

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Simulación de Sistema de Manejo de Energía Basado en un
Volante de Inercia para Compensar Variaciones de Voltaje en el
Bus de Alimentación de un Tren.**

presentada por

Ing. Giovanni Velasco Toledo

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Abraham Claudio Sánchez

Codirector de tesis
Dr. Jesús Darío Mina Antonio

Cuernavaca, Mor., 1° de diciembre de 2016.

OFICIO No. DIE/229/2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C Giovanni Velasco Toledo** con número de control **M13CE011** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "SIMULACIÓN DE SISTEMA DE MANEJO DE ENERGÍA BASADO EN UN VOLANTE DE INERCIA PARA COMPENSAR VARIACIONES DE VOLTAJE EN EL BUS DE ALIMENTACIÓN DE UN TREN" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS



Dr. Abraham Claudio Sánchez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7675950

CODIRECTOR DE TESIS



Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 6094069

REVISOR 1



Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

REVISOR 2



Dr. Carlos Aguilar-Castillo
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3581040

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

CMAZ/lrr.

Cuernavaca, Mor., 2 de diciembre de 2016
OFICIO No. SAC/342/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. GIOVANNI VELASCO TOLEDO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“SIMULACIÓN DE SISTEMA DE MANEJO DE ENERGÍA BASADO EN UN VOLANTE DE INERCIA PARA COMPENSAR VARIACIONES DE VOLTAJE EN EL BUS DE ALIMENTACIÓN DE UN TREN”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”



DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



S. E. P. - TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
DIRECCIÓN

C.p. M.T.I. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatoria

A Dios

Dedico esta Tesis con orgullo a Dios por nunca dejarme solo y cuidar mis pasos siempre, por enseñarme el camino que me llevara con bien hacia el destino que él tiene preparado para mí y mi familia.

A mi Esposa

Dedico esta Tesis a mi Esposa Liza Claudine por apoyarme y ser mi compañera y amiga en los momentos más difíciles, gracias por ser uno de los motivos que me impulsan a seguir adelante.

A mi hijo

Dedico esta Tesis a mi hijo José Eduardo porque eres mi mejor inspiración y me das fuerza para superar cualquier cosa que se ponga en nuestro camino.

A mi Madre

Dedico esta Tesis a mi Madre Dolores por siempre confiar en mí y traerme a este mundo en una familia unida.

A mi Familia

Dedico esta Tesis a mi Familia por haberme brindado su apoyo durante toda mi vida.

Agradecimientos

Agradezco a mis asesores el Dr. Abraham Claudio Sánchez y el Dr. Jesús Darío Mina Antonio por haberme apoyado y guiado durante la realización de mi trabajo de investigación.

Agradezco a mis revisores el Dr. Mario Ponce Silva y el Dr. Carlos Aguilar Castillo por haberme brindado sus valiosos consejos durante mi trabajo de investigación y como mis maestros en clase.

A mis compañeros y amigos de generación: Omar Arellano Cruz, Julio Cesar Ayala Mendoza, Rita Ávila Medina, Oscar Miguel Rodríguez Benítez, Ángel Figuera Delgado. Gracias por su compañía y durante el tiempo que compartimos aprendí muchas cosas de cada uno de ustedes.

A toda la comunidad del departamento de Ingeniería Electrónica, por la amistad y el compañerismo que siempre brindan, por los conocimientos y apoyo que me brindaron durante mi tiempo en CENIDET.

A la Sra. Lorena Ruiz Ramírez por su gran apoyo para concluir los tramites de titulación, gracias por el interés que tiene por ayudar a los estudiantes.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por haberme dado la oportunidad de formar parte de sus alumnos y desarrollar mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindar el apoyo para que los alumnos lleven a cabo sus estudios de posgrado.

Resumen.

En la actualidad los sistemas de transporte eléctricos están siendo tomados muy en cuenta ya que los medios de transporte que utilizan combustibles fósiles son uno de los principales contaminadores del medio ambiente. En las grandes ciudades los trenes eléctricos son el principal medio de transporte para mover a las personas de un lugar a otro. Estos sistemas tienen distintos puntos que aún se siguen investigando e innovando.

En este trabajo de investigación se abordará el estudio energético de un tren eléctrico a nivel de simulación a través del cual se puede analizar el comportamiento de un sistema de manejo y recuperación de la energía que el tren produce durante un frenado regenerativo y aprovecharla en el bus de alimentación durante la aceleración.

Para llevar a cabo el objetivo del trabajo se realizó el modelado del tren, del bus de alimentación, así como del sistema de manejo de energía y se integró todo con una estrategia de control de energía. La estrategia controla la energía que se toma e inyecta al bus de alimentación y compensa las variaciones de voltaje producto de la aceleración y frenado del tren. Se presentan los resultados de la simulación que contempla las partes que integran el sistema, a nivel de simulación los resultados muestran que es posible aprovechar más del 50% de la energía producida por el frenado del tren.

Abstrac.

At present, electric transport systems are being taken into account as fossil fuels are one of the main pollutants of the environment. In large cities, electric trains are the main means of transport to move people from one place to another. These systems have different points that are still being investigated and innovated.

In this research work will be addressed the energy study of an electric train at the simulation level through which it is possible to analyze the behavior of a system of handling and recovery of the energy that the train produces during a regenerative braking and take advantage of it on the bus Power supply during acceleration

In order to carry out the objective of the work, the modeling of the train, the power bus, as well as the energy management system was carried out and integrated with an energy control strategy. The strategy controls the energy that is taken and injected into the power bus and compensates for the variations of voltage product of the acceleration and braking of the train. The results of the simulation that includes the parts that integrate the system are presented, at simulation level the results show that it is possible to take advantage of more than 50% of the energy produced by the braking of the train

Contenido

Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Simbología.....	VI
Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Uso de la energía en un tren eléctrico.....	2
1.3 Sistema de manejo de energía.....	3
1.4 Planteamiento del problema.....	4
1.5 Estado del arte.....	5
1.6 Propuesta de solución	8
1.7 Objetivos.....	9
1.7.1 Objetivo general	9
1.7.2 Objetivos particulares	10
1.8 Justificación	10
Capítulo 2: Modelado del sistema de manejo de energía	11
2.1 Análisis y modelado del tren	12
2.2 Validación del modelo del tren.....	14
2.3 Perfil de velocidad del tren	17
2.4 Características físicas del tren	20
2.5 Análisis de la red eléctrica.....	21
2.6 Modelado del bus de alimentación.	24
2.7 Integración del sistema del manejo de energía.....	30
Conclusiones del capítulo.....	32
Capítulo 3: Dimensionamiento del sistema de manejo de energía.....	33
3.1 Estudio energético del tren	34
3.2 Dimensionamiento del volante de inercia.	36
3.3 Estrategia de control de energía.	38
Conclusiones del capítulo.....	39
Capítulo 4: Resultados de simulación.	40
4.1 Condiciones de simulación.....	41
	I

4.2 Simulación del modelo del tren.....	43
4.3 Simulación del modelado de la red eléctrica.....	45
4.4 Resultados de simulación del sistema de manejo de energía.....	51
4.5 Análisis de resultados.....	55
4.5.1 Resultado del modelado y simulación del tren.....	55
4.5.2 Resultado del modelado y simulación de la red eléctrica.....	55
4.5.3 Resultados del modelo y simulación del sistema de manejo de energía.....	55
Capítulo 5: Conclusiones.....	56
5.1 Conclusiones.....	57
5.2 Problemática que se presentó durante el desarrollo del tema de tesis.....	57
5.3 Aportaciones.....	58
5.4 Trabajos futuros.....	58
Referencias.....	59
6. Anexo A.....	62
7. Anexo B.....	63
8. Anexo C.....	68

Índice de figuras

Figura 1.1: Esquema utilizado en [11] para el control del sistema de almacenamiento de energía	12
Figura 1.2: Circuito equivalente utilizado en [11] para representar el bus de alimentación del tren eléctrico.	12
Figura 1.3: Estrategia de control de energía utilizada en [12].	13
Figura 1.4: Esquema eléctrico utilizado en [13].	13
Figura 1.5: Esquema utilizado en [21] para representar una subestación eléctrica alimentando a un tren eléctrico.	14
Figura 1.6: Esquema del sistema de manejo de energía que se utilizara en el trabajo de tesis	15
Figura 2.1: Fuerzas que intervienen en el movimiento de un vehículo a lo largo de una pendiente.	18
Figura 2.10: Corte transversal de las barras guía [25].	28
Figura 2.11: Ubicación de los elementos que integran una vía para rodamiento neumático [25].	29
Figura 2.12: Esquema del bus de alimentación con dos subestaciones contemplando resistencias e inductancias como parásitos.	30
Figura 2.13: Esquema del bus de alimentación con dos subestaciones contemplando solo resistencias como parásitos.	31
Figura 2.14: Perfil de velocidad del recorrido de la Estación General Anaya a la Estación San Antonio Abad.	32
Figura 2.15: Comparación del voltaje de la subestación 1. En azul contemplando resistencias e inductancias y en rojo solo contemplando resistencias como parásitos.	33
Figura 2.16: Comparación del voltaje de la subestación 2. En azul contemplando resistencias e inductancias y en rojo solo contemplando resistencias como parásitos.	33
Figura 2.17: Modelo del bus de alimentación contemplando cinco subestaciones y dos trenes siendo alimentados.	34
Figura 2.18: Esquema del sistema de manejo de energía.	36
Figura 2.19: Esquema del volante de inercia.	37
Figura 2.2: Perfil de velocidad utilizado en [28] para realizar la prueba experimental del coche eléctrico.	20
Figura 2.3: Perfil de fuerza obtenido de manera experimental y resultados de simulación.	21
Figura 2.4: Perfil de potencia obtenido de manera experimental y perfil de potencia resultado del modelado propuesto	22
Figura 2.5: Vehículo eléctrico utilizado en [28] para realizar pruebas experimentales.	22
Figura 2.7: Línea 2 del sistema de transporte colectivo metro de la Ciudad de México, marcadas con una flecha las estaciones elegidas.	24
Figura 2.8: Perfil de velocidad obtenido con GPS de la estación General Anaya a la estación San Antonio Abad.	25
Figura 2.9: Ubicación de las barras guía en la vía del tren.	27

Figura 3.1: Potencia mecánica del tren durante el recorrido de la estación General Anaya a la estación Ermita.	40
Figura 3.12: Diagrama de flujo de la estrategia de control de energía.	45
Figura 3.2: Energía disponible durante el frenado del tren durante el recorrido de la estación General Anaya a la estación Ermita.	41
Figura 4.1: Perfil de velocidad del tren 1.	47
Figura 4.10: Voltaje de la subestación 2	52
Figura 4.11: Voltaje de la subestación 3	53
Figura 4.12: Voltaje de la subestación 4	53
Figura 4.13: Voltaje de la subestación 5	54
Figura 4.15: Corriente de la subestación 2	55
Figura 4.17: Corriente de la subestación 4	56
Figura 4.18: Corriente de la subestación 5	56
Figura 4.19: Corriente del sistema de manejo de energía 1	57
Figura 4.2: Perfil de velocidad del tren 2.	48
Figura 4.20: Corriente del sistema de manejo de energía 2	57
Figura 4.21: Energía disponible total durante el frenado de los dos trenes.	58
Figura 4.22: Energía entregada por el sistema de manejo de energía 1	58
Figura 4.23: Energía absorbida por el sistema de manejo de energía 2	59
Figura 4.24: Velocidad del volante de inercia 1	59
Figura 4.25: Velocidad del volante de inercia 2	60
Figura 4.3: Fuerza del tren 1	49
Figura 4.4: Fuerza del tren 2	49
Figura 4.5: Potencia mecánica del tren 1	50
Figura 4.6: Potencia mecánica del tren 2	50
Figura 4.7: Corriente que consume el tren 1 [IL1]	51
Figura 4.8: Corriente que consume el tren 2 [IL2]	51
Figura 4.9: Voltaje de la subestación 1	52
Figura 9.1: Simulación principal, en azul se tiene el bloque que contiene el modelado dinámico del convoy, cálculo de parásitos y el modelo del bus de alimentación. En naranja y verde se tienen los bloques donde se programó la estrategia de control y en amarillo y rosa se tiene el modelo del volante de inercia.	75
Figura 9.2: Esta imagen muestra los dos subsistemas que se encuentran dentro del bloque que contiene el modelo dinámico del convoy (Cyan) y el modelo del bus de alimentación (Azul marino).	75
Figura 9.3: Se muestra el contenido del bloque que modela dinámicamente el convoy.	76
Figura 9.4: Este bloque muestra el contenido del subsistema rojo en donde se calcula la fuerza necesaria para garantizar el perfil de velocidad del convoy.	77
Figura 9.5: En este subsistema se calculan las corrientes y voltajes, debido al tamaño de las expresiones para las corrientes se implementaron mediante bloques con funciones programables.	78
Figura 9.6: En esta ilustración se muestra el diagrama de bloques del modelado del volante de inercia.	79
Figuran 4.14: Corriente de la subestación 1	54

Índice de tablas

Tabla 2.1: Especificaciones del vehículo	17
Tabla 2.2: Parámetros Físicos del tren.	21
Tabla 3.1: Parámetros utilizados para simular el modelo físico del tren.....	34
Tabla 3.2: Concentrado de potencias y energías obtenidas en simulación para los ocho perfiles de velocidad	35
Tabla 3.3. Parámetros obtenidos para el sistema de manejo de energía.....	37
Tabla 4.1: Parámetros utilizados en simulación	42
Tabla 4.2: Concentrado de valores puntuales para los 4 casos de simulación planteados. ...	54

Simbología

A: Ampere.

A_F = Área Frontal del Tren.

a_c = Aceleración del Vehículo.

a : Radio del Conductor.

A_T : Área Transversal de las Barras Guía.

α : Angulo de la Pendiente.

CD: Corriente Directa.

CA: Corriente Alterna.

C_d = Coeficiente de Resistencia Aerodinámica.

d : Distancia Entre los Conductores.

F_r : Fuerza de Resistencia a la Rodadura.

f_r = Coeficiente de Resistencia a la Rodadura.

F_a : Fuerza de Arrastre Aerodinámica.

F_g : Fuerza producto de la Gravedad.

F_{ac} : Fuerza de Aceleración.

F_t : Fuerza Total Requerida para el Movimiento del Vehículo.

g = Gravedad.

H : Henrio.

I_1 : Corriente de la Subestación 1.

I_2 : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_3 : Corriente de la Subestación 2.

I_4 : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_5 : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_6 : Corriente de la Subestación 3.

I_7 : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_8 : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_9 : Corriente de la Subestación 4.

I_{10} : Corriente que Circula en un Segmento del Circuito.

I_{11} : Corriente de la Subestación 5.

I_{R1} : Corriente del Sistema de Recuperación 1.

I_{R2} : Corriente del Sistema de Recuperación 2.

I_L : Corriente que Consume el Tren.
 I_{L1} : Corriente que Consume el Tren 1.
 I_{L2} : Corriente que Consume el Tren 2.
 J = Momento de Inercia del Volante.
 L_{ex} = Inductancia Externa del Par de Conductores.
 l = Longitud de los Conductores.
 L_m : Inductancia Interna.
 Le_1 : Inductancia de la Subestación 1.
 Le_2 : Inductancia de la Subestación 2
 Lp_1 : Inductancia Parásita.
 L = Longitud del Volante de Inercia.
 MATLAB: Software Matemático.
 m_{total} = Masa Total del Tren (Contemplando Pasajeros).
 m_{tren} : Masa del Tren (Sin Pasajeros).
 $m_{pasajeros}$: Masa de los Pasajeros.
 μ_0 : Permeabilidad Magnética del Vacío.
 m : Metro.
 μ = Viscosidad del Aire.
 η_{Driver} = Eficiencia del Inversor.
 $\eta_{Maquina}$ = Eficiencia de la Máquina de Inducción.
 ρ = Densidad del Aire.
 P_t : Potencia Mecánica Instantánea del Vehículo.
 P_{rec} = Potencia del Sistema de Recuperación.
 P_{aire} = Pérdidas por Fricción con el Aire [watts].
 Re_1 : Resistencia de la Subestación 1.
 Re_2 : Resistencia de la Subestación 2.
 Re_3 : Resistencia de la Subestación 3.
 Re_4 : Resistencia de la Subestación 4.
 Re_5 : Resistencia de la Subestación 5.
 Rp_1 : Resistencia Parásita.
 Rp_2 : Resistencia Parásita.
 Rp_{11} : Resistencia Parásita en Barras Guía.
 Rp_{12} : Resistencia Parásita en Barras Guía.
 Rp_{21} : Resistencia Parásita en Barras Guía.
 Rp_{22} : Resistencia Parásita en Barras Guía.
 Rp_1 : Resistencia Parásita en Barras Guía.

R_{p_2} : Resistencia Parásita en Barras Guía.

R_1 : Resistencia Parásita en Barras Guía.

R_2 : Resistencia Parásita en Barras Guía.

R = Radio del Volante de Inercia.

SM_1 : Sistema de Manejo de Energía 1.

SM_2 : Sistema de Manejo de Energía 2.

t = Distancia entre el Volante y la Carcasa de Protección que lo Rodea.

VCD: Voltaje de Corriente Directa.

VAC: Voltaje de Corriente Alterna.

V_1 : Voltaje Ideal de la Subestación 1.

V_2 : Voltaje Ideal de la Subestación 2.

V_3 : Voltaje Ideal de la Subestación 3.

V_4 : Voltaje Ideal de la Subestación 4.

V_5 : Voltaje Ideal de la Subestación 5.

V_{sub_1} : Voltaje de la Subestación 1.

V_{sub_2} : Voltaje de la Subestación 2.

v = Velocidad del Tren.

W_t : Energía Mecánica Instantánea del Vehículo

ω = Velocidad Angular.

ω_{\min} : Velocidad Angular Mínima del Volante de Inercia.

ω_{\max} : Velocidad Angular Máxima del Volante de Inercia.

x = Distancia Recorrida por el Tren.

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se darán a conocer algunos de los antecedentes que conllevan a la realización de este trabajo, de igual manera se abordará el estado del arte entorno a la recuperación de energía en sistemas de transporte con trenes y la utilización de volantes de inercia en los sistemas de manejo de energía. Por otro lado se presentarán y definirán los objetivos y la justificación de este trabajo de investigación.

1.1 Antecedentes

En la actualidad el uso adecuado de los recursos naturales es un problema que ha tomado gran importancia, debido a la gran contaminación que existe en el mundo y a los efectos que esto produce en el medio ambiente y en los seres que habitamos el planeta.

En el 2011 en México el porcentaje de consumo final de energía utilizada para el transporte fue de 48% del total consumida, seguido del sector industrial con un 29%, de la energía utilizada para el transporte el 0.2% es consumida en forma de electricidad y el resto es producida a partir de hidrocarburos [1].

En las grandes ciudades el transporte de las personas, mercancías y productos comerciales es esencial, por lo que se hace necesario un medio de transporte barato, eficiente y amable con el medio ambiente. En la ciudad de México el transporte más utilizado es el transporte colectivo metro, responsable casi en su totalidad del consumo de energía eléctrica para transporte en la ciudad [2].

Para lograr un sistema eficiente y menos contaminante es necesario el uso de tecnologías y mejoras que logren asegurar un buen manejo de la energía consumida. Algunos de los esfuerzos para lograr estos objetivos son el uso de estrategias como tratar de reducir las pérdidas en el frenado haciendo una optimización en el perfil de velocidad, reducir conflictos de tránsito, mejoras en los convertidores de potencia, y el uso de sistemas de recuperación de energía utilizando estrategias de control de energía para su operación [3] los sistemas de recuperación en trenes pueden estar instalados fuera del tren en un lugar fijo y también pueden estar instalados dentro del tren formando parte de los equipos que lo conforman.

