



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN TRENES
MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE CURVAS DE VELOCIDAD

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

ÁLVARO PATRICIO GUZMÁN MARDONES

PROFESOR GUÍA
JORGE AMAYA ARRIAGADA

MIEMBROS COMISIÓN
AUGUSTO LUCERO ALDAY
MARCOS ORCHARD CONCHA
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA

SANTIAGO DE CHILE
ENERO 2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: ÁLVARO PATRICIO GUZMÁN MARDONES
FECHA: ENERO 2015
PROFESOR GUÍA: JORGE AMAYA ARRIAGADA

EFICIENCIA ENERGÉTICA EN TRENES MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE CURVAS DE VELOCIDAD

En el marco del proyecto OSIRIS (Optimal strategy to innovate and reduce energy consumption in urban rail systems) se desarrolló una herramienta computacional que permite, entre otras cosas, calcular una curva de velocidad óptima para la operación de un tren la cual minimice la energía de tracción, la potencia máxima, el trabajo total o cualquier otro objetivo operacional que sea factible de expresar mediante un modelo matemático, cumpliendo las restricciones operacionales tales como los tiempos de viajes y las velocidades máximas interestación.

El cálculo de dicha curva fue realizado de tres maneras distintas. El primer algoritmo fue programado en MATLAB e implementado en el software del proyecto OSIRIS. Este modelo heurístico propone una estrategia de conducción mediante cuatro fases: Tracción, mantención de velocidad, marcha inercial y frenado. El segundo modelo fue escrito en C++, para verificar ciertas simplificaciones del primer algoritmo. En las que se probó, dada cierta cantidad de metros, las decisiones que un conductor debe tomar.

Por otro lado, el tercer modelo matemático está basado en la teoría del control óptimo. Para esto fue necesario usar el software de código abierto BOCOP para resolver las ecuaciones diferenciales del problema. En este modelo, las variables de control son el porcentaje del esfuerzo máximo de tracción y de frenado del tren.

Los modelos fueron comparados mediante dos casos: Uno y dos límites de velocidad interestación. De las simulaciones se pudieron apreciar los tiempos de computo, la precisión y la aplicabilidad práctica.

Para validar el primer modelo heurístico, se estudió la operación de un día del Metro de Valparaíso con la curva óptima y un perfil que minimiza los tiempos de viaje (curva rápida). De este modo se pudo analizar el potencial de ahorro energético de dicho sistema ferroviario comparando su operación con ambos perfiles, el cual se estimó un 25 % de reducción en la energía consumida en tracción.

Finalmente se analizó la operación del sistema desde el punto de vista eléctrico, calculando la potencia instantánea requerida en tracción de las subestaciones de rectificación y el perfil de tensiones mínimas en la vía. Se pudo concluir que la curva óptima aliviana las exigencias de la infraestructura eléctrica del sistema.

Actualmente modelo heurístico está incorporado a la herramienta OSIRIS, funcionando correctamente y validado por los integrantes del proyecto. Nuevas versiones y mejoras se harán a partir de las experiencias y retroalimentaciones de los usuarios del programa.

Pareciera que fue ayer cuando entré como mechón a la facultad...

Agradecimientos

A lo largo de todos mis estudios fui apoyado por mi familia, mis padres gracias a su trabajo me permitieron permanecer sin preocupaciones en la universidad. Por otro lado, mis hermanos siempre estuvieron para darme algún empujón cuando la tarea se hacía difícil. Sobre esto, mis amigos fueron también parte fundamental de esto, en alguna junta, fiesta o en la misma universidad, dando bromas y risas que permiten abstraerse del ritmo del estudio de la ingeniería. No está demás recalcar la ayuda en los cursos tediosos que me brindaron.

Naturalmente mi amada compañera hizo mas llevadera este proceso de finalización de mi carrera. Si bien no estudió lo mismo que yo (lo cual agradezco) para ayudarme con el tema, fue notable su capacidad de quitarle peso a mis preocupaciones, relajarme y volver a seguir trabajando tranquilamente. Gracias a ese estado mental pude vislumbrar las soluciones de los problemas.

Con respecto al trabajo de memoria, agradezco la oportunidad que se me fue dada en el Centro de Modelamiento Matemático. El equipo compuesto por mi profesor guía y los ingenieros me ayudaron a llevar a cabo la tarea, sobre todo en temas de programación. Sobre esto último fue importante el apoyo de la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02) la cual redujo el tiempo de realización de mi memoria.

La oportunidad de estar en el extranjero me sirvió para definir una propuesta de un tema, gracias a la información que fue proporcionada por los ingenieros que conocí. Los profesores de mi comisión me ayudaron a concretarla. Posteriormente tuvieron la paciencia de responder todos los correos, preguntas e inquietudes técnicas que surgieron.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas y circunstancias de la vida que me dieron la sabiduría de lograr las metas universitarias que me propuse. Probablemente sin ellas no hubiera llegado a escribir esta página.

Tabla de contenido

Resumen	I
Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivos generales	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcances	2
1.4. Estructura de la memoria	3
2. Antecedentes	4
2.1. Proyecto OSIRIS	4
2.2. Proyectos de ahorro de energía en Alemania	5
2.3. Metro de Valparaíso	8
2.4. Dinámica del tren	9
2.4.1. Resistencia al rodado	9
2.4.2. Fuerza en gradiente	10
2.4.3. Fuerza en curva	11
2.4.4. Esfuerzo de tracción	11
2.4.5. Límite de adherencia	12
2.4.6. Influencia de las masas rotatorias	13
2.5. Ecuaciones de movimiento	14
2.5.1. Modelo discreto	14
2.5.1.1. Incremento de tiempo	14
2.5.1.2. Incremento de distancia	15
2.5.1.3. Incremento de velocidad	16
2.6. Fases de la marcha de un tren	16
2.6.1. Aceleración	17
2.6.2. Velocidad crucero	17
2.6.3. Marcha inercial	17
2.6.4. Frenado	18
2.7. Maneras, estrategias y tácticas de conducción	18
2.7.1. Conducción operativa	18
2.7.2. Conducción eficiente	18

2.8.	Modelo de eficiencia energética analítico	19
2.8.1.	Minimización del consumo de la energía mecánica	19
2.8.2.	Operación óptima	20
2.8.3.	Calculo de la estrategia óptima de conducción	20
2.9.	Modelo de eficiencia energética heurístico	22
3.	Diseño e implementación	24
3.1.	Algoritmo heurístico	24
3.1.1.	Procesamiento de datos	24
3.1.2.	Curva rápida	25
3.1.3.	Optimización heurística	26
3.2.	Algoritmo heurístico 2	30
3.3.	Modelo analítico	32
3.4.	Modelación eléctrica	34
3.4.1.	Subestaciones	34
3.4.2.	Catenarias	34
3.4.3.	Trenes	34
3.4.4.	Modelo de operación	35
3.4.4.1.	Perfil de tensiones mínimas	36
3.4.4.2.	Potencias instantáneas de cada subestación	36
4.	Resultados	37
4.1.	Algoritmo heurístico	37
4.1.1.	Caso Merval	37
4.1.2.	Casos para comparación	45
4.2.	Algoritmo heurístico 2	48
4.3.	Modelo analítico	50
4.4.	Comparación entre modelos	54
4.5.	Modelo eléctrico	56
5.	Conclusiones	59
5.1.	Algoritmo heurístico	59
5.2.	Algoritmo heurístico 2	59
5.3.	Modelo analítico	60
5.4.	Comparación entre modelos	60
5.5.	Modelo eléctrico	61
5.6.	Trabajos futuros	62
	Bibliografía	64
A.	Metro de Valparaíso	65
A.1.	Características trenes	65
A.2.	Límites de velocidad	66
A.3.	Topografía vía	67
A.3.1.	Gradientes y pendientes	67
A.3.2.	Curvas	68
A.4.	Carga de pasajeros	69
A.5.	Parámetros eléctricos	69

Índice de tablas

2.1.	Ahorros de energía estimados por <i>Deutsche Bahn</i>	6
2.2.	Coefficientes fórmula de Davis.	10
2.3.	Valores de K en sistemas ferroviarios.	11
2.4.	Coefficientes de adhesión.	13
2.5.	Coefficientes para fórmulas de adhesión.	13
2.6.	Factor de las masas rotatorias.	14
2.7.	Desaceleraciones de frenado para trenes.	18
2.8.	Valores de la variable de control en regímenes de marcha.	22
4.1.	Parámetros simulación Merval.	37
4.2.	Energías consumidas por cada perfil.	44
4.3.	Parámetros caso 1: Un límite de velocidad.	45
4.4.	Parámetros caso 2: Dos límites de velocidad.	45
4.5.	Resultados caso 1, algoritmo heurístico.	46
4.6.	Resultados caso 2, algoritmo heurístico.	47
4.7.	Resultados caso 1, algoritmo heurístico 2.	48
4.8.	Resultados caso 2, algoritmo heurístico 2.	49
4.9.	Resultados caso 1, modelo analítico.	50
4.10.	Resultados caso 2, modelo analítico.	52
4.11.	Comparación entre algoritmos, caso 1.	54
4.12.	Comparación entre algoritmos, caso 2.	55
4.13.	Parámetros para simulación eléctrica.	56
4.14.	Número de trenes en la vía.	57
5.1.	Comparación entre modelos.	60

Índice de figuras

2.1. Participantes proyecto OSIRIS.	4
2.2. Deutsche Bahn.	5
2.3. Afiche ES: Conducción consciente, ahorro de energía.	6
2.4. BVG y Energieoptimiertes Leit und Störfallmanagement.	8
2.5. Metro de Valparaíso.	9
2.6. Fuerza en gradiente.	10
2.7. Esfuerzo de tracción versus velocidad.	12
2.8. Fases de la marcha de un tren.	17
2.9. Estrategia de marcha eficiente.	22
3.1. Etapas de cálculo de la curva rápida.	26
3.2. Primera etapa algoritmo heurístico.	29
3.3. Segunda etapa algoritmo heurístico.	29
3.4. Algoritmo heurístico 2.	31
3.5. Equivalente de Norton para las subestaciones.	34
3.6. Red en corriente continua para análisis nodal.	35
4.1. Resultados Puerto-Limache 8:00.	39
4.2. Resultados Limache-Puerto 8:00.	40
4.3. Resultados interestación Puerto-Limache 8:00 AM.	41
4.4. Resultados interestación viaje Limache-Puerto 8:00 AM.	41
4.5. Consumo total de energía con perfil rápido.	42
4.6. Consumo en trenes con perfil rápido.	43
4.7. Consumo total de energía con perfil óptimo.	43
4.8. Consumo en trenes con perfil óptimo.	44
4.9. Resultados caso 1, algoritmo heurístico.	46
4.10. Resultados caso 2, algoritmo heurístico.	47
4.11. Resultados caso 1, algoritmo heurístico 2.	48
4.12. Resultados caso 2, algoritmo heurístico 2.	49
4.13. Resultados caso 1, modelo analítico.	50
4.14. Variables de estado y control caso 1, modelo analítico.	51
4.15. Resultados caso 2, modelo analítico.	52
4.16. Variables de estado y control caso 2, modelo analítico.	53
4.17. Comparación entre modelos, caso 1.	54
4.18. Comparación entre modelos, caso 2.	55
4.19. Perfil mínimo de tensiones en la vía.	56
4.20. Potencia requerida en tracción por cada SER.	58

A.1. Parámetros trenes Merval.	65
A.2. Curvas esfuerzo-velocidad trenes Merval.	65
A.3. Límites de velocidad.	66
A.4. Gradientes y pendientes vía.	67
A.5. Radios de curvatura de la vía.	68
A.6. Carga de pasajeros, dirección Puerto - Limache.	69
A.7. Carga de pasajeros, dirección Limache - Puerto.	69
A.8. Parámetros eléctricos.	69

Glosario

AREMA: *American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association*, Asociación Americana de Ingeniería de Ferrocarriles y Mantenición de la vía férrea.

ATM: *Azienda Transorti Milanese*, Empresa de Transporte de Milán.

BOCOP: *The optimal control solver*, Solver de control óptimo.

BVG: *Berlin Verkehrsbetriebe*, Operador de transporte de Berlín.

CAF: Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles.

CMM: Centro de modelamiento matemático, Universidad de Chile.

DB: *Deutsche Bahn*, Trenes Alemanes.

EFE: Empresa de los Ferrocarriles del Estado.

ELS: *Energieoptimiertes Leit- und Störfallmanagement*, Optimización de energía, control y gestión de accidentes.

ES: *Projekt EnergieSparen*, Proyecto de ahorro de energía.

ICE: *Intercity Express*, Tren expreso interciudad.

IFB: *Institut für Bahntechnik*, Instituto de tecnología de trenes.

INRIA: *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*, Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática.

MATLAB: *Matrix Laboratory*, Laboratorio de matrices.

Merval: Metro de Valparaíso.

OSIRIS: *Optimal strategy to innovate and reduce energy consumption in urban rail systems*, Estrategia óptima para innovar y reducir el consumo en sistemas ferroviarios urbanos.

RATP: *Régie Autonome des Transports Parisiens*, Administración Autónoma de los Transportes Parisinos.

SAFT: *Société des Accumulateurs Fixes et de Traction*, Sociedad de Acumuladores y tracción.

SER: Subestación de rectificación.

SNCF: *Société Nationale des Chemins de Fer Français*, Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses.

UITP: *L'Union internationale des transports publics*, Unión Internacional de Transporte Público.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El creciente aumento de la población en Chile y por tanto la demanda de transporte, ha demostrado la necesidad de mejorar la infraestructura vial del país. A las nuevas líneas del Metro de Santiago, se suman los proyectos de trenes de cercanía: Santiago-Nos-Rancagua, Extensión del Biotren en el Concepción metropolitano, la quinta etapa del Merval en Valparaíso-Viña del Mar y la conexión Santiago-Melipilla [1]. Estos nuevos proyectos mejorarán los tiempos de viaje de las personas y por ende la calidad de vida.

Nuevos proyectos se traducen en nuevas líneas, trenes, subestaciones y mayor consumo energético, por lo cual la eficiencia energética cumple un rol fundamental, en términos ecológicos y económicos.

La eficiencia energética es un gran tema a abordar, no solo en el consumo industrial, comercial y residencial, sino también en los sistemas de transporte. Los crecientes aumentos del costo de energía y la dependencia del país a los vaivenes del precio del combustible hacen aún más importante esta tarea. En estos días, cualquier tipo de ahorro es de gran ayuda.

En la actualidad varios sistemas de transporte ferroviarios en el mundo, según su nivel de tecnología, buscan las posibilidades de reducir el consumo de energía de los trenes. Una opción factible es realizar modos de conducción eficientes en la operación, sin dejar de lado la seguridad, puntualidad y economía del sistema.

En el presente trabajo de título se busca la manera de lograr una reducción del consumo energético de los trenes de cercanía utilizados por la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE), en su filial Metro de Valparaíso (Merval). En particular se busca determinar una curva de velocidad del tren que produzca un menor gasto de energía, sin dejar de lado los tres requerimientos anteriormente señalados.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

En este trabajo de título se busca lograr la reducción del consumo energético de tracción en trenes, para así obtener un transporte más eficiente, amigable con el medio ambiente y con menores costos de operación. Se generarán modelos teóricos del problema para obtener curvas de velocidad óptimas, los cuales serán programados computacionalmente. Sus validaciones se lograrán mediante resultados de simulaciones, contrastándolos con valores reales de operación.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de la marcha del tren considerando variables dinámicas y energéticas.
- Plantear modelos de optimización para reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia, utilizando herramientas matemáticas.
- Simular y obtener curvas de velocidades eficientes según requerimientos de transporte, considerando restricciones de operación.
- Comparar resultados de simulaciones con valores reales dados por un operador ferroviario.
- Análisis de sensibilidad frente a distintas condiciones de operación y escenarios posibles.
- Determinación del potencial de reducción de energía a partir de datos proporcionados por operadores de trenes.
- Estudiar el impacto en la infraestructura eléctrica y factibilidad de la aplicación de los perfiles óptimos de velocidad en la operación ferroviaria.

1.3. Alcances

En el marco del proyecto OSIRIS (Optimal strategy to innovate and reduce energy consumption in urban rail systems) [2] se encuentra el desarrollo de una herramienta computacional que permita, entre otras cosas, calcular una curva de velocidad óptima para la operación de un tren la cual minimice la energía de tracción, la potencia máxima, el trabajo total o cualquier otro objetivo operacional que sea factible de expresar mediante un modelo matemático, cumpliendo las restricciones operacionales tales como los tiempos de viaje y las velocidades máximas interestación

El cálculo de dicha curva puede ser realizado de varias formas, y para ello se puede utilizar la teoría de control. Se considerará de manera particular el Principio del Mínimo de Pontryagin, que permite caracterizar la optimalidad. Sin embargo, se explorará también otras formulaciones alternativas, tanto a través de modelos discretos como continuos.

Una vez establecido el(los) modelo(s), se abordará la resolución computacional del mismo, aplicando técnicas y algoritmos de optimización no lineal, sin excluir la posibilidad de usar también aproximaciones de las soluciones basadas en heurísticas.

Posteriormente, se desarrollará un prototipo de software para la resolución del problema, que permita a un usuario especializado estudiar casos reales y evaluar la sensibilidad de las soluciones en función de escenarios realistas, a través de la variación de los parámetros del modelo.

1.4. Estructura de la memoria

El primer capítulo del presente documento presenta una introducción del tema, motivación objetivos y alcances. En el cual se busca dejar claro la idea a desarrollar, más las metas a conseguir y sus posibles limitaciones.

A continuación en el Capítulo 2, se realiza una revisión bibliográfica, donde se expone la información relevante a utilizar en el estudio, más un marco teórico que funda las bases del trabajo a desarrollar. Trata de la dinámica del tren, la simulación de la marcha y los modelos de optimización.

En el Capítulo 3, llamado diseño e implementación, se encuentra la formulación y explicación de cada uno los modelos matemáticos propuestos en la memoria. Dichos modelos fueron posteriormente programados para obtener sus respectivos resultados.

Los resultados, expuestos en el Capítulo 4, muestra la resolución numérica de los modelos matemáticos. En este capítulo se tienen los resultados obtenidos en el estudio de caso Merval, la resolución de los modelos de optimización y el impacto en la infraestructura que producen los perfiles óptimos de velocidad.

Para terminar, en el último capítulo de conclusiones, destaca las observaciones mas relevantes que se dejaron de manifiesto durante el transcurso del trabajo. Los logros obtenidos en éste y además de dar ciertos lineamientos para futuros trabajos de este tipo.

Adicionalmente, en la bibliografía se pueden ver los documentos de referencia y en los anexos, los parámetros de operación del Metro de Valparaíso utilizados en las simulaciones.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Proyecto OSIRIS

El proyecto OSIRIS (Optimal strategy to innovate and reduce energy consumption in urban rail systems) tiene como objetivo reducir el consumo total de energía en los sistemas ferroviarios en Europa del 10 % respecto de los niveles actuales para el año 2020 [2]. Está a cargo del Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo de la Comisión Europea. Dentro del proyecto se encuentran diversos participantes tanto de la industria como de la academia: Alstom, Ansaldo, Areva, Atac Roma, ATM, CAF, D'Appolonia, Istanbul Ulasim, Instituto Tecnológico de Aragón, Newrail, RATP, SAFT, Siemens, TU Wien, UITP y el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile.



Figura 2.1: Participantes proyecto OSIRIS.

Para lograr el objetivo se desarrolla una herramienta computacional llamada OSIRIS tool la cual posee cuatro modelos para describir la operación de un sistema ferroviario, los cuales interactúan entre sí:

- Modelo de velocidad: Curvas de velocidad que minimizan la energía de tracción.
- Modelo de fuerzas: Fuerzas de tracción necesarias para el movimiento del tren.
- Modelo de energía: Consumo de energía en tracción e infraestructura.
- Modelo termal: Temperatura y humedad durante la operación del sistema.

Cabe destacar que este Trabajo de Título está orientado a desarrollar el primer modelo. En dicho modelo es necesario conocer las restricciones de tiempo de viaje entre dos estaciones, topología de la vía, límites de velocidad, características de los trenes y motores de tracción, más la carga de pasajeros y la programación diaria de la operación del sistema ferroviario.

2.2. Proyectos de ahorro de energía en Alemania

A continuación, a modo de mostrar la experiencia internacional en reducción del consumo de energía de los trenes, se expone la obtenida en Alemania de los operadores *Deutsche Bahn* (DB) y *Berlin Verkehrsbetriebe* (BVG).

En Alemania el principal operador de trenes es la empresa estatal *Deutsche Bahn*, la cual posee la gran mayoría del transporte de pasajeros en Alemania que corresponde a dos billones de pasajeros cada año. Con sus filiales *DB Regio* y *DB Fernverkehr*, conecta las distintas ciudades de Alemania e incluso con países vecinos. Aparte de tener trenes urbanos (S-Bahn) y regionales (IC) existe el *Intercity Express* (ICE), el tren de mayor velocidad, el cual alcanza una velocidad de 230 km/h [3].



Figura 2.2: Deutsche Bahn.

Esta gran infraestructura ferroviaria ha permitido unir grandes regiones de Alemania con tiempos de viaje razonables, entregando seguridad y comodidad. Por otro lado el costo de los

viajes interurbanos no es bajo, lo cual ha perdido competitividad frente a otras opciones como el avión y la incipiente oferta de buses, la cual ha comenzado a tomar parte de la demanda desde la mitad del año 2013.

A partir de las premisas anteriormente señaladas, *Deutsche Bahn* ha buscado maneras de reducir sus costos de operación y ha desarrollado esta manera de reducir su consumo de energía en los trenes desde el año 2003 en su “*Projekt EnergieSparen (ES)*” (Proyecto de ahorro de energía). Según los estudios de la DB [4] el porcentaje máximo de energía que se puede ahorrar es en torno al 10 % sólo modificando la manera de conducción, en comparación a la manera convencional de la operación de los trenes, sin dejar de priorizar la seguridad, puntualidad y economía. En la Tabla 2.1 se muestran los valores estimados por la DB del potencial de ahorro de energía.

Tabla 2.1: Ahorros de energía estimados por *Deutsche Bahn*.

Medida	Ahorro
Conducción con ahorro de energía	10 %
Mantenimiento	3 %
Adquisición de nuevos trenes	5 %
Optimización de horarios	5 %
Coordinación del despachador del uso de la vía	Sin estimación

Para la realización del proyecto con el fin de reducir el consumo energético del 10 % en los trenes de pasajeros, se dictó un programa de capacitaciones a los 14.000 conductores de los vehículos, la cual constó de una preparación teórica, práctica mediante simuladores de conducción y operación real de máquinas. Esta instrucción estaba centrada a cambiar la forma de conducción hacia una eficiente [5].



Figura 2.3: Afiche ES: Conducción consciente, ahorro de energía.

Dentro de los compromisos medioambientales de la empresa se encuentra la reducción de las emisiones de dióxido de carbono en un 15 % para el año 2020, de este modo junto con la reducción de energía, se logra también la protección del medio ambiente. En términos económicos, se mejora la competitividad del medio de transporte debido a la reducción de costos de operación del sistema.

En primera instancia, un total de 2.600 locomotoras eléctricas para el tráfico de pasajeros fueron equipadas con medidores de energía *TEMA-BOX*, más la instrucción de los 14.000 conductores y la incorporación de un sistema de información de la energía, el cual permite evaluar con precisión los consumos para poder ser suministrados a los trenes.

Programas de simulación fueron diseñados, desarrollados e implementados por DB. De esta manera se pudo estimar el potencial de ahorro de energía y sensibilizar a los conductores del uso de los tiempos de reserva. Para las locomotoras diésel, la exactitud de las mediciones son claramente menores en comparación a las eléctricas. Se propuso la meta de desarrollar dispositivos de medición, sin embargo, la precisión de la medición no pudieron ser alcanzados en la medida necesaria. Además se concluyó que la relación costo beneficio de dicho desarrollo no era suficiente.

