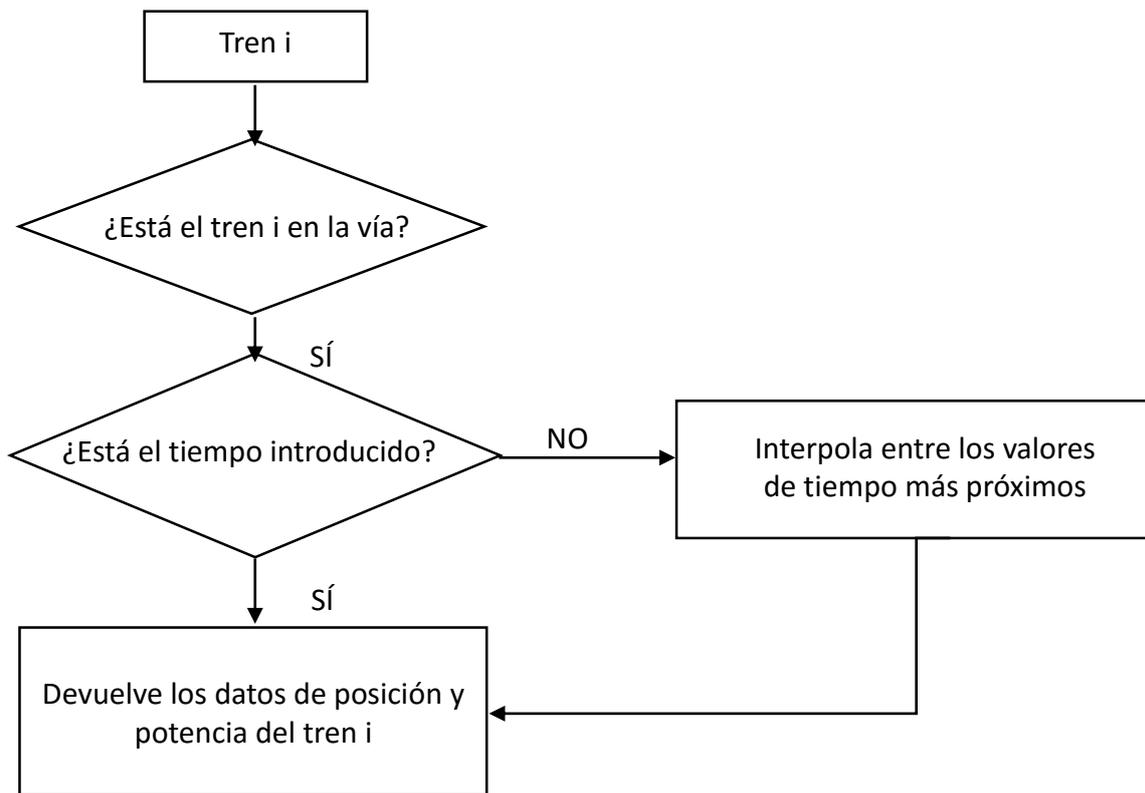


Figura 32. Diagrama de flujo obtención de potencia y posición

La importancia de esta parte es la necesidad de conocer estos datos para su posterior uso en la parte eléctrica, ya que serán los datos que caractericen el circuito eléctrico equivalente.

Ya que la malla de tráfico se encuentra discretizada en longitud y no en tiempo, una vez identificados los trenes que se encuentran en la vía, es preciso conocer de cada tren los parámetros de potencia y posición del tiempo inmediatamente superior, e inmediatamente inferior al determinado.

De esta forma, y considerando que el paso de discretización es suficientemente pequeño como para que la curva entre un dato y otro pueda ser interpretada como una función lineal, se realiza una interpolación lineal mediante la cual se obtienen los datos con gran exactitud de la potencia y la posición del tren en ese instante de tiempo.

$$P_{instante} = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \cdot (t_{instante} - t_1) + P_1 \quad (17)$$

$$X_{instante} = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \cdot (t_{instante} - t_1) + X_1 \quad (18)$$

Las matrices resultantes de este procedimiento son dos, una para almacenar los datos de posición y otra para la potencia.

$$\text{Posición} = \left[\begin{array}{ccc} & & \\ \text{Posición} & \text{idt} & \text{ids} \end{array} \right]; \text{Potencia} = \left[\begin{array}{ccc} & & \\ \text{Potencia} & \text{idt} & \text{ids} \end{array} \right]$$

Figura 33. Matriz de posición

Figura 34. Matriz de potencia

Capítulo 4

Modelado y simulación del sistema eléctrico

4.1 Modelado del sistema eléctrico

Todo sistema eléctrico cuenta con impedancias, cargas, generadores y tomas de tierra. Es por ello que se deben identificar entre los elementos que forman un sistema eléctrico ferroviario 1x3000 Vcc, cuáles son los necesarios para la representación del circuito eléctrico equivalente.

Estos elementos son: las catenarias, las vías, las subestaciones y el material rodante.

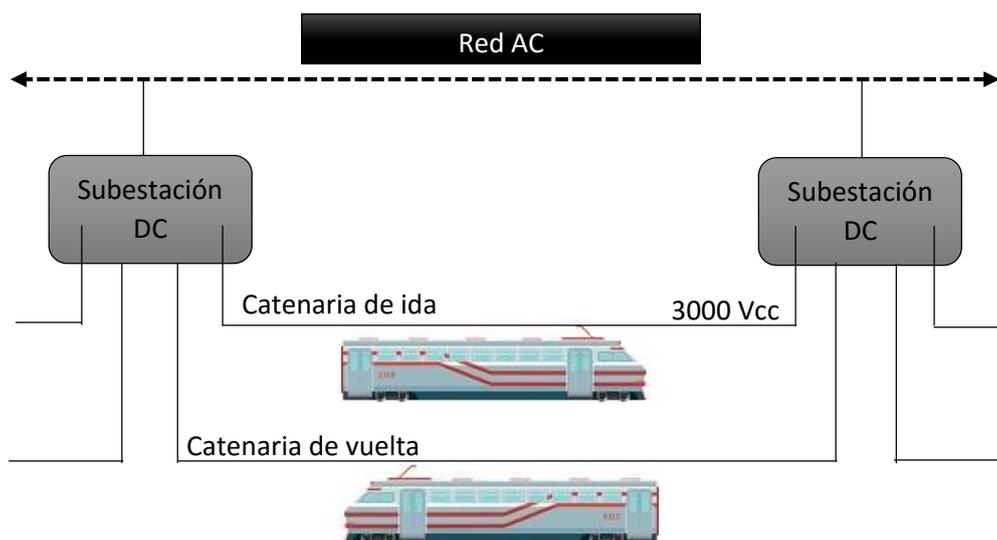


Figura 35. Esquema eléctrico ferroviario

Estos elementos llevados al modelado eléctrico se representan de la siguiente forma:

- La catenaria como una línea monofásica. La línea considerada es del tipo CA-160, construida con un hilo de cobre uniforme de 107 mm^2 y por lo tanto el valor de impedancia por metro no varía ($0.051 \Omega/\text{km}$)
- Las subestaciones y la red como generadores ideales. Es decir, se desprecia el efecto de la red.
- Los trenes como cargas cuya potencia demanda es conocida.
- Se desprecia el raíl, debido a que tras una primera simulación considerando el rail como una impedancia más, se obtuvieron unos voltajes en los nudos situados en el raíl de magnitudes despreciables en comparación con la tensión de la línea.

De esta forma, el circuito equivalente DC tomado para la resolución del sistema eléctrico para un ejemplo arbitrario del tráfico presenta la estructura que puede verse a continuación:

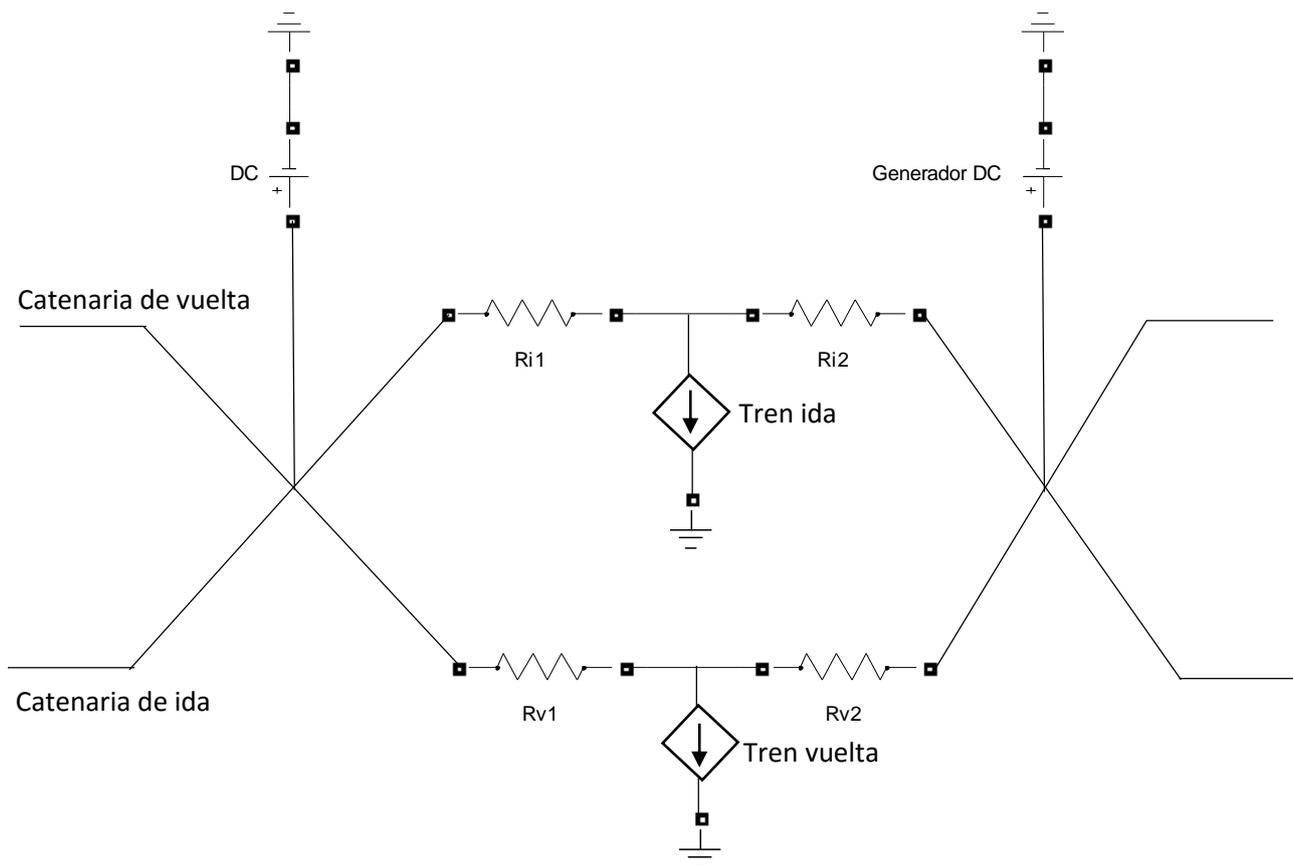


Figura 36. Circuito equivalente del sistema de tráfico

El sistema se modela como un conjunto de ramas y nudos, donde cada nudo corresponde a una posición de enganche tanto de un generador como de una carga, o bien a los extremos de la línea. Cada rama posee una impedancia dependiendo de la longitud del tramo de cada una de ellas.