1.2 Uso de la energía en un tren eléctrico.

Los sistemas eléctricos ferroviarios juegan un papel importante en los sistemas de transporte de los países desarrollados. La eficiencia energética de estos sistemas es elevada en comparación con otros modos de transporte. Además, el frenado regenerativo de los trenes permite devolver energía a la red, con lo que se puede reducir notablemente el consumo energético de los mismos. Sin embargo, en los sistemas electrificados en corriente directa (CD) se pueden presentar situaciones en las que se no se aproveche toda la energía del frenado regenerativo.

Uno de los momentos en los que el tren necesita mayores cantidades de energía es en el arranque, para reducir esta demanda excesiva de energía se aborda de diferentes maneras, dentro de las que se pueden destacar:

- El vehículo: reducción de masa, mejoras aerodinámicas, almacenamiento de energía dentro del tren, configuración y uso de los servicios auxiliares, etc.
- La infraestructura: trazado de la línea y electrificación: sistema y tensión de alimentación, zonas eléctricamente aisladas, sección de conductores, devolución de energía a un almacenamiento fijo fuera del tren, etc.

- La operación: diseño de horarios, conducción económica o eco-driving, etc.

En la actualidad la mayoría de los trenes permiten convertir la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, todo esto mediante un frenado eléctrico, en este caso existen dos tipos de frenado eléctrico [3].

Típicamente el frenado dinámico es usado para reducir sobre voltajes producto de la energía devuelta al bus de CD, sin embargo es un método ineficiente debido a que esa energía no se aprovecha. En su lugar se prefiere el frenado regenerativo, en el cual la energía eléctrica que se recupera es enviada al bus de alimentación y aprovechada por otro tren, sin embargo no siempre pasa esto y se generan problemas.

Los sistemas eléctricos ferroviarios pueden ser de corriente alterna (CA) o de corriente directa (CD), en los sistemas de CA los voltajes de bus son de hasta 25kv lo que les permite manejar corrientes reducidas y a la vez tener menos pérdidas, además la conexión con la compañía de energía eléctrica les permite devolver energía a la red eléctrica.

En los sistemas que utilizan CD la conexión a la red es mediante rectificadores que solo pueden transferir energía en un solo sentido por lo que no es posible regresar energía a la red, además su tensión puede ser de hasta 3kv lo que ocasiona corrientes más grandes y por lo tanto más pérdidas.

Un factor importante es la receptividad, la cual se puede definir como la capacidad que tiene un sistema ferroviario para aceptar la energía regresada por los trenes durante el frenado [4].

Para sistemas que utilizan CD existen factores importantes que se pueden destacar:

- Pérdidas en subestaciones
- Pérdidas en conductores
- Pérdidas en reóstatos

De este modo se han implementado sistemas avanzados para el ahorro de energía y a continuación se enlistan algunos:

- Subestaciones reversibles
- Almacenadores de energía, dentro de los cuales están: los ultra capacitores, volantes de inercia y baterías.

1.3 Sistema de manejo de energía

El campo de los sistemas de manejo de energía está en constante evolución, lo que hace que a las tecnologías ya existentes se le vayan sumando, poco a poco, nuevas soluciones que se adapten a las necesidades de los trenes o mejoren algunas de las prestaciones originales.

En cualquier caso, estos sistemas pueden clasificarse según su ubicación, una de las opciones es cuando se instalan fuera del tren en un lugar determinado, ya que esta opción permite

mayor capacidad de almacenamiento de energía, al mismo tiempo una reducción de peso del tren, sin embargo la distancia entre el sistema y el tren pueden presentar caídas de voltaje y pérdidas, las cuales ocasionan el sistema no sea muy eficiente.

Otra opción es que el sistema de manejo se encuentre instalado dentro del tren, la ventaja de este tipo de sistema es que puede actuar directamente en el punto donde se encuentra el tren, sin embargo su mayor desventaja es que el peso adicional sobre el tren y en consecuencia su capacidad de almacenamiento de energía se debe limitar a un punto en el cual el peso adicional no genere mayor gasto de energía que el recuperado.

Como es lógico, en función de las ventajas e inconvenientes de cada una de las soluciones mencionadas, éstas son más utilizadas según los mayores beneficios energéticos que se obtengan. [5].

En la actualidad existen diversos sistemas de almacenamiento de energía, los más usados son [6]: almacenamiento de aire comprimido, volantes de inercia, ultra capacitores, baterías, sistemas de bombeo hidráulico, etc., aunque, debido a sus características, no todas ellas son aptas para ser utilizadas en aplicaciones ferroviarias.

Entre las que son las más utilizadas hoy en día como sistemas instalados dentro del tren son las baterías y los ultra capacitores [7], por otro lado para sistemas de manejo de energía instalados fuera del tren la opción más utilizada son los volantes de inercia.

Estos sistemas de manejo de energía necesitan ser dimensionados para la aplicación en la que van a ser utilizados, además de llevar a cabo un estudio de las dinámicas que se presentan durante la operación para definir una estrategia de manejo de energía.

1.4 Planteamiento del problema

Los sistemas de transporte con trenes eléctricos alimentados con un voltaje de corriente directa presentan diferentes problemas durante el recorrido del tren [3]. Uno de los problemas ocurre cuando se utiliza el frenado dinámico, la energía cinética del tren se pierde en bancos de resistencias, esto para evitar picos de voltaje en el bus de alimentación.

Si se utiliza el frenado regenerativo se pueden presentar situaciones en las que el sistema de manejo de energía no sea receptivo, esto principalmente provoca que el voltaje del bus de alimentación se incremente a niveles que podrían sobrepasar los límites permitidos, por consecuencia se pierde nuevamente la energía generada. Una de las soluciones a estos problemas es la utilización de un sistema de almacenamiento de energía.

Los sistemas de almacenamiento necesitan de una estrategia de control que maneje el flujo de energía absorbida y regresada al bus de alimentación. Con el sistema de almacenamiento se pueden reducir las variaciones en el voltaje de alimentación y los picos de potencia demandados a las subestaciones [8]. Además de definir una estrategia de control de flujo de energía, los sistemas de almacenamiento utilizados para recuperar energía necesitan ser

dimensionados para la aplicación específica en la que van operar [9], haciendo necesario el estudio de la aplicación.

Otro aspecto a considerar es la necesidad de visualizar el desempeño de la estrategia de control utilizada, debido al tamaño del sistema de transporte es difícil hacerlo a escala real. Una buena solución es hacerlo por medio de una simulación [10], se debe hacer un análisis y modelado matemático del sistema de almacenamiento.

1.5 Estado del arte

El estado del arte que se presenta se centra en el estudio de trabajos en los que se propone una solución a los problemas que se presentan en un tren eléctrico y al aprovechamiento de la energía que se genera durante el frenado regenerativo. Derivado de esto se abordarán trabajos en los que se lleva a cabo un modelado más detallado de los sistemas que integran el sistema de alimentación del tren, el sistema de almacenamiento y el tren mismo.

En las referencias [14-20] se lleva a cabo el modelado matemático de autos y trenes eléctricos desde el punto de vista energético, se considera una sumatoria de fuerzas que representan la resistencia mecánica, el arrastre aerodinámico y la resistencia debida a una pendiente además se considera la fuerza de aceleración.

Otro aspecto a considerar es que el análisis longitudinal de la dinámica de los vehículos eléctricos en estas publicaciones toma como base un perfil de velocidad definido y a partir de este se calculan parámetros como fuerza, torque, potencia y energía cinética del tren.

En [11] se hace el estudio de la influencia de un sistema de almacenamiento de energía fijo que utiliza capacitores, la compensación de las variaciones de voltaje en el bus de alimentación es el principal objetivo del trabajo. En esta referencia se propone un modelo de la red eléctrica en el que el voltaje de la subestación es representado por fuentes de voltaje en CD y la potencia de la subestación la limitan con una resistencia en serie con la fuente. Los trenes son modelados considerando todas sus características físicas y las fuerzas que actúan sobre el tren, posteriormente se define una fuente de corriente equivalente a nivel del bus de alimentación. Solo se consideran resistencias como parásitos en las líneas de alimentación ya que representan el efecto más significativo en el comportamiento del bus de alimentación. En la Figura 1.1 se muestra el esquema utilizado para el manejo de energía, en la Figura 1.2 se muestra el circuito utilizado.

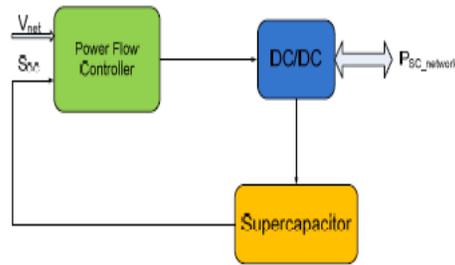


Figura 1.1: Esquema utilizado en [11] para el control del sistema de almacenamiento de energía.

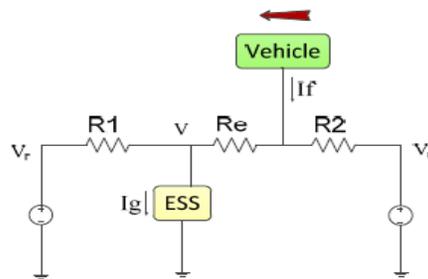


Figura 1.2: Circuito equivalente utilizado en [11] para representar el bus de alimentación del tren eléctrico.

En [12] se lleva a cabo una estrategia de control de energía en un sistema de manejo de energía para aplicaciones de tracción, el sistema de manejo de energía está integrado por un volante de inercia. Esta estrategia está basada solo en el voltaje del bus de CD, la energía instantánea del sistema de almacenamiento y la cantidad de potencia que se entrega y absorbe del bus. En este artículo se establecen tres regiones de operación del sistema y están delimitadas por rangos de voltaje. Las regiones que se establecen son Carga, Recuperación y descarga, en la Figura 1.3 se muestra la estrategia utilizada.

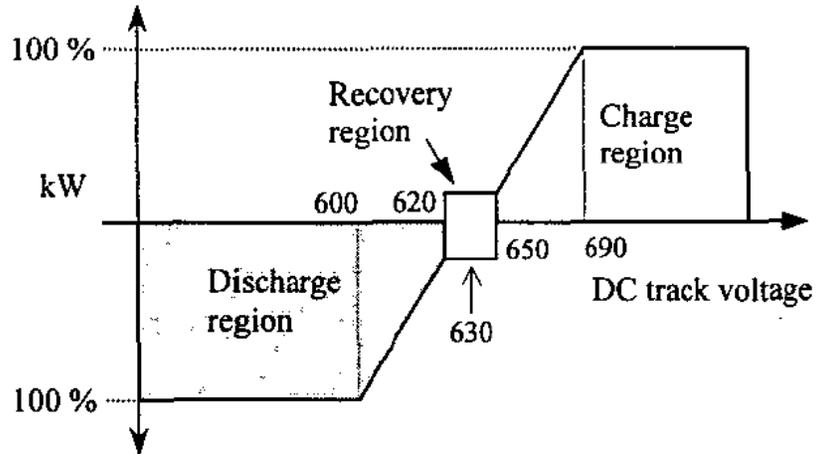


Figura 1.3: Estrategia de control de energía utilizada en [12].

En [13] se hace un análisis de un sistema de almacenamiento de energía con dos volantes de inercia para compensar el voltaje del bus de CD en un satélite. El sistema obtiene energía de paneles fotovoltaicos cuando la luz del sol incide sobre el satélite y la libera cuando la luz del sol no proporciona energía. En esta referencia se tienen dos sistemas de almacenamiento de energía, y se modelan como fuentes controladas de corriente.

La estrategia de manejo de energía se basa en una relación entre el voltaje del bus con la corriente que absorbe o entrega cada sistema de almacenamiento. En la Figura 1.4 se muestra el esquema utilizado.

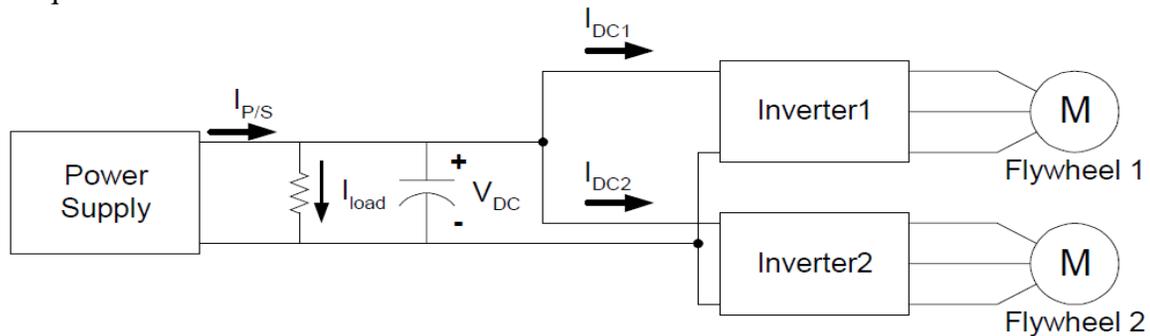


Figura 1.4: Esquema eléctrico utilizado en [13].

En [3] se lleva a cabo el desarrollo de un sistema de manejo de energía para compensar las caídas de voltaje debidas al periodo de aceleración de un tren eléctrico. El voltaje nominal del tren es de 750 VCD y llega tener caídas de hasta 530 VDC. El sistema de almacenamiento está instalado en un lugar fijo fuera del tren y la estrategia de control está basada y toma como variable a controlar el voltaje del bus. Sin embargo en esta referencia no se muestra como se simula el bus de alimentación y el modelado del sistema de almacenamiento.

En [21] se hace un estudio de las corrientes de fuga a tierra en trenes alimentados con CD. En este artículo se considera a la subestación como una fuente de voltaje en CD y al tren

(carga) como una fuente de corriente directa, además los parásitos en la línea de alimentación son considerados como resistencias únicamente.

En la Figura 1.5 se muestra el esquema que fue utilizado.

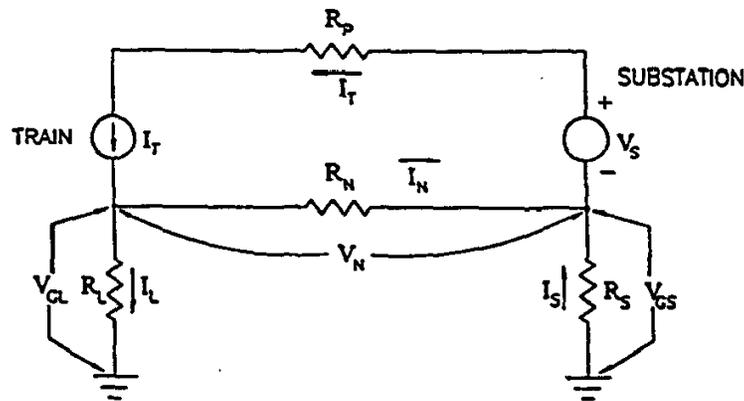


Figura 1.5: Esquema utilizado en [21] para representar una subestación eléctrica alimentando a un tren eléctrico.

De acuerdo a la literatura el voltaje del bus es la variable de entrada principal para la estrategia de manejo de energía, en base a este se puede saber si es necesario absorber o entregar energía al bus de alimentación. Si se absorbe o entrega energía se puede controlar el voltaje del bus de alimentación, de este modo se puede generar una estrategia de manejo de energía que se base en el voltaje del bus y maneje tres regiones de operación para el sistema de manejo de energía.

El método más utilizado para modelar vehículos eléctricos es el análisis longitudinal de fuerzas, este método ofrece versatilidad para poder simular vehículos con distintas características como peso, geometría y los parámetros que definen el material en el que se desplazan. En el modelado del bus de alimentación se considera al vehículo como una fuente de corriente y esto puede ser aplicado también al sistema de recuperación, además los parásitos que se consideran son resistencias eléctricas.

1.6 Propuesta de solución

Se propone hacer un estudio energético mediante un modelado basado en el análisis longitudinal de fuerzas en un tren eléctrico, tomando como referencia algunas características de los trenes utilizados en el Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México. Además en base a los resultados obtenidos dimensionar el tamaño y capacidad del sistema de almacenamiento de energía. El sistema de manejo de energía estará basado en un volante de inercia como elemento de almacenamiento.

También se adaptará una estrategia de control de energía para controlar la corriente que absorbe y entrega el sistema de manejo de energía al bus de alimentación del tren.

Para poder visualizar el efecto que tendría un sistema de manejo de energía en los parámetros del bus de alimentación se realizara un modelo aproximado que represente el bus de alimentación. En este modelo se podrá simular al tren moviéndose de una estación a otra.

Con lo anterior realizar una simulación del sistema completo que integre las diferentes etapas para observar el efecto que tendría un sistema de manejo en la energía que consume un tren durante su recorrido de una estación a otra.

En la Figura 1.6 se muestra el esquema del sistema de manejo de energía que se utilizara para realizar la simulación y las variables principales que se tomaran en cuenta. La estrategia de control identificara el momento en el que debe actuar sobre el bus de alimentación solo midiendo el voltaje del mismo. Para integrar el voltaje de inercia con el bus de alimentación se desarrollara una relación en re los parámetros físicos del volante y la potencia del sistema de manejo de energía, esto para simplificar el modelado del inversor y la máquina de inducción.

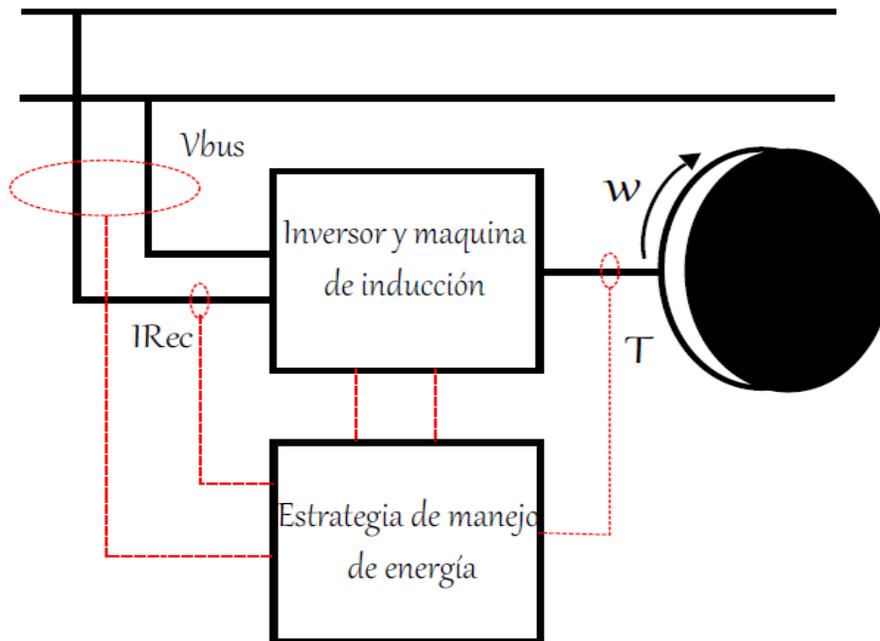


Figura 1.6: Sistema de manejo de energía propuesto en el trabajo de tesis.

1.7Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Simulación de un sistema de manejo de energía que permita compensar las variaciones de voltaje en el bus de alimentación producidas por el frenado regenerativo de un tren eléctrico, a través de una estrategia de control de energía.

1.7.2 Objetivos particulares

1. Realizar una búsqueda del estado del arte entorno al modelado de trenes eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía con volantes de inercia.
2. Realizar el modelado de un tren eléctrico para obtener la energía disponible durante un frenado regenerativo.
3. Dimensionar el sistema de almacenamiento y recuperar al menos el 50% de la energía disponible.
4. Realizar un modelo que represente el bus de alimentación del tren eléctrico.
5. Establecer una estrategia de control de energía.
6. Integrar las distintas etapas de modelado mediante simulación.

1.8 Justificación

El modelado y la simulación de un tren eléctrico y su sistema de alimentación considerando un sistema de manejo de energía proporcionan información que puede ayudar a analizar el comportamiento de un sistema de dimensiones reales. Esto permite evaluar y visualizar diferentes parámetros durante el funcionamiento del sistema, lo cual puede ser de gran ayuda para el diseño de este tipo de sistema de gran potencia.