Durante un seminario de dos días, hubo cien especialistas, en la capacitación de los conductores. La actividad constó de un módulo teórico de cuatro horas, para luego el entrenamiento mediante los simuladores de conducción. Dicho simulador permitió no solo la instrucción de los conductores, sino también el posterior análisis de resultados obtenidos mostró el potencial de ahorro del 10 %.

Debido a las complicaciones que surgieron en la implementación de los conductores del conocimiento adquirido, fue necesario un cambio en el enfoque del proyecto. De este modo, se aplicaron las siguientes medidas:

- Explicar y convencer
- Impartir conocimientos y ejemplos
- Percibir esfuerzos y recompensar los progresos
- Dar información sobre el comportamiento de la conducción
- Incentivar y sancionar
- Ayuda y apoyo

Una de las ideas de la DB, posterior a la capacitación, para promover el ahorro de energía fue realizar una olimpiada de ahorro de energía. Los conductores debían realizar los viajes respetando la puntualidad y disminuyendo su consumo. Finalizada la competencia el conductor que lograba menos tiempo y menor consumo resultó ser el ganador.

El operador de transporte público en Berlín, *Berlin Verkehrsbetriebe* (BVG), también ha realizado estudios para el ahorro de energía de sus trenes de metro, en conjunto con TU Berlin, TU Dresden, Institut für Bahntechnik (IFB), Fraunhofer Institut, ASCI, BLIC. Dicho estudio fue denominado *ELS - Energieoptimiertes Leit- und Störfallmanagement* (Optimización de energía, control y gestión de incidentes), donde se buscó obtener eficiencia energética modificando la manera de conducción y seguridad en la vía, obteniendo resultados similares a la *Deutsche Bahn*.



Figura 2.4: BVG y Energieoptimiertes Leit und Störfallmanagement.

La experiencia alemana demostró que para lograr esta meta era necesario el compromiso y el incentivo de los conductores a manejar económicamente, los cuales cumplieron un rol fundamental en el éxito del programa. Actualmente estas técnicas se utilizan en Alemania para ahorrar energía, obteniendo así un menor costo de operación, sin reducir la calidad del servicio.

2.3. Metro de Valparaíso

La Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE) es una empresa autónoma del Estado de Chile, dedicada al transporte de pasajeros. Fue creada a comienzos del año 1884, siendo la empresa estatal más antigua de Chile [6].

Ya en el año 1913 se logró conectar el país desde Iquique hasta Puerto Montt, siendo gran aporte a la actividad productiva, teniendo injerencia en el transporte de carga y en el de pasajeros. En los años cincuenta era el principal medio de transporte, pero veinte años después comenzó un periodo de crisis dado por la falta de inversiones en el mantenimiento de sus equipos. Por otro lado, la creciente construcción de carreteras, la competencia mediante buses y el aumento del parque automovilístico, disminuyó la preponderancia de este medio de transporte.

A principios de los años noventa, una nueva reestructuración de la empresa era necesaria, por lo que mediante decretos de ley se le dio una renovación a los ferrocarriles del Estado. Posteriormente se crearon nuevas filiales, para lograr explotación comercial, incorporando recursos y gestión privada.

Dentro de estas filiales se encuentra el Metro de Valparaíso (Merval) en la quinta región, el cual posee una longitud de 43 km y 20 estaciones ubicadas en las comunas de Valparaíso, Viña del Mar, Quilpué, Villa Alemana y Limache. Recorriendo desde el valle hacia el mar en aproximadamente 55 minutos y viceversa, también en la operación existen bucles entre estaciones intermedias de menor duración para aumentar la oferta. El Metro de Valparaíso será el sistema ferroviario a estudiar en este trabajo, a partir de los datos que han sido proporcionados por su personal.



Figura 2.5: Metro de Valparaíso.

El Estado en los últimos años ha realizado inversiones importantes que han permitido la modernización de la infraestructura y el material rodante. De este modo han aparecido nuevos proyectos los cuales serán desarrollados en los años venideros, siendo así el ferrocarril una alternativa de transporte y de descongestión de las ciudades. En el caso de Merval se tiene el comienzo de su quinta etapa añadiendo ocho nuevos trenes, transportando 29 millones de usuarios al año. Su costo asciende a 40 millones de dólares.

2.4. Dinámica del tren

El movimiento del tren depende en gran medida de las fuerzas presentes en la marcha del tren, las cuales determinan su aceleración. Principalmente se tienen la fuerza de resistencia al rodado, la fuerza en gradiente y en curvas, más el esfuerzo de tracción. En las siguientes secciones se detalla cada una de ellas.

2.4.1. Resistencia al rodado

En el movimiento de un tren existen las llamadas fuerzas de resistencia al rodado. Estas fuerzas se oponen al movimiento del tren en la vía y se expresan como una función cuadrática dependiente de la velocidad:

$$F_r(v) = A + Bv + Cv^2 \quad (2.1)$$

Los parámetros A , B , C son constantes que dependen de las características del equipo tractor, ya sea locomotora o automotor y de las características de los coches, carros o vagones acoplados. Según [7] la fórmula de Davis sirve para cuantificar la resistencia al rodado en recta y horizontal mediante:

$$F_r(v) = (A + Bv)P + C \cdot N + D \cdot S \cdot v^2 \quad (2.2)$$

En este caso la fuerza se expresa en kilogramos, P es la masa en toneladas, N el número de ejes, la velocidad en km/h y $S[m^2]$ es la superficie equivalente del vehículo la cual aplica sólo para el equipo tractor al ir a la cabeza del tren. Para los vagones, coches y carros no se utiliza S , solamente se multiplica el coeficiente D por la velocidad al cuadrado. Los valores de los coeficientes se muestran en la Tabla 2.2 para cada caso:

Tabla 2.2: Coeficientes fórmula de Davis.

Móvil	A	B	C	D
Automotor	0,65	0,014	13	0,00515
Locomotora	0,65	0,0093	13.15	0,0045
Carros remolcados	0,65	0,014	13.15	0,0077
Coches remolcados	0,65	0,0093	13.15	0,0072

Existen múltiples maneras de obtener los coeficientes de la Ecuación (2.1), los cuales se calculan a partir de la experiencia empírica. Otras fórmulas son por ejemplo la fórmula de Sauthoff (1932) para trenes de pasajeros y la de Strahl (1913) [8]. Sin embargo, para lograr cálculos más precisos, es mejor pedir dichos coeficientes a los fabricantes quienes han hecho las pruebas pertinentes a sus trenes.

2.4.2. Fuerza en gradiente

Un tren que sube una gradiente posee una fuerza contraria a su movimiento dada por la componente paralela a la vía del peso, la cual debe ser vencida por el esfuerzo de tracción para acelerar o mantener su velocidad. Si el tren se encuentra en una pendiente dicha fuerza tenderá a acelerar al tren, siendo un alivio para los motores de tracción. Sin embargo, puede que la pendiente sea muy pronunciada lo que resultará en la aplicación de los frenos para mantener un máximo de velocidad, siempre y cuando el esfuerzo de frenado lo permita, caso omiso el tren acelerará. De la Figura 2.6 se aprecia que la fuerza en gradiente está dada por:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (2.3)$$

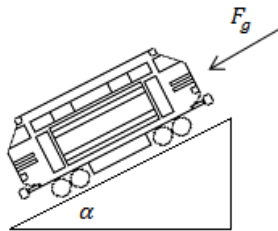


Figura 2.6: Fuerza en gradiente.

En general las gradientes de las líneas férreas no son muy elevadas por lo que el seno del ángulo de la gradiente es aproximadamente igual a su tangente [8]. En los sistemas ferroviarios las gradientes i se expresan en por mil [‰], por lo cual la fuerza en gradiente resulta:

$$F_g = m \cdot g \cdot \frac{i}{1000} \quad (2.4)$$

2.4.3. Fuerza en curva

Un tren desplazándose por una curva posee una fuerza de resistencia al movimiento dado por la fricción entre las ruedas y los rieles y la fuerza centrípeta, debido a que movimiento instantáneo del tren es tangente a la curva. Teniendo como dato el radio de curvatura r en metros, la fuerza resistiva en una curva se puede aproximar a partir de:

$$F_c = m \cdot g \cdot \frac{K}{r} \quad (2.5)$$

De este modo una curva de longitud K produce una fuerza equivalente a una gradiente de 1[‰]. Dependiendo del sistema ferroviario se usa distintos valores de K [m]. En la Tabla 2.3, se muestra el valor de K según algunos operadores [9]

Tabla 2.3: Valores de K en sistemas ferroviarios.

Operador	K
SNCF	800
Japón	800
AREMA	700
China	700
Taiwan Railway Administration	600

2.4.4. Esfuerzo de tracción

La locomotora o el automotor mediante sus motores generan el esfuerzo de tracción necesario para mover el tren, el cual es dependiente de la velocidad. En la Figura 2.7 muestra una curva esfuerzo velocidad un tren.

$$F_{tr} = F_{tr}(v) \quad (2.6)$$

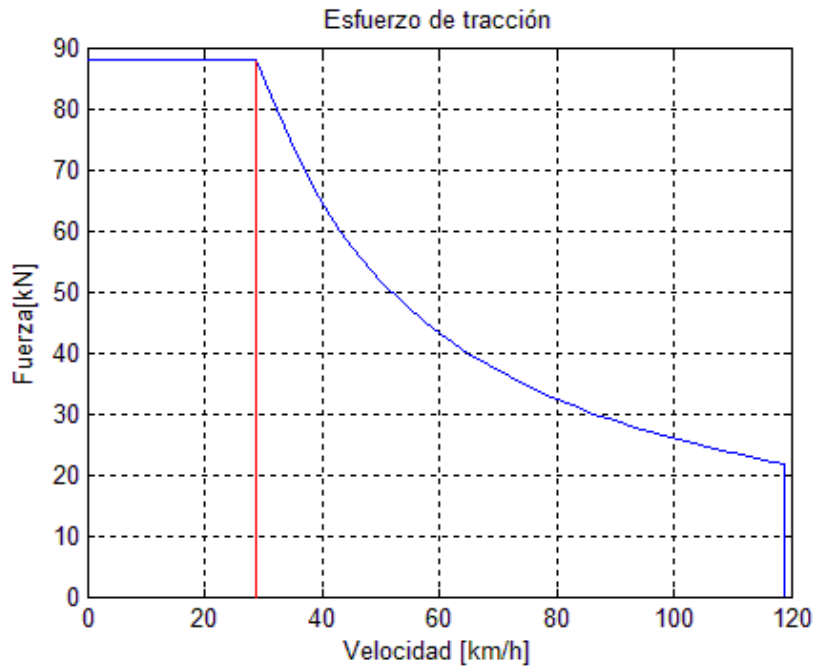


Figura 2.7: Esfuerzo de tracción versus velocidad.

La característica del esfuerzo de tracción se define por las tres siguientes variables relevantes [10]:

- Velocidad máxima del vehículo
- Fuerza de tracción limitada por la adherencia
- Fuerza de tracción a potencia constante

Para sacar al tren del reposo se utiliza el máximo esfuerzo de tracción, el cual está sujeto al límite de adherencia. En esta etapa se entrega torque constante que corresponde a la primera parte de la curva. Aumentando la velocidad, se llega a un punto en el cual se deja de aplicar torque constante y se suministra potencia constante. Como la potencia es igual a la fuerza por la velocidad, la fuerza de tracción a potencia constante es inversamente proporcional a la velocidad. Esta velocidad de cambio de régimen de los motores está en torno a los 30 km/h. Finalmente existe una velocidad a la cual las fuerzas de resistencia del rodado se igualan a el esfuerzo de tracción, la cual corresponde a la velocidad máxima del tren.

2.4.5. Límite de adherencia

El límite de adherencia indica el valor máximo que puede tomar el esfuerzo de tracción sin que las ruedas patinen sobre los rieles. Existe el denominado coeficiente de adhesión que representa que porcentaje del esfuerzo de tracción puede ser aplicado para que el tren no resbale, el cual depende de las condiciones de las ruedas y de los rieles [11].

Tabla 2.4: Coeficientes de adhesión.

Condición	Valor	Valor con arena
Rieles secos	0,25 - 0,30	0,35 - 0,40
Rieles muy húmedos	0,18 - 0,20	0,22 - 0,25
Rieles grasientos y húmedos	0,15 - 0,18	0,22 - 0,25
Rieles con agua nieve	0,15	0,20
Rieles con poca nieve	0,10	0,15

Por otro lado el coeficiente de adherencia se puede calcular dada su dependencia de la velocidad [12]:

$$\mu(v) = k_1 + \frac{k_2}{k_3 + v} \quad (2.7)$$

Las constantes k_1 , k_2 y k_3 han sido calculadas experimentalmente por varios autores. Por ejemplo Curtius y Kniffler en los años cincuenta y también por Kother.

Tabla 2.5: Coeficientes para fórmulas de adhesión.

Fórmula	k_1	k_2 (m/s)	k_3 (m/s)
Curtius y Kniffler	0,161	2,083	12,222
Kother	0,116	2,5	11,667

2.4.6. Influencia de las masas rotatorias

Las masas rotatorias del tren, tales como los ejes y las ruedas, influyen en los cálculos cinemáticos. La energía cinética del tren en movimiento está compuesto por la energía de las masas en traslación y en rotación. Estas últimas producen un consumo adicional para acelerarlas durante el arranque.

Para expresar esta influencia se utiliza el factor de las masas rotatorias. Sea la masa total tren m_T igual a la suma de la masa no rotante del tren m_t más las masas rotatorias m_r . El factor corresponde al cociente de la masa total del tren y la masa del tren.

$$\rho = \frac{m_T}{m_t} = 1 + \frac{m_r}{m_t} \quad (2.8)$$

En la Tabla 2.6 se muestran valores típicos utilizados para considerar el efecto de las masas rotatorias [13]:

Tabla 2.6: Factor de las masas rotatorias.

Material rodante	Factor
Locomotora diésel-eléctrica	1,15 - 1,25
Locomotora diésel-hidráulica	1,10 - 1,15
Locomotora eléctrica	1,15 - 1,25
Vagones de pasajeros	1,06 - 1,09
Carros de carga vacíos	1,08 - 1,10
Carros de carga cargados	1,03 - 1,04

Si se conoce la masa del equipo tractor m_l y la masa de los vagones o carros $m_{v,c}$ más sus respectivos factores de masas rotatorias ρ_l y $\rho_{v,c}$, se calcula un factor equivalente dado por:

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_l \cdot m_l + \rho_{v,c} \cdot m_{v,c}}{m_l + m_{v,c}} \quad (2.9)$$

2.5. Ecuaciones de movimiento

Conocidas las fuerzas presentes en el movimiento de un tren, se puede escribir la ecuación de la dinámica del tren en función de la velocidad:

$$F_{tr}(v) - F_r(v) - F_g - F_c = \rho M \frac{dv}{dt} \quad (2.10)$$

la cual se debe resolver para obtener el perfil de la marcha del tren. Analíticamente suele ser complejo resolver la ecuación, debido a que las fuerzas dependen de la velocidad.

2.5.1. Modelo discreto

Para la resolución de la Ecuación (2.10) se puede discretizar por incrementos de tiempo, distancia o velocidad [14].

2.5.1.1. Incremento de tiempo

Sea la aceleración $a[\text{m/s}^2]$, la velocidad $v[\text{m/s}]$, la distancia $s[\text{m}]$ y el tiempo $t[\text{s}]$. Escribiendo la velocidad y la distancia como integrales del tiempo resulta:

$$v = \int a dt = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \bar{a}_i \Delta t_i \quad (2.11)$$

$$s = \int v dt = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \bar{v}_i \Delta t_i \quad (2.12)$$

$$\bar{a}_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{2} \quad (2.13)$$

$$\bar{v}_i = \frac{v_{i+1} - v_i}{2} \quad (2.14)$$

donde \bar{a}_i y \bar{v}_i son los promedios de la aceleración y la velocidad en el incremento de tiempo Δt_i . La fuerza neta en t_i es F_i dependiente de la velocidad, por lo tanto se pueden calcular las variables del tren a partir de:

$$\bar{a}_i \approx a_i = \frac{F_i}{M} \quad (2.15)$$

$$v_{i+1} = v_i + a_i (t_{i+1} - t_i) \quad (2.16)$$

$$s_{i+1} = s_i + \bar{v}_i (t_{i+1} - t_i) \quad (2.17)$$

2.5.1.2. Incremento de distancia

Considerando la distancia como la variable independiente, el tiempo y la velocidad se pueden obtener como integrales de s :

$$t = \int \frac{ds}{v} = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta s_i}{\dot{v}_i} \quad (2.18)$$

$$v = \int \frac{ads}{v} = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\dot{a}_i \Delta s_i}{\dot{v}_i} \quad (2.19)$$

Si el incremento de distancia es pequeño, \bar{a}_i se puede aproximar como un valor constante. Suponiendo que la aceleración promedio durante Δs_i puede ser calculada con la fuerza en s_i se tiene:

$$\bar{a}_i \approx a_i = \frac{F_i}{M} \quad (2.20)$$

$$t_{i+1} = t_i + \frac{s_{i+1} - s_i}{\bar{v}_i} \quad (2.21)$$

$$v_{i+1} = v_i + \frac{a_i (s_{i+1} - s_i)}{\bar{v}_i} = \sqrt{v_i^2 + 2a_i (s_{i+1} - s_i)} \quad (2.22)$$

2.5.1.3. Incremento de velocidad

Con la velocidad como variable de integración independiente se tiene:

$$t = \int \frac{dv}{a} = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta v_i}{\bar{a}_i} \quad (2.23)$$

$$v = \int \frac{ads}{v} = \lim_{\Delta t_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\bar{v}_i \Delta v_i}{\bar{a}_i} \quad (2.24)$$

Si el incremento de distancia es pequeño, \bar{a}_i se puede aproximar como un valor constante. Sea \bar{F}_i el promedio de la fuerza neta durante el cambio de velocidad en Δv_i , la dinámica del tren se expresa mediante las siguientes ecuaciones:

$$\bar{a}_i = \frac{F_i}{M} \quad (2.25)$$

$$t_{i+1} = t_i + \frac{v_{i+1} - v_i}{\bar{a}_i} \quad (2.26)$$

$$s_{i+1} = s_i + \frac{\bar{v}_i (v_{i+1} - v_i)}{\bar{a}_i} = s_i + \bar{v}_i (t_{i+1} - t_i) \quad (2.27)$$

2.6. Fases de la marcha de un tren

En la marcha de un tren entre origen y destino o entre estación y estación, se distinguen cuatro etapas: aceleración, velocidad crucero, marcha inercial y frenado. El movimiento del tren depende del esfuerzo de tracción, las fuerzas presentes en el movimiento, los límites de velocidad de la vía y las restricciones de los tiempos de viaje que el tren debe cumplir. A continuación se explica cada una de estas etapas, las que se muestran en la Figura 2.8.

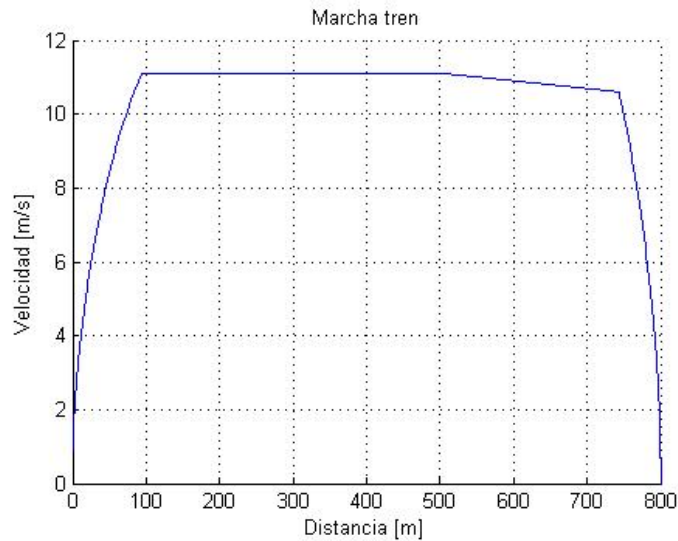


Figura 2.8: Fases de la marcha de un tren.

2.6.1. Aceleración

Para que el tren salga del reposo o acelere desde una velocidad inicial al límite de velocidad de una sección se utiliza toda la fuerza disponible de los motores de tracción. Para conocer las variables cinemáticas del tren se deben resolver las ecuaciones de movimiento.

2.6.2. Velocidad crucero

El tren acelera hasta la velocidad máxima permitida por la sección de vía y se mantiene a dicha velocidad. En esta fase el conductor debe proporcionar solo el esfuerzo de tracción para vencer las fuerzas resistivas. En el caso de que el tren entre a una gradiente puede que sea necesario volver a traccionar entrando a una nueva etapa de aceleración. Por otro lado si se tiene una pendiente, será necesario aplicar los frenos para mantener la velocidad.

En la práctica, para obtener velocidad constante se tracciona durante un lapso, luego ir a vela y volver a traccionar de nuevo durante repetidas veces en una ventana de tiempo. Para efectos de la simulación, la fuerza de tracción se iguala a las fuerzas resistivas obteniendo así aceleración cero.

2.6.3. Marcha inercial

Luego de alcanzar la velocidad máxima y mantenerla por un tiempo, se apagan los motores de tracción y el tren queda rodando sobre los rieles. Dependiendo de las fuerzas resistivas, el tren acelerará (caso pendiente) o desacelerará (caso gradiente).

2.6.4. Frenado

Para llegar sin velocidad a la estación es necesario frenar el tren, lo cual generalmente no se usa con todo su potencial de frenado, por razones de seguridad y comodidad de los pasajeros. Por otro lado cuando se realizan los cálculos, el tipo de locomotora es conocido, por lo cual se puede estimar su desaceleración. Según [8] valores usuales de la desaceleración durante el frenado se muestran en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7: Desaceleraciones de frenado para trenes.

Tipo	Desaceleración[m/s ²]
Frenado de servicio en trenes suburbanos	0,525
Frenado de servicio en trenes de pasajeros	0,375
Frenado de servicio en trenes de carga	0,225
Frenado máximo en trenes suburbanos	0,7
Frenado máximo en trenes de pasajeros	0,5
Frenado máximo en trenes de carga	0,3

2.7. Maneras, estrategias y tácticas de conducción

Actualmente en los sistemas ferroviarios en el mundo existen dos tipos estrategias de conducción. A partir de la tecnología instalada existente, permiten la operación de los trenes con puntualidad y eficiencia. A continuación se detalla cada uno de éstos.

2.7.1. Conducción operativa

Son las estrategias de control para la operación del tren sin el objetivo del ahorro de energía, minimizando el tiempo de viaje. Es la primera manera de conducción utilizada por todos los sistemas ferroviarios, debido a la falta de tecnología existente.

La conducción operativa sólo considera tres fases en la marcha del tren: aceleración, velocidad constante y frenado. Sin embargo, posee la base teórica para calcular los tiempos de viaje, la programación, la construcción y el tiempo de conducción. Cabe destacar que de esta se obtiene el mínimo tiempo de viaje, pero no así el mínimo de consumo de energía. Es útil para comparar los ahorros de energía con otros perfiles de velocidad.

2.7.2. Conducción eficiente

Hoy en día la protección del medio ambiente es de suma importancia, por esta razón nuevas técnicas están siendo desarrolladas para lograr la reducción del consumo de energía y sus costos. Una manera de reducir dicho consumo es generar una curva de velocidad eficiente.

Para lograrlo modelos matemáticos son útiles para simular distintos escenarios y elegir la mejor curva de velocidad que minimice la energía. En estos cálculos, el tiempo de viaje, las velocidades máximas y la distancia interestación son restricciones requeridas para la correcta operación del sistema.

Esta táctica solo puede ser aplicada en el marco de un horario existente, ya que se puede utilizar el tiempo de reserva para alargar la fase de marcha inercial del tren para ahorrar energía.