El objetivo es obtener para cada instante analizado una matriz que presente la siguiente estructura:

$$V = \left[\begin{array}{ccccc} \text{posición} & \text{tensión} & \text{idCatenaria} & \text{tiempo} & \text{Nº simulación} \end{array} \right]$$

Figura 37. Matriz de voltajes

4.2 Métodos de resolución

Una vez obtenido el sistema eléctrico equivalente para una situación concreta, en el cual se conocen todos los valores de los generadores, las cargas y las líneas, el siguiente paso es la resolución del flujo de potencias.

Para ello es necesario distinguir entre los tipos de nodos que existen en el sistema. Por un lado hay los nodos tipo V, también denominados 1, de los cuales se conoce el voltaje y por lo tanto hacen referencia a los nodos de enganche de las subestaciones.

Por otro lado se tiene los nodos tipo P ó tipo 2. De estos nodos se conoce la potencia demandada, y por lo tanto corresponden a los trenes. En caso de coincidir tren y subestación en la misma posición, se considera que el nudo en el que se encuentran es de tipo V.

El objetivo de la resolución del flujo de potencia es obtener los valores de voltaje para los nodos tipo P del sistema y así poder realizar un análisis de la caída de tensión en cada una de las catenarias obteniendo un perfil de tensiones a lo largo de toda su longitud y a lo largo del tiempo.

Para un flujo de potencia en corriente continua, la ecuación para cada nudo k puede ser descrita de la siguiente forma:

$$V_k I_{ss,k} - P_{t,k} = V_k \sum_{i=1}^N Y_{k,i} V_i \quad (19)$$

$$Y_{k,i} = \begin{bmatrix} Y_{1,1} & \dots & Y_{1,i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k,1} & \dots & Y_{i,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{1,1}} & \dots & \frac{-1}{R_{1,i}} \\ \vdots & \sum \frac{1}{R} & \vdots \\ \frac{-1}{R_{k,1}} & \dots & \frac{1}{R_{i,i}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Donde V_k es el voltaje en el nudo k , $I_{SS,k}$ es la corriente en el nudo k , P_k es la carga del tren conectada al nudo k , $Y_{k,i}$ es el elemento k,i de la matriz de admitancias del bus (inversa de la resistencia de la rama k,i), y la diagonal de la matriz está formada por la inversa de la resistencia de las ramas que llegan a ese nudo.

Para resolver el flujo de potencias que plantea la simulación de una malla de tráfico, se tienen varios métodos para dar con la solución. Dos de ellos son: Sequential Linear Power Flow y Newton-Raphson. Cada método tiene sus ventajas y sus inconvenientes como se verá en los puntos siguientes.

Por último, el sistema se implementará en Simulink para asegurar la exactitud de los métodos.

i. Sequential Linear Power Flow

Este método está basado en el balance de corrientes en cada nudo. La ecuación (19) puede reescribirse en forma de corriente como se muestra en la ecuación (21). A pesar de la no linealidad del consumo de potencia la ecuación puede ser transformada en lineal en cada iteración cuando el valor inicial o el anterior voltaje conocido de todos los nudos es asumido. Esto supone que la componente $P_{T,k}/V_k$ es iterativamente arbitraria.

$$I_{SS,k} - \frac{P_{T,k}}{V_k} = \sum_{i=1}^n Y_{k,i} V_i \quad (21)$$

$$[Y][V] = [I] \quad (22)$$

De esta forma se obtiene una ecuación que relaciona la tensión de cada nudo y la admitancia, con la corriente total de su nudo correspondiente.

Una vez construido el sistema eléctrico, obtenidos todos los parámetros e identificado los distintos tipos de nudo, se procede a eliminar de la ecuación (22) las tensiones y las corrientes de los nudos tipo V, de tensión ya conocida, y la correspondiente fila y columna de la matriz de admitancias de ese nudo.

De esta forma, tan solo quedan en la ecuación las tensiones que se desconocen y sus respectivas corrientes de nudo. Estas corrientes, debido a la eliminación de los parámetros anteriores han de ser corregidas, para recoger la información eliminada.

$$I'_c = I_c - \sum_{i=1}^{Ne} V_i Y_{c,i} \quad (23)$$

Donde I_c hace referencia a la corriente que no ha sido eliminada de la matriz, y Ne corresponde a los nudos eliminados. Para poder resolver esta ecuación es necesario conocer previamente las corrientes inyectadas por las cargas.

$$I_c = \frac{P_{T,c}}{V_c} \quad (24)$$

De esta ecuación se desconoce el valor del voltaje del nudo. Es por ello que para empezar el proceso iterativo, se parte de un perfil de tensiones inicial. Este perfil, para reducir el tiempo de simulación debe ser de valores cercanos a los de tensión de los generadores.

A partir de las corrientes inyectadas, ya se puede obtener un resultado para las tensiones. Estas tensiones resultantes pasaran a ser el nuevo perfil V' con el que se procederá en la siguiente iteración, hasta conseguir que la solución converja a un valor con un error máximo de 0.01 V

$$error_{it} = \left| \max_{i=1} \{V'_i - V_i\} \right| \quad (25)$$

ii. Newton-Raphson

Similar al cálculo de flujo de potencia en corriente alterna, los nuevos voltajes son calculados usando la expansión de la serie de Taylor en los desbalances de potencia, como se muestra en la ecuación:

$$\Delta P_k = V_k I_{ss,h} - P_{T,k} - V_k \sum_{i=1}^N Y_{k,i} V_i \quad (26)$$

Con las derivadas de primer orden de esta ecuación, se puede obtener la matriz Jacobiana:

$$[J] = [\partial \Delta P / \partial V] \quad (27)$$

Para sistemas de corriente continua, formular la matriz Jacobiana puede expresarse en dos fórmulas, la ecuación (29) para los elementos de la diagonal, y la ecuación (30) para los elementos fuera de la diagonal:

$$\frac{\partial}{\partial V_k} \Delta P_k = I_{ss,k} - 2V_k Y_{k,k} - \sum_{i=1 \neq k}^N Y_{k,i} V_i \quad (28)$$

$$\frac{\partial}{\partial V_j} \Delta P_k = -2V_k Y_{k,j} \quad (29)$$

De esta forma, el voltaje en el bus k de la iteración $h+1$ puede hallarse mediante la siguiente fórmula:

$$[V]^{(h+1)} = [V]^{(h)} - \left[\frac{\partial}{\partial V} \Delta P \right]^{-1} [\Delta P] \quad (30)$$

Para poder realizar la primera iteración se parte de un perfil plano de tensiones. De manera homologa al método Sequential Linear Power Flow, se realizan las iteraciones necesarias para que la solución converja en un valor cuyo error sea menor o igual a 0.01V.

iii. Simulación en Simulink

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos [17]. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos.

Mediante el modelado por bloques de los elementos que forman el sistema eléctrico, es posible comprobar los resultados exactos que deberían obtenerse de los métodos previos de resolución de flujo de potencia.

Los distintos elementos eléctricos se modelan de la siguiente forma:

- Resistencias:

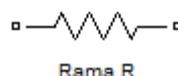


Figura 38. Bloque de resistencia eléctrica

El bloque correspondiente a una resistencia ya se encuentra implementado en la librería de Simulink, y mediante la unión de los extremos de la resistencia a los nudos, se forman las distintas ramas del sistema.

Su valor dependerá de la distancia entre los nudos entre los que se encuentra.

- Generadores

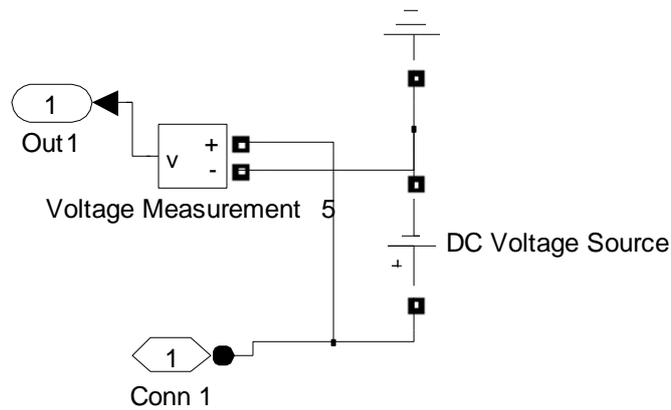


Figura 39. Bloque esquemático de una subestación

Se trata de una fuente DC, conectada a tierra y con un voltímetro conectado que lleva la señal a un visor. El polo positivo de la fuente se conecta a al nudo correspondiente.

Además, de los generadores, por medio de la ecuación 32, es posible calcular la potencia absorbida en los nudos a los que se encuentran enganchados.

$$P_{abs} = \sum I_{ramas\ del\ nudo} \cdot V_{generador} \quad (32)$$

- Cargas

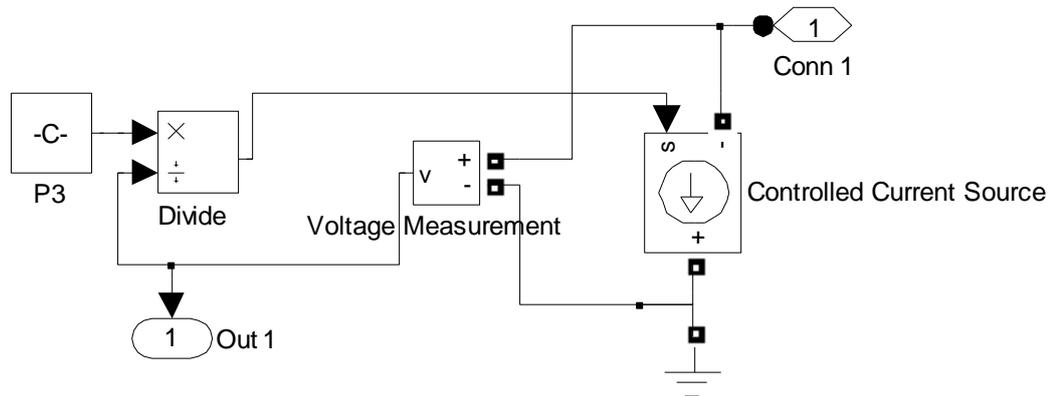


Figura 40. Bloque esquemático de un tren

El modelado de las cargas correspondientes a los trenes no es tan inmediata. No existe un bloque correspondiente a demanda de potencia, y por lo tanto se debe partir de un bloque de inyección de corriente para simular el mismo efecto.

Para inyectar la corriente precisa es necesario colocar un voltímetro que mida la tensión del nudo al que se conecta la carga, y añadir un bloque que tenga asignado el valor de la potencia que demanda en ese instante el tren.

De esta forma, aplicando la ecuación 31 para este caso, se obtiene el valor que hay que asignar a la fuente de corriente. Este proceso de ajuste se realiza automáticamente al colocar los bloques como se muestra en la figura de arriba.