Debido a que el sistema que compone y alimenta a un tren eléctrico es enorme, tener la posibilidad de aproximarse un poco al comportamiento que este tiene bajo diferentes circunstancias puede ser de gran ayuda para la realización de proyectos a escala real. Además los sistemas de transporte con trenes eléctricos son utilizados en distintas partes del mundo y representan casi en su totalidad el consumo de energía eléctrica utilizada para transporte, por lo que se hace necesario mejorar y hacer eficiente su uso.

Capítulo 2: Modelado del sistema de manejo de energía

En este capítulo se presenta el modelado del tren que será utilizado para determinar los niveles de energía, fuerza y potencia mecánica del tren durante un recorrido, para lo anterior se toman en cuenta especificaciones físicas reales del tren que son la base para el análisis de fuerzas. Por otro lado se muestra el modelado de la red eléctrica que alimenta al tren, así como la estimación de los parámetros, lo cual considera la disposición de las barras guía que determinan el comportamiento del sistema de manejo de energía. Así mismo se presenta el perfil de velocidad con el que se realiza el análisis energético. También se abordan las características físicas del tren que serán utilizadas en el análisis longitudinal de fuerzas. Por último se muestra el modelado del sistema de manejo de energía y como interactúa con el bus de alimentación del tren.

2.1 Análisis y modelado del tren

Para establecer el modelo del tren se determinan cada una de las fuerzas que interactúan en el vehículo y estas definen la dinámica de movimiento. Las fuerzas mencionadas determinan la fuerza total necesaria para garantizar un perfil de velocidad establecido en la marcha del tren.

Principalmente son cuatro fuerzas las que actúan y determinan la fuerza de arrastre total que requieren los motores del tren para garantizar su movimiento [14-20]. La principal variable de entrada en el análisis del movimiento del tren es el perfil de velocidad, el cual se encuentra establecido y el objetivo del análisis es determinar niveles de fuerza, potencia y energía en el recorrido del tren. En la figura 2.1 se muestran las fuerzas que intervienen en el movimiento del vehículo.

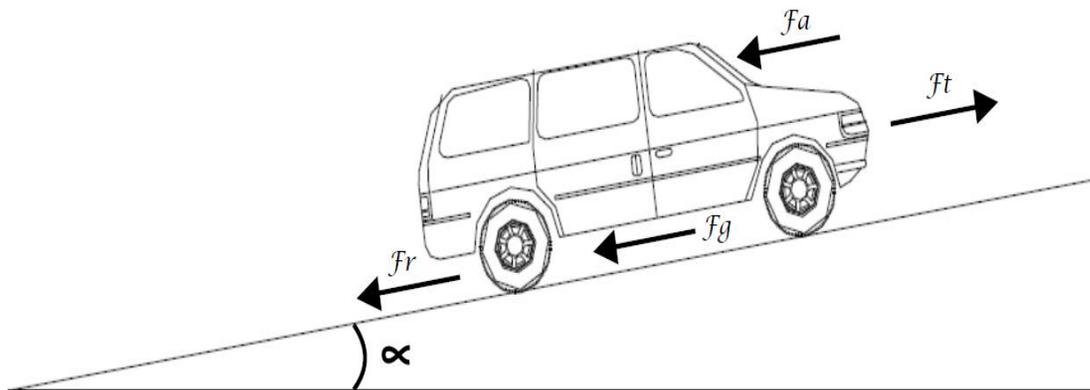


Figura 2.1: Fuerzas que intervienen en el movimiento de un vehículo a lo largo de una pendiente.

La fuerza de resistencia a la rodadura F_r es debida principalmente a la fricción del neumático con el piso. Esta fuerza es aproximadamente constante y además es proporcional al peso total del vehículo.

La ecuación que describe esta fuerza es:

$$F_r = f_r m_{total} g \quad (2.1)$$

Donde:

f_r = Coeficiente de resistencia a la rodadura.

m_{total} = Masa total del tren (contemplando pasajeros).

g = Gravedad.

La masa total del tren se compone de la masa del tren vacío más la masa de los pasajeros. Y se muestra en (2.2).

$$m_{total} = m_{tren} + m_{pasajeros} \quad (2.2)$$

La fuerza de arrastre aerodinámica F_a es debida a la fricción ejercida por el cuerpo del vehículo moviéndose a través del aire. Esta fuerza está en función del área frontal del vehículo y la forma que este tenga. La expresión para este tipo de fuerza está definida como:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A_F C_d v^2 \quad (2.3)$$

Donde:

ρ = Densidad del aire.

A_F = Área Frontal del Tren.

v = Velocidad del tren.

C_d = Coeficiente de resistencia aerodinámica.

La fuerza F_g es la fuerza requerida para llevar al tren por una pendiente. Es la componente del peso del tren que actúa en la pendiente, esta fuerza puede ser negativa o positiva dependiendo del sentido del ángulo de la pendiente.

La expresión que describe el comportamiento de esta fuerza se muestra en (2.4)

$$F_g = m_{total} g \sin \alpha \quad (2.4)$$

Otra fuerza que actúa sobre el tren y es la predominante en la sumatoria de fuerzas es la fuerza de aceleración. Cuando la velocidad del tren cambia es necesario aplicar una fuerza adicional. Esta fuerza causa una aceleración constante del vehículo y se representa por la ecuación de la segunda ley de Newton.

$$F_{ac} = m_{total} a_c \quad (2.5)$$

Donde:

a_c = Aceleración del vehículo.

La suma de las Ecuaciones (2.1), (2.3), (2.4) y (2.5) definen la fuerza total que requiere el tren para garantizar que se lleve a cabo el perfil de manejo establecido para el tren. En (2.6) se muestra la expresión que define la fuerza requerida.

$$F_t = F_r + F_a + F_g + F_{ac} \quad (2.6)$$

Sustituyendo (2.1), (2.3), (2.4) y (2.5) en (2.6) se tiene:

$$F_t = f_r m_{total} g + \frac{1}{2} \rho A_F C_d v^2 + m_{total} g \sin \alpha + m_{total} a_c \quad (2.7)$$

Una vez conociendo el perfil de fuerza necesaria para el movimiento del tren es de gran importancia saber los niveles de potencia mecánica que esta fuerza representa. La potencia de un cuerpo rígido moviendo es proporcional al producto de la fuerza instantánea que lo

impulsa y la velocidad instantánea del mismo. En (2.8) se muestra la potencia mecánica del tren.

$$P_i = F_i v \quad (2.8)$$

Uno de los parámetros de gran importancia es conocer los niveles de energía disponible durante el frenado del tren. La energía será el punto de partida para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía, ya que se necesita saber cuánta energía hay disponible y cuánta energía puede ser recuperada para su reutilización. En (2.9) se muestra la expresión que se utilizara para calcular la energía instantánea en el recorrido del tren.

$$W_i = \int P_i dt = \int F_i v dt \quad (2.9)$$

2.2 Validación del modelo del tren

Para validar el análisis y modelado del tren se tomó la información reportada en [28] en la que se presentan los resultados de simulación y pruebas reales de un auto eléctrico. En este artículo están proponiendo una metodología para optimizar el perfil de manejo, sin embargo la comparación que se realiza es con los resultados del perfil de velocidad convencional. En la Figura 2.2 se muestra el perfil de velocidad utilizado durante la prueba experimental.

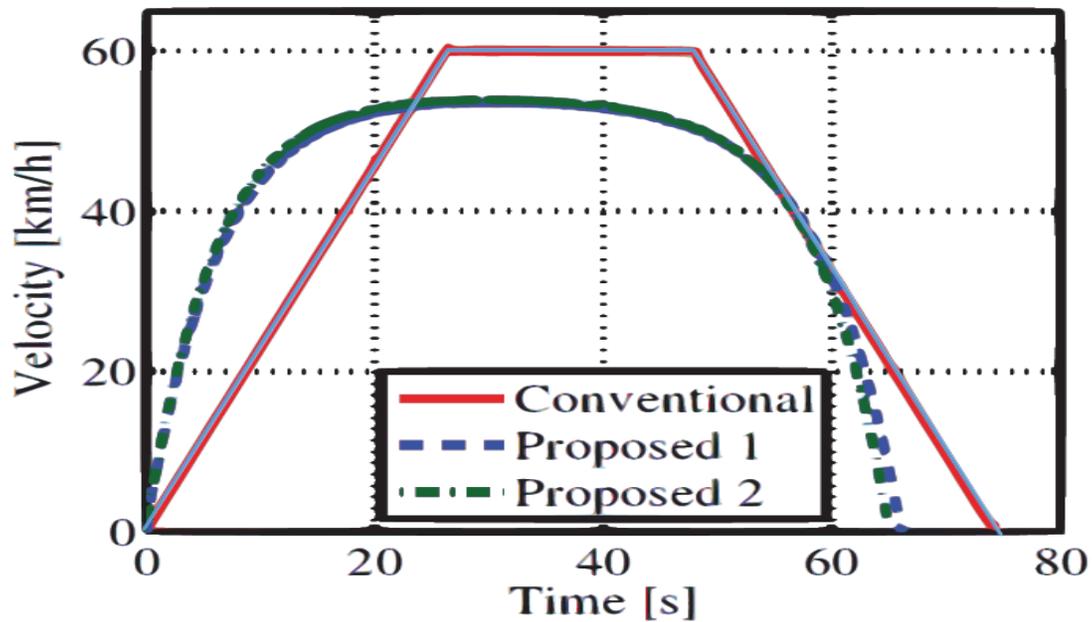


Figura 2.2: Perfil de velocidad utilizado en [28] para realizar la prueba experimental del coche eléctrico.

En color rojo se muestra el perfil convencional, este está bien definido y es el perfil de interés, ya que es con el que se va a realizar la comparación. En color azul claro se muestra el perfil que se utilizó para simular la prueba del coche y que fue obtenido a partir del perfil real (en

color rojo). Esta simulación se llevó a cabo utilizando el modelado que anteriormente se presentó. Además se muestran los perfiles propuestos en el artículo (en color verde y azul marino), los cuales no se tomaran en cuenta ya que el perfil que se está comparando es el convencional.

En la Figura 2.3 se muestra la fuerza necesaria para el perfil de manejo convencional obtenida de manera experimental. En rojo se muestra para el perfil descrito en la Figura 2.2 como convencional, en azul claro se muestran los resultados que fueron obtenidos mediante la simulación del modelo propuesto en este tema de tesis.

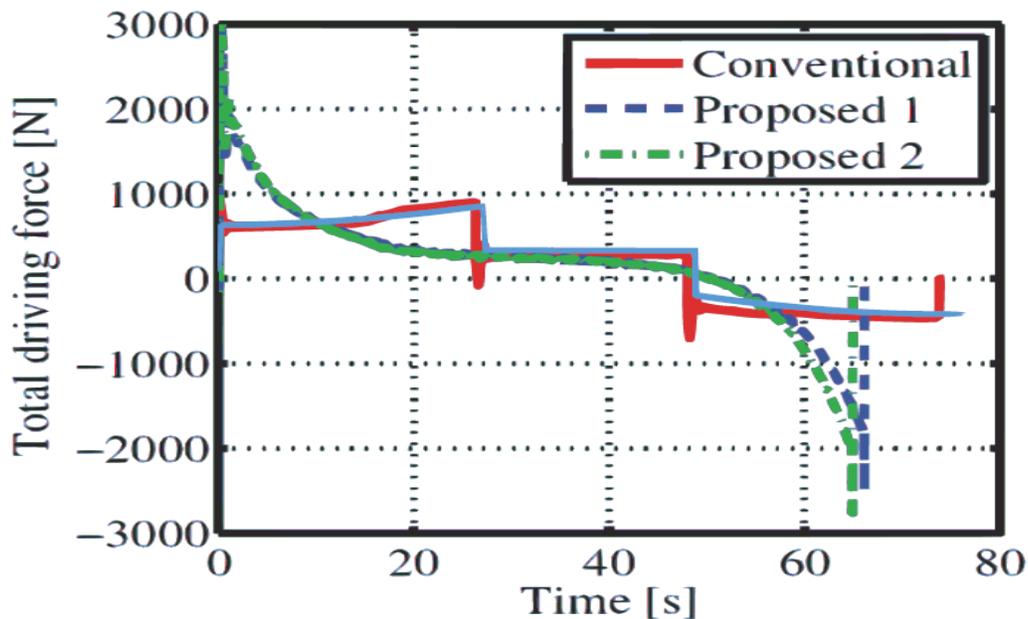


Figura 2.3: Perfil de fuerza obtenido de manera experimental y resultados de simulación.

Como se puede apreciar en la Figura 2.3 el perfil de fuerza obtenido por medio del modelo planteado en este trabajo de tesis (Azul claro) es muy cercano al perfil de fuerza obtenido mediante las pruebas experimentales (color rojo).

En la Figura 2.4 se muestra la potencia necesaria para el perfil de manejo descrito en la Figura 2.2 como convencional. En color rojo se muestra el resultado experimental y en color azul el resultado del modelado planteado en este tema de tesis.

Cabe aclarar que la potencia que muestra en el artículo es la potencia de entrada al inversor que alimenta el motor, y la potencia que se calcula en el modelo que se propone es la potencia mecánica necesaria para garantizar el perfil de manejo descrito. De este modo a la potencia de entrada al inversor es igual a la potencia mecánica más las pérdidas en el inversor y el motor que proporciona el movimiento al vehículo.

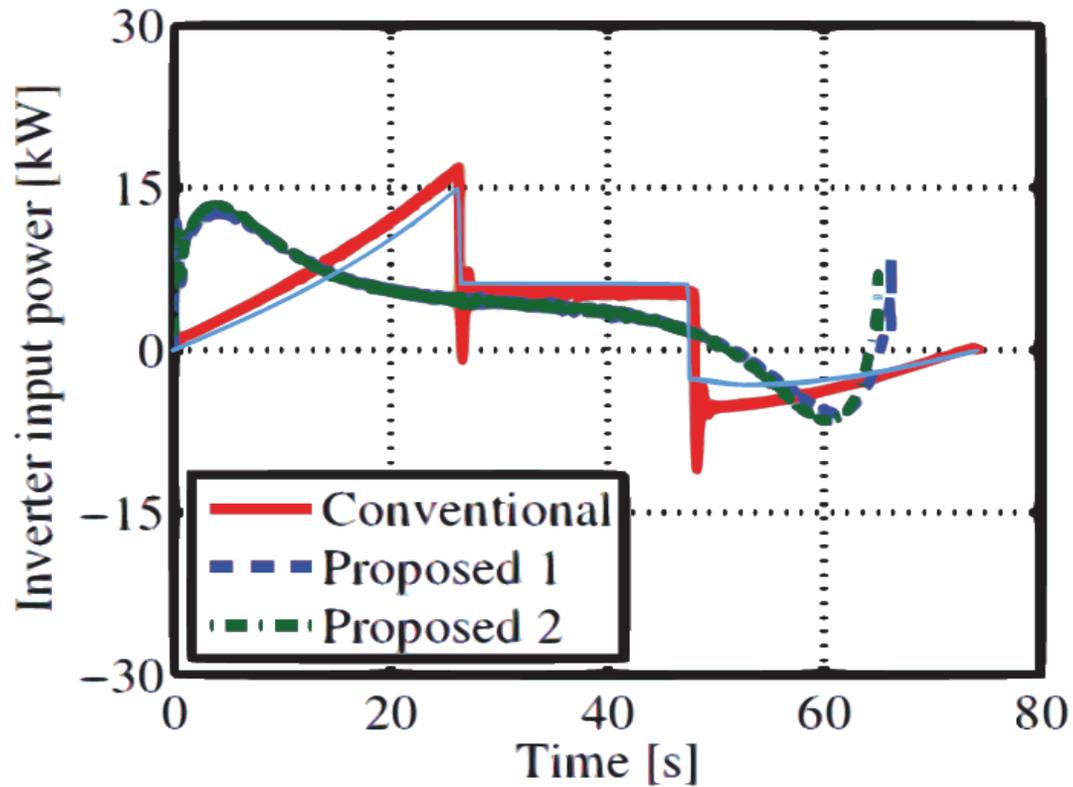


Figura 2.4: Perfil de potencia obtenido de manera experimental y perfil de potencia resultado del modelado propuesto.

Como se puede apreciar en la Figura 2.4 la potencia obtenida por medio del modelado propuesto en este trabajo de tesis es muy cercana al perfil de potencia obtenido en [28] por medio de pruebas experimentales. Esto ayuda a determinar que los resultados obtenidos en simulación con el modelado propuesto se apegan a la realidad.



Figura 2.5: Vehículo eléctrico utilizado en [28] para realizar pruebas experimentales.

En la figura 2.5 se muestra el vehículo eléctrico utilizado en [28] para realizar las pruebas experimentales. En la Tabla 2.1 se muestran las especificaciones físicas del vehículo eléctrico reportadas en [28], se tomaron algunos datos de esta información para simular el vehículo con el modelo propuesto.

Tabla 2.1: Especificaciones del vehículo

Parámetro	Valor
Masa del vehículo	854kg
Distancia del centro de gravedad a la rueda frontal	1.01m
Distancia del centro de gravedad a la rueda trasera	0.702m
Inercia de la rueda delantera	1.24kg.m ²
Inercia de la rueda trasera	1.26kg.m ²
Radio de la llanta	0.302m

2.3 Perfil de velocidad del tren

El perfil de velocidad es la parte medular del estudio del tren, esto debido a que el modelado físico del tren se basa en un perfil de velocidad establecido. Las variables de fuerza, potencia y energía son obtenidas a partir del perfil establecido durante el recorrido del tren.

Se realizaron mediciones de velocidad y se obtuvieron ocho perfiles de velocidad utilizando un GPS que proporciona la velocidad del tren en intervalos de un segundo. Los perfiles fueron tomados en la línea 2 del sistema de transporte colectivo metro de la ciudad de México. Se eligió tomar el perfil de velocidad iniciando en la estación General Anaya y terminando en la estación San Antonio Abad debido a que estas se encuentran al aire libre. Lo anterior permitió contar con un perfil de velocidad del tren de manera realista.

Las estaciones tenían que estar al aire libre ya que el GPS no registraba la velocidad del tren durante recorridos subterráneos. En la Figura 2.7 se muestran las estaciones del metro que fueron seleccionadas para obtener el perfil de velocidad del tren.



Figura 2.7: Línea 2 del sistema de transporte colectivo metro de la Ciudad de México, marcadas con una flecha las estaciones elegidas.

En la Figura 2.7 se observa que se trata de nueve estaciones, un perfil de velocidad inicia en una estación y termina en la estación contigua.

Con nueve estaciones se pueden obtener ocho perfiles de velocidad, en la Figura 2.8 se muestran los perfiles obtenidos con el GPS en un recorrido que empieza en la estación General Anaya y termina en la estación San Antonio Abad.

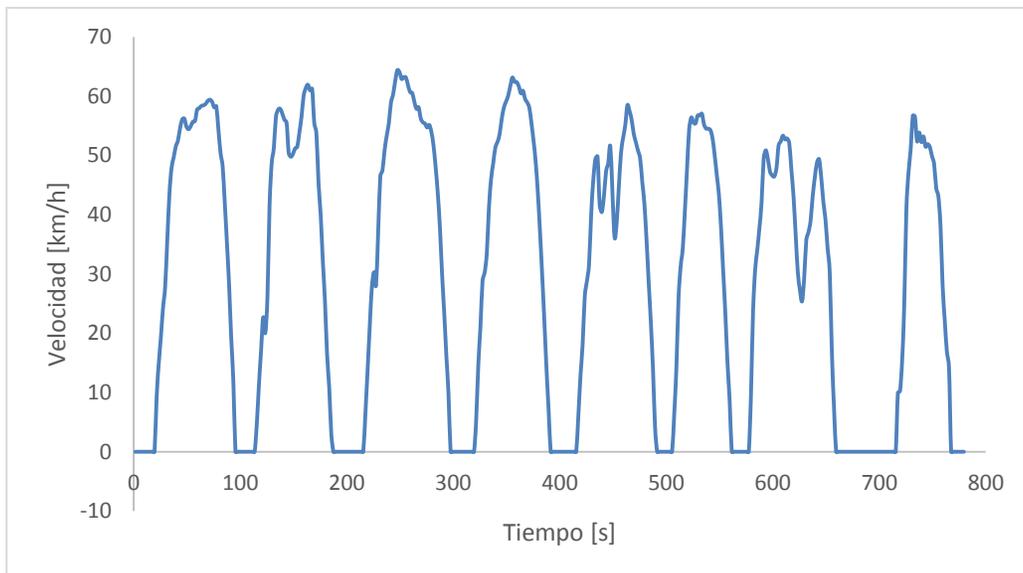


Figura 2.8: Perfil de velocidad obtenido con GPS de la estación General Anaya a la estación San Antonio Abad.