2.8. Modelo de eficiencia energética analítico

La mayor parte de la energía eléctrica consumida por los ferrocarriles es la que se usa para mover a los trenes. Por un lado la energía mecánica necesaria para vencer las fuerzas presentes en el movimiento y por otro lado las pérdidas producidas por la transformación y transmisión de la energía de tracción del suministro de energía. Ambas están influenciadas por la manera de operación del tren según sus horarios. El modelo de eficiencia energética de trenes expuesto por [8] se detalla en las siguientes secciones.

2.8.1. Minimización del consumo de la energía mecánica

La energía mecánica necesaria para mover un vehículo desde un punto hacia otro se calcula a partir de la integral de la potencia mecánica en el tiempo. Esta potencia se expresa como el producto de la fuerza de tracción F_{tr} y la velocidad v .

$$E_{mec} = \int P_{mec}(t) dt, P_{mec}(t) = F_{tr}(t) v(t) \quad (2.28)$$

Otra fórmula utilizada para el consumo de energía es la integral del esfuerzo de tracción con respecto a la distancia:

$$E_{mec} = \int F_{tr}(s) ds \quad (2.29)$$

La fórmula demuestra que cada proceso de aceleración del tren necesita energía. Entre menor tiempo disponible para llegar a un lugar de destino, el tren debe acelerar más. De este modo, se necesita más energía.

Sea un tren que se mueve entre dos estaciones, suponiendo que la vía está desocupada y la ruta esta previamente calculada. La manera de operar el tren depende en su retraso y el tiempo de viaje planeado, debido a que se debe lograr puntualidad. De este modo, si el tren va en retraso, este debe acelerar al máximo.

2.8.2. Operación óptima

La operación óptima del tren consta de cuatro etapas; máxima aceleración, velocidad crucero, marcha inercial y máximo frenado, las cuales se detallan a continuación.

La aceleración y frenado debe realizarse con el máximo esfuerzo de tracción y frenado. Esto puede entenderse analizando la fase de frenado en detalle. Entre más lento un tren frena, éste necesita mayor tiempo para detenerse. Entonces, para obtener el mismo tiempo de viaje con una desaceleración menor, el tren debe acelerar a una velocidad mayor, lo cual necesita mayor energía.

La velocidad crucero significa mantener la velocidad. Existen dos maneras de lograrlo, una con aceleración parcial y la otra con frenado parcial. La aplicación de una o de otra depende las fuerzas en movimiento del tren. La mayoría de las veces se tiene resistencia positiva, por lo tanto se necesita aceleración parcial para mantener la velocidad. En algunos casos se tienen altas pendientes en las cuales se necesita accionar los frenos para no sobrepasar la velocidad crucero. Según varios autores la aplicación bajo la velocidad crucero no es necesaria para ahorrar energía, sino que es suficiente aplicar la velocidad máxima permitida por la vía.

Durante la marcha inercial, cuando no hay esfuerzo de tracción o frenado, el tren sólo avanza sobre los rieles sin consumo de energía. Entonces cuanto antes comience esta etapa, mayor energía se puede ahorrar.

De este modo se tiene la secuencia óptima de la marcha del tren: Después de detenerse en una estación el tren debe acelerar al máximo, dependiendo del tiempo de reserva, la fase de marcha inercial puede comenzar inmediatamente o después de alcanzar la velocidad máxima (aplicar velocidad crucero) y mantenerla por un tiempo.

2.8.3. Calculo de la estrategia óptima de conducción

Para modelar la marcha del tren, se utilizan dos variables de estado: la posición del tren x_1 y su velocidad x_2 . La variable de control u , dependiente del tiempo es la razón del esfuerzo de tracción F_{tr} y el máximo frenado F_B :

$$u = \frac{F_{tr}}{F_B} \quad (2.30)$$

Para hacer el cálculo de la estrategia óptima de conducción, las siguientes condiciones deben ser aplicadas:

- La variable de control u debe estar limitada entre los valores -1 (máximo frenado) y la relación entre el esfuerzo máximo de tracción F_T y la máxima desaceleración F_B (máxima aceleración, $u_{max} = F_T/F_B$).
- Se considera una sección con solo un límite de velocidad v_m , $0 \leq x_2 \leq v_m$.
- La variación del gradiente en la sección debe ser pequeña, para que un gradiente constante i_m en la sección sea utilizado.
- Para las condiciones iniciales se cumple que el tren parte en tiempo cero con posición y velocidad cero y llega a la próxima estación en tiempo t_f , con posición $x_1(t_f) = x_{1f}$ y velocidad cero.

Por lo tanto la marcha del tren puede ser descrita por las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 \quad (2.31)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = u_B u - f_w(x_2) - i_m g \quad (2.32)$$

Donde $f_w(x_2)$ son las fuerzas de resistencia del vehículo, u_B la tasa máxima de frenado igual a $\frac{F_B}{m}$ y m la masa del tren.

El criterio de optimización debe ser la reducción de la energía mecánica del vehículo. Puede ser calculada mediante la velocidad o la variable de control:

$$Q = \int_0^{t_f} f_o(x_1, x_2) dt = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} (F + |F|) x_2 dt = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} (u + |u|) u_B m x_2 dt \quad (2.33)$$

Cabe destacar que durante marcha inercial ($u = 0$) y frenado ($u < 0$), el término $u + |u|$ resulta cero. Es decir, no hay fuerza de tracción en las ruedas.

Para resolver el problema de optimización dada las condiciones, se puede utilizar el *Principio del Mínimo de Pontryagin*. El cual permite obtener el control óptimo $u_{opt}(t)$, que maximiza el Hamiltoniano:

$$H(x, u, p) = \sum_{i=1}^n \left(p_i \frac{dx_i}{dt} \right) - f_o(x, u) \quad (2.34)$$

Para el problema, el número de estados n es igual a dos, las ecuaciones de estado (2.31) y (2.32) y el criterio de optimización f_o de la Ecuación (2.33) debe ser utilizado. El Hamil-

toniano resulta:

$$H = p_1 x_2 + p_2 (u_B u - f_w(x_2) - i_m g) - \left(\frac{u + |u|}{2} \right) u_B m x_2 \quad (2.35)$$

Para lograr que el Hamiltoniano alcance su máximo, es necesario que sea máximo el valor en función de la variable de control:

$$u p_2 - \left(\frac{u + |u|}{2} \right) m x_2 \quad (2.36)$$

De esta manera, existen cinco maneras de conducción óptima según el valor del coestado p_2 , los cuales son:

Tabla 2.8: Valores de la variable de control en regímenes de marcha.

u_{max}	$p_2 > x_2 m$	Aceleración máxima
$[0, u_{max}]$	$p_2 = x_2 m$	Velocidad crucero
0	$0 < p_2 < x_2 m$	Marcha inercial
$[-1, 0]$	$p_2 = 0$	Velocidad crucero
-1	$p_2 < 0$	Frenado máximo

2.9. Modelo de eficiencia energética heurístico

A diferencia de la conducción operativa en la cual se utilizan tres fases en su marcha, se añade la marcha inercial previa al frenado para mejorar la eficiencia. Añadiendo este régimen el sistema puede ahorrar energía apagando los motores de tracción. El problema es determinar la velocidad crucero y la posición donde la marcha inercial comienza [15].

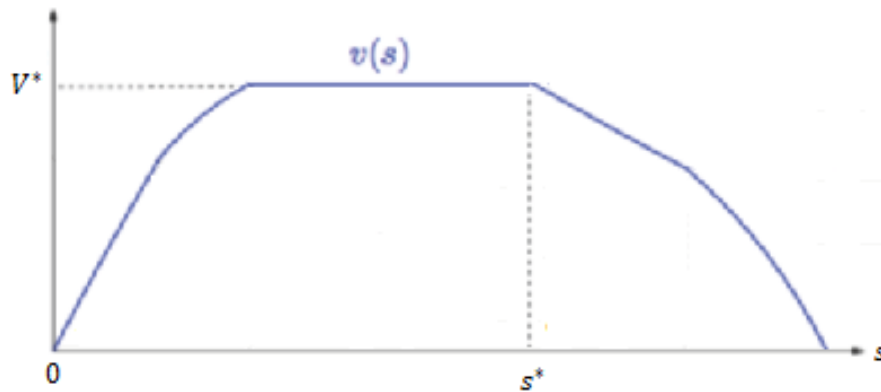


Figura 2.9: Estrategia de marcha eficiente.

Los puntos de cambio de régimen se calculan probando con curvas de distintas velocidades crucero V^* y puntos de comienzo s^* de marcha inercial, para finalmente calcular sus consumos de energía. Después de los cálculos, la curva con menor energía es la solución óptima de este método. Sin embargo, no es el mínimo teórico obtenido con el modelo analítico pero una solución más rápida y menos compleja.

Aunque la fase de marcha inercial permite ahorro de energía, incrementa el tiempo de viaje comparado con la conducción operativa. De este modo, efectos en la infraestructura deben ser estudiados posteriormente tales como la capacidad de transporte, la frecuencia, número de trenes, subestaciones de tracción, etc. La fase de aceleración está dada por el esfuerzo de tracción, el cual depende de las características del motor. En particular la eficiencia de estos motores depende de la velocidad, por lo que un factor de penalización de eficiencia es útil para una modelación precisa [16].

La fase de frenado depende de la seguridad y la comodidad de los pasajeros. El frenado máximo produce menor tiempo, pero está limitado por el operador dadas las consideraciones descritas previamente. Si la receptividad de la línea lo permite, frenado regenerativo puede ser utilizado. En este caso incorporar un coeficiente en el modelo para expresar que porción de la energía en el frenado efectivamente se puede reinyectar a la línea, sirve para hacer más realista las simulaciones y reducir el consumo de energía mediante regeneración [17].

Capítulo 3

Diseño e implementación

3.1. Algoritmo heurístico

La implementación del algoritmo heurístico fue realizada en MATLAB, ya que es el software escogido para el desarrollo del proyecto OSIRIS. De este modo se programó la rutina como una función para luego ser inserta en el programa principal de la herramienta OSIRIS.

El modelo heurístico está basado en el modelo expuesto en la Sección 2.9 considerando las siguientes simplificaciones:

- Se optimiza cada curva de velocidad interestación por separado para lograr en el global una disminución del consumo de energía en tracción.
- La función de costo es la energía mecánica necesaria en tracción, de este modo se decrecen las pérdidas asociadas a la transmisión por la catenaria, la transformación eléctrica del ondulator y la transmisión mecánica de la caja reductora.
- El orden las fases de la marcha óptima son: Aceleración, velocidad crucero, marcha inercial y frenado.

El algoritmo de resolución consta de tres principales etapas: procesamiento de datos, cálculo de la curva rápida y optimización heurística, los cuales se detallan a continuación.

3.1.1. Procesamiento de datos

En primera instancia se deben procesar los datos de la vía, más los datos de operación del sistema ferroviario. Esta información es ingresada por el usuario mediante hojas de cálculo de excel. Dentro de los datos requeridos para el algoritmo se encuentran:

- Características del tren: Masa, masa inercial, máxima aceleración permitida, fuerza de arranque, máxima fuerza de frenado, máxima potencia y sus parámetros de Davis.
- Gradientes y pendientes: Puntos de inicio y final mas sus valores en por mil.
- Curvas: Puntos de inicio y final mas sus valores del radio de curvatura en metros.
- Límites de velocidad: Puntos de inicio y final de la velocidad máxima permitida.
- Carga de pasajeros: Para cada hora de operación la cantidad de personas que se traslada entre dos estaciones.
- Tiempo máximo interestación: Tiempo requerido entre dos estaciones para satisfacer las restricciones operacionales del sistema.

La resolución del problema se hace mediante la discretización en incremento de distancia. De este modo la topografía de la vía (gradientes, pendientes, curvas y límites de velocidad) son discretizados en pasos de 1 metro. Con la topografía de la vía y la carga de pasajeros se calculan las fuerzas dadas por las gradientes y las curvas.

Cabe destacar que los datos requeridos desglosados son los datos utilizados para los cálculos de las curvas de velocidad, para los otros módulos del OSIRIS tool se requiere información adicional.

3.1.2. Curva rápida

La curva rápida considera la tracción a su máxima capacidad hasta llegar a la velocidad límite de la sección. Se mantiene dicha velocidad hasta que comienza a frenar con todo el esfuerzo disponible.

Para su cálculo, se comienza con una curva que solo corresponde al o a los límites de velocidad entre las dos estaciones. Desde el punto final de la interestación se acelera con el esfuerzo de frenado hasta intersectar los límites de velocidad, obteniendo así una distancia mínima de desaceleración. Finalmente se calcula el régimen de aceleración, el cual termina cuando se alcanza las velocidades límites. Las etapas de calculo se muestran en la Figura (3.1).

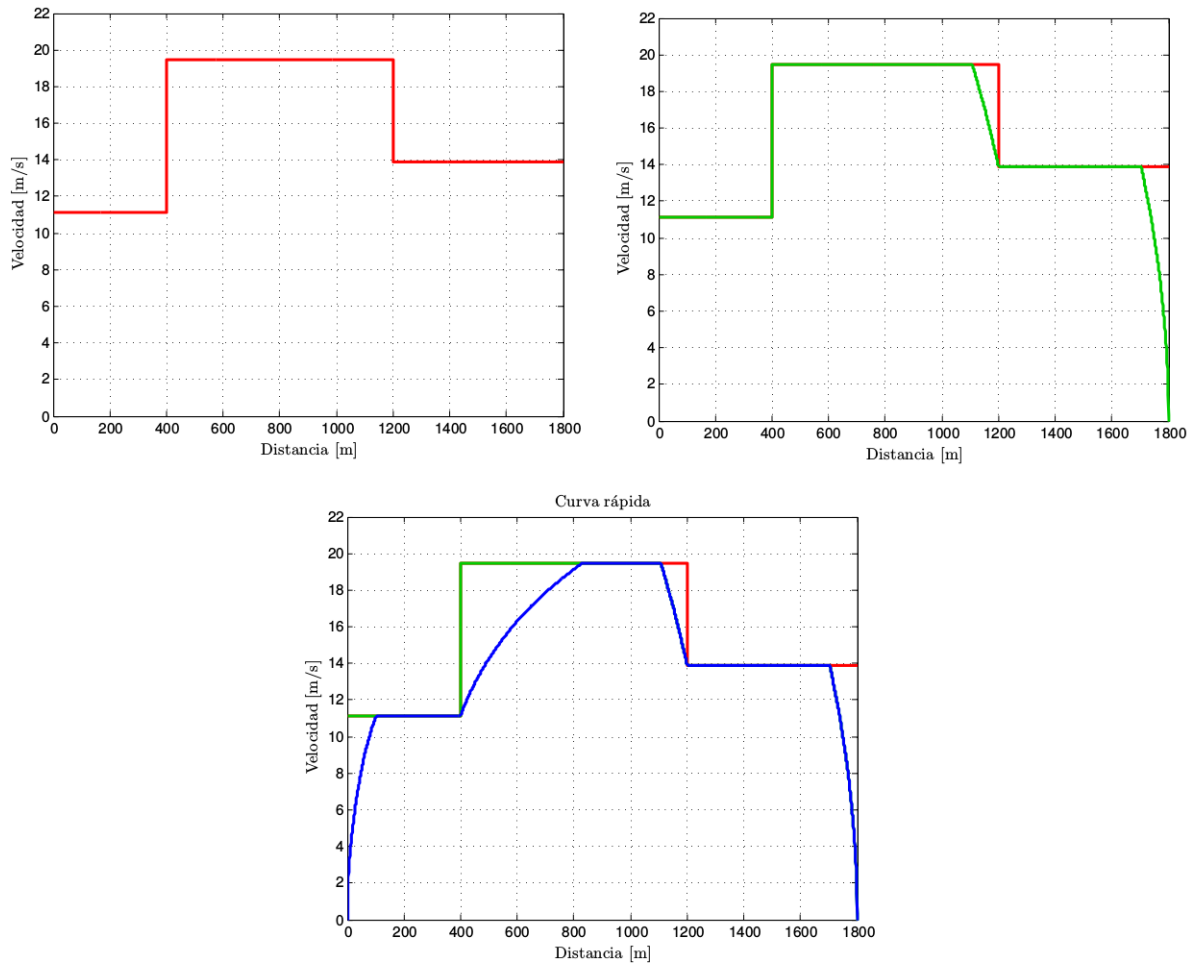


Figura 3.1: Etapas de cálculo de la curva rápida.

Con el perfil de velocidad rápido se calcula el consumo de energía y su tiempo. Cabe destacar que este tiempo es el mínimo que se puede alcanzar entre las dos estaciones, no así el consumo el cual corresponde en la mayoría de los casos al máximo. Por lo tanto este tiempo impone una restricción de tiempo mínimo que se debe cumplir bajo los límites de velocidad ligados a la seguridad en la operación del sistema.

3.1.3. Optimización heurística

La última etapa del algoritmo es la optimización heurística. Primero se verifica que el tiempo máximo requerido interestación sea mayor al tiempo de la curva rápida. De no ser así, se añade un 5% al tiempo de la curva rápida como restricción de tiempo máximo para entregar un margen de ahorro energético.

La solución inicial de la optimización es la curva rápida y sobre esta se itera hasta obtener un perfil óptimo de velocidad. Las maneras de mejorar las curvas son disminuyendo la

velocidad crucero, la cual se alcanza finalizada la etapa de tracción o bien aumentando en distancia la marcha inercial.

La velocidad crucero se disminuye en pasos del 5 % del límite de velocidad, tomando como mínimo un 40 % de la velocidad máxima. Por otro lado la marcha inercial se aumenta en pasos de 20 metros. Estos valores fueron ajustados dados los tiempos de cómputo del algoritmo y en base a la aplicabilidad de estos perfiles en la conducción real de un tren.

Cuando hay dos o más límites de velocidad, si es que el límite de la siguiente sección es mayor al anterior, se asume que el tren acelera nuevamente hasta una nueva velocidad crucero. Esta aceleración ocurre al comienzo de la siguiente sección, también se considera otro punto de comienzo de marcha inercial. De este modo se añaden dos variables de optimización del problema por cada cambio de límites de velocidad.

A continuación se detalla la formulación matemática del algoritmo heurístico para un límite de velocidad.

s	Posición del tren
$t(s)$	Tiempo acumulado en posición s
$v(s)$	Velocidad del tren en posición s
$a(s)$	Aceleración del tren en posición s
s_1	Posición de comienzo velocidad crucero
s_2	Posición de comienzo marcha inercial
s_3	Posición de comienzo frenado
A, B, C	Parámetros de Davis
$F_{mot}(v)$	Fuerza de tracción máxima
$F_{brk}(v)$	Fuerza de frenado máximo
$F_{TR}(s)$	Fuerza de tracción en posición s
$F_B(s)$	Fuerza de frenado en posición s
$F_R(s)$	Fuerza de resistencia al movimiento
$F_g(s)$	Fuerza en gradiente
$F_c(s)$	Fuerza en curva
T^*	Tiempo requerido interestación
S	Distancia interestación
$V_{max}(s)$	Velocidad máxima dada por cálculo de curva rápida
a_{max}	Aceleración máxima
M	Masa del tren
ρ	Factor de las masas rotatorias
α	Factor de recuperación de energía en frenado
m_{pas}	Masa pasajeros

El problema de optimización se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{mín } E = \sum_{s=0}^{s_1} F_{mot}(s)v(s)\Delta t + \sum_{s=s_1}^{s_2} (F_R(s) + F_g(s) + F_c(s))v(s)\Delta t - \sum_{s=s_3}^S \alpha F_B(s)v(s)\Delta t \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$0 < s_1 \leq s_2 \leq S \quad (3.2)$$

$$x(0) = 0, x(T) = S, \dot{x}(0) = 0, \dot{x}(S) = 0 \quad (3.3)$$

$$0 \leq t(s) \leq T^*, 0 \leq s \leq S \quad (3.4)$$

$$v(s) \leq V_{max}(x), 0 \leq s \leq S \quad (3.5)$$

$$a(s) \leq a_{max}, 0 \leq s \leq S \quad (3.6)$$

$$F_{TR}(s) \leq F_{mot}(v), 0 \leq s \leq S \quad (3.7)$$

$$F_B(s) \leq F_{brk}(v), 0 \leq s \leq S \quad (3.8)$$

$$F_{TR}(s) - F_B(s) - F_R(s) - F_g(s) - F_c(s) = (\rho M + m_{pas})\bar{v} \frac{\Delta v}{\Delta s} \quad (3.9)$$

La primera condición data del proceso de la marcha del tren, en la cual se acelera hasta s_1 y se mantiene la velocidad hasta s_2 . La posición s_2 es igual a s_1 cuando no hay velocidad crucero y se comienza con marcha inercial inmediatamente luego de traccionar.

Las condiciones iniciales (3.3) son posición y velocidad cero. En el tiempo final, se debe tener posición igual a distancia interestación y velocidad cero.

El tiempo no debe sobrepasar el máximo tiempo permitido entre las estaciones (3.4), los límites de velocidad deben ser cumplidos (3.5), la aceleración máxima limitada a un valor máximo (3.6) y la fuerza motriz acotada por la curva esfuerzo-velocidad de los motores de tracción (3.7), mas la fuerza de frenado disponible (3.8). Con respecto a los límites de velocidad, si ya se ha alcanzado el límite de velocidad y la topología de la vía acelera el tren (caso pendientes fuertes), se aplica un frenado parcial con el esfuerzo de frenado reducido para mantener la velocidad.

Finalmente la dinámica (3.9) es la misma presentada en el capítulo anterior para la discretización en incremento de distancia. Donde \bar{v} representa el promedio de velocidad entre la posición siguiente y la actual.

Para ilustrar gráficamente los pasos del algoritmo heurístico en su totalidad, se muestran los siguientes esquema en las Figuras (3.2) y (3.3).

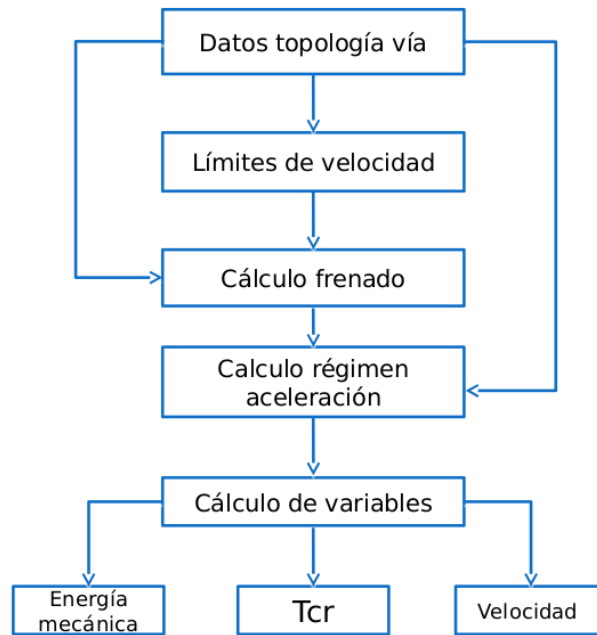


Figura 3.2: Primera etapa algoritmo heurístico.