4.3 Simulación del sistema eléctrico

Para comparar y verificar los resultados obtenidos por ambos métodos iterativos, se selecciona un instante de tiempo y se lleva a cabo su análisis, incluyendo una simulación en Simulink que garantice la fiabilidad de las soluciones alcanzadas. Resultados mostrados en la tabla 14.

La situación con la que se va a trabajar viene dada por los datos de tráfico expuestos en el capítulo anterior. Para realizar el análisis se selecciona un instante concreto, siendo el escogido el segundo 30090 lo que significa que la hora exacta es: 8 horas 21 minutos 30 segundos.

Además, se asume la existencia de cinco subestaciones localizadas en los puntos kilométricos: 0Km, 2km, 5Km, 8Km y 10.8km, generando a una tensión de 3000 V en el nudo de la catenaria en el que se encuentran, y siendo estos nudos comunes para ambas catenarias.

De esta forma, la situación que se presenta para el análisis posterior es la mostrada en la figura 41.

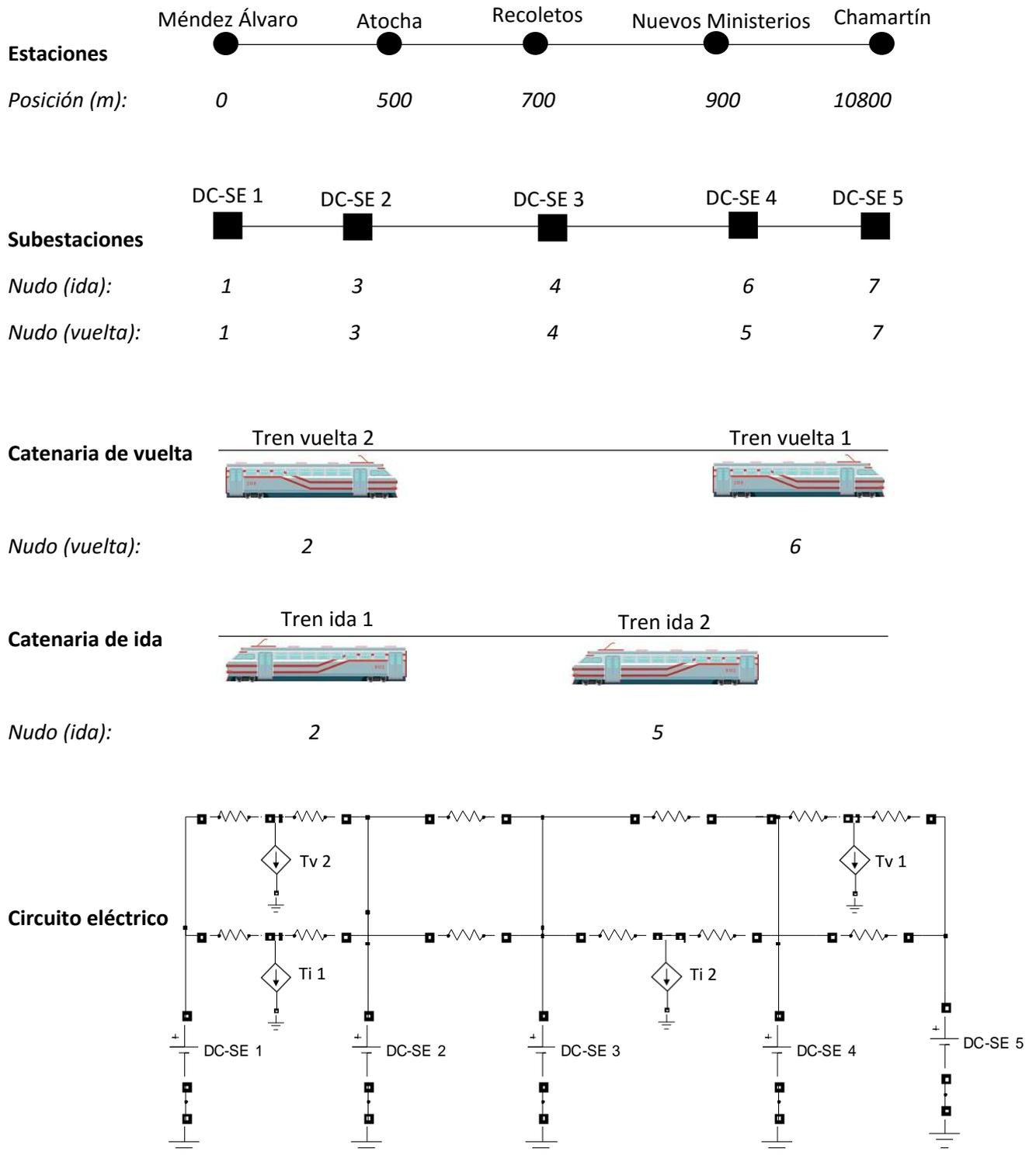


Figura 41. Ejemplo de una simulación del sistema en un instante particular

Tabla 14. Resultados del flujo de potencia

Simulación & instante analizado	Sentido	Numero de nudo	Posición (m)	Potencia (MW)	Sequential linear power flow (V)	Newton Raphson (V)	Simulink (V)	
1 T=30090s	Ida	1	0	0.351	3000	3000	3000	
		2	859.68	2.631	2956,36	2956,36	2956,36	
		3	2000	-0.934	3000	3000	3000	
		4	5000	-2.5407	3000	3000	3000	
		5	5112.5	2.631	2990,47	2990,47	2990,43	
		6	8000	-0.954	3000	3000	3000	
		7	10800	-1.822	3000	3000	3000	
		Tiempo de ejecución				0,0497s	0.1114s	-
		Número de iteraciones				4	3	1
	vuelta	1	0	0.351	3000	3000	3000	
		2	595.79	-0.72	3010,006	3010,006	3010.008	
		3	2000	-0.934	3000	3000	3000	
		4	5000	-2.5407	3000	3000	3000	
		5	8000	-0.954	3000	3000	3000	
		6	9905.59	2.631	2945,64	2945,64	2945,66	
		7	10800	-1.822	3000	3000	3000	
Tiempo de ejecución				0.00094957s	0.0040s	-		
Número de iteraciones				5	3	1		

Junto con los datos mostrados en la tabla superior, el programa facilita una serie de gráficas para hacer del resultado una solución más visual e intuitiva al problema.