Para calcular la distancia entre una estación y otra y además para poder calcular parámetros como inductancia y resistencia se partió de la ecuación de la velocidad de un cuerpo [22].

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.10)$$

Donde:

v = Velocidad del tren.

x = Distancia recorrida.

Despejando a x de (2.10) se obtiene.

$$x = \int_{t_1}^{t_2} v dt \quad (2.11)$$

De esta manera se puede calcular la distancia entre una estación y otra y además la distancia a la que se encuentra el tren de una estación en cualquier instante de tiempo. Se procedió a integrar el perfil de velocidad para obtener la distancia recorrida por unidad de tiempo y con esto determinar la distancia entre cada estación.

Las distancias son las siguientes:

- General Anaya-Ermita: 947.48m
- Ermita-Portales: 849.52m
- Portales-Nativitas: 1035.69m
- Nativitas-Villa de Cortes: 877.44m

- Villa de Cortes-Viaducto: 1440.19m
- Viaducto-San Antonio Abad: 1428.54m

2.4 Características físicas del tren

Como base para el estudio energético se tomó como referencia un tren del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México.

Un tren está compuesto por 9 vagones de los cuales 6 son motrices y 3 son remolques, en conjunto el tren pesa 231.4 toneladas sin pasajeros $\therefore m_{tren} = 231.4 \times 10^3 \text{ kg}$. El tren tiene un cupo de 349 pasajeros sentados y se considera para carga media un total de 416 pasajeros de pie, con lo que arroja un total de 765 pasajeros. Se considera a cada pasajero con un peso de 70 kg por lo que se tiene un peso total de 53.55 toneladas $\therefore m_{pasajeros} = 53.55 \times 10^3 \text{ kg}$ [23].

Sustituyendo el peso del tren y los pasajeros en (2.12) se obtiene el peso total del tren.

$$m_{tren} + m_{pasajeros} = 231.4 \times 10^3 + 53.55 \times 10^3 = 284.95 \times 10^3 \text{ kg} \quad (2.12)$$

En [26] se muestran las medidas de la parte frontal del tren, este se considera como un prisma rectangular y según la información el ancho del tren es de 2.5 m, la altura del piso al techo es de 2.4 m. Esto arroja un a frontal del tren:

$$A_f = 2.4 \times 2.5 = 6 \text{ m}^2 \quad (2.13)$$

El coeficiente de resistencia a la rodadura es otra de las expresiones que tienen que ser definidas para el análisis energético del tren. En [17] se propone una expresión para ruedas de caucho de un camión de carga, este tipo de llanta es similar a las utilizadas en vagones para carriles neumáticos. El valor que se obtuvo en [17] es:

$$f_r = 0.006 + 0.23e^{-6} = 0.00657 \quad (2.14)$$

Para el coeficiente de arrastre aerodinámico en [24] se considera un vehículo de carga con características similares a un vagón del tren del metro. En este estudio se aborda un análisis de capa límite y prototipos en el túnel de viento. Estas técnicas son aplicadas para hacer una estimación empírica del coeficiente de arrastre aerodinámico. El coeficiente de arrastre que fue calculado para este tipo de vehículos es:

$$C_d = 0.668 \quad (2.15)$$

Tabla 2.2: Parámetros Físicos del tren.

Parámetro	Valor
Masa del tren $m_{tren} + m_{pasajeros}$	$284.95 \times 10^3 \text{ kg}$
Área Frontal A_F	6 m^2
Coefficiente f_r	0.00657
Coefficiente C_d	0.668

2.5 Análisis de la red eléctrica

Un tren con rodadura neumática tiene dos tipos de ruedas para su funcionamiento. El primer tipo de llanta se encarga de sostener el peso del tren sobre el piso donde se está desplazando, en el caso de un vagón motriz esta rueda se encarga de transmitir el movimiento del motor para el desplazamiento del tren. El segundo tipo de rueda se encarga de dar dirección al tren por medio de unas barras que se encuentran a los costados de la vía, esta rueda recibe el nombre de rueda guía.

Las barras guía además de dar dirección al tren también se encargan de abastecer de energía eléctrica al tren. El tren cuenta con escobillas que están en contacto con las barras guía y toman energía de las mismas. En la Figura 2.9 se muestra la disposición de las barras guía y las escobillas que toman energía de estas.



Figura 2.9: Ubicación de las barras guía en la vía del tren.

Para simular el bus de alimentación es necesario calcular los elementos parásitos que son inherentes a las barras guía como resistencia e inductancia. En el Anexo A se muestran las propiedades eléctricas, mecánicas y composición química de las barras guía. Para el caso estas barras son ángulo de 6" x 4" x 7/8" de acero A-34-2NE con $0.02927 \Omega/km$ [25].

Además de la resistencia que representan las barras guía es de interés conocer la inductancia parásita que representan. De esta forma se puede estudiar el efecto que tiene este tipo de parásitos en el bus de alimentación y su interacción con el voltaje y la corriente de cada subestación.

La inductancia de una línea de corriente directa compuesta por dos conductores de radio a y separados por una distancia d y para $d \gg a$ se tiene en (2.16) [26].

$$\frac{L_{ex}}{l} = \frac{\mu_0}{\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right) \quad (2.16)$$

Donde:

L_{ex} = Inductancia externa del par de conductores.

l = Longitud de los conductores.

La Ecuación 2.16 muestra la inductancia externa por unidad de longitud. En la Figura 2.10 se muestra la sección transversal de las barras guía

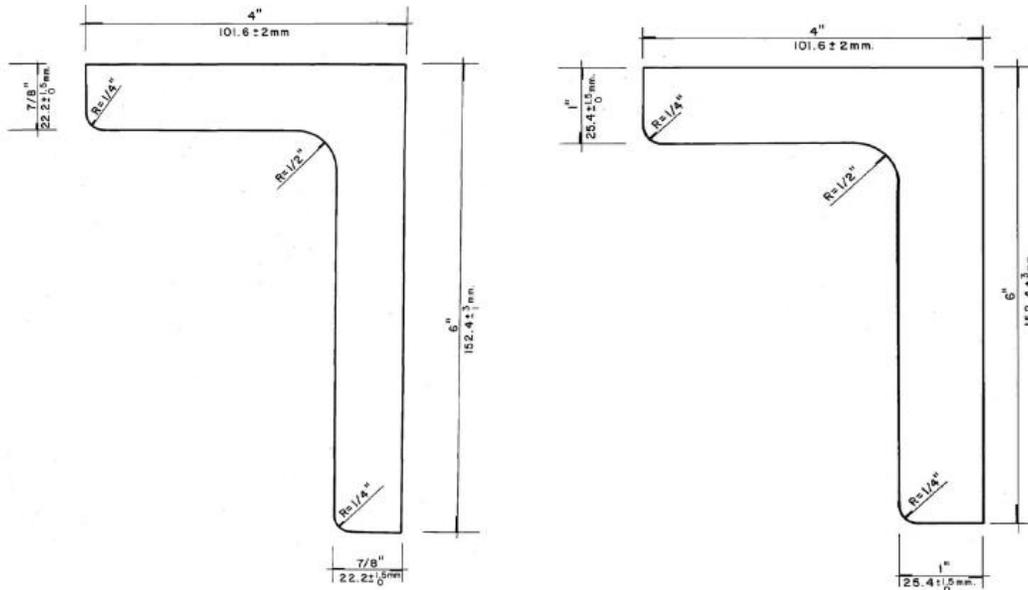


Figura 2.10: Corte transversal de las barras guía [25].

Para poder realizar una aproximación se calculó el área transversal de la barra guía y posteriormente se calculó un radio equivalente. De este modo se puede calcular la inductancia de las barras guía.

$$A_t = 5.80644 \times 10^{-3} m^2 \quad (2.17)$$

Ahora se calcula el radio equivalente en la (2.18).

$$a_c = \sqrt{\frac{A_t}{\pi}} = \sqrt{\frac{5.80644 \times 10^{-3}}{\pi}} = 0.043 m \quad (2.18)$$

En [26] se muestra que la inductancia interna de cualquier conductor es igual a:

$$L_{in} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \left(\frac{H}{m} \right) \quad (2.19)$$

Para obtener la distancia entre las barras guía se recurrió la Figura 2.11 en donde se muestra la disposición real de las barras. De acuerdo con la Figura 2.11 la distancia entre las barras guía d es de 2.497 m.

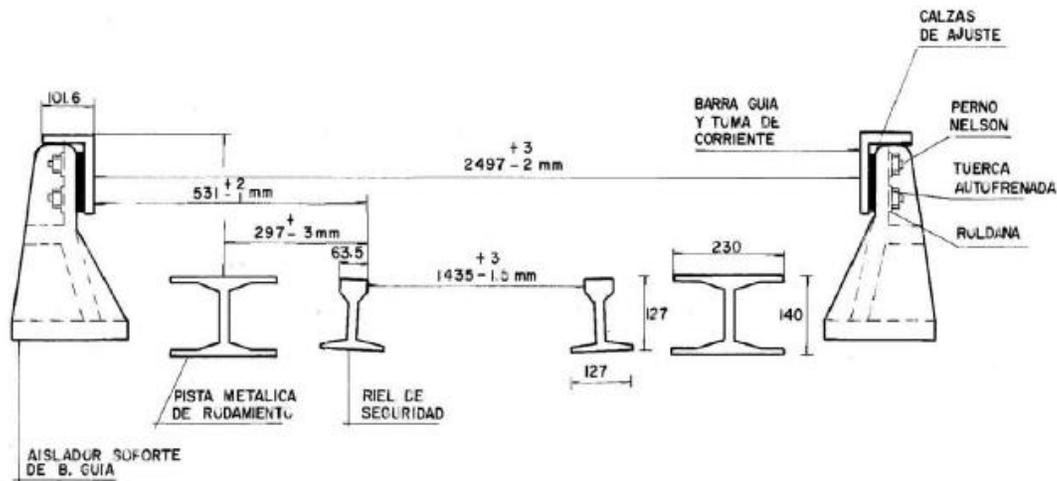


Figura 2.11: Ubicación de los elementos que integran una vía para rodamiento neumático [25].

Sustituyendo el radio equivalente y la distancia de las barras guía en (2.16) se obtiene.

$$\frac{L_{ex}}{l} = \frac{1.2566 \times 10^{-6}}{\pi} \ln \left(\frac{2.497}{0.043} \right) = 1.6246 \times 10^{-6} \left(\frac{H}{m} \right) \quad (2.20)$$

Para obtener la inductancia total por metro se suma la inductancia interna con la inductancia externa (2.19 y 2.20) [24].

$$L_r = L_{in} + L_{ex} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} + 1.6246 \times 10^{-6} = 1.6746 \times 10^{-6} \left(\frac{H}{m} \right) \quad (2.21)$$

2.6 Modelado del bus de alimentación.

El comportamiento del voltaje del bus es determinante para definir las dinámicas de energía, ya que la energía disponible en el frenado está directamente relacionada con las variaciones del voltaje del bus.

En la Figura 2.12 se muestra un circuito que representa a un tren siendo alimentado por dos subestaciones de CD.

Los parásitos como resistencia e inductancia son calculados en función de la distancia que va recorriendo el tren. Se realizó una comparación del comportamiento del voltaje del bus considerando resistencias e inductancias como parásitos con el comportamiento del mismo considerando solo resistencias como parásitos.

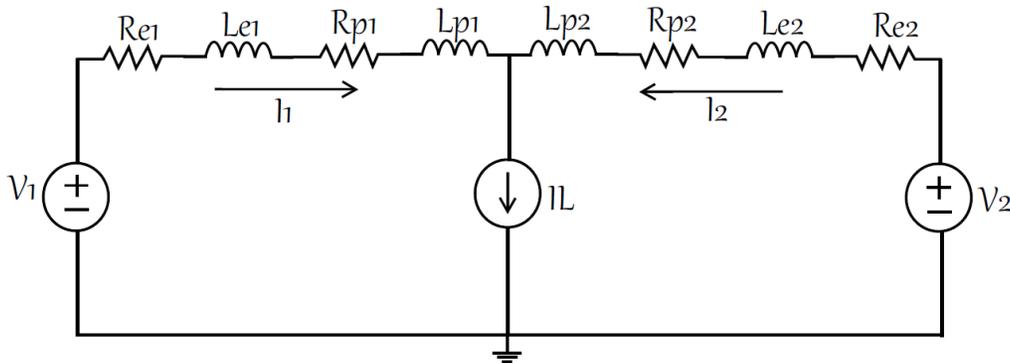


Figura 2.12: Esquema del bus de alimentación con dos subestaciones contemplando resistencias e inductancias como parásitos.

En la figura 2.12 la resistencia Re_1 y la inductancia Le_1 representan los parámetros de la subestación 1, así como la resistencia Re_2 y la inductancia Le_2 representa los parámetros de la subestación 2.

A continuación se muestra el análisis del circuito mostrado en la Figura 2.12.

Al realizar una suma de voltajes en el recorrido exterior del circuito se obtiene (2.22).

$$V_1 - (Re_1 + Rp_1)I_1 - (Le_1 + Lp_1) \frac{dI_1}{dt} + (Re_2 + Rp_2)I_2 + (Le_2 + Lp_2) \frac{dI_2}{dt} - V_2 = 0 \quad (2.22)$$

De la suma de corrientes se tiene (2.23).

$$I_1 = I_L - I_2 \quad (2.23)$$

Al sustituir (2.23) en (2.22) se tiene:

$$V_1 - (R_{e1} + R_{p1})I_L - (L_{e1} + L_{p1})\frac{dI_L}{dt} + (R_{e1} + R_{p1} + R_{e2} + R_{p2})I_2 + (L_{e1} + L_{p1} + L_{e2} + L_{p2})\frac{dI_2}{dt} - V_2 = 0 \quad (2.24)$$

Donde I_L es conocida y la única incógnita es I_2 y su derivada, para poder calcularla mediante bloques se procede a despejar la derivada más grande.

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{1}{L_T} \left[V_2 + (R_{e1} + R_{p1})I_L + (L_{e1} + L_{p1})\frac{dI_L}{dt} - (R_{e1} + R_{p1} + R_{e2} + R_{p2})I_2 - V_1 \right] \quad (2.25)$$

Donde:

$$L_T = L_{e1} + L_{p1} + L_{e2} + L_{p2} \quad (2.26)$$

Para el voltaje de la subestación 1 se tiene lo siguiente.

$$V_{sub1} = V_1 - R_{e1} I_1 - L_{e1} \frac{dI_1}{dt} \quad (2.27)$$

Para el voltaje de la subestación 2 se tiene lo siguiente.

$$V_{sub2} = V_2 - R_{e2} I_2 - L_{e2} \frac{dI_2}{dt} \quad (2.28)$$

En la Figura 2.13 se muestra el circuito que representa a un tren siendo alimentado por dos subestaciones de rectificación contemplando solo resistencias como elementos parásitos. La resistencia R_{e1} y R_{e2} representan la resistencia que limita la potencia de la subestación 1 y 2 respectivamente.

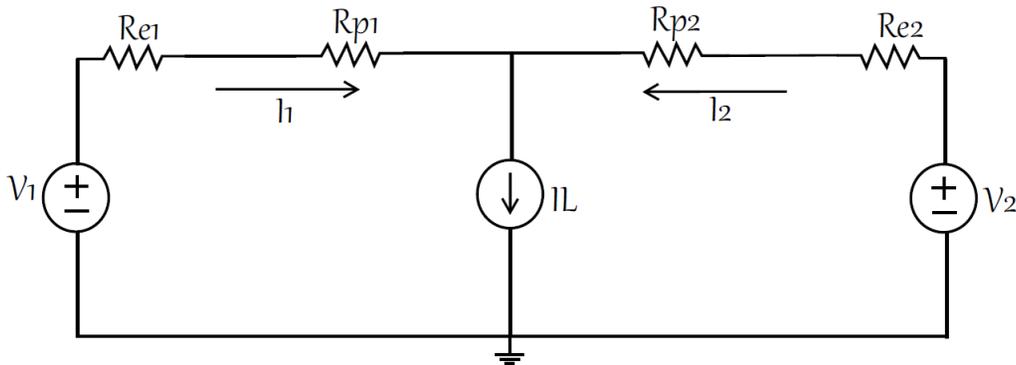


Figura 2.13: Esquema del bus de alimentación con dos subestaciones contemplando solo resistencias como parásitos.

A continuación se muestra el análisis del circuito mostrado en la Figura 2.13.

Al realizar una sumatoria de voltajes por el circuito exterior se obtiene (2.29).

$$V_1 - (\text{Re}_1 + R_{p1})I_1 + (\text{Re}_2 + R_{p2})I_2 - V_2 = 0 \quad (2.29)$$

De la suma de corrientes se tiene que:

$$I_1 = I_L - I_2 \quad (2.30)$$

Sustituyendo (2.30) en (2.29) se tiene lo siguiente.

$$V_1 - (\text{Re}_1 + R_{p1})I_L + (\text{Re}_1 + R_{p1} + \text{Re}_2 + R_{p2})I_2 - V_2 = 0 \quad (2.31)$$

Despejando I_2 se obtiene (2.31).

$$I_2 = \frac{1}{R_t} [V_2 + (\text{Re}_1 + R_{p1})I_L - V_1] \quad (2.32)$$

Donde:

$$R_t = \text{Re}_1 + R_{p1} + \text{Re}_2 + R_{p2} \quad (2.33)$$

Para el voltaje de la subestación 1 se tiene lo siguiente.

$$V_{sub1} = V_1 - \text{Re}_1 I_1 \quad (2.34)$$

Para el voltaje de la subestación 2 se tiene lo siguiente.

$$V_{sub2} = V_2 - \text{Re}_2 I_2 \quad (2.35)$$

En la Figura 2.15 se muestra una comparación del comportamiento del voltaje en la subestación 1 para el circuito de la Figura 2.12 y el circuito de la Figura 2.13. Esto utilizando el perfil de velocidad para el recorrido de la Estación General Anaya a la Estación San Antonio Abad que es mostrado en la Figura 2.14

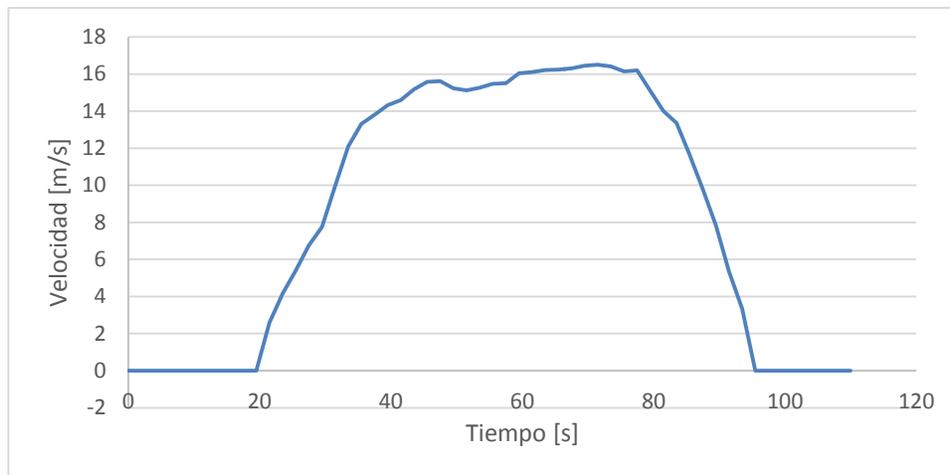


Figura 2.14: Perfil de velocidad del recorrido de la Estación General Anaya a la Estación San Antonio Abad.