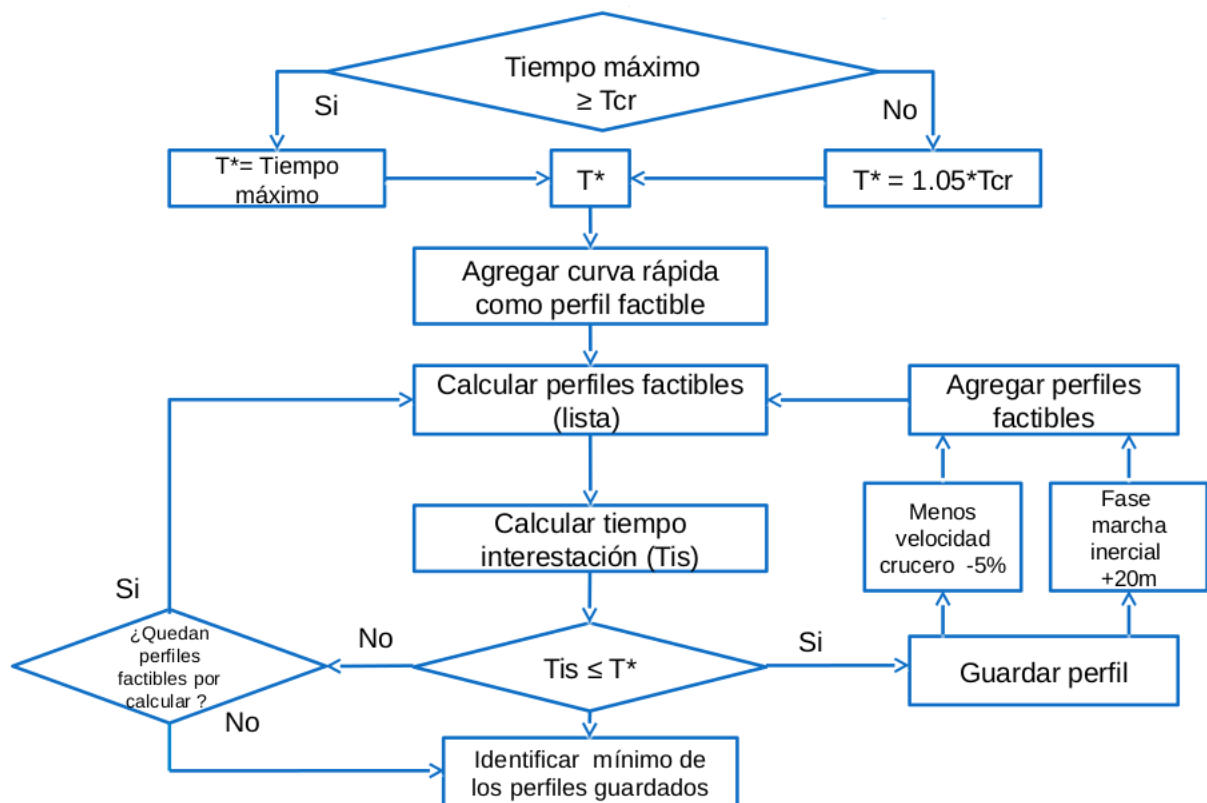


Figura 3.3: Segunda etapa algoritmo heurístico.

El algoritmo fue implementado para el estudio de la operación del Merval. Los resultados se muestran en la siguiente sección.

3.2. Algoritmo heurístico 2

El algoritmo heurístico 2, o combinatorial, fue programado para verificar las simplificaciones del primer algoritmo. En particular se estudia el orden de las fases de la marcha inercial y la re-aceleración cuando existen dos o más límites de velocidad.

El algoritmo heurístico 2 está basado en las decisiones que el conductor del tren debe tomar. Las posibilidades que tiene son acelerar, mantener la velocidad, dejar de traccionar y frenar. Se define el parámetro “metros de decisión.”^{el} cual indica cada cuantos metros el conductor cambia o mantiene el régimen en el que se encuentra.

El régimen de frenado es el primero que se calcula y no se considera frenar como una decisión en cualquier otro punto entre las dos estaciones. Por otro lado la primera decisión que debe tomar es la de acelerar para salir del reposo.

Luego de acelerar se intenta con la decisión de menor energía posible, en este caso dejar de traccionar. Si no se ha sobrepasado el tiempo máximo se mantiene la decisión. Si se ha sobrepasado el tiempo entonces la última decisión debió haber sido como mínimo mantener la velocidad.

Se prueba con mantener la velocidad, si no se ha sobrepasado el tiempo se mantiene la decisión. En caso contrario, acelerar es la opción restante. Si se acelera y no se cumple el tiempo, significa que en la última elección se debió traccionar más (mantener velocidad o aceleración).

Si ya se había acelerado se retrocede una decisión para aumentar la tracción y así sucesivamente. Finalmente si ya no se puede traccionar más se llega a la curva rápida y el ciclo termina. A medida que se itera, existen cadenas de decisión que permiten recorrer toda la distancia en el tiempo requerido. Cuando se llega a la otra estación se calcula la energía del perfil y se compara con un global. La siguiente cadena a probar es la que aumenta la tracción en la última decisión.

Los metros de decisión dividen la distancia interestación en pasos equidistantes. Como existen tres decisiones por tomar en cada paso, el número de elecciones posibles es una potencia de tres. Dada la cantidad de posibilidades y la subdivisiones del tramo, el tiempo de computo aumenta exponencialmente.

La programación del algoritmo combinatorial se hizo en *C++* dada su rapidez y la posibilidad de poder utilizar el cluster *Levque* del Centro de Modelamiento Matemático para realizar cálculos en paralelo. Cabe destacar que para resolución de un perfil óptimo de una distancia de 800 metros y decisiones cada 30 metros el tiempo de computo en un computador convencional es de 2 días, sin embargo en *Levque* se logra en 15 minutos.

A continuación se muestra la formulación matemática del algoritmo, la cual es muy similar al algoritmo anterior, mas un diagrama de bloque de los pasos de su ejecución 3.4:

$$\min E = \sum_{s=0}^S F_{TR}(d(s))v(s)\Delta t - \sum_{s=s_3}^S \alpha F_B(d(s))v(s)\Delta t \quad (3.10)$$

Con las restricciones:

$$d \in 0, 1, 2 \quad (3.11)$$

$$F_{TR}(d) = \begin{cases} 0 & \text{marcha inercial si } d = 0 \\ F_R + F_g + F_c & \text{mantener velocidad si } d = 1 \\ F_{mot} & \text{traccionar si } d = 2 \\ 0 & \text{frenar si } s \geq s_3 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$x(0) = 0, x(T) = S, \dot{x}(0) = 0 \wedge \dot{x}(S) = 0 \quad (3.13)$$

$$0 \leq t(s) \leq T^*, 0 \leq s \leq S \quad (3.14)$$

$$v(s) \leq V_{max}(x), 0 \leq s \leq S \quad (3.15)$$

$$a(s) \leq a_{max}, 0 \leq s \leq S \quad (3.16)$$

$$F_{TR}(s) \leq F_{mot}, 0 \leq s \leq S \quad (3.17)$$

$$F_B(s) \leq F_{brk}, 0 \leq s \leq S \quad (3.18)$$

$$F_{TR}(s) - F_B(s) - F_R(s) - F_g(s) - F_c(s) = (\rho M + m_{pas})\bar{v} \frac{\Delta v}{\Delta s} \quad (3.19)$$

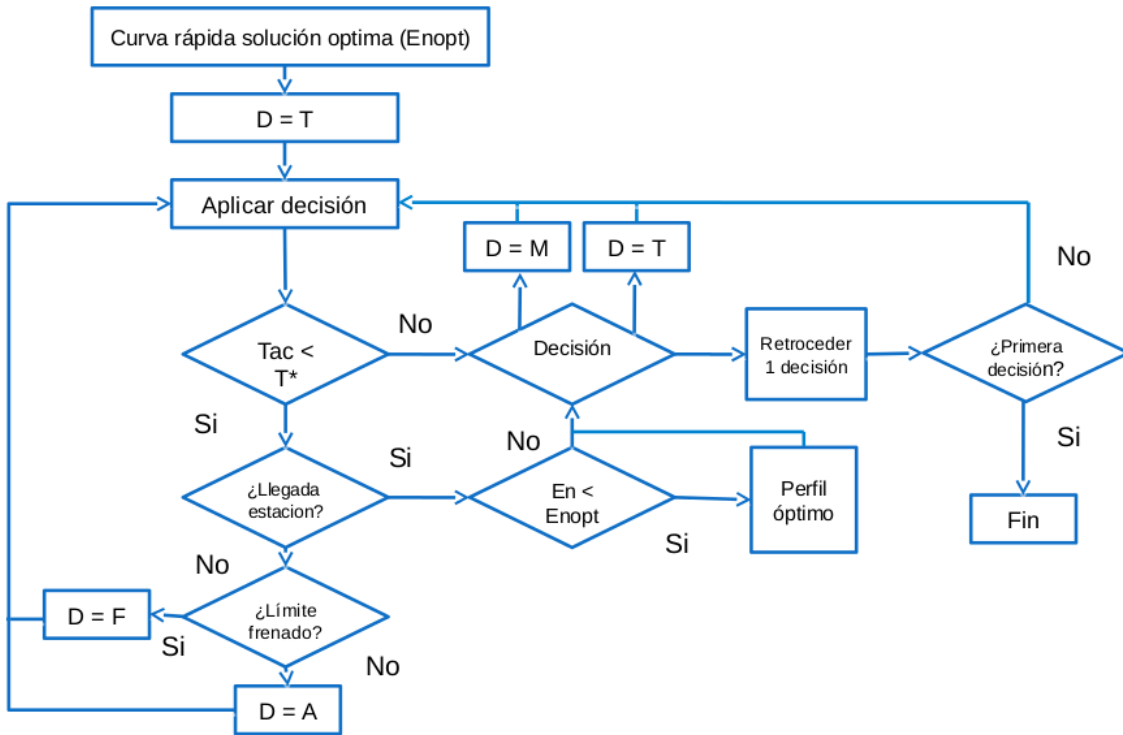


Figura 3.4: Algoritmo heurístico 2.

3.3. Modelo analítico

A diferencia de los algoritmos heurísticos, en los cuales la discretización es con incremento en distancia, en el modelo analítico se utiliza el incremento en tiempo. Para describir el sistema las variables de estado utilizadas son la posición del tren, su velocidad y su potencia mecánica. Las variables de control son el esfuerzo de tracción y el de frenado.

t	Tiempo actual
x	Posición
\dot{x}	Velocidad
\ddot{x}	Aceleración
T	Tiempo final
T^*	Tiempo requerido interestación
S	Distancia interestación
M	Masa del tren
ρ	Factor de masas rotatorias
A, B, C	Parámetros de Davis
E	Constante para radio de curvatura
g	Aceleración de gravedad
$i(x)$	Pendientes y gradientes de la vía
$r(x)$	Radio de curvatura de las curvas de la vía
m_{pas}	Masa pasajeros
$u_t(\dot{x})$	Esfuerzo de tracción
$u_{Tmax}(\dot{x})$	Esfuerzo máximo de tracción
$u_b(\dot{x})$	Esfuerzo de frenado
$u_{Bmax}(\dot{x})$	Esfuerzo máximo de frenado
$V_{max}(x)$	Límites de velocidad
$\alpha(\dot{x})$	Factor de recuperación de energía en frenado
a_{max}	Aceleración máxima permitida

De esta manera, el problema de optimización de minimización del consumo de energía del tren entre dos estaciones se define como:

$$\text{mín } Q = \int_0^T (u_t - \alpha u_b) \dot{x} dt \quad (3.20)$$

Sujeto a:

$$(\rho M + m_{pas}) \ddot{x} = u_t(\dot{x}) - u_b(\dot{x}) - (A + B\dot{x} + C\dot{x}^2) - i(x)(M + m_{pas})g - E(M + m_{pas})g/r(x) \quad (3.21)$$

$$x(0) = 0, x(T) = S, \dot{x}(0) = 0, \dot{x}(S) = 0 \quad (3.22)$$

$$u_t \leq u_{Tmax} \quad (3.23)$$

$$u_b \leq u_{Bmax} \quad (3.24)$$

$$T \leq T^* \quad (3.25)$$

$$\dot{x} \leq V_{max}(x) \quad (3.26)$$

$$\ddot{x} \leq a_{max} \quad (3.27)$$

La Ecuación (3.20) muestra el funcional a minimizar, este representa la energía total consumida por el tren entre dos estaciones. Fuerza por velocidad equivale a potencia e integrado por el tiempo se obtiene la energía. El primer valor dentro de la integral u_t corresponde al esfuerzo de tracción, el segundo u_b el de frenado, el cual está multiplicado por α dando cuenta de la posibilidad de recuperar energía mediante frenado regenerativo.

La dinámica del sistema (3.21) considera el factor de las masas rotatorias mas la masa de pasajeros como masa dinámica. En el lado derecho se tiene la fuerza de tracción y frenado, la resistencia al rodado, la fuerza en gradiente y en curva.

Las condiciones iniciales (3.22) son posición y velocidad cero. En el tiempo final, se debe tener posición igual a distancia interestación y velocidad cero.

Los esfuerzos de tracción y frenado máximos están limitados por las características de los equipos tractores o coches motrices del tren según (3.23) y (3.24).

Las restricciones representadas por (3.25) son el tiempo máximo interestación, (3.26) los límites de velocidad dependientes de la posición del tren en la vía y (3.27) la máxima aceleración permitida.

La complejidad del sistema, dada por la resolución de las ecuaciones diferenciales de la dinámica no son simples de programar. Para esto se ha utilizado el software de código abierto BOCOP [20], programado por el Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automatización (INRIA) ubicado en Francia.

3.4. Modelación eléctrica

Para conocer la operación global del sistema desde el punto de vista eléctrico, se modelan las vías como un circuito eléctrico. En el caso de Merval este resulta ser una red en corriente continua de 3000V donde la energía se entrega mediante las subestaciones, transmitida por las catenarias y se consume por los trenes en movimiento.

El modelo eléctrico está basado en lo expuesto en [18], en la cual se resuelve mediante en análisis nodal de la red obteniendo un perfil de tensión en toda la vía. Cabe señalar que este modelo no está incorporado en la herramienta OSIRIS.

3.4.1. Subestaciones

Conocida la tensión en vacío de la subestación V_o y su resistencia interna R_s , se transforma la subestación en su equivalente de Norton quedando modelada como una fuente de corriente con la resistencia interna en paralelo.

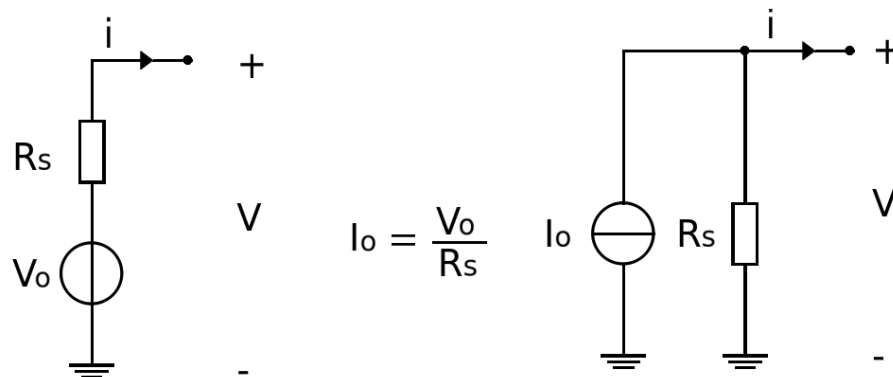


Figura 3.5: Equivalente de Norton para las subestaciones.

3.4.2. Catenarias

Las vías se modelan como una resistencia, son las porciones de vía que unen las subestaciones con los trenes y entre trenes. Los valores de estas porciones dependen de las posiciones de los trenes las que definen las resistencias que unen los nodos de tensión a calcular.

3.4.3. Trenes

Los trenes en sus procesos de tracción requieren potencia suministrada por la red. Dado los perfiles de velocidad y los esfuerzos de tracción, se calculan las corrientes necesarias. Así los trenes quedan modelados como fuentes de corriente denotando su consumo.

3.4.4. Modelo de operación

En intervalo de explotación T indica cada cuanto tiempo sale un tren desde su origen. El tiempo de vuelta T_v corresponde a cuanto se demora el tren en recorrer toda la línea partiendo desde la primera estación en la vía 1 hasta su regreso a la misma estación por la vía 2. En este tiempo se consideran los tiempos de detención en las estaciones intermedias. Con estos dos parámetros se calcula el número de trenes en la línea N_{TL} a partir de:

$$N_{TL} = \frac{T_v}{T} \quad (3.28)$$

La vía se llena con el número de trenes equidistantes temporalmente en el intervalo de explotación, definiendo así los nodos sobre los cuales se calcularán las tensiones.

La resolución del sistema consiste en resolver la red eléctrica segundo a segundo hasta completar el intervalo de explotación, de este modo se ha recorrido toda la vía con los trenes.

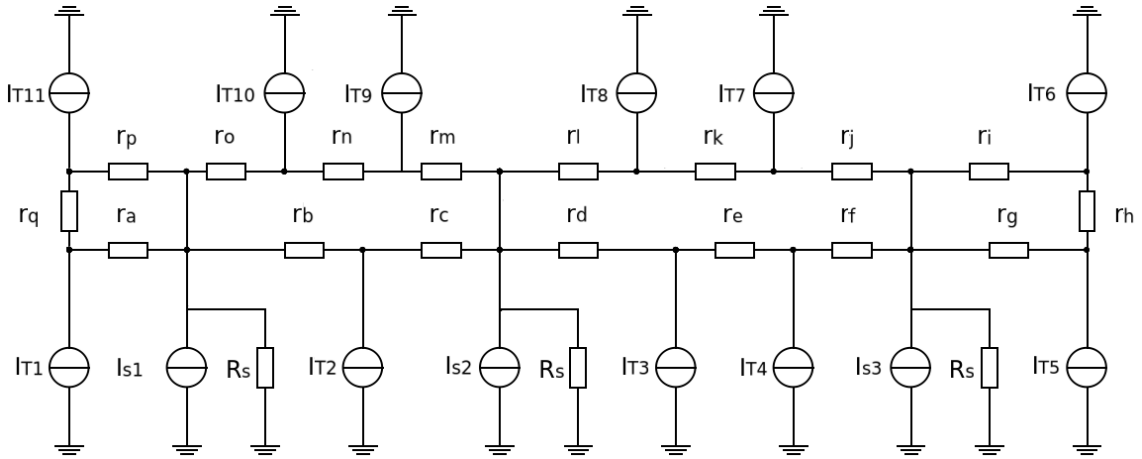


Figura 3.6: Red en corriente continua para análisis nodal.

Las subestaciones están representadas por fuentes de corriente I_s con su resistencia interna R_s . Los trenes son las fuentes de corriente rotuladas como I_T y las resistencias r_x corresponden a la catenaria.

Para los cálculos de la tensión se genera la matriz de admitancias dada por las resistencias entre elementos de la red y las conectadas a cada nodo, como se muestra en la Figura (3.6). Como son conocidas las corrientes que inyectan las subestaciones (dada por el equivalente de Norton) y las corrientes requeridas por los trenes se puede resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$[G] * [V] = [I] \Rightarrow [V] = [G]^{-1} * [I] \quad (3.29)$$

La matriz $[G]$ representa la matriz de admitancias, $[I]$ el vector de corrientes y $[V]$ el vector de tensiones incógnito a determinar. Dada la naturaleza del problema, se programó una rutina en MATLAB para la resolución matricial del sistema lineal de ecuaciones.

El vector V que corresponde a las tensiones de los nodos, mediante su análisis y posteriores cálculos adicionales permite obtener varios resultados de interés de la red. En el estudio del impacto de la curvas de velocidad óptima se han elegido tres: El perfil de tensiones mínimas, las potencias instantáneas suministradas por cada subestación y las pérdidas en las catenarias.

3.4.4.1. Perfil de tensiones mínimas

Por cada intervalo de explotación aparecen las tensiones en cada uno de los nodos de la red. Se necesita conocer el mínimo valor que llegan a tomar estos nodos, de esta forma se verifica si los trenes pueden operar dadas las caídas de tensión en la línea. Por ejemplo para una vía energizada en 3000V, la tensión mínima que debe tener un tren en su operación es de 2000V [19].

3.4.4.2. Potencias instantáneas de cada subestación

Es de interés conocer la potencia instantánea suministrada por cada subestación, ya que se pueden reconocer los *peaks* de potencia. Estas subidas de potencia sobrecargan las subestaciones sobre sus valores nominales, los cuales pueden ser sobrepasados por instantes de tiempo, pero no permanentemente.

También son de importancia dada la tarificación eléctrica del operador ferroviario. Dependiendo de los contratos de compra de energía, se paga por la potencia, aplicando un margen mayor si se pasan de los valores estipulados.

Para el cálculo, la tensión en Vacío V_o , la resistencia interna R_s y la tensión asociada al nodo de la subestación V_{sub} permiten calcular la corriente y la potencia instantánea suministrada por cada subestación:

$$I_{sub} = \frac{V_o}{R_s} - \frac{V_{sub}}{R_s} \quad (3.30)$$

$$P = V_o \cdot I = V_o \cdot \left(\frac{V_o}{R_s} - \frac{V_{sub}}{R_s} \right) \quad (3.31)$$

Analizando los valores de P para cada segundo, se pueden ver cuales se exceden de los límites permitidos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Algoritmo heurístico

4.1.1. Caso Merval

Para la validación del modelo se utilizó el estudio de la operación del Merval de un día completo, entre las 6:00 hasta las 23:00. Se tomaron los datos proporcionados por Merval para la simulación: La carga de pasajeros, el tiempo máximo entre estaciones, la topografía de la vía y las características del tren, las cuales pueden ser vistas en los anexos. Dentro de los parámetros utilizados para la simulación se encuentran:

Tabla 4.1: Parámetros simulación Merval.

Masa tren	79[ton]
Factor de las masas rotatorias	1.06
Esfuerzo máximo de tracción	22[kN/motor]
Esfuerzo máximo de frenado	21[kN/motor]
Número de motores	4
Potencia	720 [kW]
Velocidad máxima	120[km/h]
Resistencia al rodado	$1814.4 + 16.94 \cdot v + 0.57 \cdot v^2$ [N]
Largo del tren	49 [m]
Aceleración máxima	0.76[m/s ²]
Energía recuperada en frenado	5%

En la operación de Merval se tienen dos tipos de trenes, simples y dobles. Los simples corresponden a un coche motriz y un remolque, el doble es un tren conformado por dos simples acoplados. Diariamente se hacen alrededor de 200 viajes los cuales 30 se hacen con trenes dobles. Los trenes dobles se utilizan de 6:00 a 9:30 y por la tarde de 17:30 a 20:00.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las curvas de velocidad para un tren simple con inicio de marcha a las 8:00 en ambos sentidos (Figuras 4.1 y 4.2). En rojo se muestran los límites máximos de velocidad, en azul las curvas rápidas y en verde la curvas óptimas calculadas con el algoritmo heurístico. Además se ilustra la altura de la vía entre la estaciones de inicio y término.