— Posición y potencia de las cargas

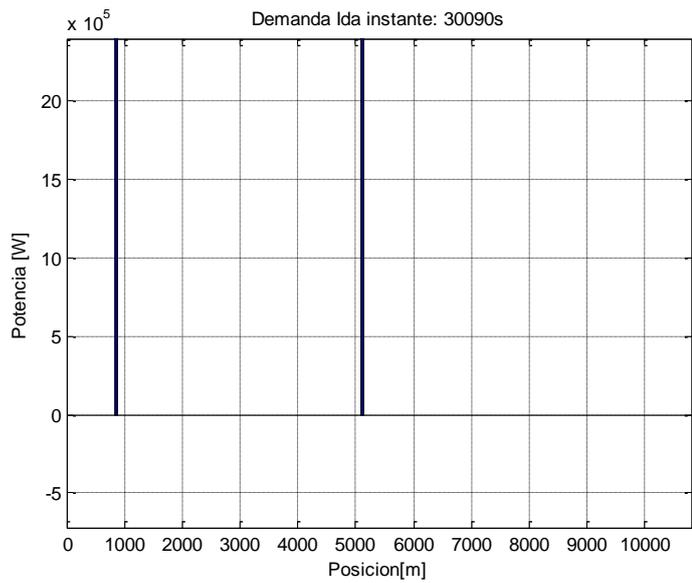


Figura 42. Demanda de potencia trenes de ida

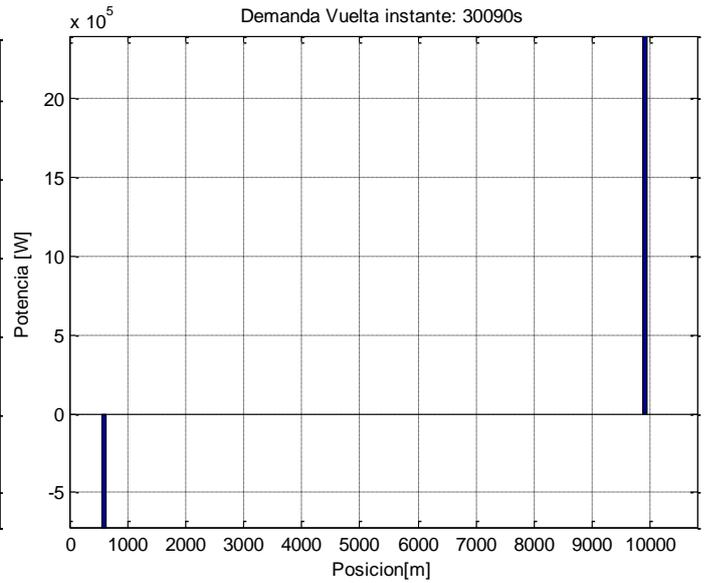


Figura 43. Demanda de potencia trenes de vuelta

— Resultado Sequential linear power flow

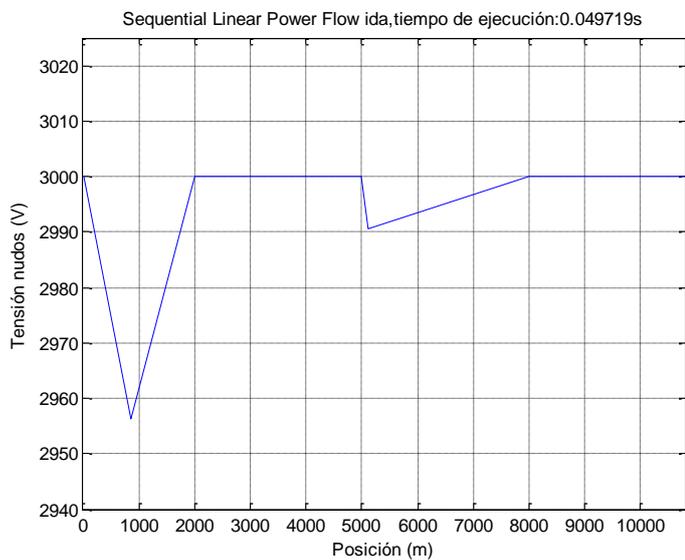


Figura 44. Resultado del flujo de potencia catenaria de ida SLPF

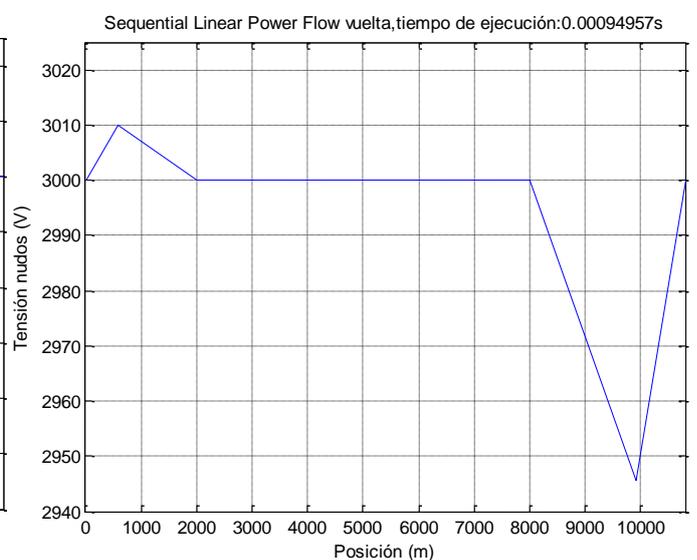


Figura 45. Resultado del flujo de potencia catenaria de vuelta SLPF

– Resultado Newton-Raphson

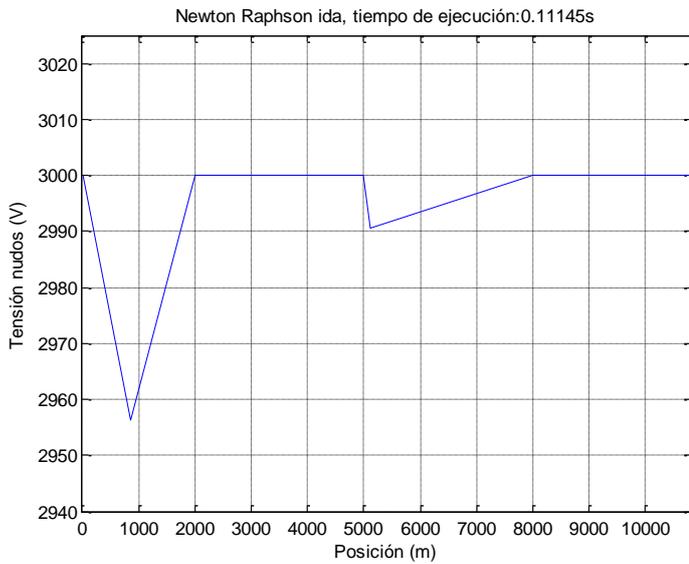


Figura 46. Resultado del flujo de potencia catenaria de ida NR

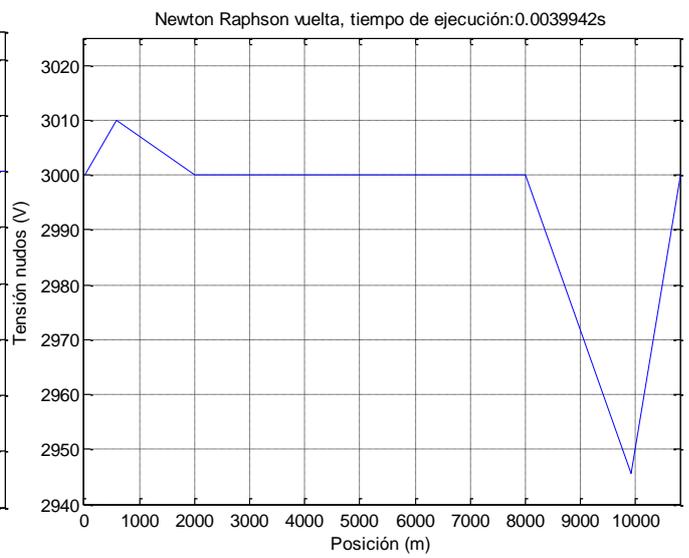


Figura 47. Resultado del flujo de potencia catenaria de vuelta NR

– Simulación en Simulink

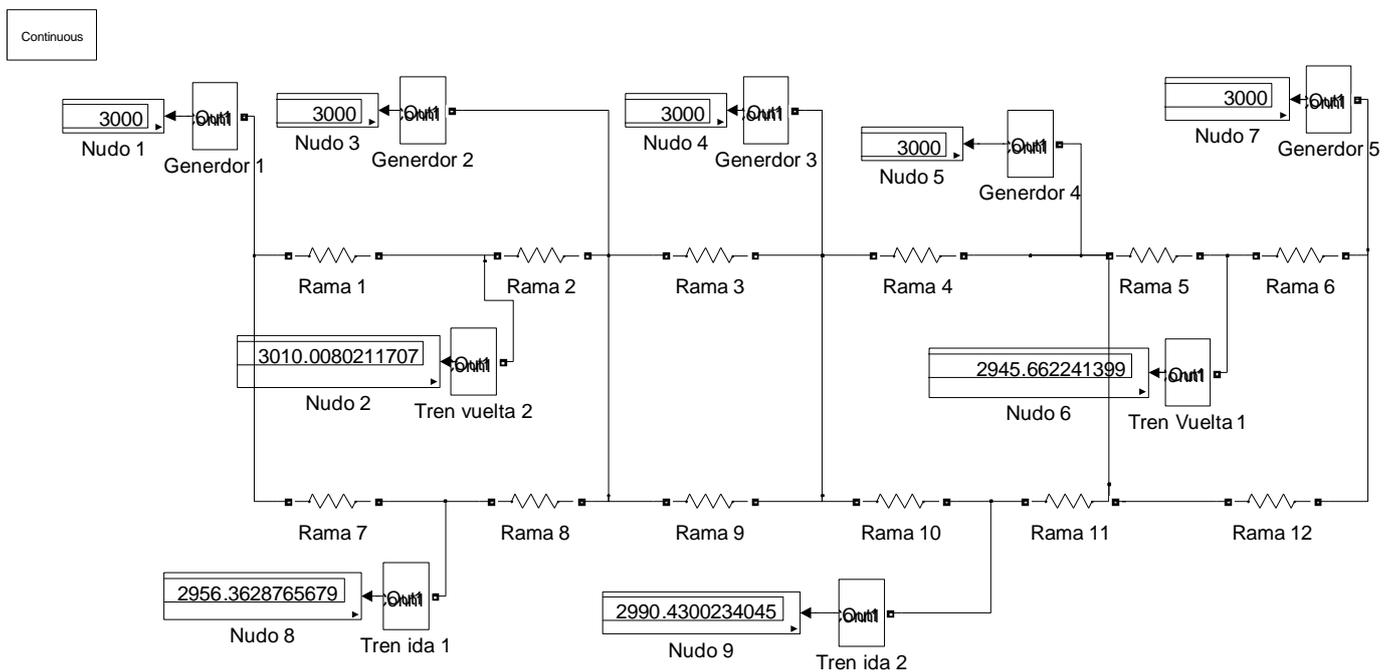


Figura 48. Esquema eléctrico en Simulink

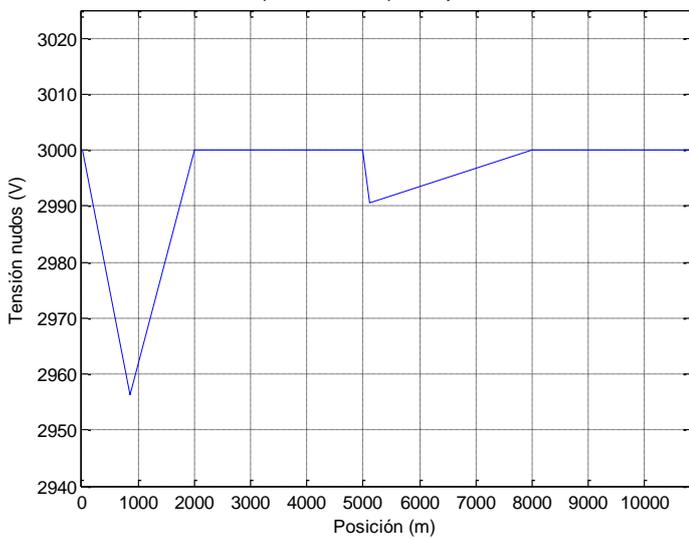


Figura 49. Resultado Simulink catenaria de ida

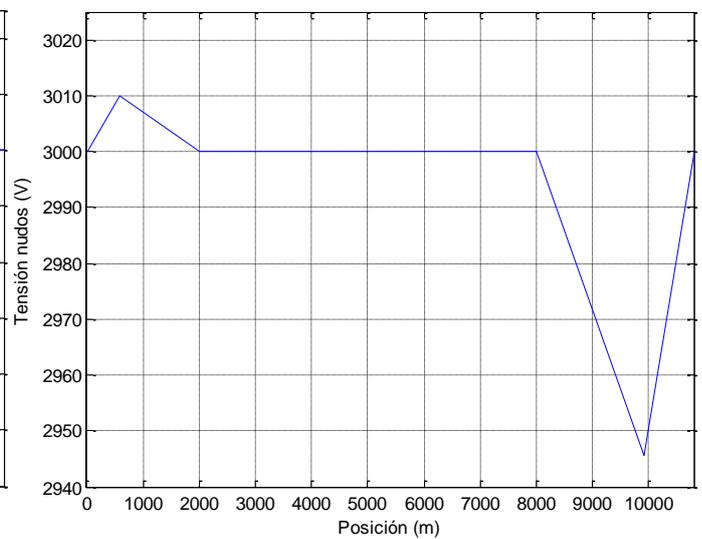


Figura 50. Resultado Simulink catenaria de vuelta

En la tabla 15, se pueden observar los distintos valores de impedancia que poseen las ramas del sistema creado.

Tabla 15. Datos de resistencia de las ramas

Rama	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Resistencia (Ω)	0.0596	0.1404	0.3	0.3	0.1907	0.0893	0.086	0.114	0.3	0.0113	0.2887	0.28

4.4 Comparativa Newton-Raphson y Sequential Linear Power Flow

Una vez comprobado que el sistema implementado para la resolución del flujo de carga es correcto, se realiza un análisis de más situaciones mediante los métodos iterativos para poder sacar conclusiones acerca de la eficacia de cada uno de ellos.

Esta vez no se implementa el sistema en Simulink ya que tras la verificación previa, se considera que los resultados obtenidos son los correctos. Los resultados se recogen en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados del flujo de potencia

Simulación & instante analizado	Sentido	Numero de nudo	Tipo	Posición (m)	Demanda potencia (W)	Generación tensión (V)	Sequential linear power flow (V)	Newton Raphson (V)	
2 T=29340	ida	1	1	0	-	3000	3000	3000	
		2	2	225	2288500,29	-	2984,68	2984,68	
		3	1	2000	-	3000	3000	3000	
		4	2	2500	1300	-	2999,98	2999,98	
		5	1	5000	-	3000	3000	3000	
		6	1	8000	-	3000	3000	3000	
		7	1	10800	-	3000	3000	3000	
	Tiempo de ejecución							0.0452	0.0973
	Número de iteraciones							3	3
	vuelta	1	1	0	-	3000	3000	3000	3000
		2	1	2000	-	3000	3000	3000	3000
		3	1	5000	-	3000	3000	3000	3000
		4	2	5798,97	374944,41	-	2992,65	2992,65	
		5	1	8000	-	3000	3000	3000	3000
6		1	10800	-	3000	3000	3000	3000	
Tiempo de ejecución							0,000589	0.0010	
Número de iteraciones							3	2	
3 T=33000	Ida	1	1	0	-	3000	3000	3000	
		2	2	225	2288500,29	-	2984,68	2984,68	
		3	1	2000	-	3000	3000	3000	
		4	2	3056,29	2631725,25	-	2938,71	2938,71	
		5	1	5000	-	3000	3000	3000	
		6	2	7457,88	-720000		3010,62	3010,62	
		7	1	8000	-	3000	3000	3000	
		8	1	10800	-	3000	3000	3000	
		Tiempo de ejecución							0.0553
	Número de iteraciones							4	3
	Vuelta	1	1	0	-	3000	3000	3000	3000