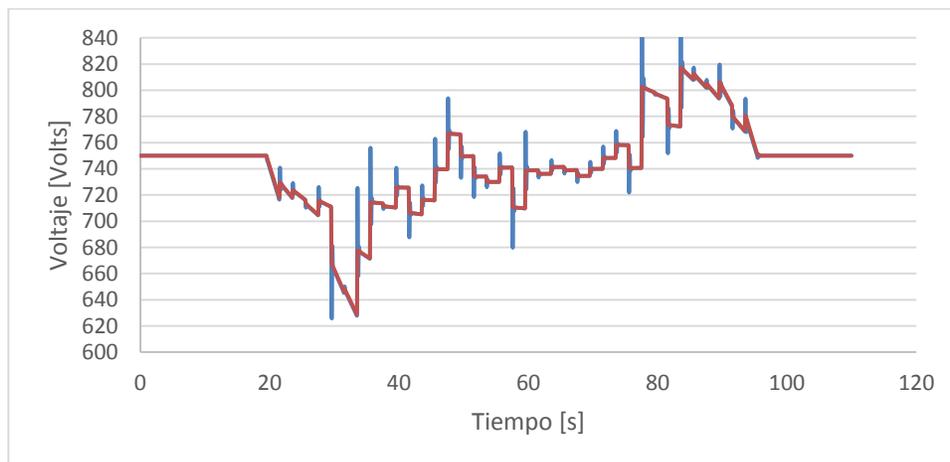


Figura 2.15: Comparación del voltaje de la subestación 1. En azul contemplando resistencias e inductancias y en rojo solo contemplando resistencias como parásitos.

De la misma manera en la Figura 2.16 se muestra la comparación del voltaje de la subestación 2. Como se puede observar el comportamiento del voltaje del bus es prácticamente determinado por las resistencias parásitas. En [21] y [11] se consideran solo resistencias como elementos parásitos para estudiar el comportamiento del voltaje del bus. Por lo que para facilitar el modelado del bus y permitir sumar más subestaciones y la posibilidad de simular dos trenes en la línea de alimentación se consideraran solo resistencias como elementos parásitos, cabe mencionar que el modelo del bus de alimentación se utilizara solo para simulación ya que no se cuenta con los elementos necesarios para validar los resultados del modelado.

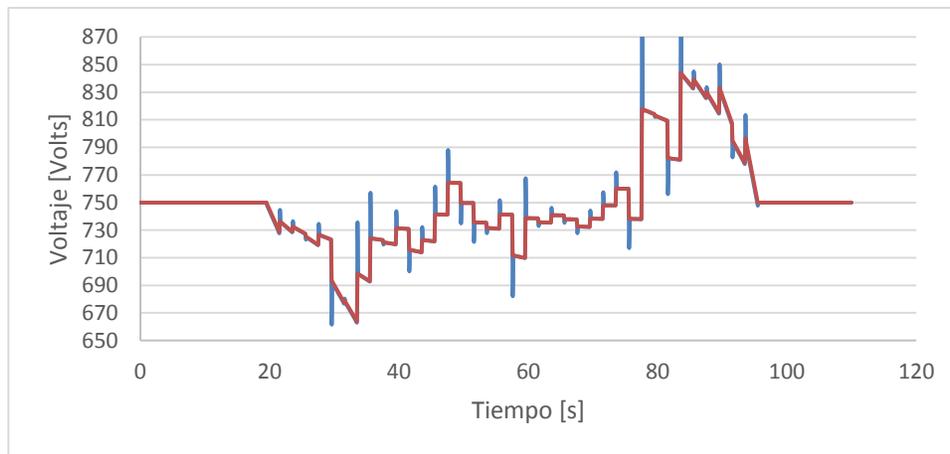


Figura 2.16: Comparación del voltaje de la subestación 2. En azul contemplado resistencias e inductancias y en rojo solo contemplado resistencias como parásitos.

Para tener un modelo más completo se optó por realizar el modelado del bus de CD con cinco subestaciones de rectificación (Figura 2.17), las cuales están definidas por las fuentes de voltaje V_1 hasta V_5 respectivamente y las resistencias R_{e1} hasta R_{e5} que limitan la potencia de la subestación de rectificación. En el modelo se considera la existencia de dos trenes que están representados por las fuentes de corriente I_{L1} e I_{L2} . También se consideran dos sistemas de manejo de energía SM1 y SM2 que se representan con las fuentes de corriente I_{R1} e I_{R2} respectivamente.

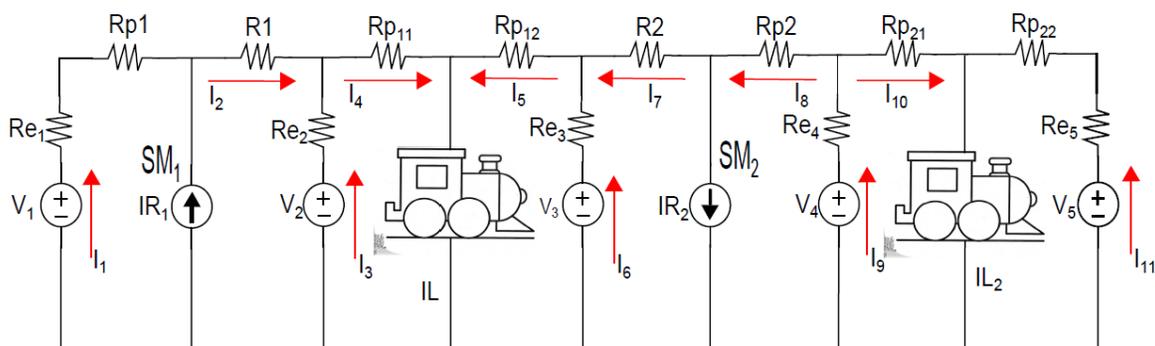


Figura 2.17: Modelo del bus de alimentación contemplando cinco subestaciones y dos trenes siendo alimentados.

En especial las resistencias R_{p11} , R_{p12} , R_{p21} y R_{p22} son los parásitos que se presentan a lo largo del trayecto de una estación a otra y se calculan en función de la distancia que va recorriendo el convoy, esto se mostró con mayor detalle en el primer avance de tesis.

Por otro lado las resistencias R_1 y R_2 representan la distancia que hay entre la subestación de rectificación y el sistema de recuperación. Su valor puede cambiar en función del punto en el que se encuentre instalado el sistema de recuperación.

Las resistencias R_{p1} y R_{p2} representan el resto de la distancia entre el sistema de recuperación y la estación contigua más lejana que puede llegar a ser de varios kilómetros.

En el circuito de la Figura 2.17 se tienen 11 corrientes que se requiere conocer, por lo que para poder conocerlas se resolvió el siguiente sistema de ecuaciones.

$$V_1 - (\text{Re}_1 + R_{p1})I_1 - R_1I_2 - R_{p11}I_4 + R_{p12}I_5 + R_2I_7 + R_{p2}I_8 - R_{p21}I_{10} + (R_{p22} + \text{Re}_5)I_{11} - V_5 = 0 \quad (2.36)$$

$$V_1 - (\text{Re}_1 + R_{p1})I_1 - R_1I_2 + \text{Re}_2 I_3 - V_2 = 0 \quad (2.37)$$

$$V_4 - \text{Re}_4 I_9 - R_{p21}I_{10} + (R_{p22} + \text{Re}_5)I_{11} - V_5 = 0 \quad (2.38)$$

$$V_1 - (\text{Re}_1 + R_{p1})I_1 - R_1I_2 - R_{p11}I_4 + R_{p12}I_5 + \text{Re}_3 I_6 - V_3 = 0 \quad (2.39)$$

$$I_2 = I_1 + IR_1 \quad (2.40)$$

$$I_4 = I_2 + I_3 \quad (2.41)$$

$$I_{L1} = I_4 + I_5 \quad (2.42)$$

$$I_5 = I_6 + I_7 \quad (2.43)$$

$$I_8 = I_7 + IR_2 \quad (2.44)$$

$$I_9 = I_8 + I_{10} \quad (2.45)$$

$$I_{L2} = I_{11} + I_{10} \quad (2.46)$$

Este sistema de ecuaciones fue resuelto mediante el software Maple. Las corrientes de interés son las que aportan las subestaciones de rectificación, como son: I_1 , I_3 , I_6 , I_9 e I_{11} . Y se muestran a continuación.

$$I_1 = \frac{((A \text{Re}_4 + B) \text{Re}_3 + C) \text{Re}_2 - R_1 IR_1 (D \text{Re}_3 + E (R_{p11} + R_{p12}))}{(F \text{Re}_3 + G) \text{Re}_2 + (R_{p1} + \text{Re}_1 + R_1)(H \text{Re}_3 + I)} \quad (2.47)$$

$$I_3 = \frac{(A_2 \text{Re}_4 + B_2) \text{Re}_3 + C_2}{(D_2 \text{Re}_4 + E_2) \text{Re}_3 + F_2} \quad (2.48)$$

$$I_6 = \frac{(A_3 \text{Re}_4 + B_3) \text{Re}_2 + (R_{p1} + \text{Re}_1 + R_1)(C_3 \text{Re}_4 + D_3)}{(E_3 \text{Re}_4 + F_3) \text{Re}_2 + (R_{p1} + \text{Re}_1 + R_1)(G_2 \text{Re}_4 + H_2)} \quad (2.49)$$

$$I_9 = \frac{(A_4 \text{Re}_2 + B_4) \text{Re}_3 + C_4}{D_4 \text{Re}_3 + E_4} \quad (2.50)$$

$$I_{11} = \frac{(A_5 \text{Re}_3 + B_5) + C_5}{D_5 \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R_{p21} + R_{p22}) E_5} \quad (2.51)$$

En el Anexo B se detallan los factores considerados en (2.47) a (2.51), que definen las corrientes de cada subestación de rectificación.

2.7 Integración del sistema del manejo de energía

El sistema de manejo de energía que se modela consta de un inversor, una máquina de inducción y un volante de inercia que es donde se almacena la energía. En este punto se buscó una expresión que relacionará el voltaje del bus de alimentación y la corriente que entrega o absorbe el sistema de manejo con la energía y potencia que se encuentran en el volante de inercia. Para simplificar los cálculos de simulación la máquina de inducción y el inversor son considerados e integrados dentro de la expresión tomando en cuenta sus eficiencias. En la Figura 2.18 se muestra un esquema más completo del sistema de manejo de energía.

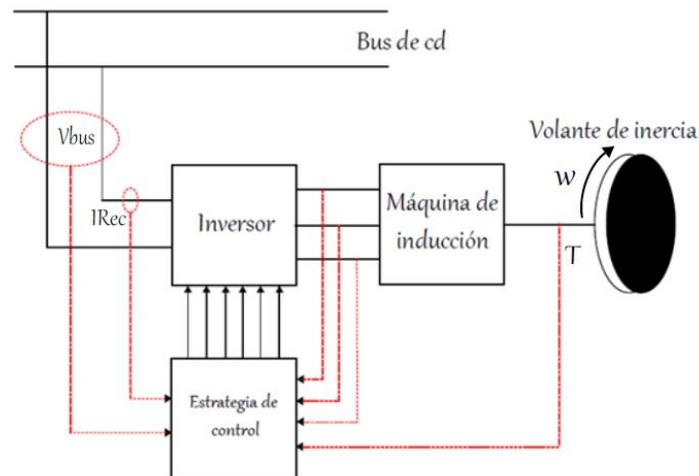


Figura 2.18: Esquema del sistema de manejo de energía.

Como primer paso se igualó la potencia eléctrica del sistema de manejo con la potencia mecánica del volante de inercia [13]. En (2.52) se consideran las pérdidas por fricción con el aire y la eficiencia del inversor y la máquina de inducción.

$$P_{rec} = \frac{1}{2} \eta_{Driver} \eta_{Maquina} J \frac{d\omega^2}{dt} + P_{aire} \quad (2.52)$$

En donde:

P_{rec} = Potencia del sistema de recuperación

J = Momento de inercia del volante

η_{Driver} = Eficiencia del inversor

$\eta_{Maquina}$ = Eficiencia de la máquina de inducción

ω = Velocidad angular.

P_{aire} = Pérdidas por fricción con el aire [watts].

La potencia del sistema de manejo de energía es igual al voltaje del bus multiplicado por la corriente del sistema de manejo de energía.

$$P_{rec} = V_{Bus} I_R \quad (2.53)$$

En [27] se lleva a cabo un análisis de las pérdidas de potencia por fricción aerodinámica de un rotor cilíndrico girando y rodeado por aire. De este modo se tomará la (2.54) para calcular las pérdidas por fricción con el aire.

$$P_{aire} = \frac{2\pi\mu R^3 \omega^2 L}{t} \quad (2.54)$$

En donde:

μ = Viscosidad del aire.

R = Radio del volante de inercia.

L = Longitud del volante de inercia.

t = Distancia entre el volante y la carcasa de protección que lo rodea.

En la Figura 2.19 se pueden observar las distintas dimensiones del volante de inercia que son tomadas en cuenta para calcular las pérdidas por fricción con el viento.

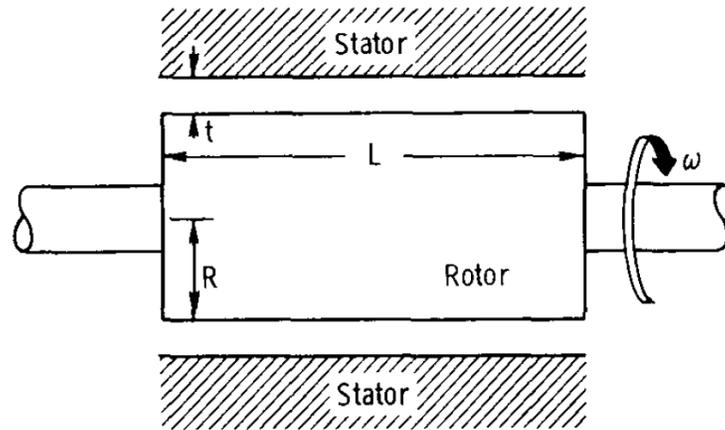


Figura 2.19: Esquema del volante de inercia.

Al sustituir (2.53) y (2.54) en (2.52) se obtiene la relación de la potencia del sistema de recuperación con la potencia mecánica del volante y las pérdidas con el aire, esta ecuación representará el estado de carga y descarga del volante de inercia.

$$V_{bus} I_{R1} = \frac{1}{2} \eta_{Driver} \eta_{Maquina} J \frac{d\omega^2}{dt} + \frac{2\pi\mu R^3 \omega^2 L}{t} \quad (2.55)$$

En donde:

V_{bus} = Voltaje del bus de CD

I_{R1} = Corriente del sistema de recuperación

Los factores η representan la eficiencia del inversor y de la máquina de inducción. Una vez simplificados los factores y despejando la corriente del sistema de recuperación se tiene lo siguiente.

$$I_{R1} = \frac{1}{V_{bus}} \left(\eta_{Driver} \eta_{Maquina} J \frac{d\omega^2}{dt} + \frac{2\pi\mu R^3 \omega^2 L}{t} \right) \quad (2.56)$$

En (2.56) describe la relación entre la corriente del sistema de recuperación y los parámetros mecánicos del volante de inercia.

Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se definió el modelo del tren y se pudo comparar con los resultados obtenidos en un trabajo reportado en la literatura en el cual se muestran pruebas físicas. Al realizar esta comparación se observó que la diferencia en los datos obtenidos con el modelo propuesto resultaron ser muy cercanos a los obtenidos por el trabajo reportado en la literatura. Por otro lado se realizó una comparación de los resultados obtenidos del modelado del bus de alimentación contemplando resistencias e inductancias como parásitos y solo contemplando resistencias como parásitos en la barras guía. Esta comparación mostro que el perfil de voltaje obtenido está definido prácticamente por las resistencias parasitas. Debido esta comparación se pudo establecer un modelo más completo en el que se consideran cinco estaciones y 2 trenes para la simulación del bus de alimentación. También se definió una expresión para ligar el bus de alimentación con el sistema de manejo de energía, esto de una manera simplificada pero que muestra la relación entre la potencia del sistema de manejo de energía y los parámetros del volante de inercia que integra el sistema de manejo.

Capítulo 3: Dimensionamiento del sistema de manejo de energía

En este capítulo se presenta el estudio energético del tren en el que se determinan las cantidades de energía que están disponibles durante un frenado regenerativo del tren. Estos datos sirven para determinar el tamaño y potencia que tiene que tener el sistema de manejo de energía, así como la estrategia de control de energía a utilizar.

3.1 Estudio energético del tren

Como se mencionó en el Capítulo 2 la base del estudio energético es un perfil de velocidad establecido, además de datos físicos que son característicos de tren. Se obtienen 8 perfiles de velocidad que representan el recorrido de un tren de una estación a otra, se simulan cada uno de estos perfiles para determinar los niveles máximos de potencia mecánica así como de energía disponible y en base a estos datos poder dimensionar la potencia del sistema de manejo y la energía que debe ser capaz de almacenar el volante de inercia.

Para la simulación del modelo del tren se utiliza Simulink de MATLAB y en la Tabla 3.1 se muestran los parámetros que fueron utilizados.

Tabla 3.1: Parámetros utilizados para simular el modelo físico del tren.

Parámetro	Valor Utilizado
Masa total del tren [$m_{tren} + m_{pasajeros}$]	$284.95 \times 10^3 \text{ kg}$
Área frontal del tren [A_f]	6 m^2
Coefficiente de resistencia a la rodadura [f_r]	0.00657
Coefficiente de arrastre aerodinámico [C_d]	0.668
Densidad del aire [ρ]	$1.23 \text{ kg} / \text{m}^3$

En la Figura 3.1 se muestra la potencia mecánica del tren durante el recorrido de la estación General Anaya a la estación Ermita. La potencia máxima que se presenta durante este recorrido es de 3.95 MW.

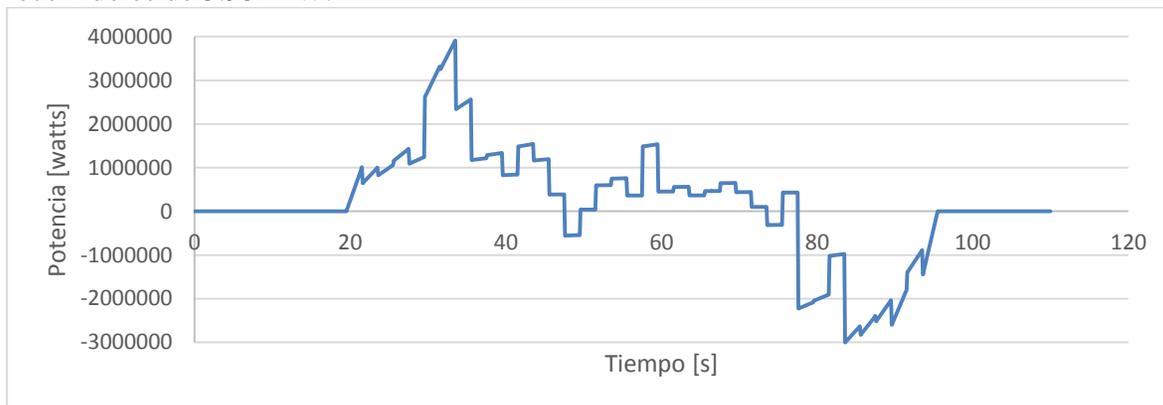


Figura 3.1: Potencia mecánica del tren durante el recorrido de la estación General Anaya a la estación Ermita.

Otro parámetro de importancia es la energía que representa la etapa de frenado en el recorrido, ya que esta es determinante para establecer el tamaño del sistema de manejo y la energía que debe ser capaz de almacenar. En la Figura 3.2 se muestra la energía disponible durante el frenado del tren, dicha energía es de 9.9 kW-h.