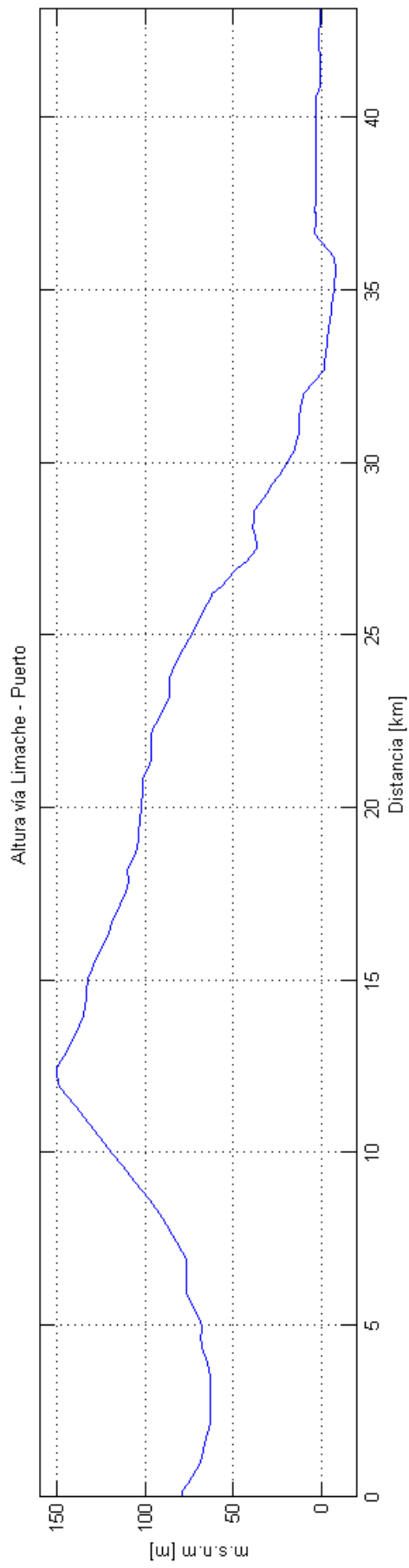
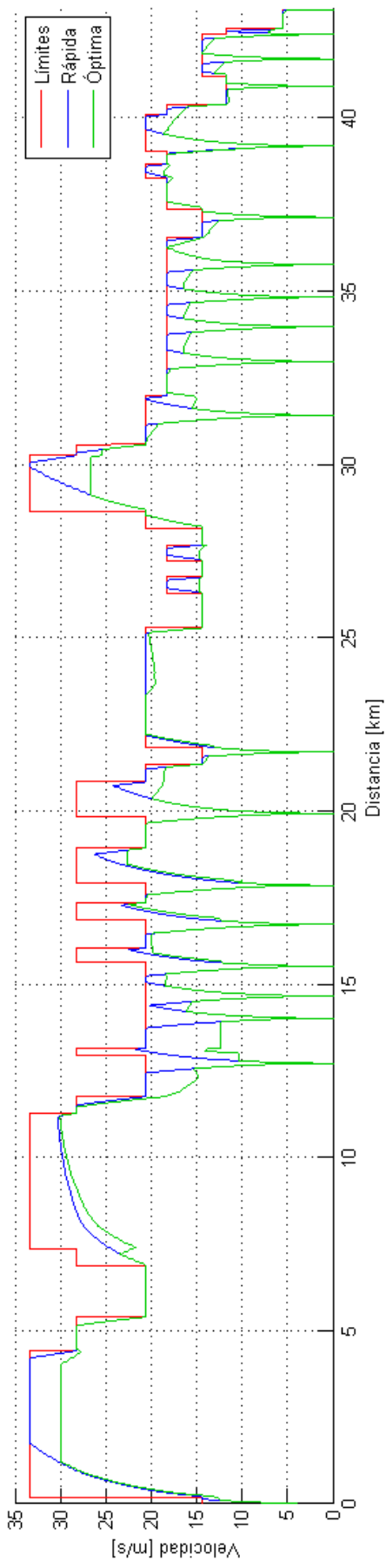


Figura 4.1: Resultados Puerto-Limache 8:00.

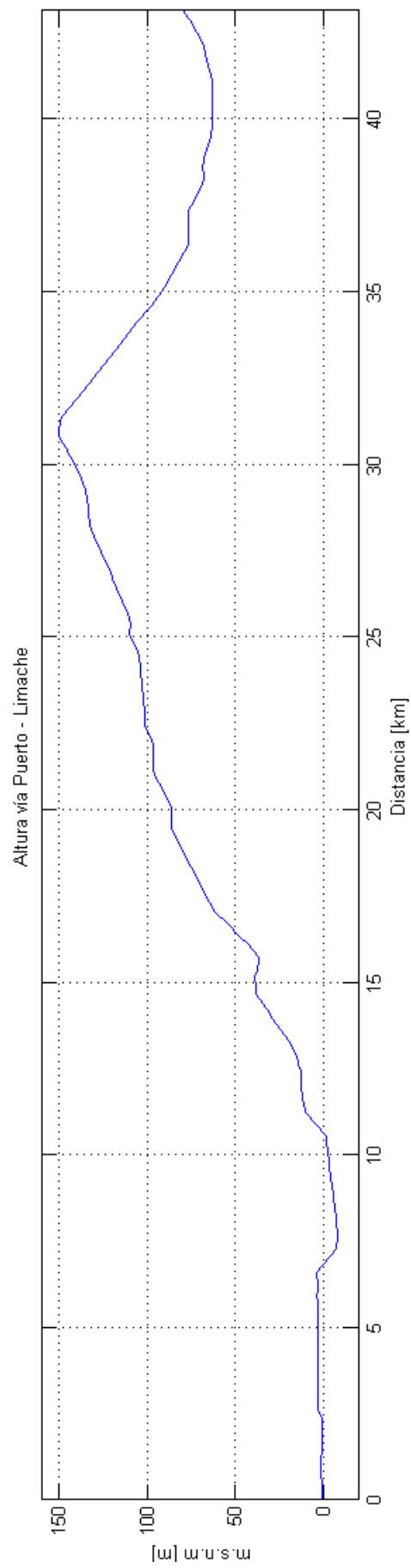
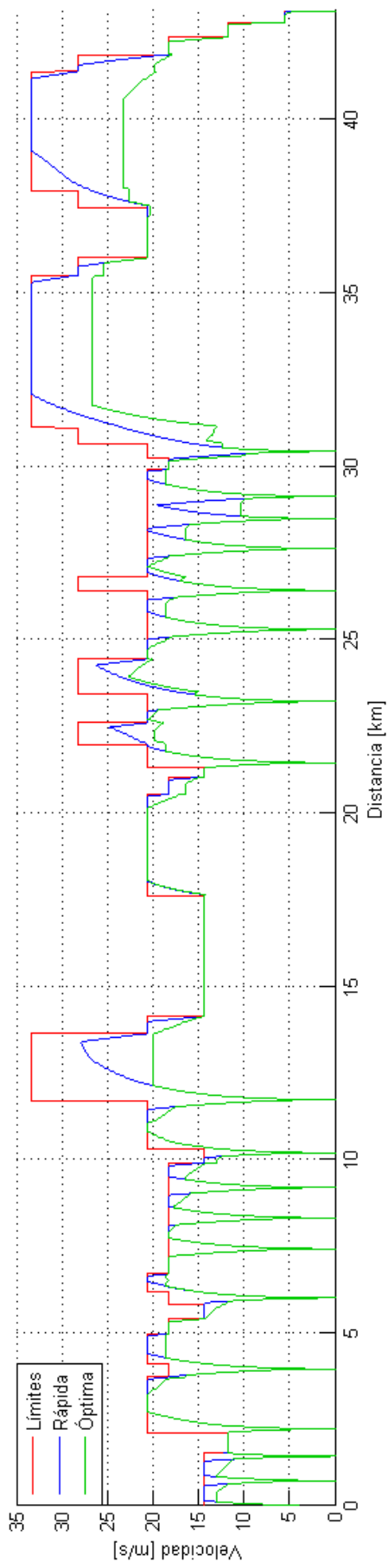


Figura 4.2: Resultados Limache-Puerto 8:00.

En las Tablas de las Figuras (4.3) y (4.4) se muestran los detalle de cada uno de los viajes interestación con los tiempos de operación de Merval, los de las curvas rápidas y óptimas. También se añaden las energías consumidas y las variaciones porcentuales. El indicador $1 - \frac{E_{co}}{E_{cr}}$ da cuenta de la reducción porcentual de energía comparando la curva rápida con la óptima.

Origen	Destino	Tiempo Merval	Tiempo rápido	Tiempo óptimo	Diferencia Tcr [%]	Energía curva rápida [kWh]	Diferencia T* [%]	Energía curva óptima [kWh]	1 - Eco/Ecr [%]
Puerto	Bellavista	01:14	01:09	01:14	-6,4	3,3	-0,4	2,4	25,46
Bellavista	Francia	01:14	01:08	01:14	-8,1	3,2	-0,6	2,2	30,41
Francia	Barón	01:23	01:23	01:23	-0,1	2,8	0,0	2,6	6,05
Barón	Portales	01:55	01:53	01:55	-1,4	8,2	0,0	7,3	11,29
Portales	Recreo	02:18	02:20	02:26	1,5	8,7	6,1	6,9	20,90
Recreo	Miramar	01:43	01:41	01:43	-1,8	6,2	-0,4	5,1	18,01
Miramar	Víña del Mar	01:14	01:14	01:14	-0,3	5,2	-0,1	4,9	6,12
Víña del Mar	Hospital	01:15	01:13	01:15	-2,7	5,5	-0,4	4,5	18,48
Hospital	Chorillos	01:28	01:22	01:28	-6,6	5,9	-0,4	4,2	29,37
Chorillos	El Salto	01:47	01:44	01:46	-2,8	10,7	-1,1	9,3	12,77
El Salto	Quilpué	09:58	09:34	09:57	-4,0	48,1	-0,1	40,1	16,56
Quilpué	El Sol	01:52	01:52	01:58	0,2	11,4	5,2	8,6	24,65
El Sol	El Belloto	02:03	02:05	02:11	1,7	13,1	6,4	9,0	31,53
El Belloto	Las Américas	01:27	01:24	01:27	-3,4	8,1	-0,5	6,9	15,64
Las Américas	La Concepción	01:31	01:28	01:31	-3,2	8,7	-0,3	7,6	12,86
La Concepción	Villa Alemana	01:15	01:12	01:15	-4,6	7,1	-0,1	5,2	26,98
Villa Alemana	Sargento Aldea	01:17	01:00	01:16	-22,0	5,4	-1,2	2,2	60,33
Sargento Aldea	Peñablanca	01:33	01:34	01:39	1,2	8,7	6,0	7,6	12,66
Peñablanca	Limache	10:56	09:14	10:56	-15,5	39,1	0,0	20,8	46,79
Total		47:23	44:31	47:45	-6,1	209,4	0,8	157,3	24,9

Figura 4.3: Resultados interestación Puerto-Limache 8:00 AM.

Origen	Destino	Tiempo Merval	Tiempo rápido	Tiempo óptimo	Diferencia Tcr [%]	Energía curva rápida [kWh]	Diferencia T* [%]	Energía curva óptima [kWh]	1 - Ecr/Eco [%]
Limache	Peñablanca	08:58	08:29	08:58	-5,5	62,9	0,0	56,0	11,11
Peñablanca	Sargento Aldea	02:05	01:30	02:04	-27,6	5,0	-0,8	2,0	59,68
Sargento Aldea	Villa Alemana	00:53	00:59	01:02	11,9	4,9	16,1	3,1	37,40
Villa Alemana	La Concepción	01:07	01:10	01:12	4,7	5,4	7,0	4,3	20,48
La Concepción	Las Américas	01:21	01:26	01:29	6,5	5,8	10,1	4,4	24,48
Las Américas	El Belloto	01:21	01:22	01:25	1,3	6,5	5,0	5,9	9,51
El Belloto	El Sol	01:56	02:06	02:11	8,5	10,7	12,6	8,3	22,06
El Sol	Quilpué	01:43	01:58	02:04	14,5	9,5	20,2	5,9	37,32
Quilpué	El Salto	09:14	08:53	09:14	-3,7	25,2	-0,1	15,9	37,02
El Salto	Chorillos	01:48	01:49	01:54	1,0	6,4	5,4	4,4	30,97
Chorillos	Hospital	01:15	01:20	01:24	6,9	5,5	11,9	4,2	23,64
Hospital	Víña del Mar	01:04	01:12	01:15	12,5	5,2	16,8	3,9	24,08
Víña del Mar	Miramar	01:11	01:17	01:20	8,0	5,4	12,9	4,1	24,44
Miramar	Recreo	01:43	01:48	01:52	5,1	9,1	8,6	7,1	21,99
Recreo	Portales	02:20	02:17	02:20	-1,9	9,5	-0,2	8,3	12,70
Portales	Barón	01:59	02:10	02:15	9,3	7,6	13,9	5,2	31,40
Barón	Francia	01:21	01:18	01:21	-3,6	3,8	0,0	2,9	22,13
Francia	Bellavista	01:08	01:08	01:09	0,1	3,3	1,9	2,9	14,11
Bellavista	Puerto	02:00	02:08	02:13	6,4	2,1	11,1	1,0	53,88
Total		44:27	44:21	46:41	-0,2	193,6	5,0	149,6	22,7

Figura 4.4: Resultados interestación viaje Limache-Puerto 8:00 AM.

En el sentido Puerto – Limache se aprecia que la diferencia entre el tiempo dado por Merval y la curva rápida es de un 8,72 % lo que indica que la operación real no está cerca de funcionar al menor tiempo posible. Con la curva óptima esta diferencia es de un 0,44 %, lo cual indica que el resultado obtenido representa ,con poco error asociado, la operación de Merval.

En el sentido Limache – Puerto ocurre lo contrario, la diferencia con la curva rápida es tan solo un -0,55 % por lo cual la operación se asemeja a este perfil de velocidad e incluso en algunos viajes inter-estación el tiempo de Merval es menor al de la curva rápida. Si el tiempo de Merval es menor que la curva rápida, algunos límites de velocidad impuestos por la vía en dicho sentido no están siendo tomados en cuenta, pero solo por un par de segundos.

Cabe destacar que si el tiempo de la curva rápida es mayor al proporcionado por los datos de operación, el algoritmo de optimización fija el tiempo requerido interestación en un 5 % más sobre el tiempo de la curva rápida. De este modo se tiene un margen de tiempo para el ahorro de energía. Esta consideración explica las diferencias porcentuales entre el tiempo de Merval y el tiempo óptimo, valor que en el resultado total es de un 5.1 %.

Una manera de comprobar la validez de los resultados, es comparar cuanto energía del consumo total de la operación del sistema corresponde a la empleada en tracción. Parte del software desarrollado en el CMM permite conocer al usuario cuanto porcentaje de la energía total es gastada en cada requerimiento, ya sea en las estaciones, en la vía y en los trenes.

En la Figuras (4.5), (4.6), (4.7) y (4.8) se muestran los desgloses de las energías totales consumidas por Merval y la consumida en trenes durante un día de operación, utilizando la curva rápida y la curva óptima.

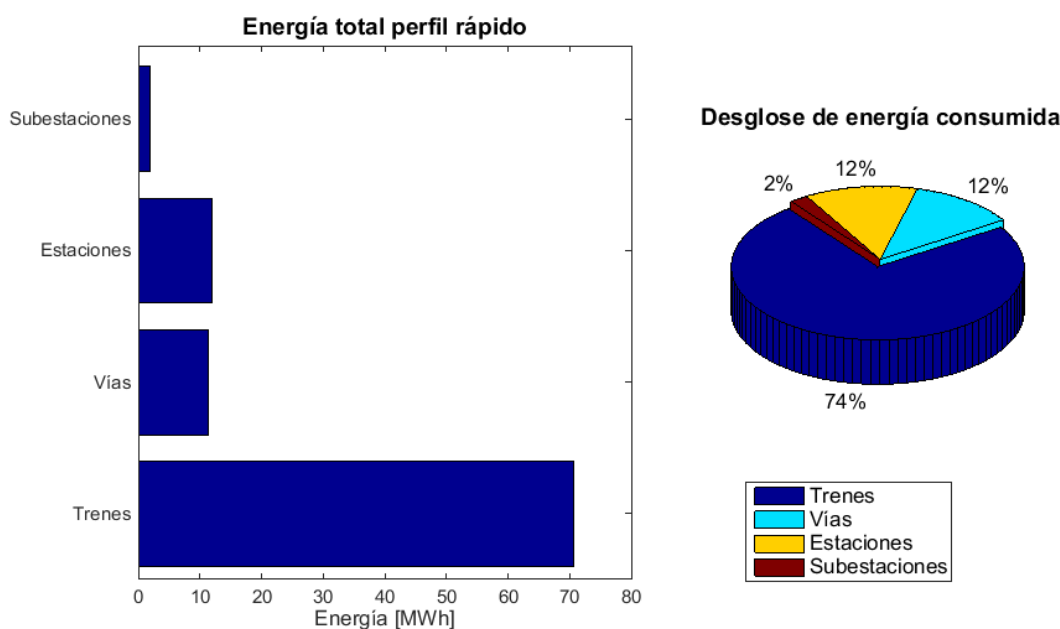


Figura 4.5: Consumo total de energía con perfil rápido.

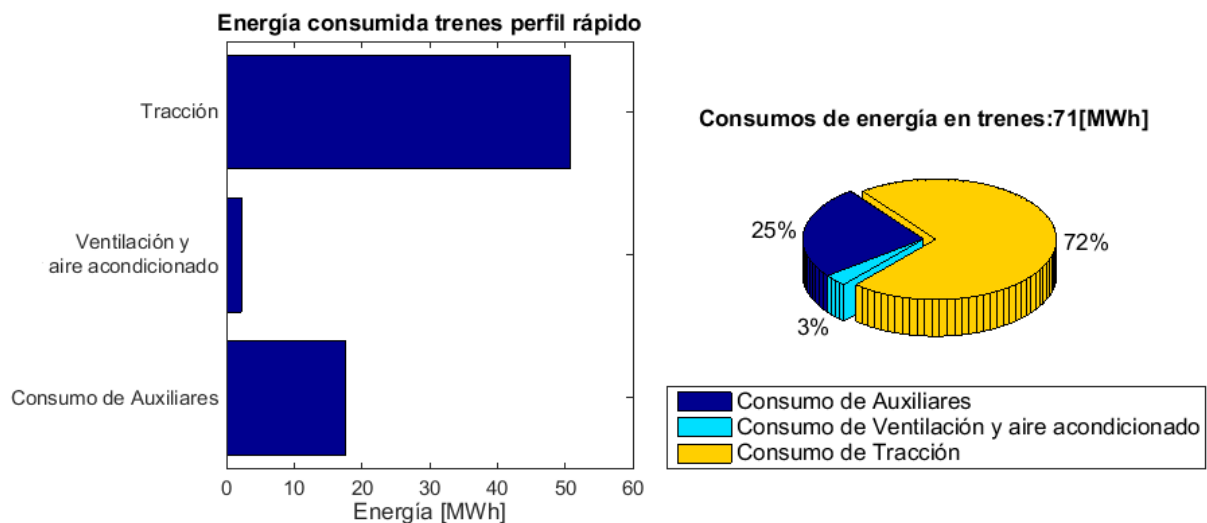


Figura 4.6: Consumo en trenes con perfil rápido.

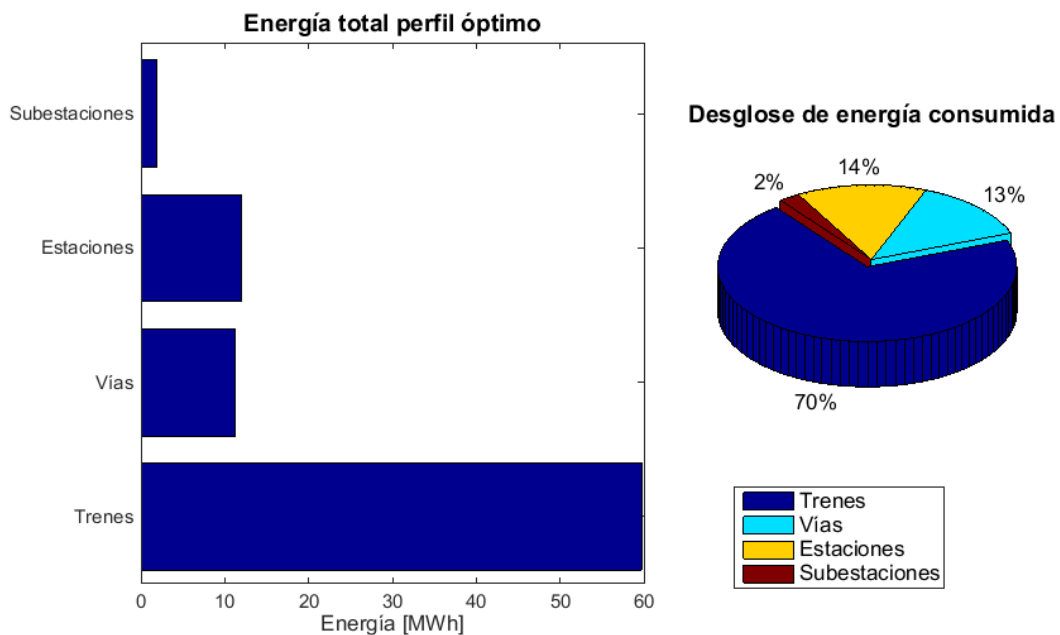


Figura 4.7: Consumo total de energía con perfil óptimo.

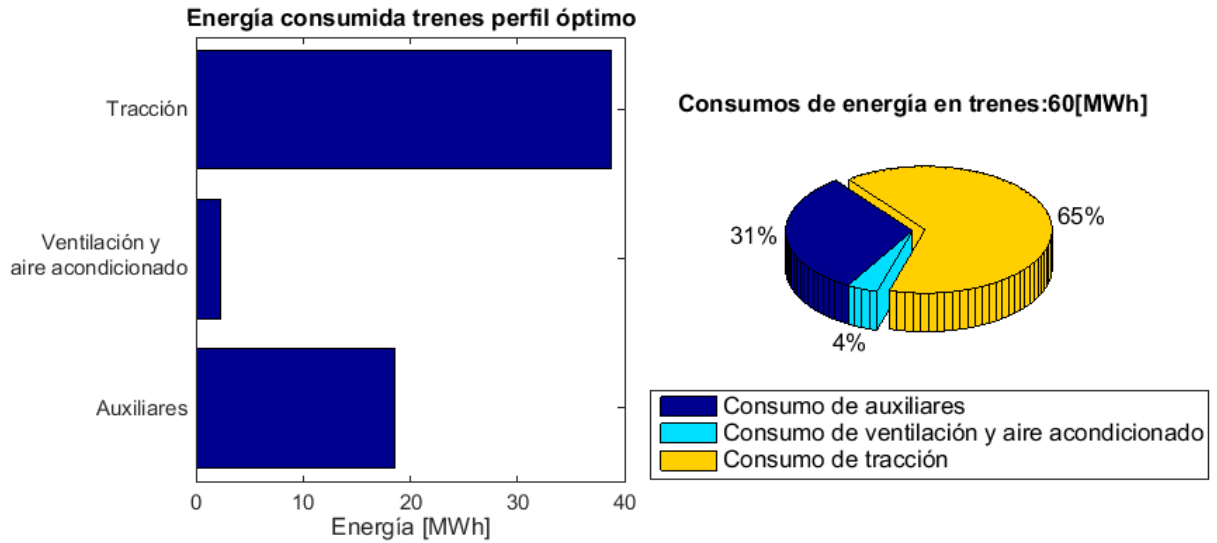


Figura 4.8: Consumo en trenes con perfil óptimo.

Se aprecia que el porcentaje de la energía utilizada en trenes corresponde alrededor del 74 % para el perfil rápido y un 70 % para el óptimo, dando cuenta de la reducción del consumo. En tracción se tienen 51.1 MWh y 39 MWh, lo cual corresponde a un 22 % de reducción del consumo de energía en tracción. En la Tabla (4.1.1) se detallan los valores para cada perfil de velocidades.

Tabla 4.2: Energías consumidas por cada perfil.

Perfil / Consumo	Total [MWh]	Trenes [MWh]	Tracción [MWh]	Tracción del total [%]
Rápido	94.5	71	51.1	54.1
Óptimo	85.7	60	39	45.5

4.1.2. Casos para comparación

Para la comparación de este algoritmo con respecto a los otros se han realizado dos casos bases. El primero con un límite de velocidad y el segundo con dos. Se utilizó el tren simple para el estudio de caso de Merval. Los parámetros de los dos casos son los siguientes:

Tabla 4.3: Parámetros caso 1: Un límite de velocidad.

Masa tren	79[ton]
Masa pasajeros	7500[ton]
Factor de masas rotatorias	1.06
Distancia interestación	800[m]
Velocidad máxima	70[km/h]
Tiempo adicional respecto curva rápida	5 %
Aceleración máxima	1[m/s]
Energía recuperada en frenado	10 %

Tabla 4.4: Parámetros caso 2: Dos límites de velocidad.