		2	1	2000	-	3000	3000	3000	
		3	2	4500,62	-227391,58	-	3003,15	3003,15	
		4	1	5000	-	3000	3000	3000	
		5	1	8000	-	3000	3000	3000	
		6	1	10800	-	3000	3000	3000	
		Tiempo de ejecución						0.000634	0.0008987
		Número de iteraciones						3	2
4 T=38070	Ida	1	1	0	-	3000	3000	3000	
		2	1	2000	-	3000	3000	3000	
		3	2	3796,28 983765 450	2631725,25	-	2935,38	2935,382	
		4	1	5000	-	3000	3000	3000	
		5	1	8000	-	3000	3000	3000	
		6	1	10800	-	3000	3000	3000	
		Tiempo de ejecución						0.0497	0.1093
	Número de iteraciones						4	3	
	Vuelta	1	1	0	-	3000	3000	3000	
		2	2	595,79	-720000	-	3010,006	3010,006	
		3	1	2000	-	3000	3000	3000	
		4	1	5000	-	3000	3000	3000	
		5	1	8000	-	3000	3000	3000	
		6	1	10800	1300	3000	3000	3000	
Tiempo de ejecución						6.28e-04	0.0010		
Número de iteraciones						3	2		
5 T=43300	Ida	1	1	0	-	3000	3000	3000	
		2	1	2000	-	3000	3000	3000	
		3	1	5000	-	3000	3000	3000	
		4	1	8000	-	3000	3000	3000	
		5	1	10800	-	3000	3000	3000	
	Tiempo de ejecución						0.0108	0.0072	
	Número de iteraciones						0	0	
	Vuelta	1	1	0	-	3000	3000	3000	

		2	1	2000	-	3000	3000	3000	
		3	2	4479,24	412367,47	-	2994,07	2994,07	
		4	1	5000	-	3000	3000	3000	
		5	1	8000	-	3000	3000	3000	
		6	1	10800	-	3000	3000	3000	
		Tiempo de ejecución						0.0345	0.867
		Número de iteraciones						3	2

Para un sistema como el que se presenta, tras varias simulaciones donde se evalúan algunos de los casos más relevantes que pueden darse durante la simulación, se puede concluir que el método de resolución más eficiente es el Sequential Linear Power Flow.

A pesar de necesitar un mayor número de iteraciones para llegar a una solución precisa, su ejecución es más rápida. Esta diferencia de tiempos se debe a la creación de la matriz Jacobiana en el método de Newton-Raphson. Además el error final con respecto a la última iteración es menor en el caso de Sequential Linear Power Flow.

En ambos casos, los resultados de tensión obtenidos son idénticos e igualmente correctos.

Es por ello, que para un sistema cuyo objetivo final es el análisis de todo un sistema de tráfico discretizado en el tiempo, lo cual conlleva el análisis de un número de casos y sistemas eléctricos elevado, el parámetro que indica el método resolutivo más adecuado es el tiempo de ejecución.

Capítulo 5

Modelado y simulación del sistema ferroviario

5.1 Esquema del sistema ferroviario

El sistema de tráfico y el sistema eléctrico están íntimamente relacionados. Cada situación temporal que se analiza en el sistema de tráfico genera un sistema eléctrico particular. De esta forma el sistema eléctrico va variando a lo largo del tiempo a medida que avanzan los diferentes trenes en ambos sentidos, otros finalizan su trayecto y otros lo comienzan.

De esta forma puede distinguirse entre dos tipos de sistemas dentro de la instalación:

-Sistema eléctrico fijo:

Consta de todo aquello que no cambia a lo largo del tiempo en el sistema eléctrico equivalente. Se determina el número, posición y voltaje de los generadores.

-Sistema eléctrico variable:

Engloba a todos los elementos que cambian de valor y cantidad a lo largo de la simulación. Se trata de las cargas, las ramas y los nudos. Es necesario que en cada análisis, estos valores se actualicen y conformen un nuevo sistema eléctrico equivalente a la situación que ofrece el sistema de tráfico para el instante de tiempo seleccionado.

La posición de los generadores en el sistema es fija, mientras que las cargas toman posiciones variables, alterando el número y la posición de los nudos, así como el valor de las impedancias de las distintas ramas que se forman en cada situación. Es por ello que es necesario conocer la posición y la demanda de potencia de los trenes que haya en circulación en los instantes de tiempo que se quieran analizar.

Para representar el sistema eléctrico 1x3000 Vcc, se asignan a los generadores unos valores fijos de 3000 V, y se hace uso de dos catenarias, una correspondiente a los trenes de ida, y otra para los trenes de vuelta, como puede observarse en la figura 51.

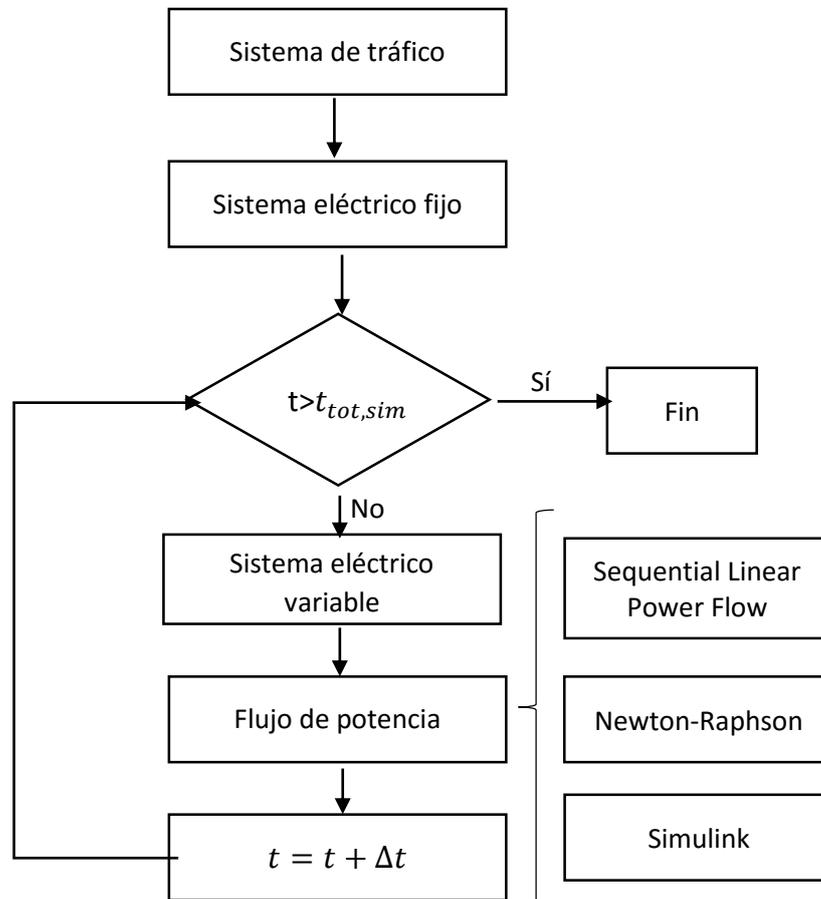


Figura 51. Flujograma del sistema eléctrico

El sistema está creado de tal forma que se realice un análisis de potencia a lo largo de todo el periodo de circulación de trenes para poder obtener una imagen de la evolución de las tensiones en los distintos puntos kilométricos a lo largo del tiempo, y sacar así conclusiones sobre el sistema dinámico de tráfico.

El conocimiento de la localización de las subestaciones y su tensión de alimentación permiten identificar los primeros nudos en el sistema eléctrico y generar las primeras ramas.

Las estaciones de pasajeros junto con las características mecánicas del tren y las características de la vía, tanto pendiente como limitaciones con respecto a la velocidad y la aceleración, hace que se generen unas curvas de posición y potencia determinadas.

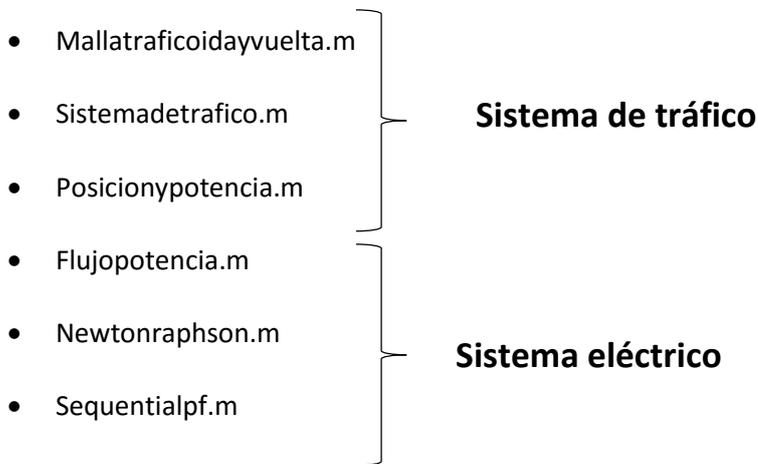
Los horarios de ida y de vuelta de los trenes, permiten saber la localización exacta de cada tren, su consumo de potencia en cada instante y la catenaria de la que se alimentan, lo cual genera en el sistema eléctrico nuevas ramas y nudos donde se demandará potencia, diferenciando si el consumo se realiza en una u otra de las catenarias, y aplicando así los cambios a la línea de alimentación correspondiente.

Considerando además, que los trenes están permanentemente conectados a tierra, el sistema eléctrico quedaría completo y cerrado, listo para su análisis de potencia.

De esta forma, cada situación de tráfico genera un sistema eléctrico particular, que varía en función del número de trenes en circulación, su posición y su consumo, mientras el resto de elementos se mantiene constante.

El programa implementado parte unos datos mecánicos y físicos para obtener una equivalencia eléctrica de una situación determinada y posteriormente resolver el flujo de potencia que se plantea.