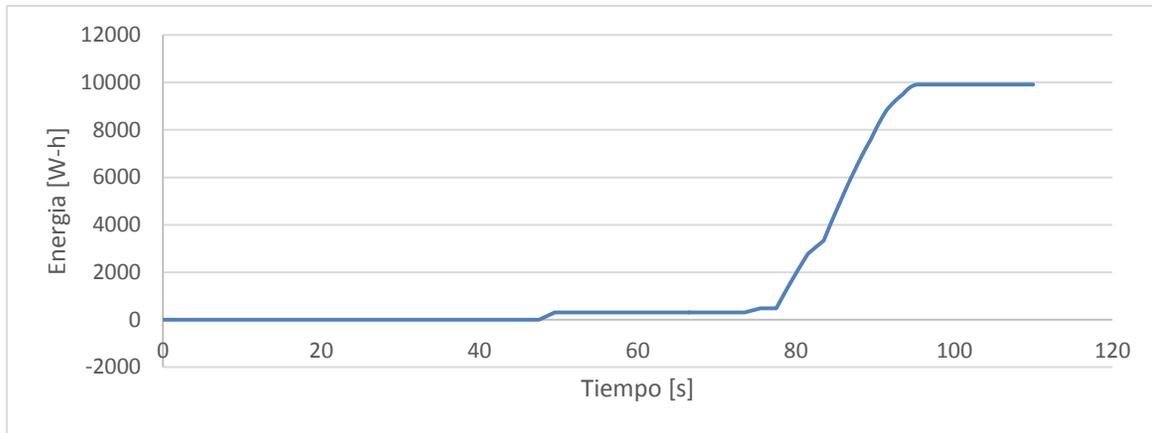


Figura 3.2: Energía disponible durante el frenado del tren durante el recorrido de la estación General Anaya a la estación Ermita.

En la Tabla 3.2 se muestra un condensado de valores obtenidos por medio de simulación, se puede observar la potencia máxima y la energía disponible durante el frenado del tren para cada uno de los perfiles de velocidad.

Tabla 3.2: Concentrado de potencias y energías obtenidas en simulación para los ocho perfiles de velocidad

Recorrido	Potencia máxima [MW]	Energía consumida [kW-h]	Energía Recuperable [kW-h]	Energía recuperable [%]
General Anaya-Ermita	3.95	15.64	9.65	61.7
Ermita-Portales	7.33	17.9	12.5	69.83
Portales-Nativitas	5.09	16.75	10.15	60.59
Nativitas-Villa de Cortes	3.73	15.41	9.83	63.7
Villa de Cortes-Xola	3.99	19.84	14.63	73.73
Xola-Viaducto	4.39	12.23	8.36	68.35
Viaducto-Chabacano	4.4	18.55	12.95	69.81
Chabacano-San Antonio Abad	7.4	12.3	8.8	71.5
Total		128.62	86.87	67.54

La energía que se puede recuperar total en los perfiles de velocidad es de 86.87 kW-h, lo que representa un 67.54% de la energía total consumida. De esta tabla también se puede identificar la máxima energía recuperable en un solo trayecto de una estación a otra, la cual se presenta en el recorrido de la estación Villa de Cortes a la estación Xola con 14.63 kW-h. Este dato es de utilidad para dimensionar el sistema de recuperación que se va a utilizar.

3.2 Dimensionamiento del volante de inercia.

Para establecer la potencia máxima del sistema de manejo de energía se tomó como referencia el promedio de la potencia pico que consume el tren durante su recorrido. De la Tabla 3.2 la potencia promedio representa 5.03 MW, esta potencia será establecida como la potencia máxima del sistema de recuperación.

A continuación se presenta el diseño del volante de inercia. Para el diseño del volante se toma como referencia la energía promedio que se encuentra disponible durante un frenado del tren. El promedio fue obtenido a partir de los datos de la Tabla 3.2 en donde se muestra que la suma total de la energía disponible durante un frenado es de 86.87 kW-h y en total se tienen 8 perfiles de velocidad, lo que da un promedio de 10.86 kW-h o 39.09 MJ.

Esta energía debe ser la energía efectiva o útil del sistema de manejo de energía por lo que se considera un límite de descarga máximo del 90%, esto arroja el valor de la energía total que puede almacenar el sistema y es igual a 43.43 MJ.

Por otro lado se debe considerar la velocidad máxima a la que va a girar el volante de inercia, para un motor de inducción en la región de campo debilitado la velocidad máxima está alrededor de 7000 rpm, lo que es igual 733.03 rad/s.

De la ecuación para la energía de un volante de inercia despejamos el momento de inercia y tenemos lo siguiente.

$$E = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (3.1)$$

$$J = \frac{2E}{\omega^2} = \frac{2(43.43 \times 10^6)}{(733.03)^2} = 161.65 \text{ kgm}^2 \quad (3.2)$$

Por otro lado se necesita saber la velocidad mínima que debe tener el volante de inercia, como se había mencionado solo se permitirá una descarga máxima de 90% por lo que el volante se quedaría solo con el 10% de la energía, este porcentaje representa 4.343 MJ.

Igualmente de la ecuación de la energía de un volante de inercia se despeja la velocidad angular y tenemos.

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{2E}{J}} = \sqrt{\frac{2(4.343 \times 10^6)}{161.65}} = 231.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (3.3)$$

De la ecuación para el momento de inercia se despeja la masa del volante de inercia.

$$J = \frac{1}{2} m R^2 \quad (3.4)$$

Para este diseño se propone un radio de 0.40 metros que puede ser contenido en un lugar con dimensiones considerablemente bajas.

$$m = \frac{2J}{R^2} = \frac{2(161.65)}{(0.40)^2} = 2020.62kg \quad (3.5)$$

Como siguiente paso para poder obtener el volumen del volante de inercia se debe considerar el material del dispositivo, un material común es el acero estructural el cual tiene una densidad $\rho = 7800 \frac{kg}{m^3}$, se debe conocer el volumen para poder calcular la longitud del volante de inercia.

El volumen puede ser obtenido dividiendo la masa por la densidad y se obtiene lo siguiente:

$$V = \frac{2020.62}{7800} = 0.259m^3 \quad (3.6)$$

El volumen de un cilindro esta dado por la siguiente ecuación:

$$V = \pi R^2 L \quad (3.7)$$

De la ecuación anterior se despeja la longitud L y se obtiene:

$$L = \frac{V}{\pi R^2} = \frac{0.259}{\pi(0.4)^2} = 0.515m \quad (3.8)$$

En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros obtenidos del sistema de manejo de energía y el volante de inercia que lo integra.

Tabla 3.3. Parámetros obtenidos para el sistema de manejo de energía

Parámetro	Valor Obtenido
Potencia del sistema de recuperación	5.03MW
Capacidad de almacenamiento de energía	43.43MJ
Velocidad máxima del volante de inercia [ω_{max}]	733.03Rad / s
Velocidad mínima del volante de inercia [ω_{min}]	231.8Rad / s
Momento de inercia [J]	161.65kgm ²
Masa del volante de inercia [m]	2020.62kg
Volumen del volante de inercia [V]	0.259m ³
Radio del volante de inercia [R]	0.40m
Largo del volante de inercia [L]	0.515m

3.3 Estrategia de control de energía.

Como estrategia de control de energía se tomó la posibilidad de establecer diferentes etapas y rangos de potencia [12].

Se manejaron dos regiones en las cuáles el sistema de recuperación se carga o descarga pero sin llegar a descargarse por completo. Se establecieron rangos de voltajes permitidos y que a consideración no causarían mayor problema en el bus de CD.

El rango de voltaje normal de alimentación es de 750 VCD. El sistema de recuperación entra en la zona de carga cuando el voltaje del bus sobrepasa un valor límite y significa que absorbe energía del bus de alimentación para compensar esta sobre tensión. En el otro caso el sistema de recuperación entra en la zona de descarga cuando el voltaje del bus se encuentra por debajo de un límite mínimo de voltaje permitido y en este caso el sistema entrega energía al bus para compensar la caída de tensión.

Como límite mínimo de voltaje permitido, sin que el sistema de recuperación de energía actúe sobre la línea, se estableció en 730 VCD, por debajo de este límite el sistema de recuperación empieza en la zona de descarga inyectando una corriente equivalente al 25% de la potencia del sistema de recuperación.

Si el voltaje siguiera descendiendo el siguiente límite se encuentra en 720 VCD, en estas condiciones el sistema de recuperación inyecta una corriente equivalente al 50% de la potencia del sistema de recuperación, posteriormente se tiene un límite más en 710 VCD en el cual el sistema inyecta una corriente equivalente al 75% de la potencia del mismo.

El sistema de recuperación inyecta una corriente equivalente al 100% de su potencia cuando el voltaje en la línea desciende por debajo de 700 VCD, aunque cabe aclarar que no llega a quedarse sin energía o pararse por completo.

La región de carga contempla el momento en el que el convoy frena e inyecta corriente al bus de alimentación. El límite máximo permitido sin que el sistema de recuperación actúe sobre la línea se considera en 760 VCD, en estas condiciones el sistema de recuperación absorbe una corriente equivalente al 25% de su potencia.

A partir de este voltaje la potencia que el sistema de recuperación absorbe corriente de la línea de alimentación crece 25% cada 10 volts hasta llegar a 790 VCD en donde se absorbe una corriente equivalente al 100% de la potencia del sistema de recuperación.

Esta estrategia de control de energía es implementada en un bloque de función en Matlab y se muestra a en el anexo B.

A continuación en la Figura 3.12 se muestra el diagrama de flujo que representa el proceso de la estrategia de control de energía.

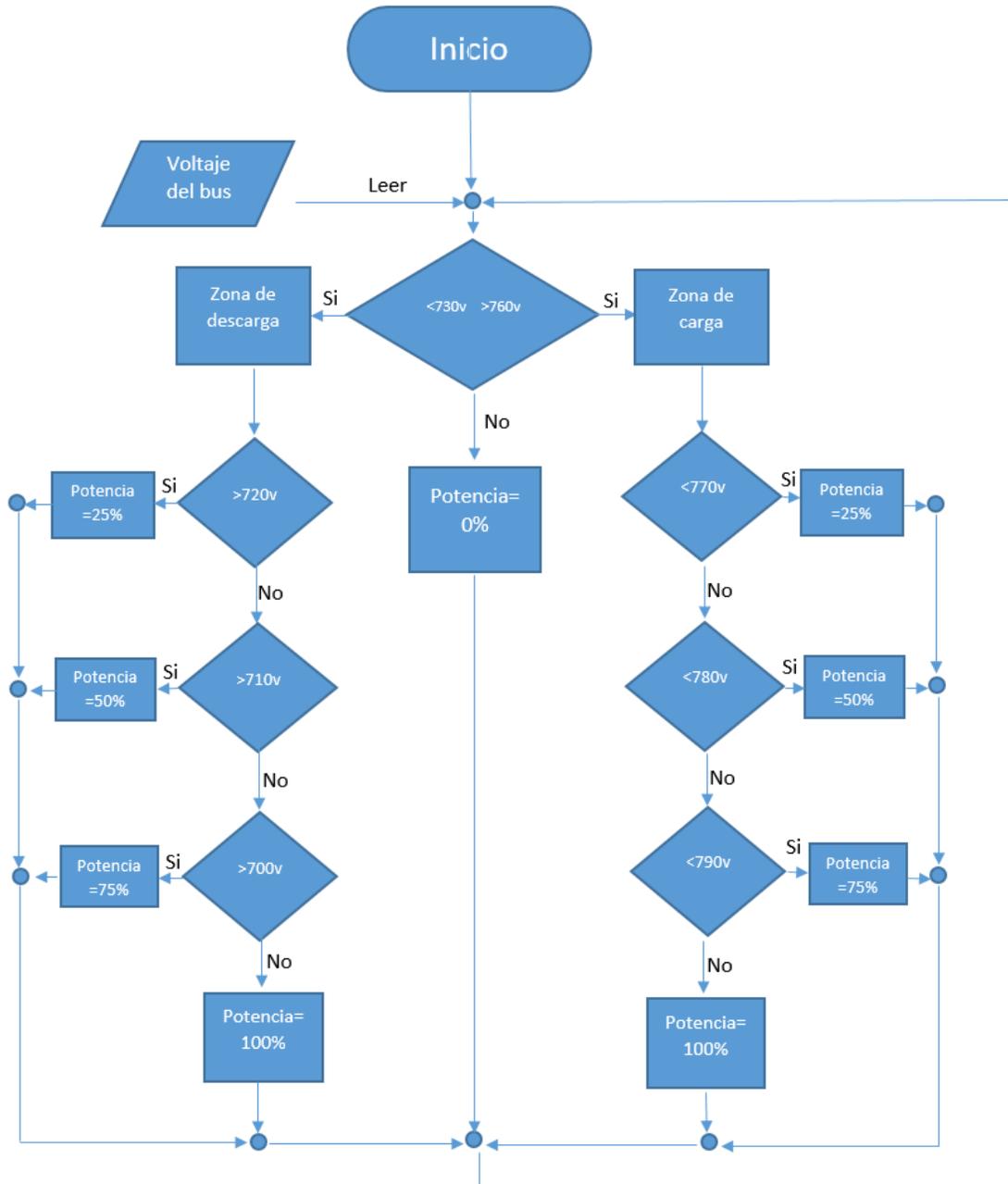


Figura 3.12: Diagrama de flujo de la estrategia de control de energía.

Conclusiones del capítulo

El estudio energético del tren es de vital importancia y sirve de base para determinar los niveles de energía y potencia con los que debe de trabajar el sistema de manejo de energía. Por otro lado la estrategia de manejo de energía está basada en el voltaje del bus de alimentación por lo que es la única variable que se puede medir. Esto es posible debido a que en base a esta variable es posible determinar si es necesario entregar o absorber energía del bus de alimentación.

Capítulo 4: Resultados de simulación.

En este capítulo se presentan los resultados de simulación del análisis mostrado en los Capítulos 2 y 3. Primero se muestran las condiciones con las que se realizó la simulación, posteriormente se muestran los resultados obtenidos de la simulación del modelo del tren. Además se presentan los datos obtenidos del modelado de la red eléctrica y el sistema de manejo de energía.

4.1 Condiciones de simulación.

Una vez terminada la base teórica se procedió a simular el sistema completo, desde el modelo del tren, el modelo de la red eléctrica, el modelado del volante de inercia y todo esto en conjunto con la estrategia de control de energía.

El sistema completo fue simulado en la herramienta Simulink de Matlab y las imágenes detalladas de cada bloque de simulación se muestran en el anexo C.

La simulación puede analizar dos trenes que se encuentren en diferente estación y además se puede elegir si un tren sale antes o después del otro, y si es necesario para llegar a un punto crítico se puede elegir que los dos trenes salgan al mismo tiempo. A continuación se enlistarán los diferentes casos y las condiciones que diferencian a cada uno.

- Caso 1: En este caso los dos trenes arrancan al mismo tiempo, uno entre las subestación 2 y 3, y el otro entre la subestación 4 y 5.
- Caso 2: El primer tren ubicado entre las subestaciones 2 y 3 sale antes que el tren ubicado entre las subestaciones 4 y 5.
- Caso 3: El segundo tren ubicado entre la subestación 4 y 5 sale antes que el tren ubicado entre la subestación 2 y 3.
- Caso 4: Solo se tiene un solo tren y está ubicado entre la subestación 2 y 3.

A continuación se muestra la simulación del caso más crítico en el que los dos trenes salen al mismo tiempo.

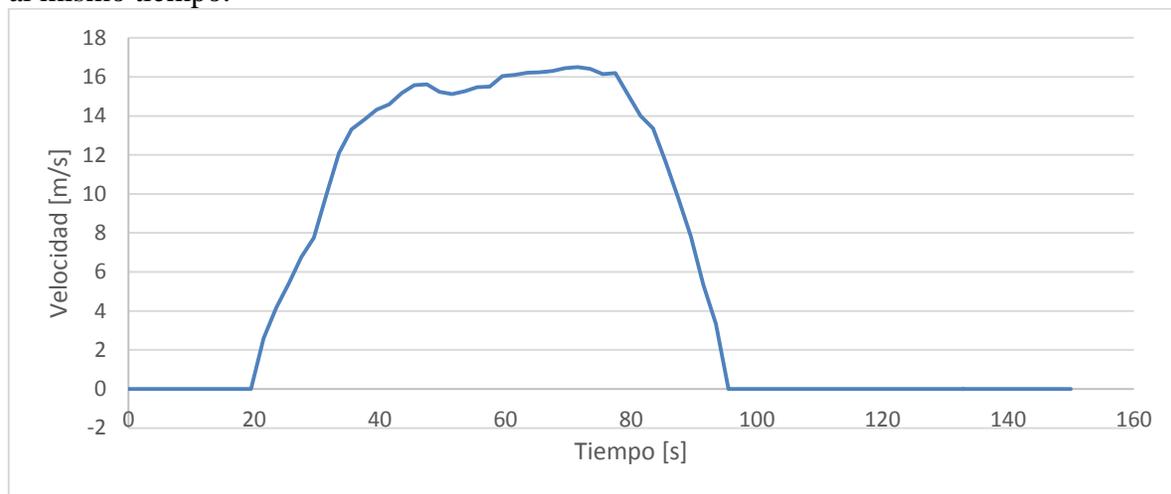


Figura 4.1: Perfil de velocidad del tren 1.

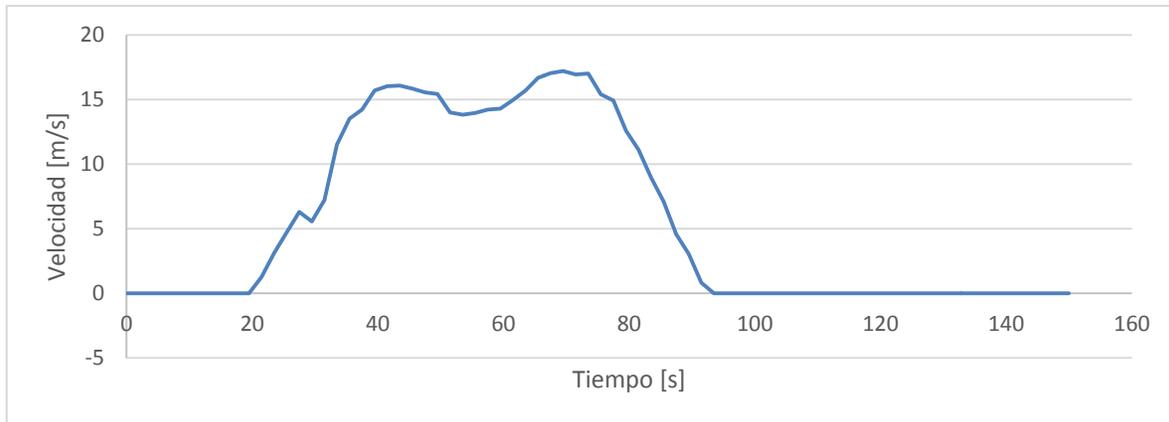


Figura 4.2: Perfil de velocidad del tren 2.

El caso de estudio considera dos trenes los cuales tienen definidos los perfiles de velocidad de las Figuras 4.1 y 4.2 respectivamente. Se considera que el sistema de manejo de energía actúa sobre el tren 1. El propósito del estudio es evaluar la influencia mutua de los trenes y el sistema de manejo sobre el voltaje del bus de CD.

En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros utilizados en el modelo del sistema completo. Las variables de interés a evaluar están referidas al bus de CD (voltaje y corriente); y del lado del volante la velocidad angular. Indirectamente se evalúan variables como potencia y energía.