Masa tren	79[ton]
Masa pasajeros	7500 [ton]
Factor de masas rotatorias	1.06
Distancia interestación	1200[m]
Velocidad máxima 1	50[km/h] de 0 a 600[m]
Velocidad máxima 2	70[km/h] de 600 a 1200[m]
Tiempo adicional respecto curva rápida	5 %
Aceleración máxima	1[m/s]
Energía recuperada en frenado	10 %

Se tiene el valor de la aceleración máxima tanto para tracción y frenado. Por otro lado para el segundo caso el comienzo de la sección con límite de velocidad 70 km/h, comienza realmente a los 650 m debido a la longitud del tren.

Para el algoritmo heurístico, los resultados de dichos casos se muestran a continuación:

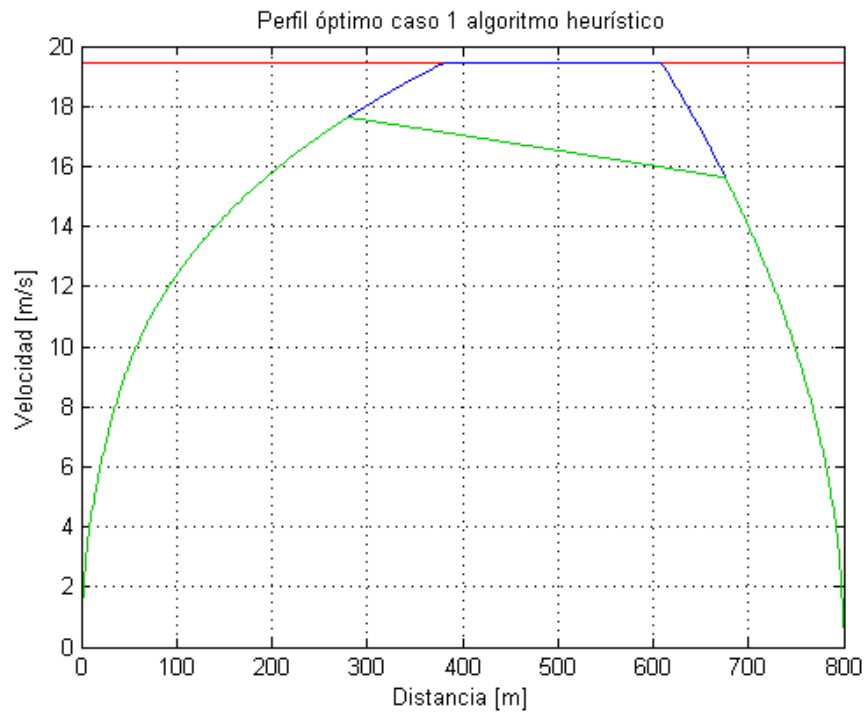


Figura 4.9: Resultados caso 1, algoritmo heurístico.

Tabla 4.5: Resultados caso 1, algoritmo heurístico.

Tiempo final	66.68[s]
Energía	4.07[kWh]

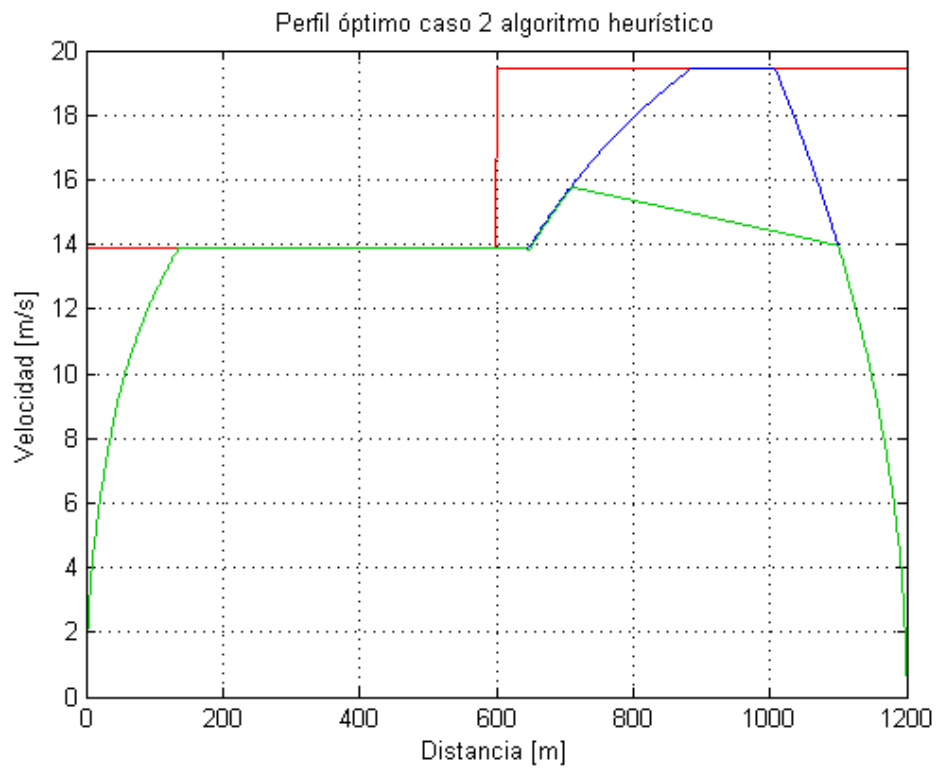


Figura 4.10: Resultados caso 2, algoritmo heurístico.

Tabla 4.6: Resultados caso 2, algoritmo heurístico.

Tiempo final	99.42[s]
Energía	3.90[kWh]

4.2. Algoritmo heurístico 2

Para el estudio de las simplificaciones utilizadas en el algoritmo heurístico se probaron los dos casos previamente descritos en la sección anterior. El primero permite ver si el régimen de aceleración, velocidad crucero, marcha inercial y frenado es el mejor para reducir el consumo de energía. En el segundo caso se quiere comprobar si acelerar cuando se entra en una sección con un límite de velocidad mayor conviene acelerar inmediatamente o esperar un poco.

Las Figuras (4.11) y (4.12) muestran los resultados de ambos casos calculados con el algoritmo heurístico 2. En rojo se tienen los límites de velocidad, en azul la curva rápida y en verde el perfil óptimo. Los metros de desición utilizados fueron de 30 y 50 metros para el caso 1 y para el caso 2 respectivamente.

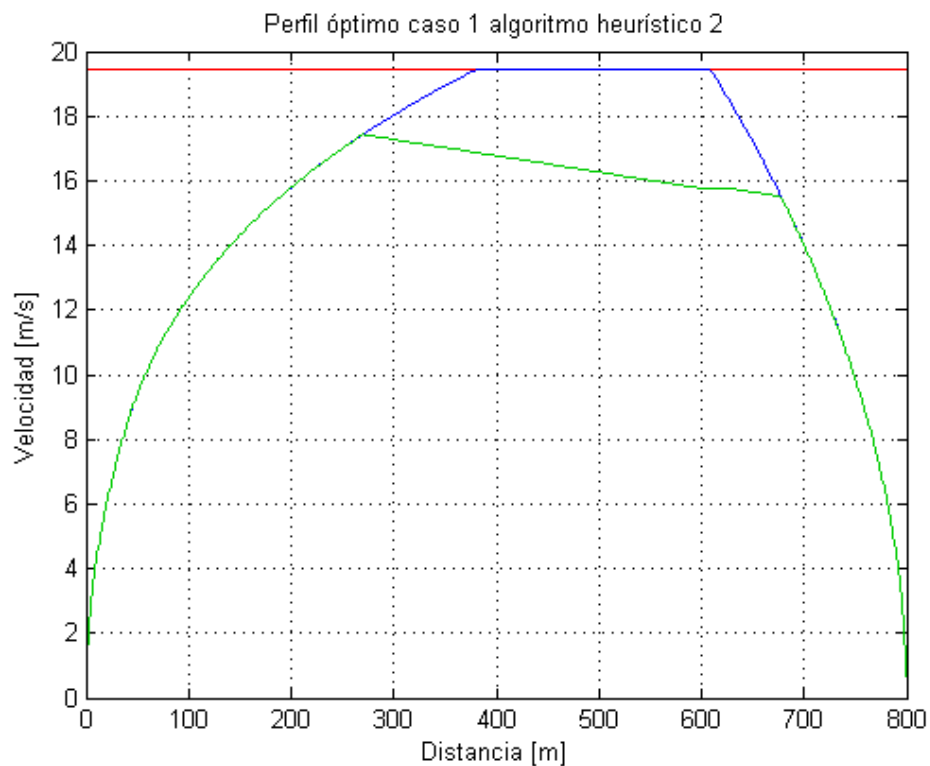


Figura 4.11: Resultados caso 1, algoritmo heurístico 2.

Tabla 4.7: Resultados caso 1, algoritmo heurístico 2.

Tiempo final	66.68[s]
Energía	4.07[kWh]

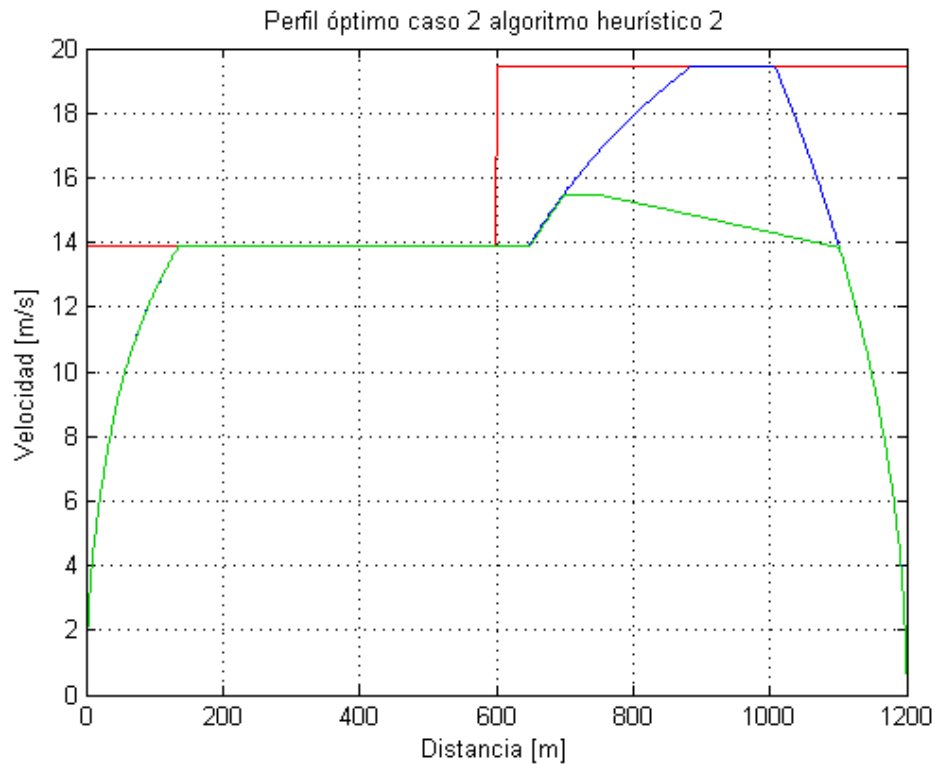


Figura 4.12: Resultados caso 2, algoritmo heurístico 2.

Tabla 4.8: Resultados caso 2, algoritmo heurístico 2.

Tiempo final	67[s]
Energía	4.09[kWh]

Para el primer caso se probó con un tiempo de marcha del 5% sobre el tiempo de la curva rápida. Se puede ver como el perfil de velocidad sigue la propuesta de la marcha, pese a que no se distinga la fase de mantención de velocidad.

En el segundo caso se llega a la velocidad límite de la primera sección, luego se avanza con velocidad constante hasta la segunda sección para luego volver a acelerar. Desde el punto de inicio de la segunda sección comienza una etapa de aceleración hasta llegar a una fase corta de velocidad crucero para luego apagar los motores y finalmente frenar.

Sobre la base de estos resultados obtenidos para el algoritmo heurístico 2, se puede concluir que las simplificaciones utilizadas en el primer algoritmo son aceptables y que no están lejos de una solución óptima más precisa.

4.3. Modelo analítico

El software BOCOP, a diferencia de los algoritmos heurísticos, utiliza la discretización en tiempo para sus cálculos y la definición de funciones continuas para el desarrollo de las ecuaciones diferenciales dadas por la ecuación de movimiento. Para incorporar la curva esfuerzo-velocidad de los motores de tracción, se aproximó mediante un polinomio de orden 5 la característica de tracción. Si bien la aproximación es satisfactoria, añade un consumo de potencia mayor, dado las diferencias al ajustar dicha curva donde sobrepasa el esfuerzo máximo. Estos valores sobrepasados no son considerablemente altos, por lo que se tendrá un consumo de energía total ligeramente mayor.

La Figura (4.13) muestra el perfil óptimo. Adicionalmente en la Figura (4.14) se aprecian las variables de estado (velocidad y energía acumulada), además de las variables de control (porcentaje de tracción y frenado). Pese a que han sido calculadas con discretización del tiempo, se mostraron en función de la distancia para luego realizar comparaciones entre algoritmos. En la Tabla (4.9), se muestran los resultados del caso con un límite de velocidad.

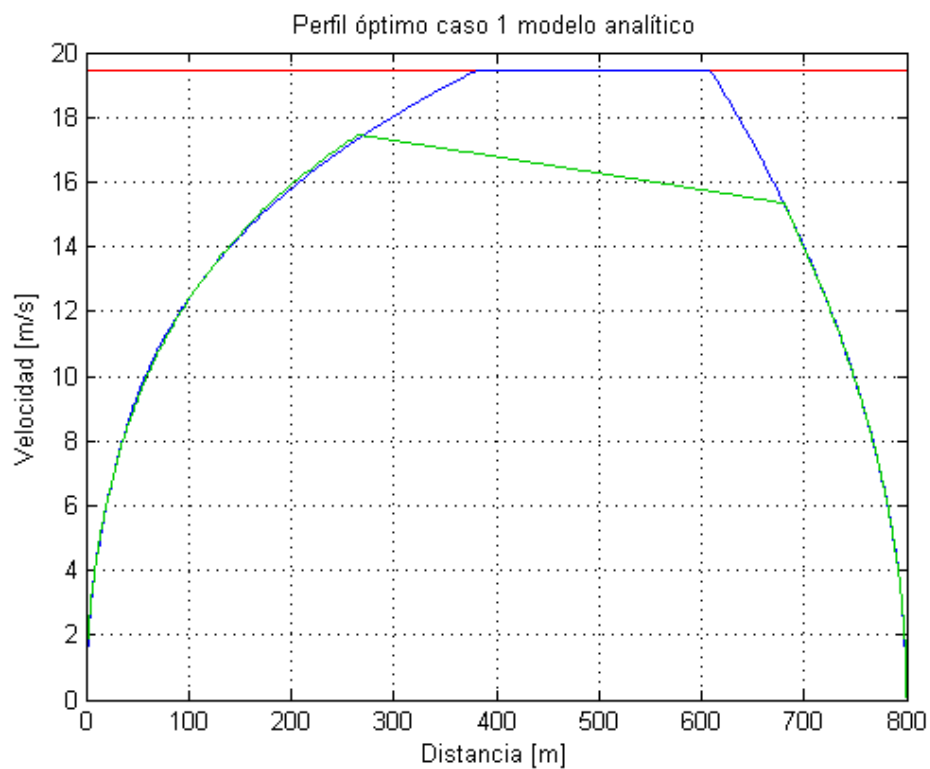


Figura 4.13: Resultados caso 1, modelo analítico.

Tabla 4.9: Resultados caso 1, modelo analítico.

Tiempo final	67[s]
Energía	4.09[kWh]

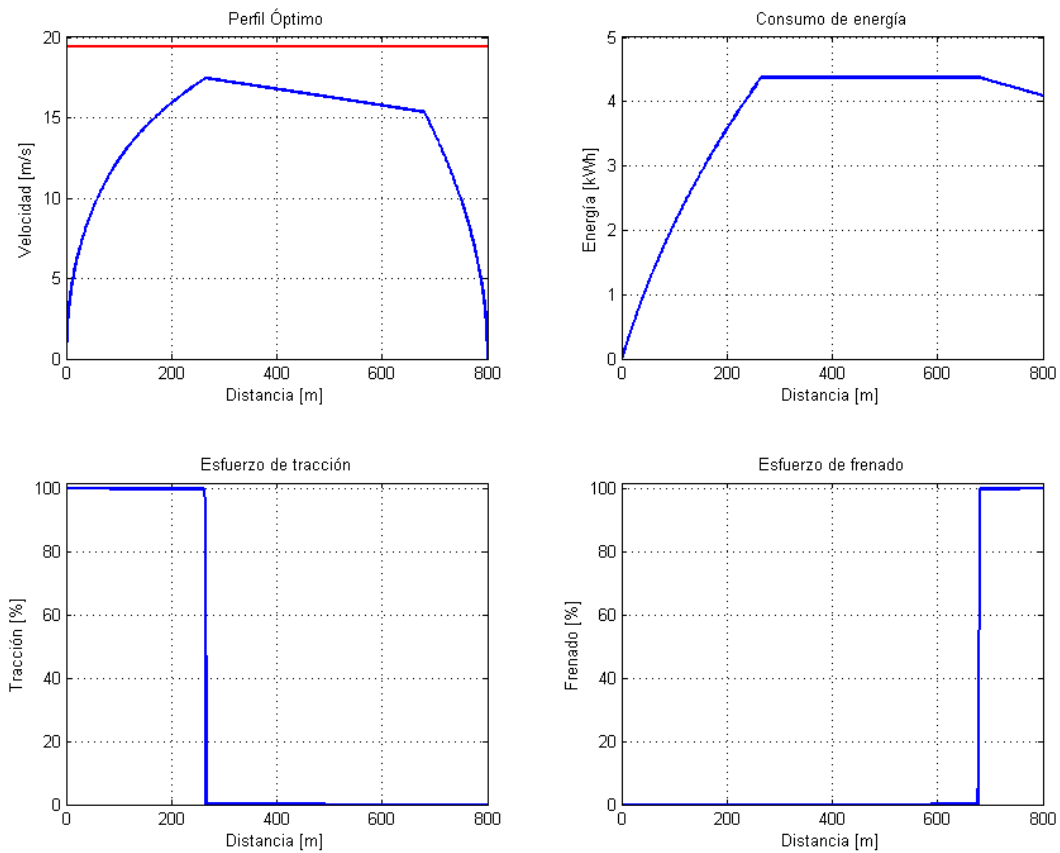


Figura 4.14: Variables de estado y control caso 1, modelo analítico.

El perfil de velocidad muestra aceleración con tracción al 100 % hasta los 265 metros, luego se realiza marcha inercial hasta los 680 metros para finalmente frenar con toda la capacidad desde ese punto. Es importante destacar el valor de las variables de control, las cuales muestran que la estrategia óptima se acelera y frena al 100 %. Por otro lado, mientras una toma un valor distinto de cero la otra es cero.

Observando la energía consumida, se aprecia como aumenta durante la aceleración, se mantiene en marcha inercial y luego decrece dada la regeneración.

En la Figuras (4.15) y (4.16) se muestran los resultados para el caso con dos límites de velocidad (perfil óptimo, variables de estado y control respectivamente). En la Tabla (4.10), el tiempo final y la energía consumida del caso con dos límites de velocidad.

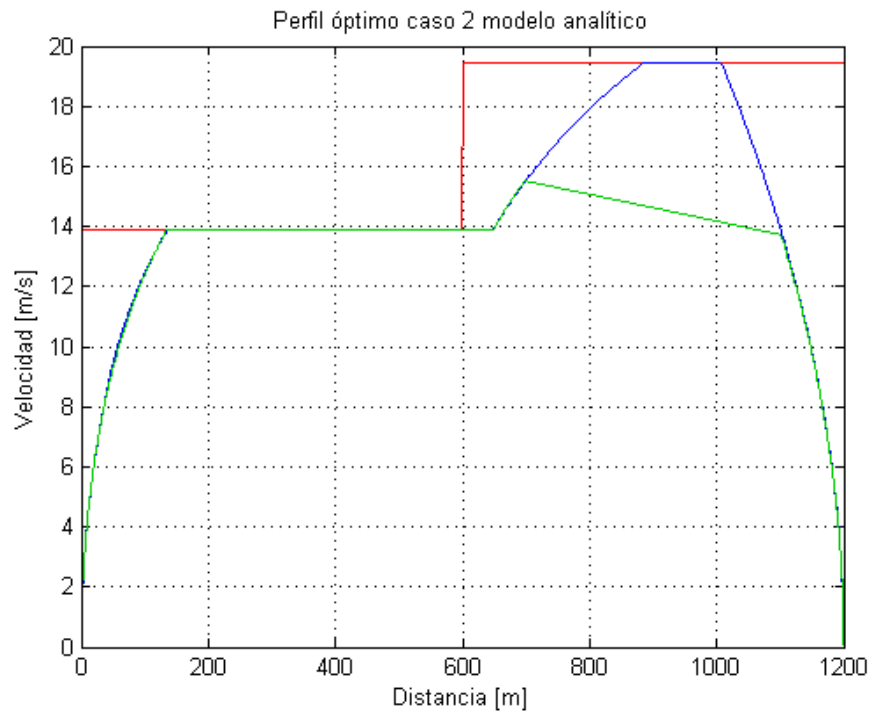


Figura 4.15: Resultados caso 2, modelo analítico.

Tabla 4.10: Resultados caso 2, modelo analítico.

Tiempo final	100[s]
Energía	3.95[kWh]

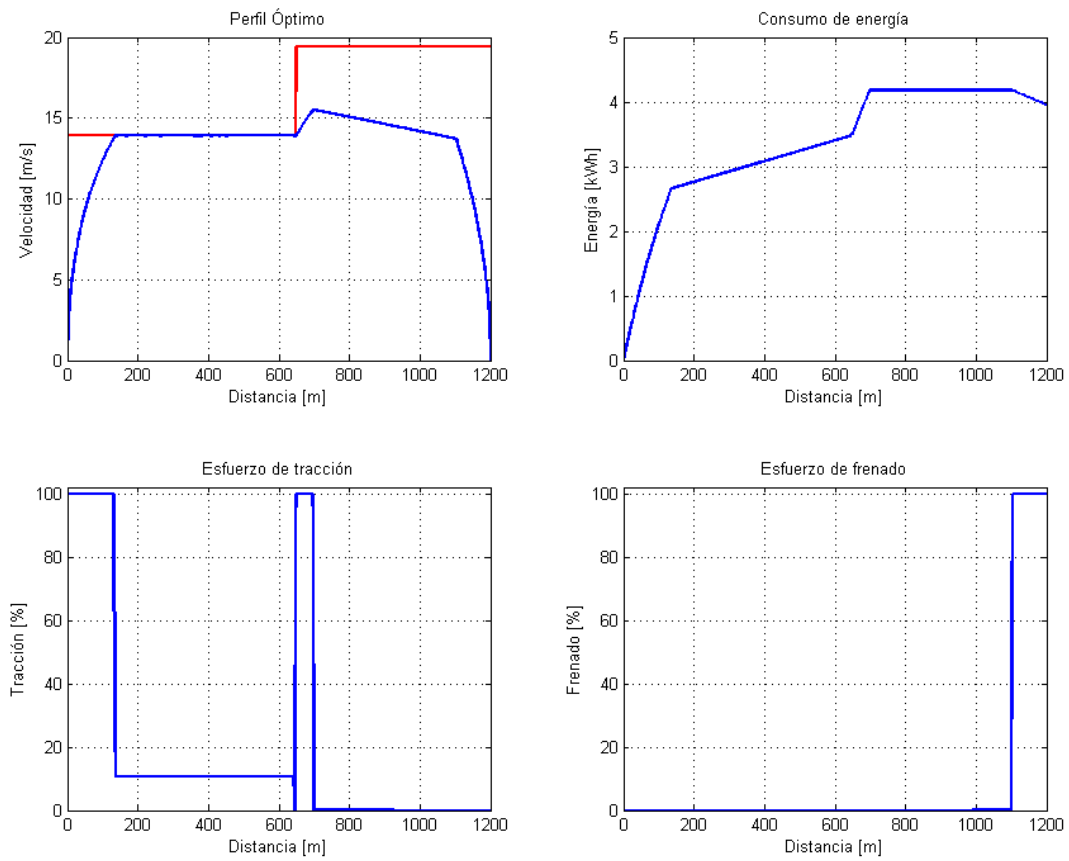


Figura 4.16: Variables de estado y control caso 2, modelo analítico.