Para ello, se encuentra dividido en varias partes independientes que se cargan de realizar funciones concretas, donde el archivo *mallatraficoidayvuelta.m* es el programa principal que se encarga de llamar al resto de funciones y recopilar los datos:



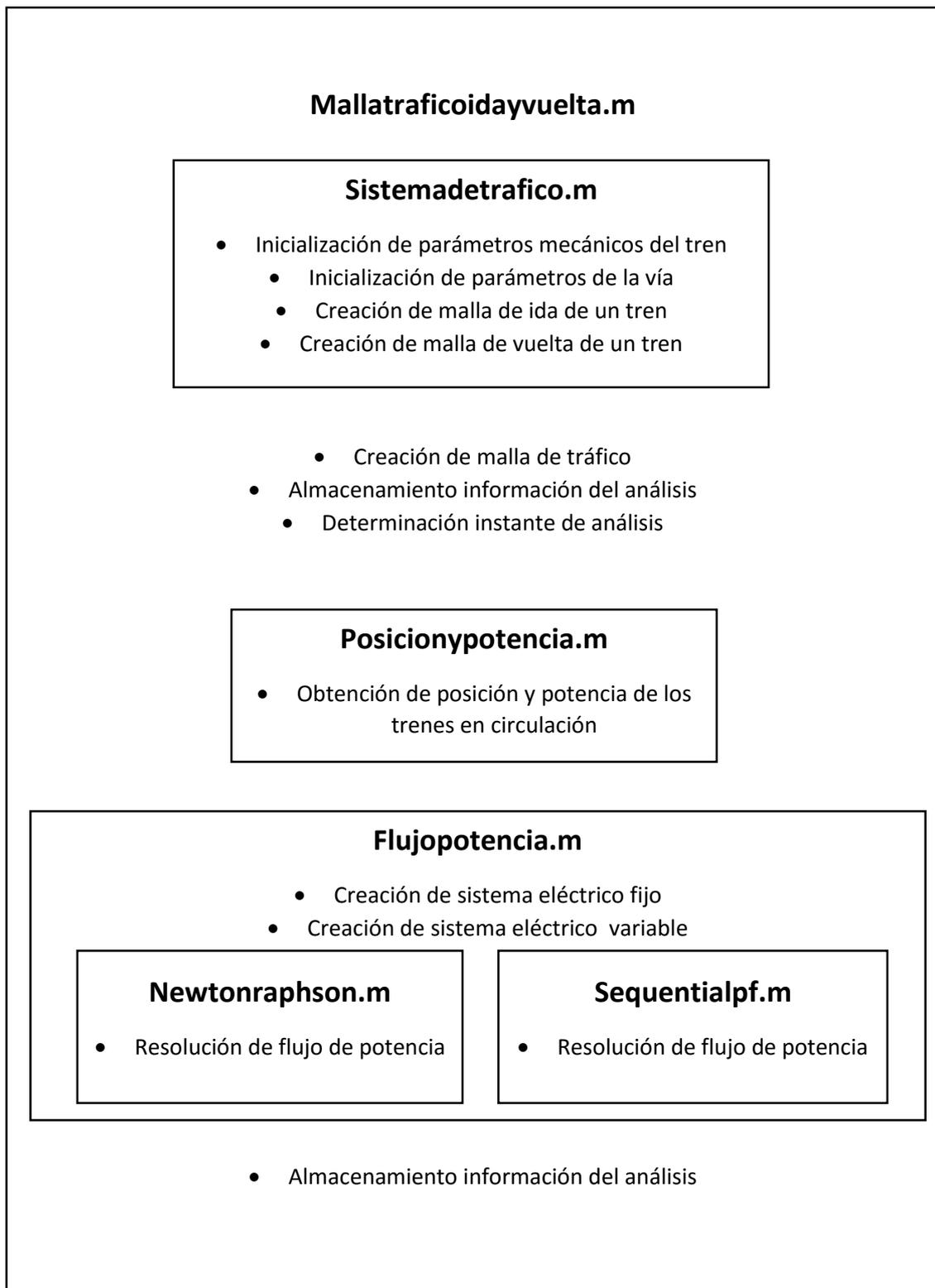


Figura 52. Diagrama descriptivo del programa implementado

5.2 Resultados

El objetivo es realizar un análisis del flujo de cargas del sistema de tráfico completo, desde el comienzo del primer tren hasta el final del último, con un paso de discretización temporal suficientemente corto de tal forma que se obtengan unos resultados precisos.

Este análisis se realiza para el tráfico descrito en el capítulo 3 y la posición de las subestaciones mencionadas en el capítulo 4, de tal forma que los resultados obtenidos en los apartados anteriores de este proyecto se vean recogidos también en el resultado final del análisis completo.

El sistema de tráfico es analizado cada 100 segundos, lo que supone un total de 147 situaciones, donde el número de nudos del sistema varía entre 5 y 8 dependiendo del tráfico que haya en ese momento.

Como resultado del análisis se obtienen unos valores de tensión asignados a posiciones correspondientes a un tiempo determinado. La sucesión de tiempos ofrece la posibilidad de seguir la evolución de la tensión de los distintos puntos de la catenaria a medida que pasa el tiempo y el tráfico va evolucionando.

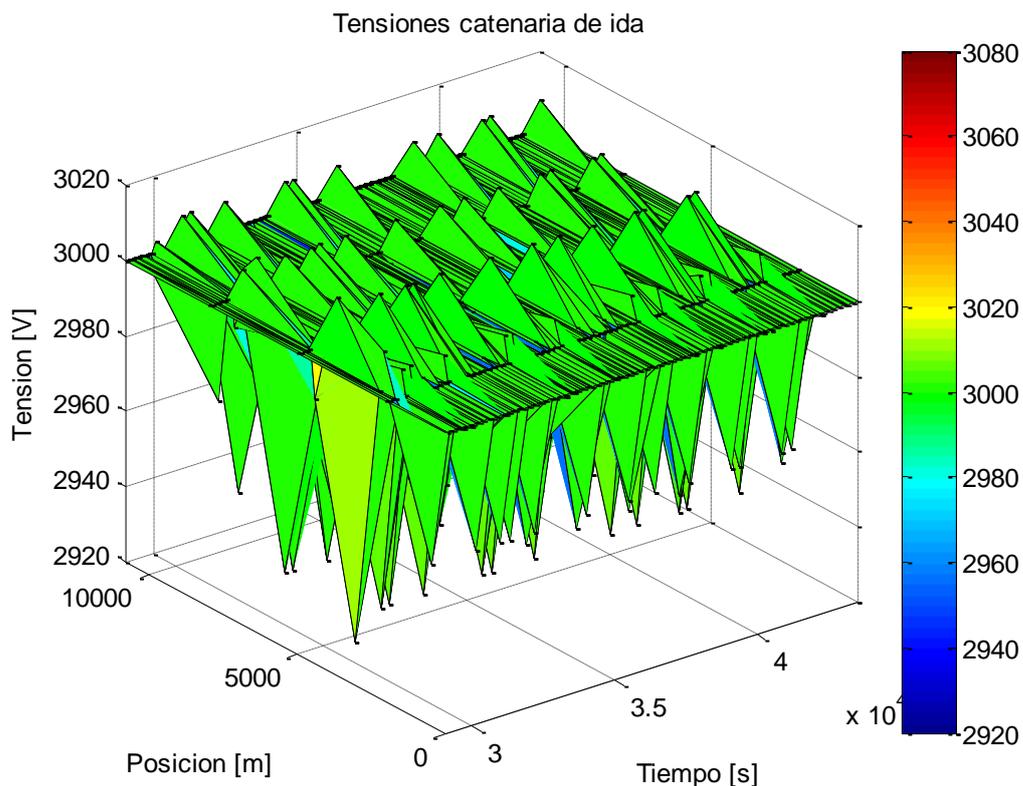


Figura 53. Distribución de tensiones a lo largo del espacio y el tiempo catenaria de ida

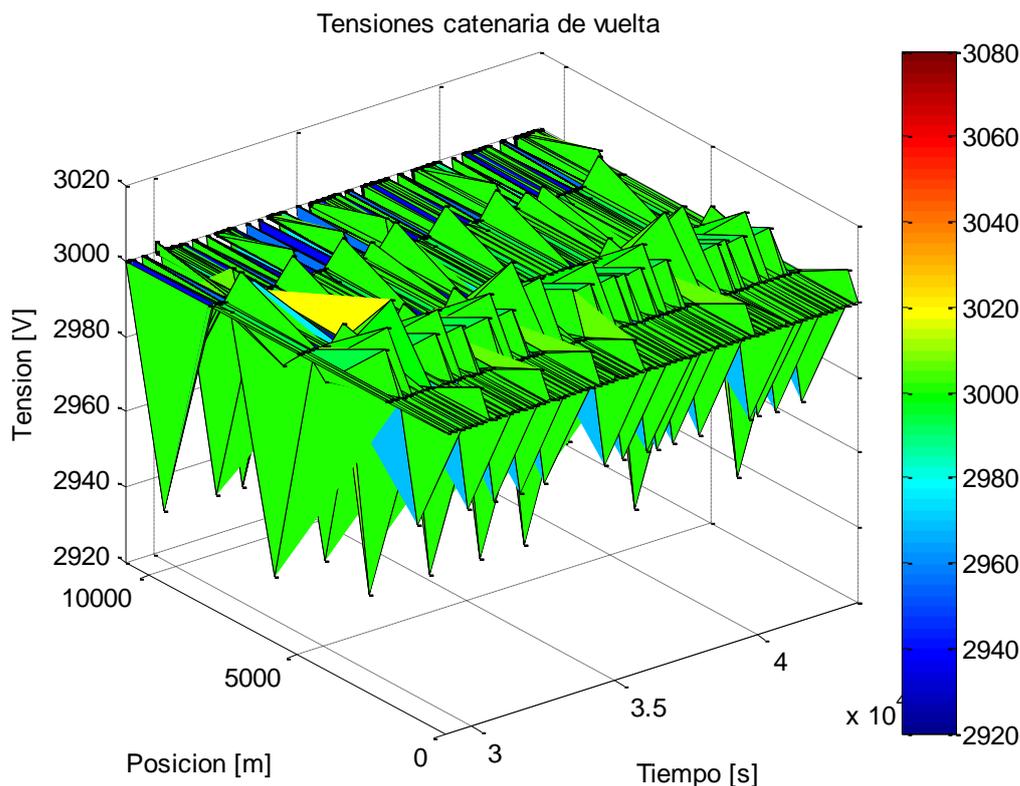


Figura 54. Distribución de tensiones a lo largo del espacio y el tiempo catenaria de vuelta

Para la situación de tráfico planteada, y la localización de cinco subestaciones repartidas de manera uniforme a lo largo de la línea, se observa como el valor máximo de tensión para una potencia de regeneración máxima permitida de 0.72MW para la catenaria de ida es de 3017.68 V y para la de vuelta es de 3017.66 v, mientras que los valores mínimos alcanzados son: 2928.15 V cuando los trenes tienen un sentido de ida, y 2932.73 V cuando su sentido es el contrario.

De acuerdo con la normativa de ferrocarriles EN 50163:2004 “Railway Applications-Supply voltages of traction system”, las tensiones permitidas para los diferentes sistemas de tracción eléctrica son mostradas en la tabla 17.

Tabla 17. Tensiones nominales y sus límites permitido y duración [18]

Sistema de electrificación	Mínimo voltaje no permanente U_{min2} (V)	Mínimo voltaje permanente U_{min1} (V)	Voltaje nominal U_n (V)	Máximo voltaje permanente U_{max1} (V)	Máximo voltaje no permanente U_{max2} (V)
D.C (valor medio)	400	400	600	720	800
	500	500	750	900	1000
	1000	100	1500	1800	1950
	2000	2000	3000	3600	3900

Los siguientes requerimientos deben ser cumplimentados [18]:

- La duración de los voltajes entre U_{min1} y U_{min2} no debe exceder 2 minutos.
- La duración de los voltajes entre U_{max1} y U_{max2} no debe exceder 5 minutos.
- La tensión del nudo donde se sitúe una subestación tractiva de corriente continua, en condición de cargas nulas, debe ser menor o igual que U_{max2} , y además la tensión del pantógrafo de los trenes circulantes cuando los haya debe seguir cumpliendo los requerimientos de la tabla superior.
- Bajo condiciones normales de operación, las tensiones de línea deben encontrarse en el intervalo $U_{min1} < U < U_{max2}$

Es por ello, que para el caso estudiado los valores de tensión máxima y mínima y sus duraciones satisfacen las condiciones exigidas por la norma. La instalación de cinco subestaciones en las posiciones elegidas es una configuración apta para el uso.