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en simulación

Parámetro	Valor
Masa (m)	284.95 Toneladas
Coefficiente de fricción dinámico f_r	0.00657
Densidad del aire ρ_{aire}	1.23 kg/m ³
Área frontal del tren A	6m ²
Coefficiente de resistencia aerodinámico C	0.668
Gravedad g	9.81 $\frac{m}{s^2}$
Voltaje normal de la subestación V_1, V_2, V_3, V_4, V_5	750VCD
Resistencia de la subestación $Re_1, Re_2, Re_3, Re_4, Re_5$	0.05 Ω
Resistencia parásita en el riel Rp_1	0.0259 Ω
Resistencia parásita en el riel Rp_2	0.0259 Ω
Resistencia parásita R_1	0.002 Ω
Resistencia parásita R_2	0.002 Ω
Eficiencia del controlador η_{Driver}	90%
Eficiencia de la máquina eléctrica $\eta_{Maquina}$	90%

4.2 Simulación del modelo del tren.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la primera etapa de simulación que contempla el modelo del tren, en la que se obtiene la fuerza y potencia mecánica de cada uno de los trenes.

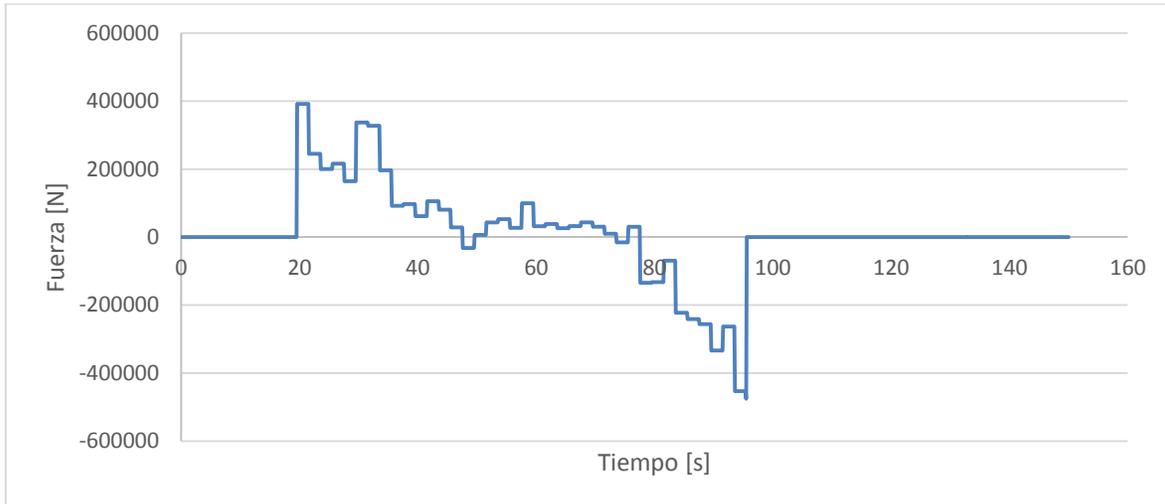


Figura 4.3: Fuerza del tren 1

La fuerza máxima (Figura 4.3) que necesita el tren 1 al acelerar es de 391.3 kN y la fuerza máxima en el momento del frenado es de -475 kN.

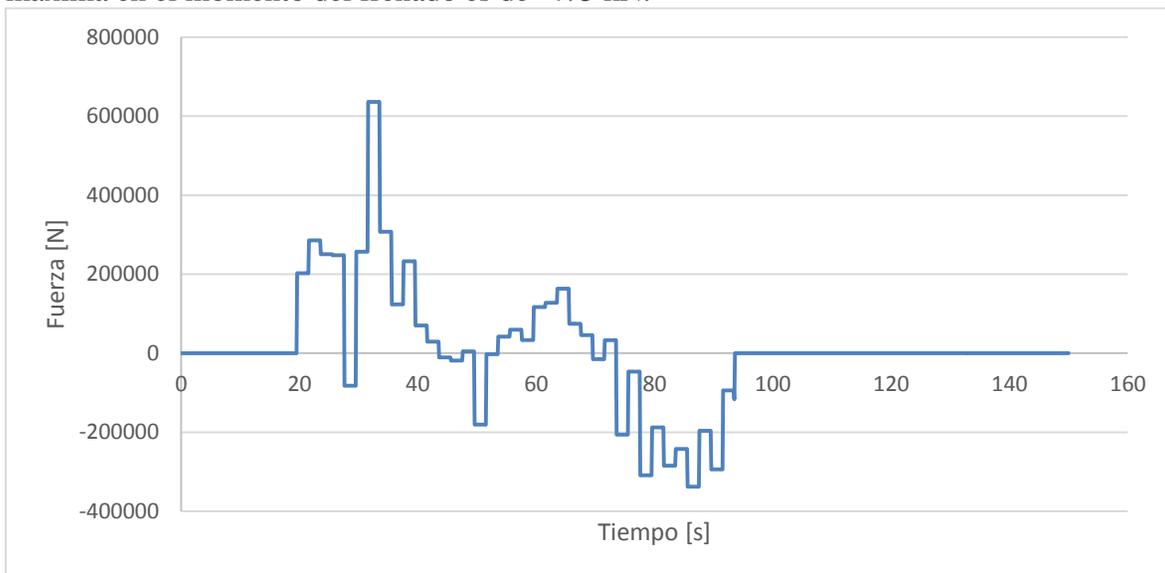


Figura 4.4: Fuerza del tren 2

La fuerza máxima (Figura 4.4) que necesita el tren 2 al acelerar es de 636.2 kN y la fuerza máxima en el momento del frenado es de -338 kN.

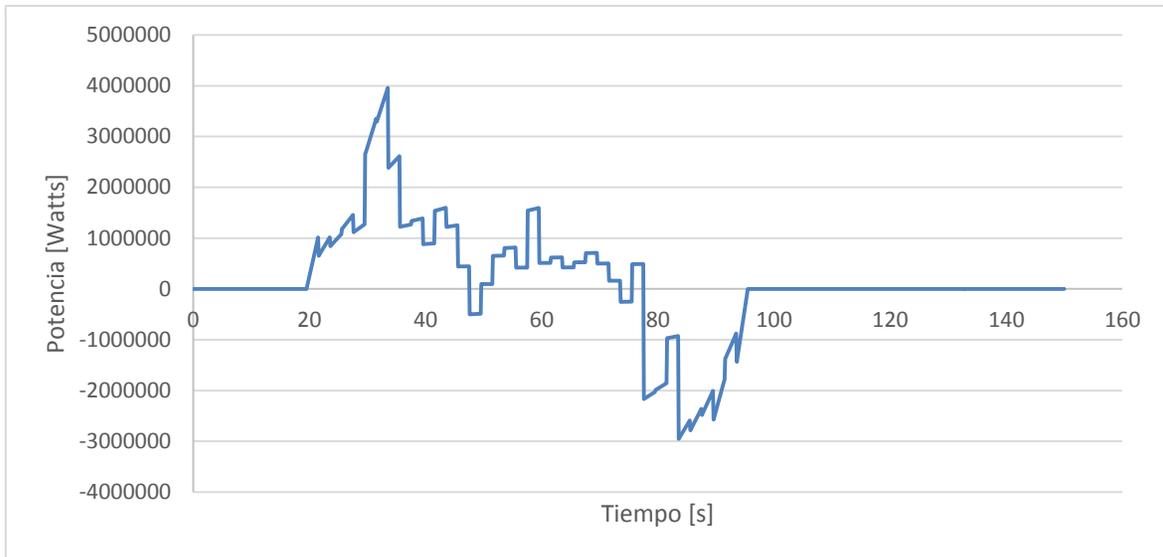


Figura 4.5: Potencia mecánica del tren 1

La potencia máxima (Figura 4.5) del tren 1 en el momento de la aceleración es de 3.95 MW y la potencia máxima en el momento del frenado es de -2.95 MW.

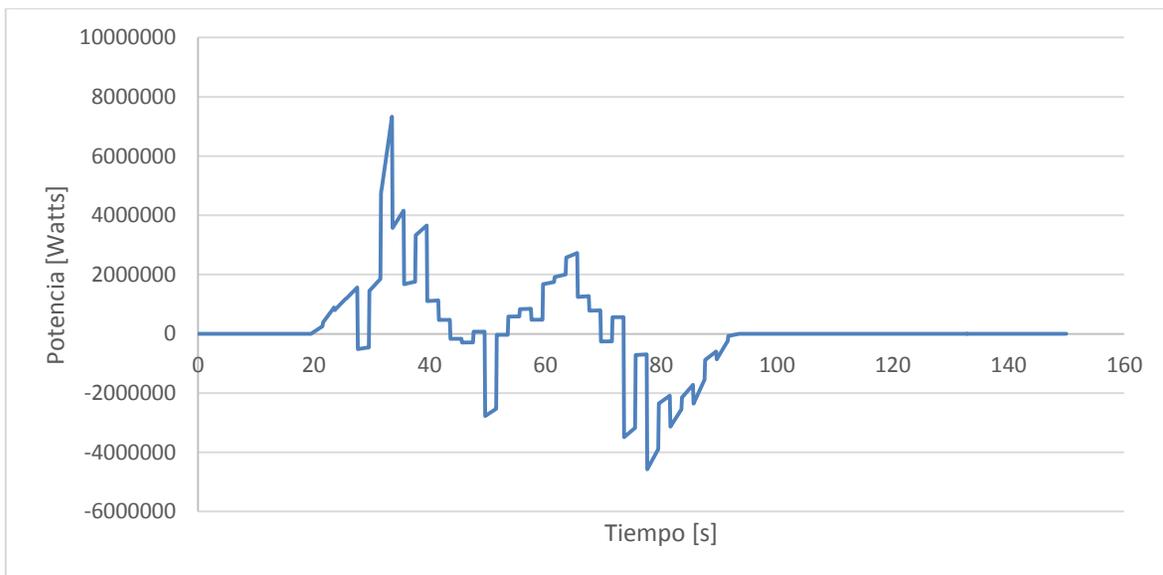


Figura 4.6: Potencia mecánica del tren 2

La potencia máxima (Figura 4.6) del tren 2 en el momento de la aceleración es de 7.33 MW y la potencia máxima en el momento del frenado es de -4.57 MW.

4.3 Simulación del modelado de la red eléctrica.

Otra etapa de la simulación contempla la simulación de del modelo de la red eléctrica, para lo cual se muestran valores de voltaje y corriente con y sin los sistemas de manejo de energía funcionando, cabe mencionar que la estrategia de control de energía es la que controla a los dos sistemas.

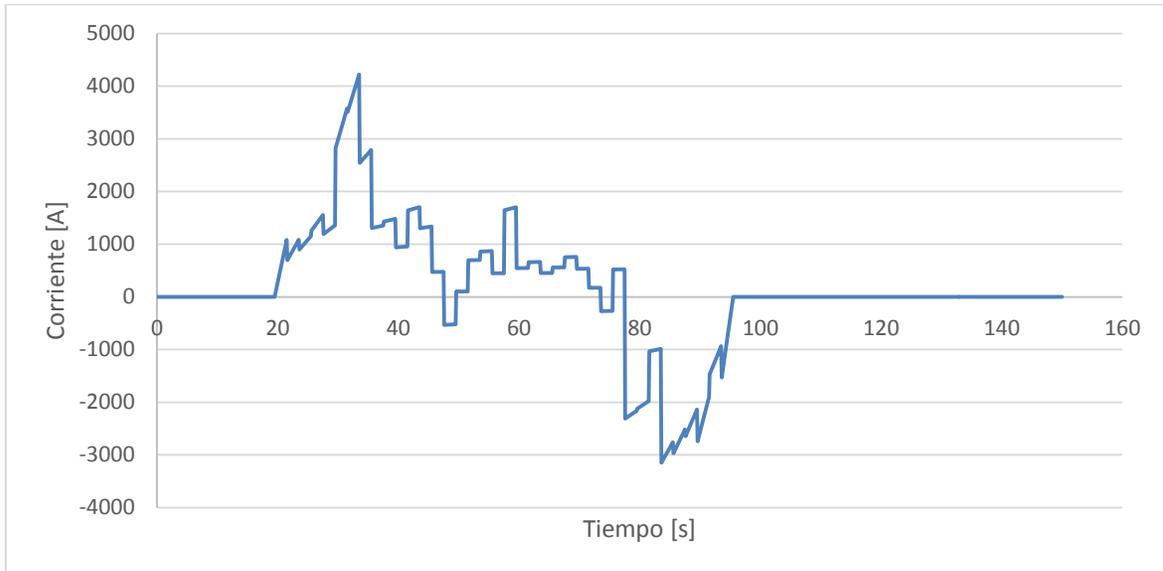


Figura 4.7: Corriente que consume el tren 1 [IL1]

La corriente máxima (Figura 4.7) del tren 1 es de 4222 A durante la aceleración y la corriente máxima durante el frenado es de 3148.5 A.

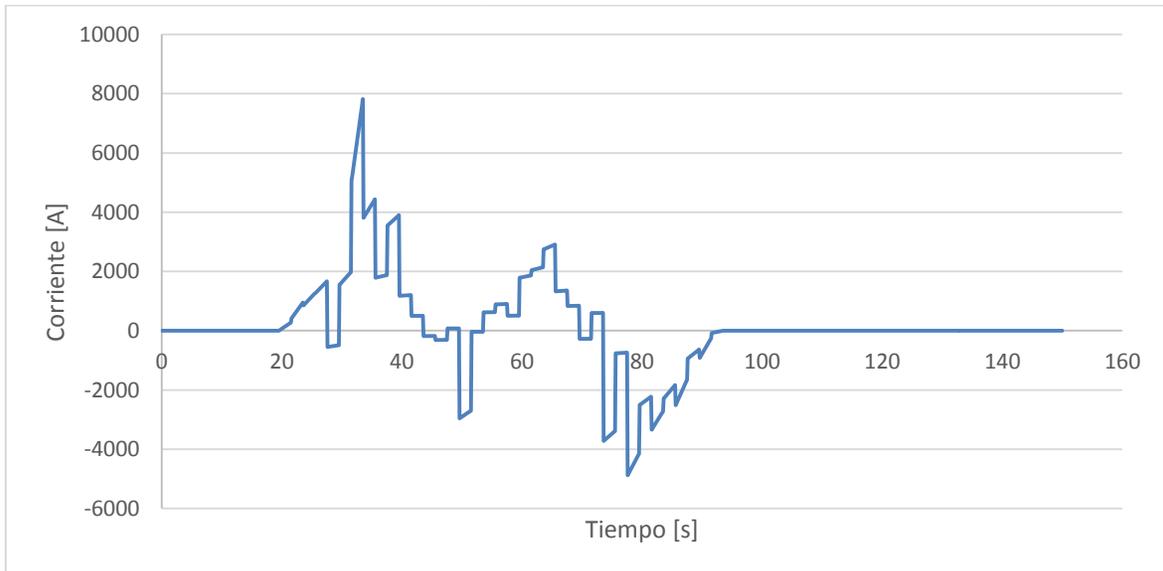


Figura 4.8: Corriente que consume el tren 2 [IL2]

La corriente máxima (Figura 4.8) del tren 2 es de 7819 A durante la aceleración y la corriente máxima durante el frenado es de 4880 A.

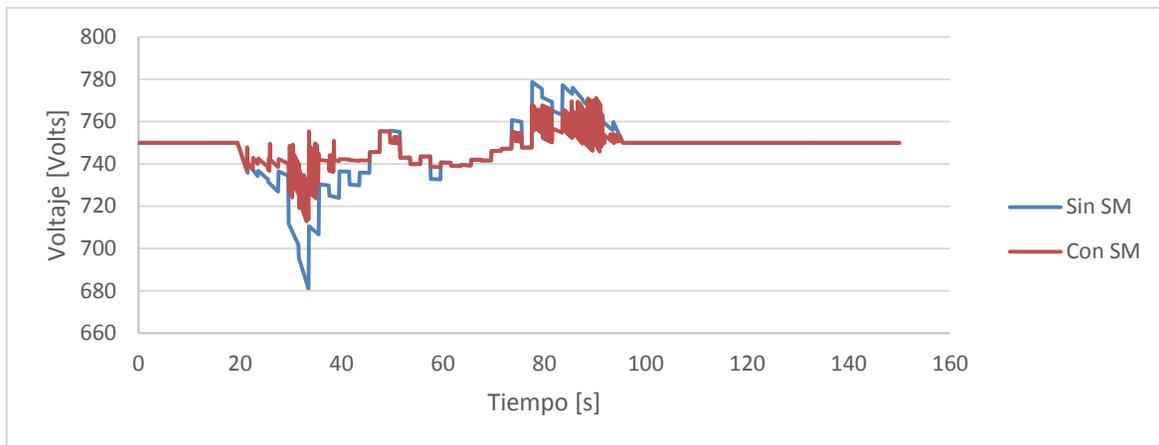


Figura 4.9: Voltaje de la subestación 1

En la Figura 4.9 se muestra el voltaje de la subestación 1. En azul sin el sistema de manejo de energía funcionando y en rojo con el sistema de manejo y el control de energía funcionando. El voltaje de esta subestación desciende hasta 680 V sin el sistema funcionando, y por el contrario cuando el sistema está funcionando el voltaje desciende solo a 714 V.

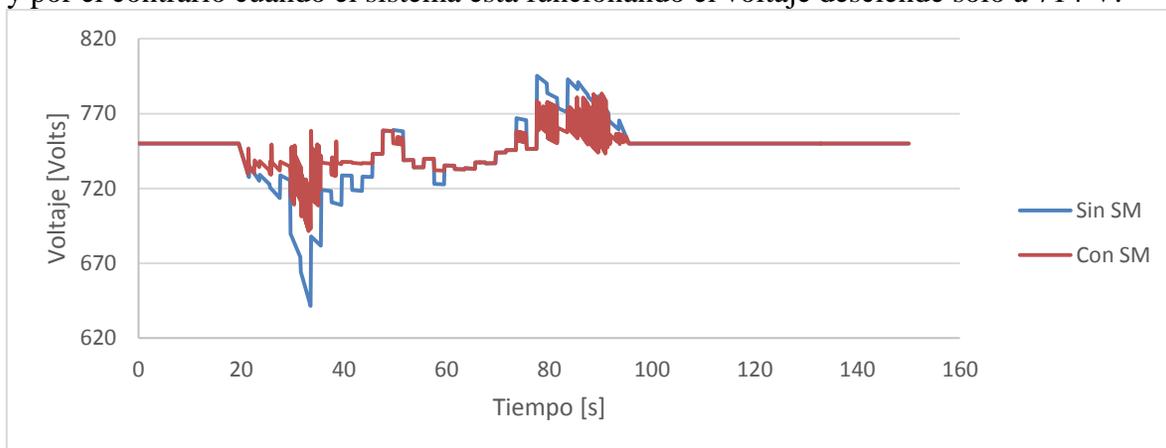


Figura 4.10: Voltaje de la subestación 2

En la Figura 4.10 se muestra el voltaje de la subestación 2 que es la que está alimentando directamente al tren 1. En azul se muestra el voltaje de la subestación sin el sistema de manejo funcionando y en rojo utilizando el sistema de manejo de energía. En el caso de no usar el sistema de manejo el voltaje desciende hasta los 645 V. Para el caso de utilizar el sistema de manejo de energía sólo desciende hasta 691 V. También se puede observar entre los segundos 80 y 100 la acción del segundo sistema de manejo, en esta subestación no es tan evidente debido a que el segundo sistema de manejo se encuentra en la subestación 3.