Con respecto a la estrategia óptima de conducción, dadas por las variables de control, este modelo propone los mismos pasos: Acelerar y frenar al 100%. El tramo donde el esfuerzo de tracción está en un valor constante menor al máximo, indica la mantención de la velocidad. En particular, en dicho tramo el tren está limitado por la velocidad máxima.

En el punto del cambio del límite de velocidad, el perfil muestra que se debe acelerar al máximo al llegar a ese punto. De esta forma queda esclarecida por el modelo heurístico 2 y el modelo analítico, la hipótesis de volver a acelerar frente a aumentos de la velocidad máxima.

4.4. Comparación entre modelos

En la Figura (4.17) se muestra la superposición de las curvas obtenidas por los tres algoritmos para el primer caso:

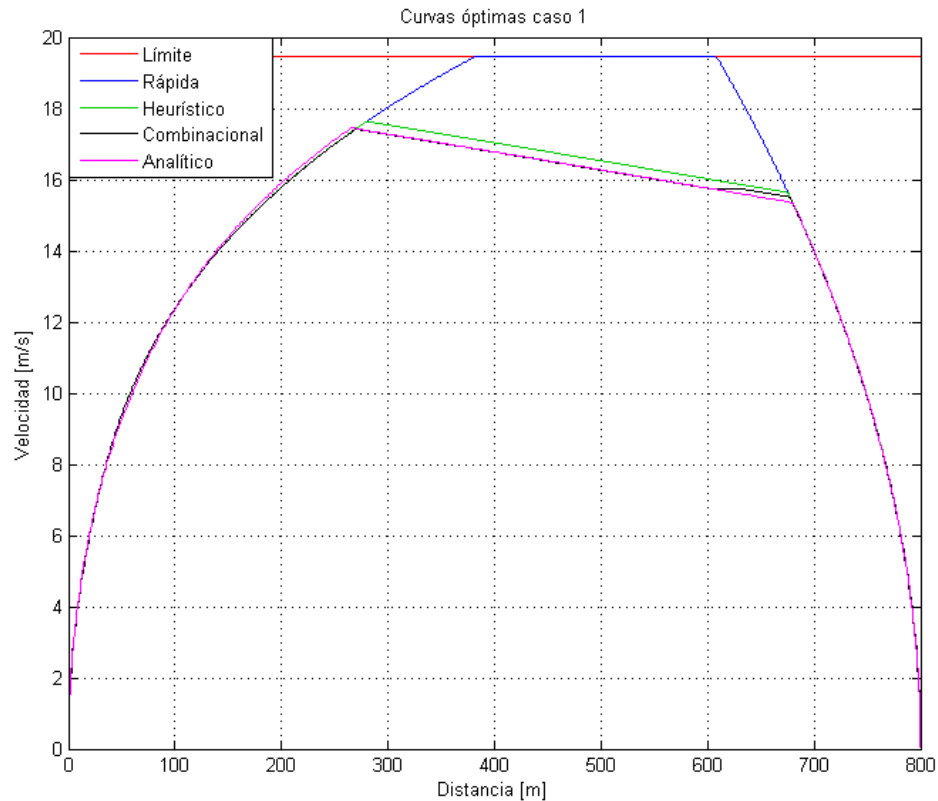


Figura 4.17: Comparación entre modelos, caso 1.

Es notorio como en las tres curvas el comienzo de la marcha inercial es prácticamente el mismo. De todos modos el modelo analítico da una mayor precisión con respecto al metro a la cual se debe comenzar la marcha inercial, debido a que los modelos heurísticos modifican este valor en pasos discretos (20 metros para el algoritmo 1 y los metros de decisión para el algoritmo 2). Pese a lo anterior, las fases de conducción quedan bien definidas y proponen una estrategia óptima muy similar entre ellas.

En la Tabla (4.11) se muestran los resultados de cada uno de los modelos para el primer caso:

Tabla 4.11: Comparación entre algoritmos, caso 1.

Valor / Algoritmo	Heurístico	Combinacional	Analítico
Tiempo [s]	66.68	67.07	67
Energía [kWh]	4.07	4.18	4.09

En la Figura (4.18) se muestra la superposición de las curvas obtenidas por los tres algoritmos para el segundo caso:

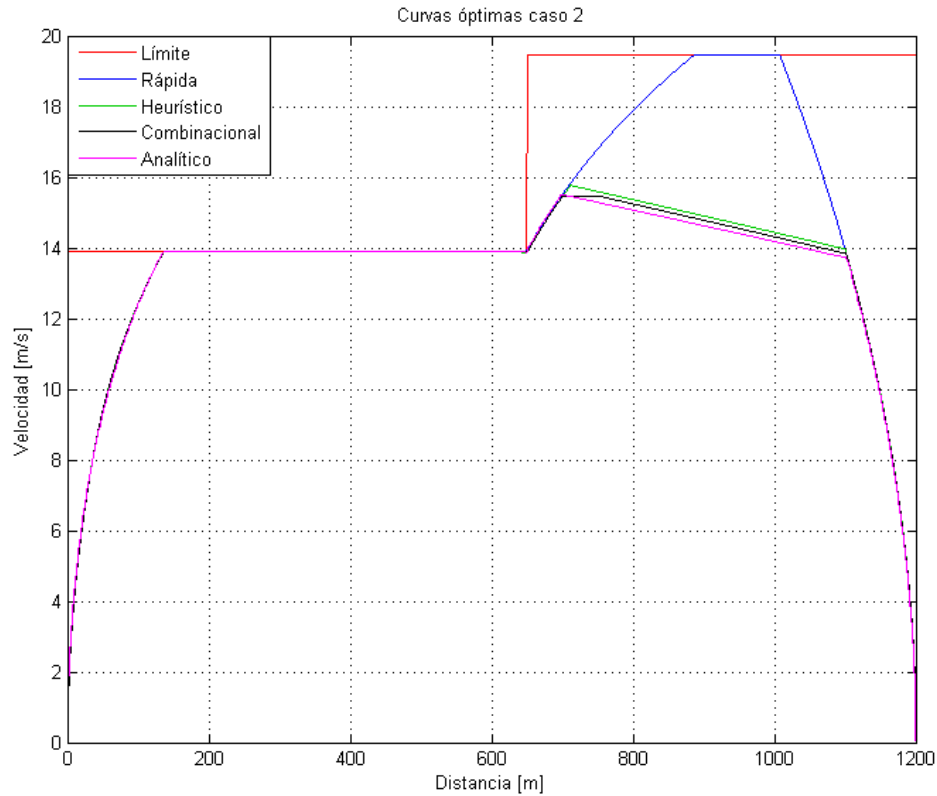


Figura 4.18: Comparación entre modelos, caso 2.

Al igual que en el primer caso el modo de operación óptimo es muy similar entre los tres modelos. En particular el algoritmo heurístico y el analítico difieren muy poco, a diferencia del combinacional el cual añade una fase de mantención de la velocidad.

Esta disimilitud es producida por la elección de metros de decisión mayores, en este caso de 50 metros. Si bien se reducen los tiempos de cálculo, los puntos óptimos de cambio de régimen son múltiplos de 50 y la solución pierde exactitud.

En la Tabla (4.12) se muestran un resumen de los resultados de cada uno de los modelos para el caso 2:

Tabla 4.12: Comparación entre algoritmos, caso 2.

Valor / Algoritmo	Heurístico	Combinacional	Analítico
Tiempo [s]	99.42	99.68	100
Energía [kWh]	3.90	4.07	3.95

Es interesante ver que con tres algoritmos distintos de optimización los resultados son muy similares para ambos casos, tanto en regímenes de marcha como numéricamente, pese a que los tiempos de cálculo y las simplificaciones sean distintas.

4.5. Modelo eléctrico

Para el estudio de la red eléctrica de Merval, se simuló su comportamiento en un intervalo de explotación de 6 minutos con trenes cortos. En la Figura (4.19) se muestran los resultados para el perfil mínimo de tensiones de la vía con las curvas de velocidad óptimas y rápidas, las cuales están en azul y rojo respectivamente.

Los parámetros utilizados en la simulación eléctrica se detallan a continuación:

Tabla 4.13: Parámetros para simulación eléctrica.

Parámetro	Valor
Tensión en vacío de las SER	3300[V]
Tensión mínima permitida	2000[V]
Resistencia catenarias	0.07[Ω /km]
Resistencia interna SER	0.01263[Ω]
Potencia SER	2 x 3000[kW]
Punto kilométrico SER 1 Portales	5
Punto kilométrico SER 2 El Salto	12
Punto kilométrico SER 3 Villa Alemana	29

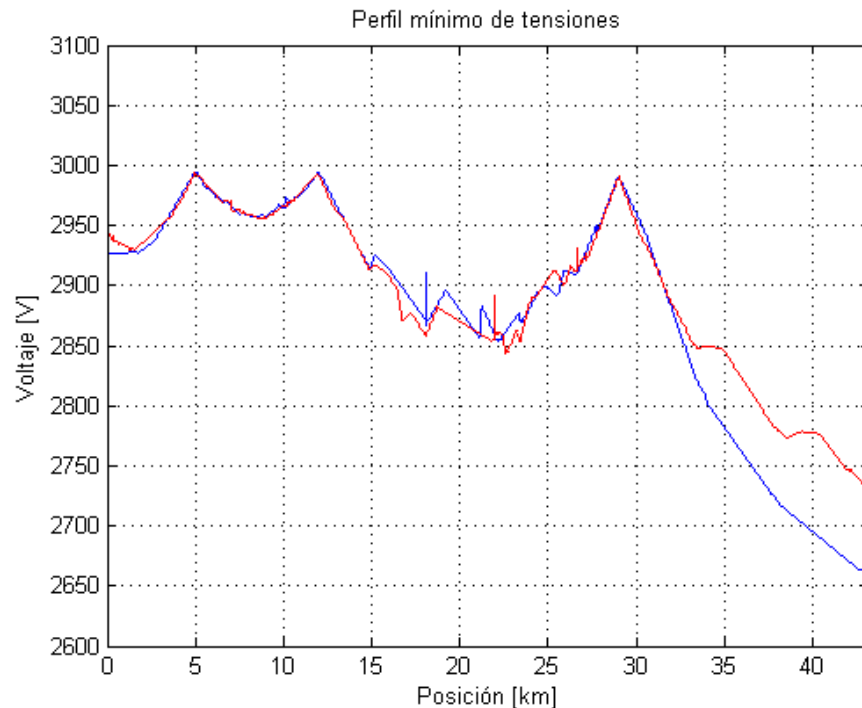


Figura 4.19: Perfil mínimo de tensiones en la vía.

El perfil de tensiones de la vía tiene sus máximos en los puntos de inyección donde se encuentran las subestaciones y caen a medida que se alejan de estas. Sin embargo las caídas

de tensión no sobrepasan el límite mínimo de tensión permitido para la operación apropiada de los trenes para ambos perfiles de conducción.

La curva óptima produce una mayor caída de tensión en la vía que la curva rápida. Esto es debido a que con el perfil óptimo en el intervalo de explotación, necesita un tren más que el perfil rápido (Tabla (4.14)) dado el tiempo que demora un tren en dar una vuelta.

Tabla 4.14: Número de trenes en la vía.

Perfil / Valor	Tiempo de vuelta	Número de trenes
Rápido	1:46:28	18
Óptimo	1:52:06	19

Dicho tren adicional añade una caída de tensión adicional en el tramo a la derecha de la SER 3. Espacialmente esta subestación alimenta una sección total de vía mayor y por consiguiente tendrá bajas de voltaje mayores que las primeras dos subestaciones, mas aún si se tienen más trenes.

Por otro lado la curva rápida tiene una mayor distancia de frenado al poseer velocidades superiores a la curva óptima, por ende mayor tiempo de frenado. Como se tiene regeneración, los trenes evacúan potencia a la vía en forma de corriente, la cual aumenta la tensión de la vía en el punto donde se encuentra el tren.

Las potencias instantáneas requeridas en tracción por cada subestación y en su totalidad se encuentran ilustradas en la Figura (4.20).

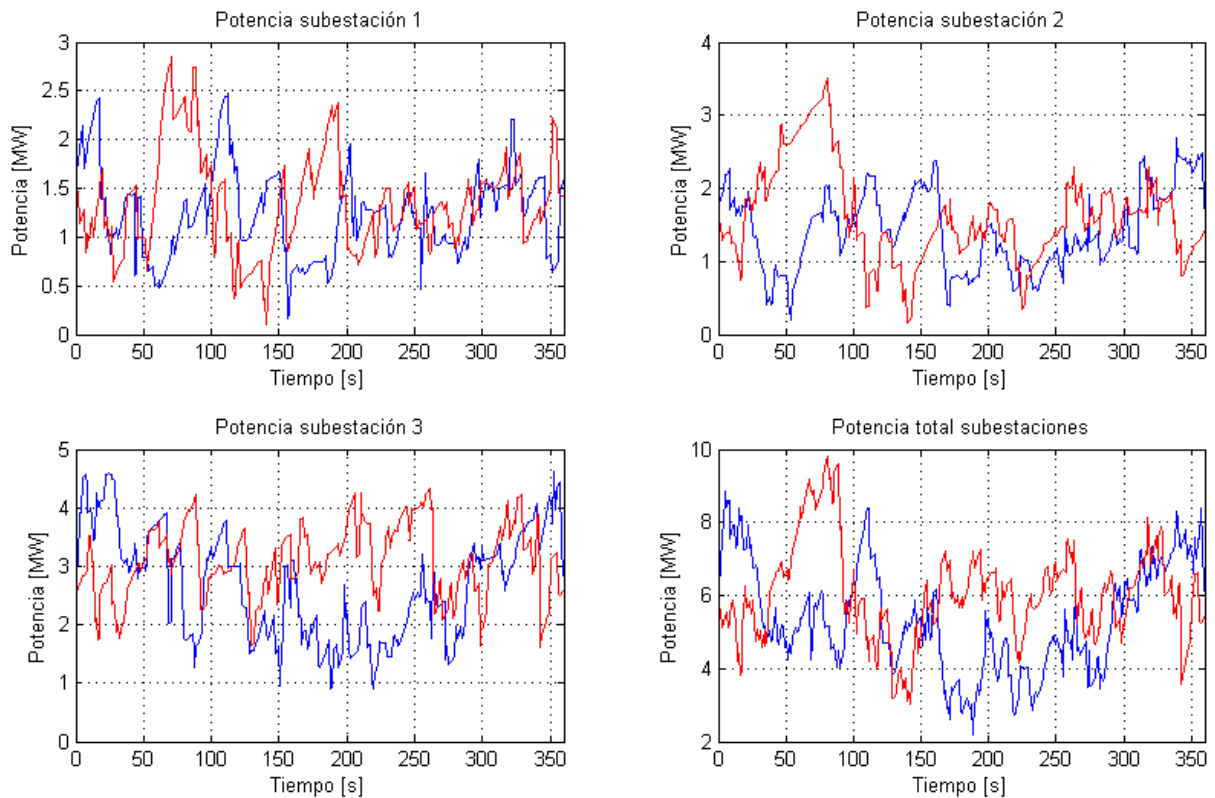


Figura 4.20: Potencia requerida en tracción por cada SER.

En las subestaciones 1 y 2 se aprecian que los peaks de potencia son mayores con la curva rápida y mas duraderos, dado el mayor tiempo de tracción de los trenes. Caso contrario ocurre en la SER 3, en donde el peak con el perfil óptimo es mayor.

Los requerimientos de potencia de un tren con las curvas rápidas son mayores que las óptimas, lo cual fue corroborado en las secciones anteriores. Sin embargo cuando existe regeneración esta diferencia disminuye, dado el mayor tiempo de frenado. En otras palabras, el perfil rápido recupera más energía mediante el frenado regenerativo.

Si ahora consideramos la operación del sistema con mas trenes, los consumos instantáneos de potencia dependen de la fase de marcha en la que se encuentran los trenes. En particular la tracción necesita mayor potencia que la mantención de velocidad, la marcha inercial no necesita potencia y durante el frenado se devuelve parte de ésta a la red.

Volviendo al caso de la SER 3 se puede deducir que la potencia entregada por el frenado con la curva rápida compensa en mayor cantidad el consumo de tracción, obteniéndose así menores peaks. En la práctica existen varios trenes que se encuentran frenado durante lapsos de tiempo en los que otros trenes traccionan decreciendo el consumo instantáneo de la subestación.

En un global, sumando toda la potencia requerida en tracción, los peaks resultan menores para el perfil óptimo, exigiendo menos a la infraestructura.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Algoritmo heurístico

El algoritmo heurístico demostró ser un buen modelo que permite tener una solución realista, ya que propone una estrategia muy cercana a la que se utiliza hoy en día mediante los cambios de las fases de marcha del tren. Esto último permite a éste algoritmo ser una herramienta a considerar para la reducción del consumo en tracción y poner los perfiles óptimos obtenidos en práctica en un tren real. Considerar entre varias cosas, la topografía de la vía, los límites de velocidad, la adherencia y la carga de pasajeros, hace del modelo una herramienta que se ajusta a cualquier condición.

Por otro lado las desventajas se manifiestan cuando se encuentran mas de un límite de velocidad entre estaciones. Como se explicó en el Capítulo 3, por cada límite de velocidad aparecen dos variables más, las cuales ralentizan los cálculos. Por otro lado al dividir una sección en varios puntos equidistantes para la marcha inercial y disminuir la velocidad crucero en pasos del 5 %, lo cual son pasos discretos de las variables, disminuyendo así la precisión de la solución óptima.

En el caso Merval fue de gran ayuda ya que permitió obtener resultados razonables desde el punto de vista operacional. También mostró el potencial de ahorro en que Merval se encuentra con respecto a la curva rápida: Para el tren simple se tiene un 25 % en promedio.

5.2. Algoritmo heurístico 2

El algoritmo 2 fue concebido bajo la idea de corroborar ciertas hipótesis de la propuesta de estrategia óptima del primer algoritmo heurístico. Luego de las pruebas , sus resultados permitieron concluir que las hipótesis eran satisfactorias.

Los tiempos de cálculo de este algoritmo depende del parámetro metros de decisión. Entre mas pequeño es, los tiempos de computo aumentan exponencialmente. Al ser tan elevados se necesitó utilizar un cluster para su resolución. Debido a esto, su aplicabilidad como herramienta no es buena ya que necesita muchos recursos. Cabe destacar que la precisión disminuye al aumentar los metros de decisión.

5.3. Modelo analítico

El modelo analítico presenta matemáticamente una solución óptima con bases teóricas bien fundadas, da una buena precisión y en términos de tiempos de cómputo es similar al algoritmo heurístico 1.

La ventaja de tener dos variables de control es la posibilidad de llevar la ley de control óptima en práctica en la conducción real, ya que al transformar los resultados del espacio del tiempo al de la distancia, nos muestra en que puntos hay que acelerar o frenar y a que porcentaje de la capacidad total.

Al igual que en el algoritmo heurístico cuando hay mas de un límite de velocidad los tiempos de computo se ven afectados al agregar una restricción mas al problema. En el software BOCOP este tipo de restricciones son programadas mediante condicionales los que en términos computacionales generan aumentos de tiempo. Por otro lado, como el programa resuelve ecuaciones diferenciales, se requieren en la definición del problema ecuaciones continuas y cuanto mejor si son derivables. Así la topografía de la vía se complica en su definición, lo que finalmente se optó por tomar un valor constante entre estaciones.

5.4. Comparación entre modelos

A continuación, la Tabla (5.1) muestra un resumen de las características de los tres algoritmos.

Tabla 5.1: Comparación entre modelos.

Modelo / Parámetro	Tiempo de cómputo	Precisión	Aplicabilidad
Heurístico	Depende de los límites de velocidad	Buena	Sí
Combinacional	Muy elevado	Depende de los metros de decisión	No
Analítico	Igual al heurístico	Buena	Sí

Dada su aplicabilidad y tiempos de cálculo, la mejor opción es en algoritmo heurístico. Sin embargo, este debe ser llevado a otro lenguaje de programación que permita la optimización

de los tiempos de cómputo. Es importante destacar que los tiempos de cómputo aumentan a medida que se tengan mas de un límite de velocidad.

El modelo analítico es una buena opción, mientras no se resuelva el tema de agregar la topografía de la vía en su resolución, el algoritmo heurístico tendrá ventajas sobre éste.

Finalmente el algoritmo combinatorial está confinado solamente a despejar dudas con respecto a las propuestas de estrategias óptimas.

5.5. Modelo eléctrico

Comparando los efectos en la infraestructura dados por las curvas rápidas y las óptimas, se puede concluir que esta última exige de menor manera el equipamiento eléctrico. Sin embargo se manifestó como un tren más en la vía, dada la ubicación de las subestaciones, incide en el perfil de tensiones mínimas.

Por otra parte surgen inquietudes con respecto a las etapas de la marcha de un tren. Da la impresión, que dependiendo del estado en que se encuentren los trenes, se tendrán las correspondientes exigencias en el consumo de tracción. De este modo la potencia requerida puede ser compensada con trenes que estén frenando e inyectando potencia a la vía. Sobre esto último uno podría generar curvas de velocidad óptimas considerando el sistema como un todo y no por separado, a modo de lograr la sincronización entre trenes que traccionan y frenan.

En vista de los *peaks* de potencia de las SER, vale la pena preguntarse que tipo de contrato tiene Merval con su suministro de energía. Por ejemplo, en la tarifa AT4 uno de los parámetros para determinar el precio final de la energía consumida es la demanda máxima leída en horas punta del sistema. Así, si se tienen menores *peaks* de potencia, el costo operacional de Merval disminuye.

Al momento de diseñar la infraestructura, el perfil utilizado es el de la curva rápida ya que esta supone el caso mas exigente de la red eléctrica. Por lo tanto la curva óptima queda relegada a la operación. Visto de otra forma, los modelos presentados en el presente trabajo de título sirven para mejorar la operación de un sistema ya diseñado, haciéndolo mas eficiente, con menores costos y menos nocivo con el medio ambiente.

5.6. Trabajos futuros

Durante la realización del trabajo de título surgieron varias ideas de estudio a partir de lo ya estudiado entre ellas se encuentran:

I. Estudio de sincronización tracción frenado para regeneración y optimización global

Como se vio en las simulaciones eléctricas, el sistema se vio beneficiado al utilizar regeneración en los trenes, aliviando así la potencia instantánea requerida.

De este modo el estudio de la sincronización entre las fases de tracción y frenado en el sistema completo, permitirían un mayor ahorro energético. Esto es debido a que los trenes que frenan proporcionan potencia los trenes que traccionan. Sin embargo, la inyección de la energía depende de la receptividad de la vía aspecto que no ha sido simulado de manera precisa.

Finalmente con las acotaciones previamente señaladas, la optimización de las curvas de velocidad puede cambiar de enfoque. En vez de considerar la optimización local por viajes interestación, tomar el sistema con todos los trenes operando y minimizar la energía global del sistema.

II. Mejora modelo eléctrico y cálculos en corriente alterna

El modelo eléctrico permitió conocer variables eléctricas de interés para la operación del sistema con todos los trenes en la vía. No obstante, existen mas variables de interés tales como: las tensiones y corrientes de fuga, los efectos armónicos en el sistema de catenarias, la contaminación electromagnética, entre otros. Estas variables son de interés al diseñar el sistema eléctrico ferroviario, lo cual es de interés saber como fluctúan en la operación real.