Este programa permite conocer las demandas de potencia y el estado tensional que en la línea genera, lo cual permite hacer una primera aproximación del número de subestaciones que son necesarias para cumplir los requisitos marcados por la norma. Así como la potencia que absorbe cada subestación a lo largo de la simulación.

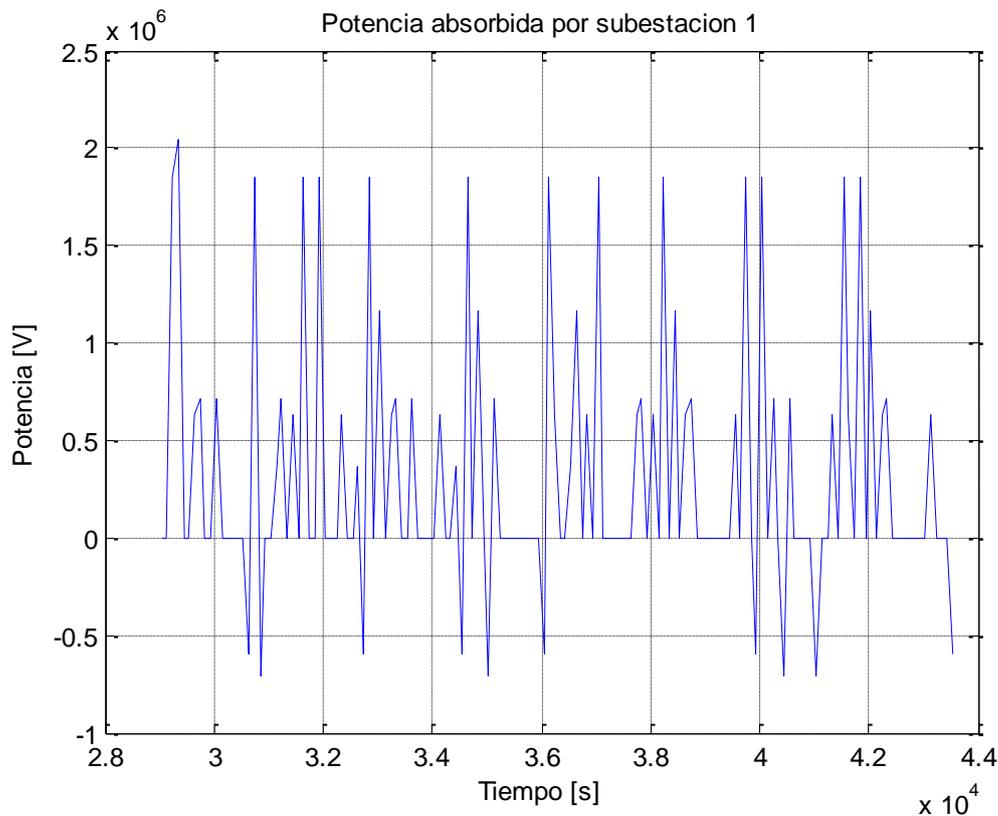


Figura 55. Potencia absorbida SE-1

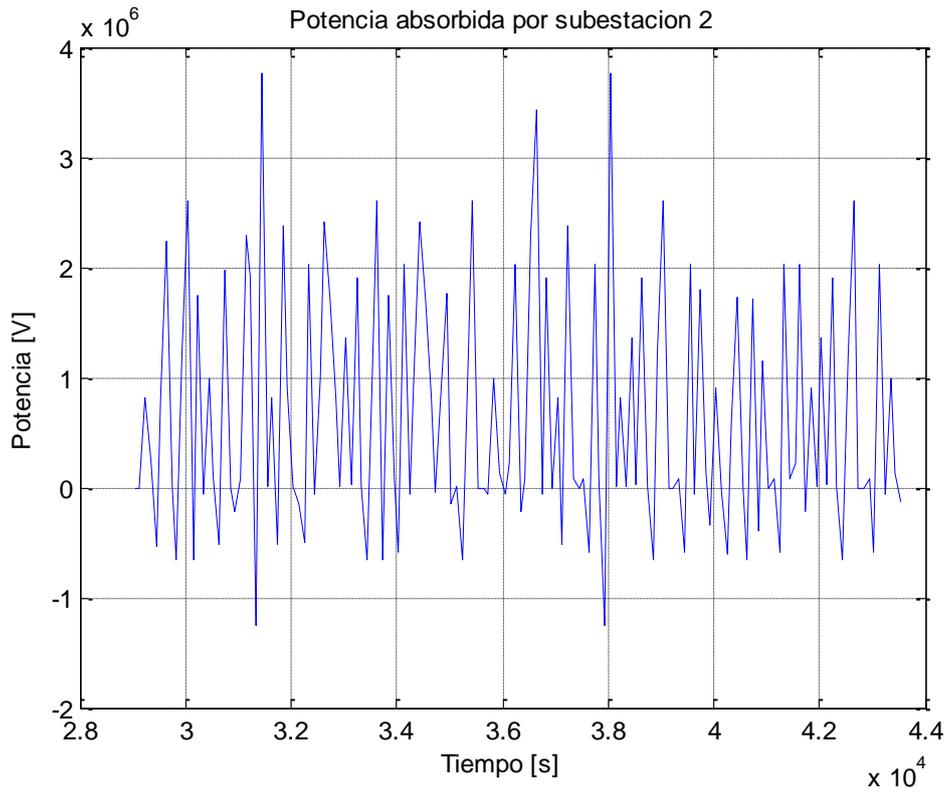


Figura 56. Potencia absorbida SE-2

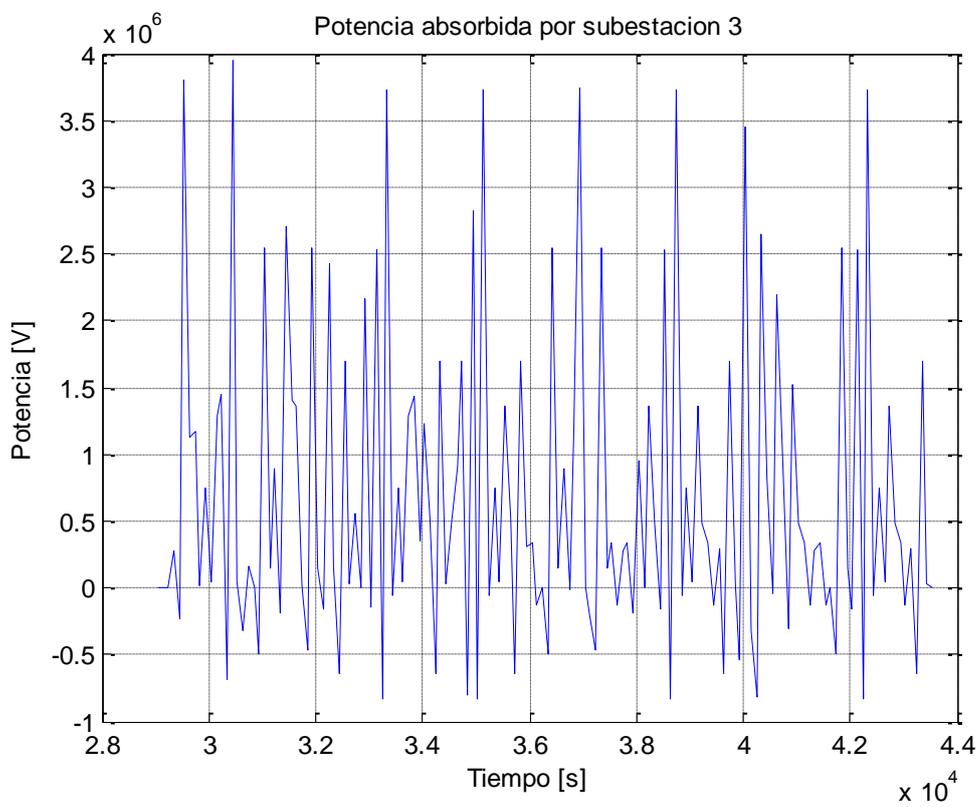


Figura 57. Potencia absorbida SE-3

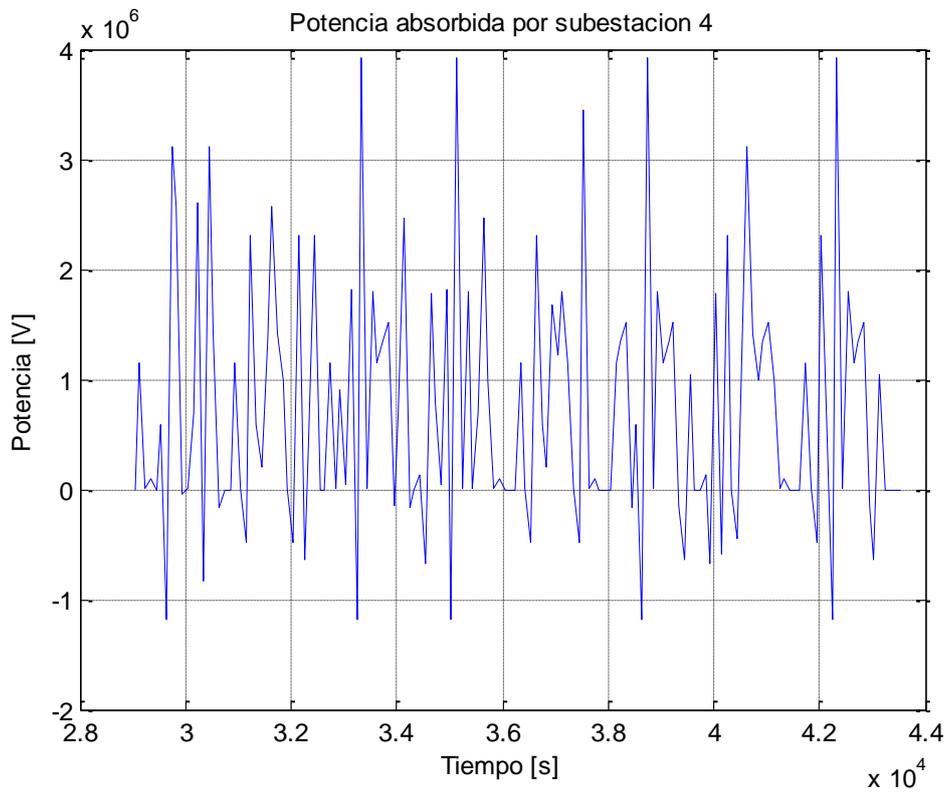


Figura 58. Potencia absorbida SE-4

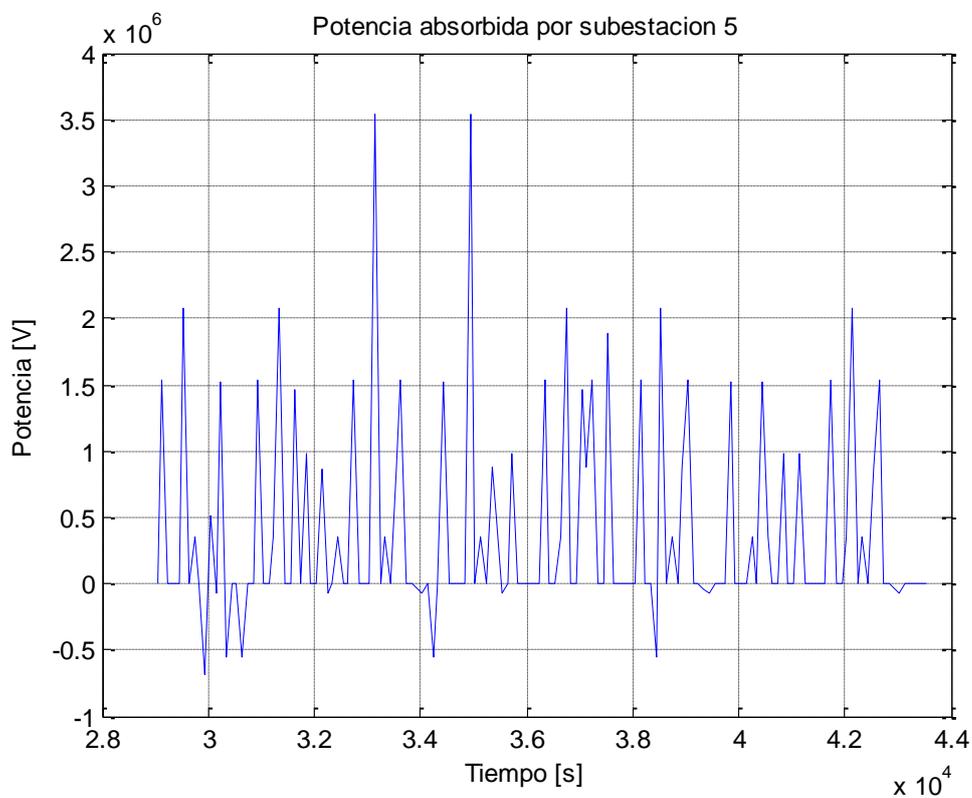


Figura 58. Potencia absorbida SE-5

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

Una vez concluido el proyecto es importante resumir las ideas y los resultados más destacables que se han podido extraer del estudio.

El objetivo principal del trabajo era construir una herramienta de simulación de un sistema de tracción eléctrica ferroviaria en DC. La primera conclusión que puede sacarse de acuerdo a los resultados arrojados es que el modelo desarrollado permite determinar de forma precisa y coherente su funcionamiento. Por medio de esta herramienta es posible modelar un sistema ferroviario complejo de forma sencilla si de él se toman las características principales, ignorando el funcionamiento de los elementos al detalle.

El primer objetivo parcial que se debía completar en el trabajo era modelar y simular un sistema de tráfico. La conclusión extraída de este apartado reside en la importancia que posee la elección del paso de discretización. De él depende la precisión del modelo, y debido a la generalidad del modelo, es necesario dar un valor suficientemente pequeño para que el resultado obtenido sea en ese aspecto lo más preciso posible acorde a los datos introducidos. La segunda conclusión obtenida es la posibilidad de gestión del tráfico que permite esta herramienta. Si se pretende diseñar un modelo de tráfico, usando este simulador se puede conocer la hora a la que llegan los trenes a las estaciones lo que permite realizar una planificación y previsión de horarios.

El segundo objetivo parcial, determinar las demandas y las posiciones de los trenes en un instante de tiempo, reafirma la conclusión sacada en el punto anterior sobre la importancia del paso de discretización para la obtención de resultados precisos. Ya que en este caso, los datos obtenidos nos proporcionarán precisión a la hora de cumplir el tercer objetivo parcial, obtener el circuito equivalente.

El cuarto objetivo era realizar el análisis de flujo de cargas al sistema ferroviario completo. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede decir que el modelo propuesto es válido para reproducir las tensiones de las catenarias a lo largo del tiempo, con un tráfico dinámico. Esto permite determinar qué puntos kilométricos de la línea son los más críticos, si se sobrepasan los

valores de tensión marcados por la norma, y permite tomar decisiones sobre la localización de las subestaciones.

Finalmente, respecto los métodos implementados para la resolución del flujo de cargas, evaluando los resultados obtenidos y el tiempo de ejecución de cada uno de ellos se puede determinar que el método más eficaz es el Sequential Lineal Power Flow.

En el método convencional Newton-Raphson, el problema de formulación crea complicaciones debido a la necesidad de calcular derivadas en la matriz Jacobiana, lo que supone que el tiempo de simulación del sea mayor. Por otro lado, el método Sequential Lielar Power Flow, usa fórmulas no lineales sobre el desajuste de corrientes en lugar de las comúnmente usadas fórmulas sobre el desajuste de potencia para simplificar en general la complejidad de las ecuaciones.

6.2 Trabajos futuros

El campo del modelado y simulación ferroviario presenta un abanico enorme de posibilidades. En cuanto a lo referente a este proyecto, existen una serie de cuestiones que no han sido fruto de estudio y que podrían tratarse con más detenimiento para un futuro análisis más exhaustivo del sistema:

- Mejorar el dimensionamientos: Incluir en la representación del perfil orográfico curvas y peraltes, incluir la vía como un elemento más del sistema eléctrico, así como modelar de forma exacta las subestaciones y contemplar la existencia de cantones.