Por otro lado, el modelo eléctrico considera un sistema de catenarias alimentado en corriente continua, lo que no es común para todos los sistemas ferroviarios. La programación de un modelo que permita obtener los mismos y más resultados para redes en corriente alterna es un desafío no menor. Bajo estas condiciones se debe hacer un sistema que calcule los flujos de potencia activa y reactiva, además de considerar todos los efectos inductivos y capacitivos. También la distorsión armónica dada por la electrónica de potencia de los trenes, influye considerablemente.

Bibliografía

- [1] *Master plan EFE*. http://www.efe.cl/proyectos/master_trenes.html.
- [2] *Objetivos proyecto OSIRIS*. <http://www.osirisrail.eu/objectives>.
- [3] Harris, K; Tee, Jackie: *IHS Jane's World Railways*. 2008.
- [4] *Ein Leitfaden für Energie Sparendes Fahren (Conducir y ahorrar: Una guía para la conducción con ahorro de energía)*, Deutsche Bahn, 2003.
- [5] Strößenreuter, H.: *Klimaschutz als Sanierungsbeitrag - Projekt Energie Sparen der Deutschen Bahn*, 2004.
- [6] *Historia EFE*. <http://www.efe.cl/empresa/historia.html>.
- [7] Lucero, A.: *Apuntes del Curso EL603 Tracción eléctrica, Departamento Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile*, 2008.
- [8] Hansen, I; Pachl, J. (eds.): *Railway timetable and traffic*. 2008.
- [9] Jong, J.: *Analytical solutions for prediction train coasting dynamics*, 2003.
- [10] Wende, D.: *Fahrdynamik*. 1983.
- [11] Richey, S.: *Electric Railway Handbook*. 1911.
- [12] Wende, D.: *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. 2003.
- [13] Pachl, J.: *Systemtechnik des Schienenverkehrs*. 2011.
- [14] Jong, J; Chang, S.: *Algorithms for generating trains speed profiles*, 2005.
- [15] Desprez, C; Djellab, H.: *Traction energy saving by speed profile optimization*, 2012.
- [16] Domínguez, M; Fernández, A; Cucala A P; Lukaszewicz P.: *Optimal design of metro automatic operation speed profiles for reducing energy consumption*, 2010.
- [17] Domínguez, M; Fernández, A; Cucala A P; Pecharromán R.: *Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of*

ATO speed profiles, 2012.

- [18] Díaz, E; Sánchez, M: *Proyectos de tracción y alimentación eléctrica para la tercera fase de la Línea 2 del Metro de Santiago*, 1985.
- [19] Kießling, F;Puschmann, R; Schmieder A: *Contact lines for electric railways*. 2001.
- [20] *BOCOP – The optimal control solver*. <http://bocop.saclay.inria.fr>.

Anexos A

Metro de Valparaíso

A continuación se muestran todos los parámetros utilizados para las simulaciones de la operación diaria de Merval: Características de los trenes, límites de velocidad, topografía vía, carga de pasajeros y variables eléctricas.

A.1. Características trenes

Tren simple		Tren doble	
Masa tren	79 [ton]	Masa tren	158 [ton]
Factor de las masas rotatorias	1,06	Factor de las masas rotatorias	1,06
Esfuerzo máximo de tracción	22[kN/motor]	Esfuerzo máximo de tracción	22[kN/motor]
Esfuerzo máximo de frenado	21[kn/motor]	Esfuerzo máximo de frenado	21[kn/motor]
Número de motores	4	Número de motores	8
Potencia	720[kW]	Potencia	720[kW]
Velocidad máxima	120[km/h]	Velocidad máxima	120[km/h]
Resistencia al rodado	$1814,4 + 16,94*v + 0,57*v^2$	Resistencia al rodado	$3628,8 + 33,38*v + 0,57*v^2$
Largo del tren	49[m]	Largo del tren	98[m]

Figura A.1: Parámetros trenes Merval.

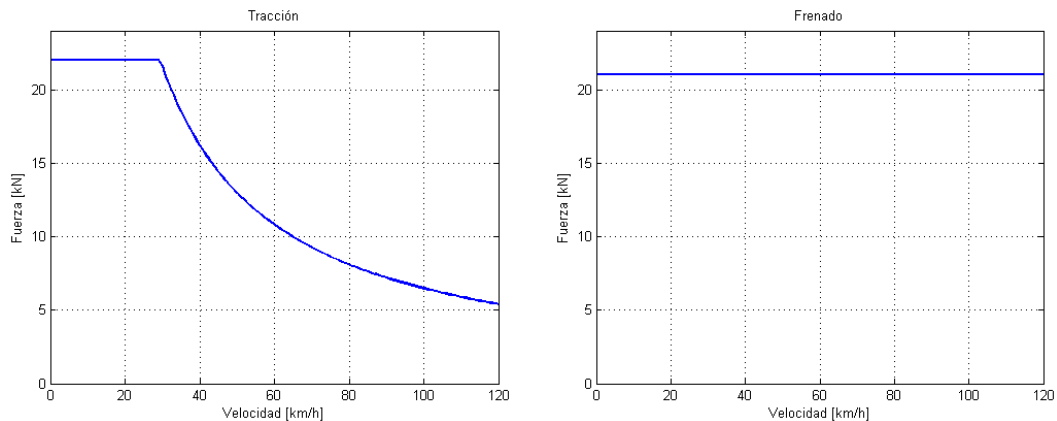


Figura A.2: Curvas esfuerzo-velocidad trenes Merval.

A.2. Límites de velocidad

Dirección Puerto – Limache			Dirección Limache – Puerto		
PK inicio	PK fin	Velocidad [m/s]	PK inicio	PK fin	Velocidad [m/s]
0,000	0,093	11,7	0,000	0,086	11,7
0,093	1,645	14,4	0,086	0,272	14,4
1,645	2,219	11,7	0,272	4,515	33,3
2,219	3,816	20,6	4,515	5,494	28,3
3,816	4,206	18,3	5,494	6,963	20,6
4,206	5,066	20,6	6,963	7,460	28,3
5,066	5,496	18,3	7,460	11,369	33,3
5,496	5,931	14,4	11,369	11,854	28,3
5,931	6,294	18,3	11,854	13,061	20,6
6,294	6,791	20,6	13,061	13,254	28,3
6,791	9,995	18,3	13,254	15,722	20,6
9,995	10,408	14,4	15,722	16,144	28,3
10,408	11,798	20,6	16,144	16,961	20,6
11,798	13,725	33,3	16,961	17,456	28,3
13,725	14,215	20,6	17,456	18,036	20,6
14,215	17,687	14,4	18,036	19,026	28,3
17,687	20,632	20,6	19,026	19,916	20,6
20,632	21,128	18,3	19,916	20,935	28,3
21,128	21,393	14,4	20,935	21,448	20,6
21,393	22,039	20,6	21,448	21,931	14,4
22,039	22,691	28,3	21,931	25,377	20,6
22,691	23,539	20,6	25,377	26,362	14,4
23,539	24,529	28,3	26,362	26,844	18,3
24,529	26,492	20,6	26,844	27,301	14,4
26,492	26,903	28,3	27,301	27,765	18,3
26,903	30,000	20,6	27,765	28,264	14,4
30,000	30,342	18,3	28,264	28,749	20,6
30,342	30,727	20,6	28,749	30,355	33,3
30,727	31,207	28,3	30,355	30,675	28,3
31,207	35,603	33,3	30,675	32,074	20,6
35,603	36,101	28,3	32,074	36,165	18,3
36,101	37,561	20,6	36,165	36,646	18,3
37,561	38,050	28,3	36,646	37,472	14,4
38,050	41,479	33,3	37,472	38,341	18,3
41,479	41,967	28,3	38,341	38,762	20,6
41,967	42,466	18,3	38,762	39,152	18,3
42,466	42,900	11,7	39,152	40,196	20,6
42,900	43,230	5,6	40,196	40,495	18,3
			40,495	41,310	11,7
			41,310	42,503	14,4
			42,503	42,667	11,7
			42,667	43,230	5,6

Figura A.3: Límites de velocidad.

A.3. Topografía vía

A.3.1. Gradientes y pendientes

PK inicio	PK fin	Pendiente [%o]	PK inicio	PK fin	Pendiente [%o]	PK inicio	PK fin	Pendiente [%o]
0	1,194	0,8	15,041	15,139	0,14	26,513	26,561	10,9
1,194	1,424	-1,1	15,139	15,358	-6,5	26,561	26,894	5,7
1,424	1,55	0	15,358	15,635	-3,7	26,894	27,466	10,3
1,55	1,911	0,1	15,635	15,73	0,14	27,466	27,805	8,2
1,911	2,218	-0,3	15,73	15,93	15,2	27,805	27,919	10
2,218	2,373	0	15,93	16,088	18,2	27,919	28,221	6,2
2,373	2,428	2,8	16,088	16,306	23,3	28,221	28,587	2,1
2,428	2,645	7,8	16,306	16,674	18,6	28,587	28,736	3,5
2,645	2,819	2,3	16,674	16,738	13,2	28,736	29,004	2,7
2,819	3,103	-1,4	16,738	16,817	19,3	29,004	29,224	3,6
3,103	3,381	0	16,817	16,869	25,7	29,224	29,252	4,3
3,381	3,471	4,7	16,869	16,91	19,3	29,252	29,263	6,3
3,471	3,501	-1,3	16,91	16,952	22,8	29,263	29,763	6,6
3,501	3,731	0,14	16,952	17,057	22,8	29,763	30,096	9,9
3,731	3,86	-1,3	17,057	17,102	0,14	30,096	30,361	11,5
3,86	4,172	0,3	17,102	17,304	13,7	30,361	30,416	8,2
4,172	4,248	-1,7	17,304	17,451	7,8	30,416	30,626	13,7
4,248	4,745	0,2	17,451	18,139	10	30,626	30,82	9,5
4,745	5,023	0,5	18,139	18,621	10,5	30,82	30,857	0,14
5,023	5,548	0	18,621	19,119	10,1	30,857	30,976	2,1
5,548	5,755	0	19,119	19,298	7,9	30,976	31,189	-3,5
5,755	5,928	2,2	19,298	19,473	10,3	31,189	31,239	0,14
5,928	5,971	0,14	19,473	19,518	0,14	31,239	31,404	-13,4
5,971	5,996	-6,5	19,518	19,719	1,4	31,404	31,878	-15,9
5,996	6,108	-2,6	19,719	19,845	-1,1	31,878	33,289	-15,5
6,108	6,355	1	19,845	20,016	-0,1	33,289	33,646	-16
6,355	6,393	0,14	20,016	20,06	0,14	33,646	34,08	-14,7
6,393	6,476	8,5	20,06	20,316	8,8	34,08	34,605	-16
6,476	6,603	0,14	20,316	20,786	10,6	34,605	35,13	-14,8
6,603	7,277	-17,1	20,786	20,889	10,6	35,13	35,833	-11,2
7,277	7,35	0,14	20,889	21,131	6,7	35,833	36,329	-10,3
7,35	7,397	-2,5	21,131	21,166	0,14	36,329	36,378	0,14
7,397	7,524	-2,5	21,166	21,252	-0,2	36,378	36,591	-0,5
7,524	8,261	1,1	21,252	21,435	-0,2	36,591	37,307	-0,7
8,261	8,413	2,5	21,435	21,54	-0,2	37,307	37,347	0,14
8,413	9,163	2,5	21,54	21,634	-0,2	37,347	37,539	-8,8
9,163	9,287	2,5	21,634	21,647	0	37,539	38,137	-9,9
9,287	10,165	2,5	21,647	21,852	1,7	38,137	38,231	-4,9
10,165	10,289	2,5	21,852	22,024	4,9	38,231	38,461	0
10,289	10,476	2,5	22,024	22,392	9,8	38,461	38,557	2
10,476	10,55	0,14	22,392	22,437	0,14	38,557	38,84	-1,4
10,55	11,242	17	22,437	22,827	0,8	38,84	38,872	0,14
11,242	11,31	0,14	22,827	23,124	1,5	38,872	39,232	-7,6
11,31	11,65	3,5	23,124	23,203	0,2	39,232	39,485	-6,2
11,65	12,002	3,5	23,203	23,311	1,8	39,485	39,609	-0,5
12,002	12,396	0,6	23,311	23,327	-1,4	39,609	39,681	-3,1
12,396	12,62	5,5	23,327	23,338	0	39,681	39,827	0
12,62	12,641	0,1	23,338	23,51	4,5	39,827	40,343	-1,4
12,641	12,878	4	23,51	24,1	1,4	40,343	41,106	0,14
12,878	13,02	8,2	24,1	24,115	3,9	41,106	41,835	5,4
13,02	13,292	12,7	24,115	24,165	0,2	41,835	41,877	11,4
13,292	13,608	14,1	24,165	24,599	4,5	41,877	41,886	6
13,608	13,919	14,1	24,599	25,085	8,7	41,886	41,914	0
13,919	14,099	11,1	25,085	25,145	0,14	41,914	42,216	5,7
14,099	14,65	14,4	25,145	25,279	-3,3	42,216	42,853	10,2
14,65	14,751	0,14	25,279	25,388	-0,9	42,853	43,067	15,5
14,751	14,787	-5,9	25,388	25,556	4,7	43,067	43,132	0,14
14,787	14,925	0	25,556	25,677	4,4	43,132	43,231	2,5
14,925	14,997	0,14	25,677	26,401	9,5			
14,997	15,041	14,3	26,401	26,513	6,5			

Figura A.4: Gradientes y pendientes vía.

A.3.2. Curvas

PK inicio	PK fin	Radio de curvatura [m]	PK inicio	PK fin	Radio de curvatura [m]	PK inicio	PK fin	Radio de curvatura [m]
0	0,148	0	10,247	10,301	250,05	24,716	24,927	907,529
0,148	0,265	1500	10,301	10,53	559,924	24,927	25,123	470
0,265	0,303	504,6	10,53	10,729	0	25,123	25,513	0
0,303	0,529	0	10,729	11,007	400,895	25,513	25,688	950
0,529	0,671	234,89	11,007	11,141	0	25,688	26,087	1654,2
0,671	0,801	0	11,141	11,365	800,233	26,087	26,329	1500
0,801	0,923	454,8	11,365	11,833	0	26,329	26,896	0
0,923	1,175	0	11,833	11,866	5004,2	26,896	27,106	854,12
1,175	1,351	499,94	11,866	12,215	0	27,106	27,522	945,557
1,351	1,508	0	12,215	12,38	5004,2	27,522	27,736	0
1,508	1,76	504,72	12,38	12,6	0	27,736	28,05	899,865
1,76	1,801	0	12,6	12,65	2004,2	28,05	28,173	0
1,801	1,88	504,72	12,65	12,94	0	28,173	28,395	785
1,88	2,18	185,6	12,94	12,973	3800	28,395	28,576	0
2,18	2,314	0	12,973	13,063	1200	28,576	28,736	804,86
2,314	2,41	455,6	13,063	13,207	850	28,736	30,033	0
2,41	2,52	375	13,207	13,566	0	30,033	30,184	1000
2,52	2,57	325,61	13,566	13,806	1599,835	30,184	30,21	0
2,57	2,732	425,425	13,806	14,658	0	30,21	30,353	315
2,732	2,883	0	14,658	14,753	217,9	30,353	30,528	0
2,883	2,933	2804,2	14,753	14,924	0	30,528	30,76	672,057
2,933	3,378	0	14,924	15,123	660	30,76	31,051	758,34
3,378	3,538	250	15,123	15,21	841,774	31,051	31,542	936,1
3,538	3,663	0	15,21	15,54	1037,336	31,542	31,869	0
3,663	3,69	5004,2	15,54	15,895	181,057	31,869	32,24	1515
3,69	4,032	0	15,895	16,125	198,34	32,24	32,431	930,719
4,032	4,257	247	16,125	16,334	360,884	32,431	32,82	1494,2
4,257	4,417	545,73	16,334	16,348	0	32,82	33,249	0
4,417	4,463	0	16,348	16,448	3800	33,249	33,491	795,17
4,463	4,682	360	16,448	16,584	0	33,491	33,634	0
4,682	4,774	0	16,584	16,69	650	33,634	33,966	845,445
4,774	5,327	253,407	16,69	16,704	295	33,966	33,991	0
5,327	5,501	244,21	16,704	16,824	183	33,991	34,315	900,469
5,501	5,643	0	16,824	16,944	180,333	34,315	34,397	804,106
5,643	5,901	282,9	16,944	17,206	204,647	34,397	34,863	885,715
5,901	5,957	283,1	17,206	17,472	244,722	34,863	35,356	924,118
5,957	6,074	0	17,472	17,494	0	35,356	35,66	895,716
6,074	6,093	5000	17,494	17,7	415,052	35,66	35,934	804,07
6,093	6,149	0	17,7	17,998	0	35,934	36,372	875,714
6,149	6,341	227,025	17,998	18,387	295,585	36,372	36,402	0
6,341	6,455	299,558	18,387	18,425	0	36,402	36,44	3795,8
6,455	6,584	0	18,425	18,957	300	36,44	36,488	0
6,584	6,868	295,158	18,957	19,005	0	36,488	36,923	359
6,868	6,971	0	19,005	19,545	419,799	36,923	37,253	452,17
6,971	7,16	1596,2	19,545	19,882	364,474	37,253	37,838	509,516
7,16	7,324	1200,05	19,882	20,064	381,339	37,838	38,416	899,335
7,324	7,51	0	20,064	20,306	386,387	38,416	39,197	0
7,51	7,524	5003,8	20,306	20,723	390,184	39,197	39,381	3004,2
7,524	8,164	0	20,723	21,062	927,27	39,381	39,428	0
8,164	8,249	3000	21,062	21,136	504,365	39,428	39,625	3500
8,249	8,378	0	21,136	21,211	0	39,625	39,756	0
8,378	8,582	1496,14	21,211	21,314	300	39,756	39,885	5000
8,582	9,047	0	21,314	21,368	291,18	39,885	40,303	0
9,047	9,059	5003,8	21,368	21,558	0	40,303	41,098	1505,755
9,059	9,317	0	21,558	21,775	429,37	41,098	42,826	0
9,317	9,357	5003,8	21,775	22,012	447,37	42,826	42,986	304,2
9,357	9,665	0	22,012	22,228	0	42,986	42,996	384,31
9,665	9,86	510,701	22,228	23,131	754,81	42,996	43,08	184,31
9,86	10,109	345,555	23,131	24,36	0			
10,109	10,247	0	24,36	24,716	883,991			

Figura A.5: Radios de curvatura de la vía.

A.4. Carga de pasajeros

		Pasajeros viajando entre estaciones, dirección Puerto – Limache																			
Origen	Destino	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
Puerto	Bellavista	0	24	28	12	24	28	29	45	62	54	66	89	105	132	78	75	28	22	0	
Bellavista	Francia	0	35	48	21	42	48	55	78	102	84	92	127	147	204	122	128	61	53	0	
Francia	Barón	0	47	58	25	51	66	83	119	151	119	139	168	196	252	154	170	80	75	0	
Barón	Portales	0	68	83	36	66	87	112	143	186	142	171	200	233	306	187	215	104	87	0	
Portales	Recreo	0	76	92	40	75	98	130	157	208	154	199	223	271	325	200	257	120	109	0	
Recreo	Miramar	0	82	105	45	83	103	132	159	207	156	201	227	273	330	202	259	121	110	0	
Miramar	Viña del Mar	0	99	123	50	94	113	140	176	223	178	219	268	287	340	231	302	163	138	0	
Viña del Mar	Hospital	0	116	135	51	102	131	159	218	278	234	263	332	326	356	282	389	209	183	0	
Hospital	Chorillos	0	132	138	55	109	141	162	227	279	240	274	339	334	362	283	405	209	190	0	
Chorillos	El Salto	0	140	121	53	96	131	162	225	283	247	279	361	334	333	278	400	220	227	0	
El Salto	Quilpué	0	137	103	43	92	131	162	225	280	247	279	363	342	340	279	404	220	228	0	
Quilpué	El Sol	0	161	101	39	76	124	154	220	265	227	257	331	291	263	238	369	186	188	0	
El Sol	El Belloto	0	170	111	40	77	122	152	211	252	222	249	317	276	246	226	350	174	175	0	
El Belloto	Las Américas	0	195	111	36	74	113	140	196	228	208	232	291	242	202	198	311	149	148	0	
Las Américas	La Concepción	0	219	118	37	72	110	130	180	209	191	215	265	211	153	171	260	122	119	0	
La Concepción	Villa Alemana	0	224	116	35	75	107	125	175	197	180	204	251	196	137	156	236	110	108	0	
Villa Alemana	Sargento Aldea	0	235	99	30	61	87	104	149	170	151	167	203	143	71	112	192	85	72	0	
Sargento Aldea	Peñablanca	0	229	89	29	58	80	97	139	159	139	156	193	123	46	94	172	70	59	0	
Peñablanca	Limache	0	228	89	29	54	75	92	129	146	127	140	179	112	42	82	148	57	46	0	

Figura A.6: Carga de pasajeros, dirección Puerto - Limache.

		Pasajeros viajando entre estaciones, dirección Limache – Puerto																			
Origen	Destino	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	
Limache	Peñablanca	0	101	0	101	159	130	100	118	117	98	87	79	77	58	123	63	42	20	0	
Peñablanca	Sargento Aldea	0	119	0	110	173	144	109	131	125	106	95	85	82	59	125	68	44	21	0	
Sargento Aldea	Villa Alemana	0	138	42	141	198	167	124	146	148	119	105	97	90	64	129	70	45	26	0	
Villa Alemana	La Concepción	0	158	75	171	228	191	156	175	176	138	121	114	102	78	129	76	46	28	0	
La Concepción	Las Américas	0	172	95	188	246	204	164	183	184	145	129	121	107	83	133	80	46	28	0	
Las Américas	El Belloto	0	205	146	223	279	226	181	200	198	157	139	132	117	88	131	81	47	33	0	
El Belloto	El Sol	0	239	202	269	312	254	198	218	214	175	153	143	124	97	136	85	50	34	0	
El Sol	Quilpué	0	253	233	286	328	265	209	226	215	178	159	145	125	101	139	84	53	33	0	
Quilpué	El Salto	0	272	292	318	344	283	216	242	224	190	166	148	118	112	138	87	56	33	0	
El Salto	Chorillos	0	259	282	308	340	282	218	244	224	188	166	153	124	123	146	89	57	30	0	
Chorillos	Hospital	0	257	288	299	327	278	220	253	229	185	181	171	130	126	153	92	75	32	0	
Hospital	Viña del Mar	0	249	290	294	315	274	217	248	224	183	180	165	130	126	145	87	72	33	0	
Viña del Mar	Miramar	0	220	257	234	236	198	167	190	176	141	131	128	98	107	123	75	66	25	0	
Miramar	Recreo	0	204	242	204	206	174	151	163	161	128	112	113	87	96	111	68	60	22	0	
Recreo	Portales	0	202	240	204	208	175	152	162	156	126	108	107	85	91	102	62	58	22	0	
Portales	Barón	0	185	219	185	185	143	137	142	134	113	99	100	74	77	95	59	57	17	0	
Barón	Francia	0	157	176	156	150	110	116	112	103	90	78	76	59	54	70	43	44	10	0	
Francia	Bellavista	0	123	124	118	93	73	79	80	70	63	53	59	47	38	58	35	36	8	0	
Bellavista	Puerto	0	101	87	70	52	40	48	41	37	30	25	25	15	14	16	9	7	4	0	

Figura A.7: Carga de pasajeros, dirección Limache - Puerto.

A.5. Parámetros eléctricos

Parámetros sistema eléctrico	
Tensión DC en vacío de las SER	3000 [V]
Tensión DC mínima permitida	2000 [V]
Resistencia catenarias	0,07 [Ω /km]
Resistencia interna SER	0,01263 [Ω]
Potencia SER	2x3000 [kW]
Punto kilométrico SER 1 Portales	5
Punto kilométrico SER 2 El Salto	12
Punto kilométrico SER 3 Villa Alemana	29

Figura A.8: Parámetros eléctricos.