- Optimizar la localización de las subestaciones: A partir de los datos de corriente de las ramas es posible determinar las pérdidas producidas por efecto Joule en sistema, de tal forma que variando las posiciones de las subestaciones se puede minimizar este efecto, cuidando que el nivel de tensión de las catenarias es aceptado por la norma.
- Implementar situaciones de contingencias ante fallos de las subestaciones.

Bibliografía

[1] Hill RJ (1994) Electric railway traction—Part 3 traction power supplies. Power Eng J 8:275-286. Doi:10.1049/pe:19940604

[2] Thomas RS, Pham KD (1999) Traction power supply for Tri-Met Portland Westside and Hillsboro light rail extensions. SME/IEEE Jt Railr Conf. doi:101109/RRCON.1999.762402

[3] Brun, D., Lancien D., Raoul, M. La puissance et la commande du TGV. Un Systeme intégré électrotechnique/électronique. Revue Générale de l'Électricité N° 11/94, 1994.

[4] GIF, Gestor de Infraestructuras Ferroviarias. Martínez Acevedo, J. La Electrificación Ferroviaria. 2002.

[5] Características de un sistema eléctrico de transporte masivo con tranvías, 2011 [consulta 5-05-2016]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262011000100006.

[6] Electrónica de potencia, 2013 [consulta 6-05-2016]. Disponible en: <http://es.slideshare.net/gersonchavarriavera/electronica-de-potencia-29602123>.

[7] Aparamenta [consulta 15-05-2016]. Disponible en: <http://perso.wanadoo.es/hormilec/curso/aparamenta.htm>.

[8] D. D. E. Protecciones, P. El, and S. Ferroviario, "Equipos tecnológicos."

[9] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method," 2015.

[10] Plano de cercanías Madrid [22-04-2016]. Disponible en: <http://www.renfe.com/viajeros/cercanias/planos/madrid.html>.

[11] M. Siemens, "MATERIAL MOTOR RENFE Unidades y detalles técnicos," 2005.

[12] Modelos de catenaria de Adif [25-05-2016]. Diponible en: http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml

[13] RENFE, "Automotor eléctrico S-447."

- [14] A. Garc and P. Mart, "Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción." Monografias ElecRail, pp. 1–58, 2012.
- [15] A. G. Álvarez, "Explotación técnica y económica de ferrocarriles-Dinámica de los trenes en alta velocidad," 2006.
- [16] Trenes Renfe ALARIS Madrid [1-06-2016]. Disponible en: <http://www.viajar.com/ofertas-trenes/alaris-madrid-puerta-de-atocha-valencia-nord.html>.
- [17] MathWorks Simulink [1-06-2016]. Disponible en: <http://es.mathworks.com/products/simulink/>.
- [18] VDE, *Railway applications - Supply voltages of traction systems, German version EN 50163:1995*, vol. 3. 1995.
- [19] UNE 25087-1974: "Terminología del material rodante ferroviario"
- [20] P Luque, D. Álvarez, and F.J. Suárez. "Introducción a las tecnologías del transporte".2004

Anexo

Horario de los trenes extraído de la página web de RENFE.

Origen : Chamartin

Destino : Mendez Alvaro

Día de viaje: : 05-05-2016 Hora Salida entre las: 08.00 y las: 11.59

Línea	Hora Salida	Hora Llegada	Tiempo de Viaje
C10	08.04	08.22	0.18
C1	08.11	08.28	0.17
C10	08.20	08.37	0.17
C7	08.23	09.15	0.52
C10	08.34	08.51	0.17
C1	08.41	08.58	0.17
C10	08.49	09.06	0.17
C7	08.55	09.45	0.50
C10	09.04	09.21	0.17
C1	09.11	09.28	0.17
C10	09.19	09.36	0.17
C7	09.25	10.16	0.51
C10	09.33	09.50	0.17
C1	09.41	09.58	0.17
C10	09.50	10.07	0.17
C7	09.54	10.45	0.51
C10	10.04	10.21	0.17
C1	10.11	10.28	0.17
C10	10.19	10.36	0.17
C7	10.24	11.15	0.51
C10	10.34	10.51	0.17
C1	10.41	10.58	0.17
C10	10.49	11.06	0.17
C7	10.55	11.45	0.50
C10	11.03	11.20	0.17
C1	11.13	11.28	0.15
C10	11.19	11.36	0.17
C7	11.24	12.15	0.51
C10	11.34	11.51	0.17
C1	11.41	11.58	0.17
C10	11.49	12.06	0.17
C7	11.55	12.45	0.50

Origen : Mendez Alvaro

Destino : Chamartin

Día de viaje: : 05-05-2016 Hora Salida entre las: 08.00 y las: 11.59

Línea	Hora Salida	Hora Llegada	Tiempo de Viaje
C1	08.06	08.24	0.18
C10	08.08	08.58	0.50
C10	08.15	08.33	0.18
C10	08.20	08.38	0.18
C10	08.31	08.50	0.19
C10	08.37	09.28	0.51
C1	08.40	08.59	0.19
C10	08.46	09.04	0.18
C10	08.51	09.10	0.19
C10	09.02	09.21	0.19
C10	09.06	09.58	0.52
C1	09.09	09.27	0.18
C10	09.15	09.33	0.18
C10	09.20	09.39	0.19
C10	09.32	09.50	0.18
C10	09.36	10.26	0.50
C1	09.39	09.57	0.18
C10	09.45	10.03	0.18
C10	10.01	10.19	0.18
C10	10.07	10.57	0.50
C1	10.09	10.28	0.19
C10	10.16	10.34	0.18
C10	10.30	10.48	0.18
C10	10.36	11.27	0.51
C1	10.39	10.58	0.19
C10	10.45	11.03	0.18
C10	11.01	11.20	0.19
C10	11.06	11.57	0.51
C1	11.10	11.29	0.19
C10	11.15	11.33	0.18
C10	11.31	11.49	0.18
C10	11.36	12.27	0.51
C1	11.39	11.58	0.19
C10	11.45	12.03	0.18