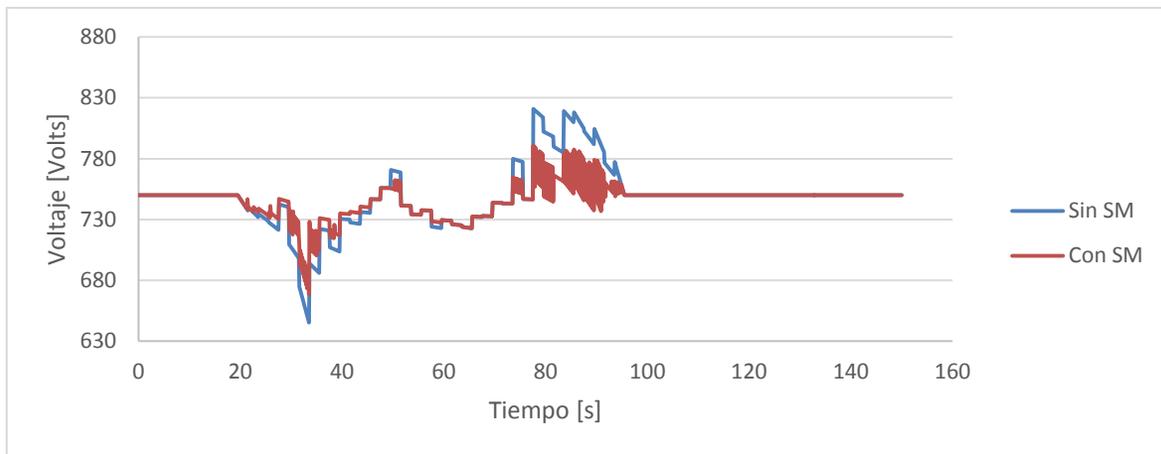


Figura 4.11: Voltaje de la subestación 3

La Figura 4.11 muestra el voltaje de la subestación 3. En color azul se ve el voltaje sin el sistema de manejo funcionando y en rojo se representa el voltaje con el sistema de manejo funcionando. En esta ocasión el punto de interés es cuando el tren 1 se encuentra frenando, lo que se puede observar como un incremento de voltaje. Uno de los sistemas de manejo se encuentra en esta subestación y permite absorber energía cuando el tren está frenando. Como se puede apreciar sin el sistema de manejo el voltaje se incrementa hasta los 819 V y con el sistema de manejo solo hasta los 783 V. También se puede apreciar la compensación del sistema de manejo 1 en el momento de la aceleración entre los segundos 30 y 40.

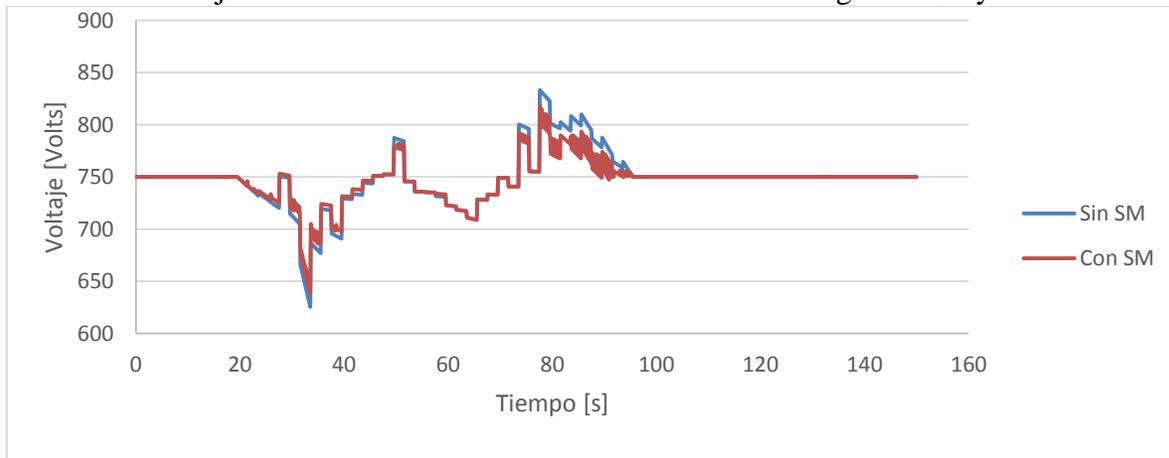


Figura 4.12: Voltaje de la subestación 4

En la Figura 4.12 se muestra el voltaje de la subestación 4. En azul se ve el voltaje sin el sistema de manejo funcionando y en rojo con el sistema de manejo funcionando. Se puede apreciar que la acción de los sistemas de manejo sobre esta subestación es muy pequeña. Es importante decir que el segundo tren se considera en la simulación para ver los efectos que un segundo tren tendría sobre un sistema de manejo ubicado a dos estaciones de distancia.

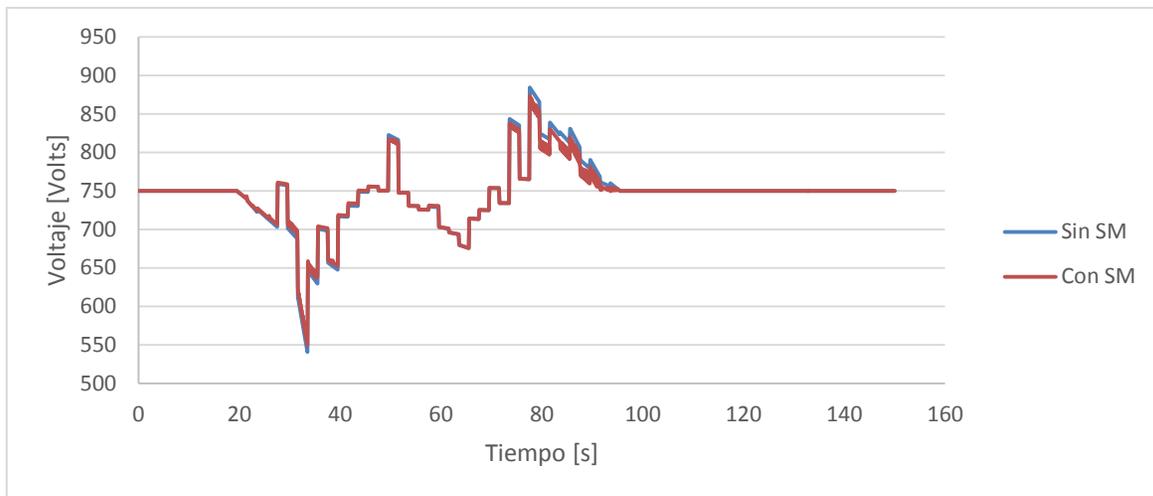
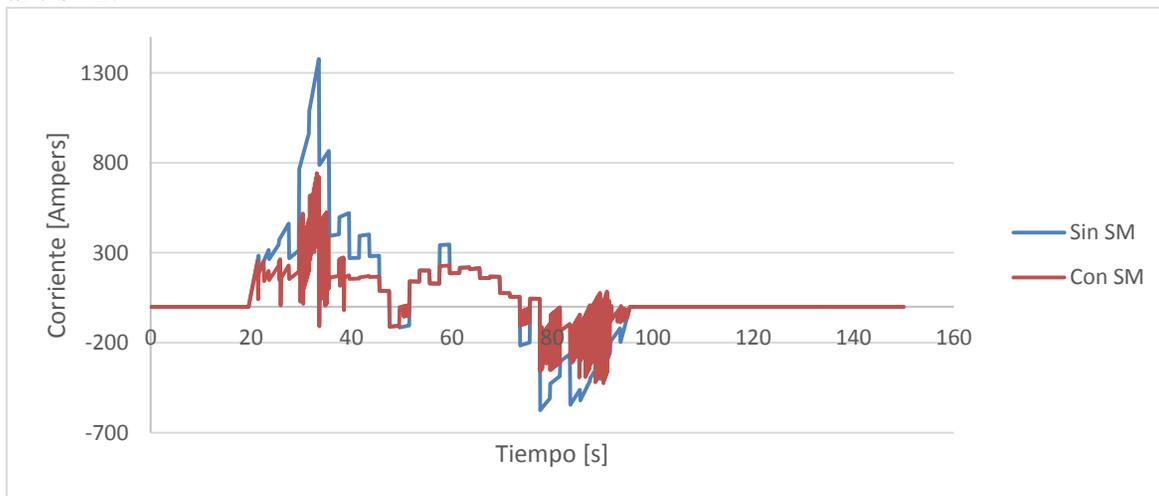


Figura 4.13: Voltaje de la subestación 5

En la Figura 4.13 se puede ver el voltaje de la subestación 5 que es la más alejada de los dos sistemas de manejo y se observa que prácticamente solo muestra el perfil de voltaje debido al tren 2.



Figuran 4.14: Corriente de la subestación 1

En la Figura 4.14 se ve la corriente de la subestación 1. En azul sin el sistema de manejo funcionando y en rojo con el sistema de manejo de energía en funcionamiento. Aunque el primer sistema de manejo se encuentra en la subestación 2 se puede apreciar el efecto de éste en el momento de la aceleración del tren 1. Sin el sistema funcionando la corriente en la subestación crece hasta los 1377 A y con el sistema funcionando esta corriente solo llega a los 714 A.

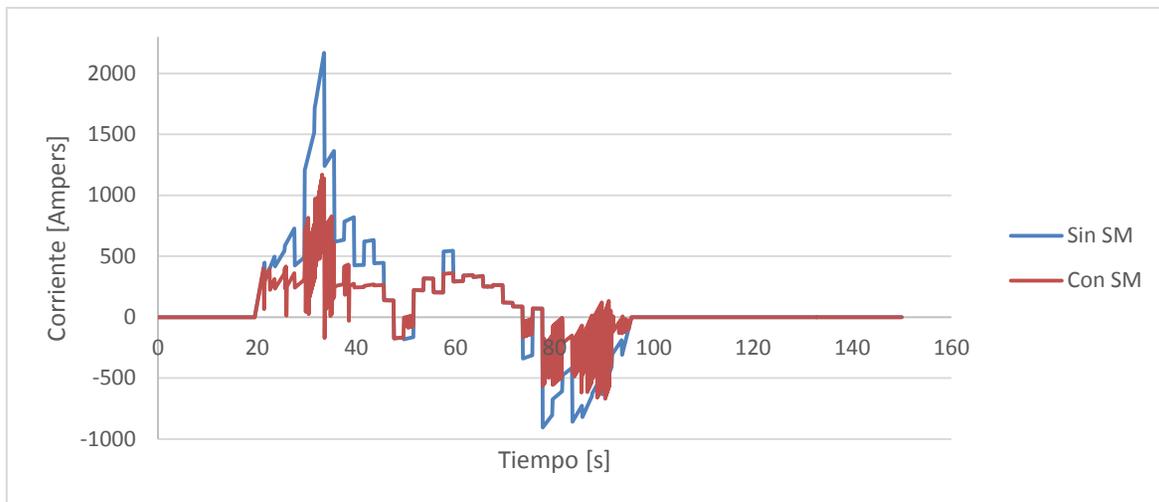


Figura 4.15: Corriente de la subestación 2

La Figura 4.15 muestra la corriente de la subestación 2. En azul sin el sistema funcionando y en rojo con el sistema funcionando. En esta subestación se encuentra el sistema de manejo de energía y como se puede apreciar en el momento de la aceleración del tren 1 la corriente llega hasta los 2122 A, y con el sistema funcionando solo llega a los 1170 A.

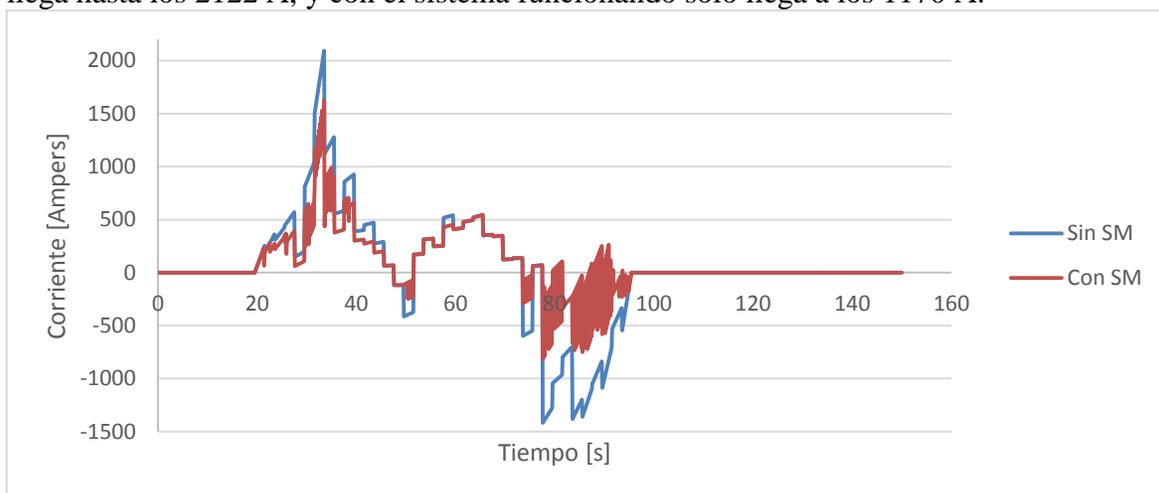


Figura 4.16: Corriente de la subestación 3

En la Figura 4.16 se muestra la corriente de la subestación 3 en la que se encuentra el segundo sistema de manejo energía. En azul sin el sistema funcionando y en rojo con el sistema funcionando. El tren 1 arranca en la subestación 2 y llega a la subestación 3, por lo que el sistema de manejo 2 tiene que absorber energía producida durante el frenado del tren. En la Figura 4.16 se puede observar el comportamiento de la corriente sin y con sistema de manejo, lo cual alcanza -1417 A y -800 A respectivamente.

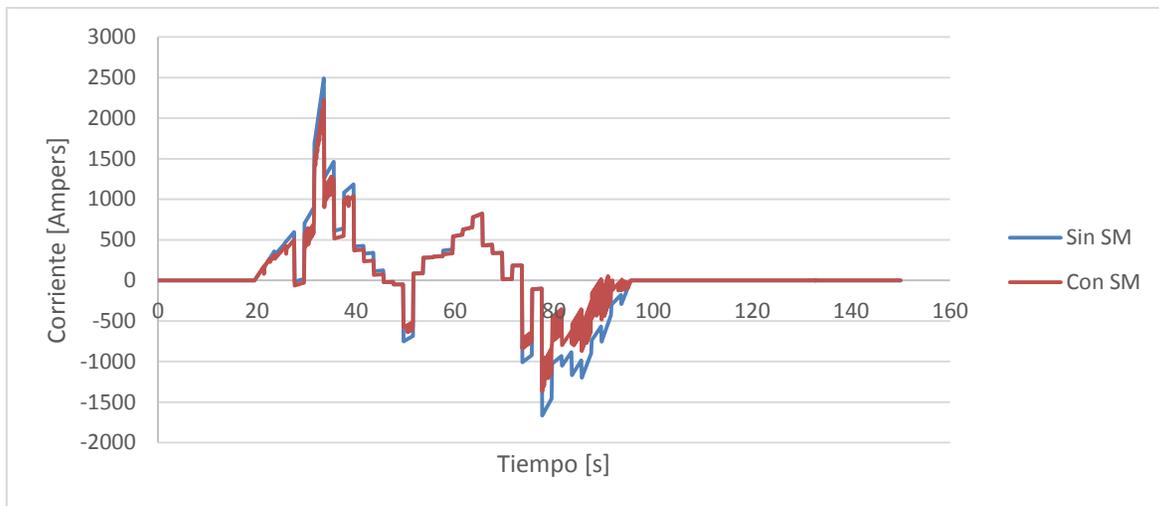


Figura 4.17: Corriente de la subestación 4

En la Figura 4.17 se muestra la corriente de la subestación 4. En azul sin el sistema funcionando y en rojo con el sistema en funcionamiento. En la figura se observa que los sistemas de manejo tienen muy poco efecto sobre esta subestación debido a que la distancia entre las estaciones es grande y representa una resistencia mayor en el circuito del bus de CD.

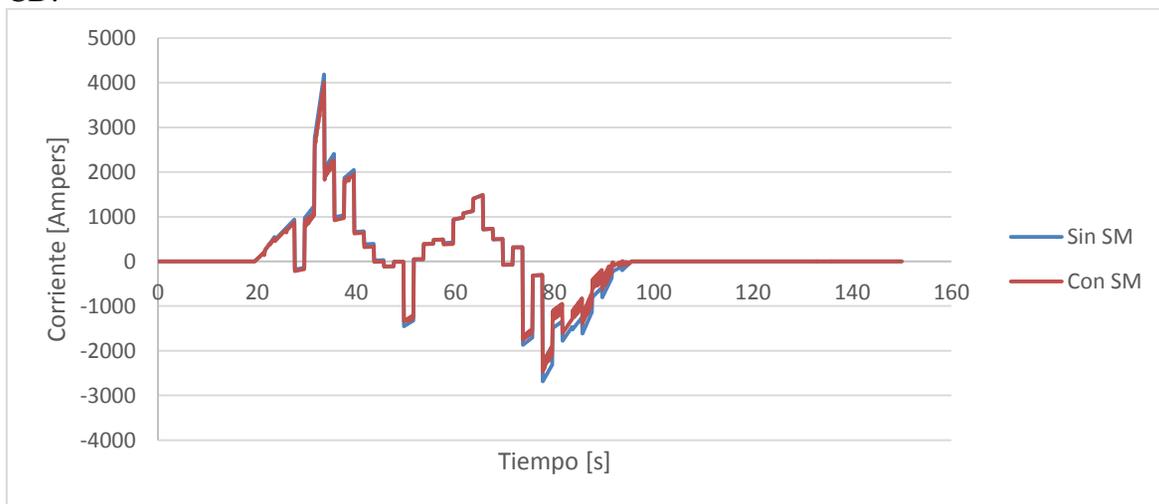


Figura 4.18: Corriente de la subestación 5

En la Figura 4.18 se muestra la corriente de la subestación 5. Se observa que prácticamente es nula la influencia de los sistemas de manejo de energía en esta subestación y el perfil de corriente es prácticamente igual con y sin los sistemas en funcionamiento.

Los resultados de la simulación de la red eléctrica son producto de un modelo sencillo pero por falta de información real no es posible validar el resultado obtenido, debido a esto solo se quedará en simulación.

4.4 Resultados de simulación del sistema de manejo de energía.

A continuación se muestra la corriente que aporta cada sistema de manejo de energía, así como la energía que está corriente representa. También se muestra la velocidad de cada volante de inercia y el porcentaje de energía absorbida con respecto a la disponible.

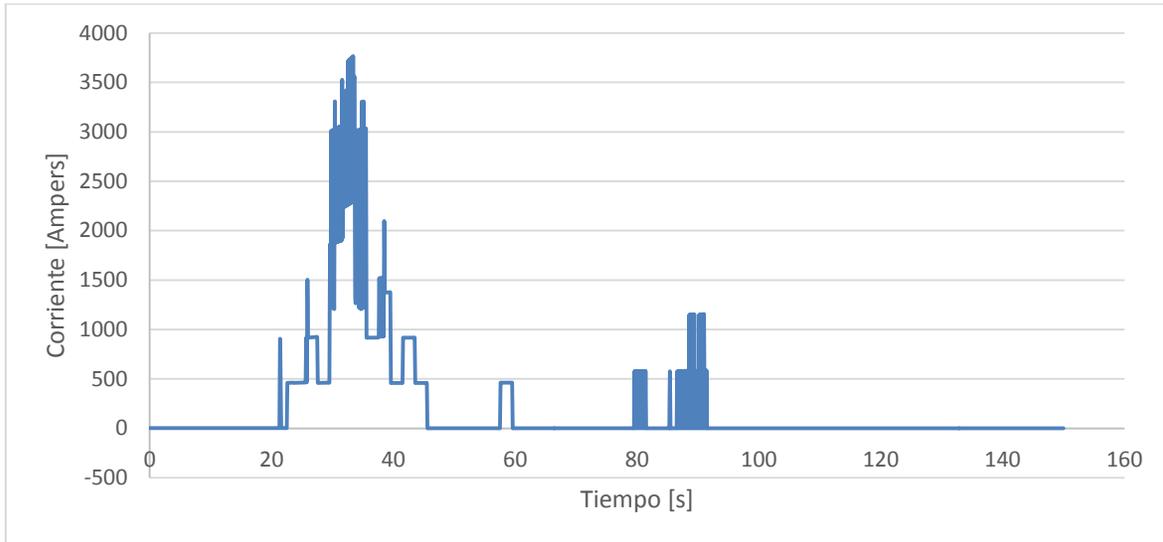


Figura 4.19: Corriente del sistema de manejo de energía 1

En la Figura 4.19 se muestra la corriente que aporta el sistema de manejo de energía 1. El pico máximo de corriente es de 3743 A.

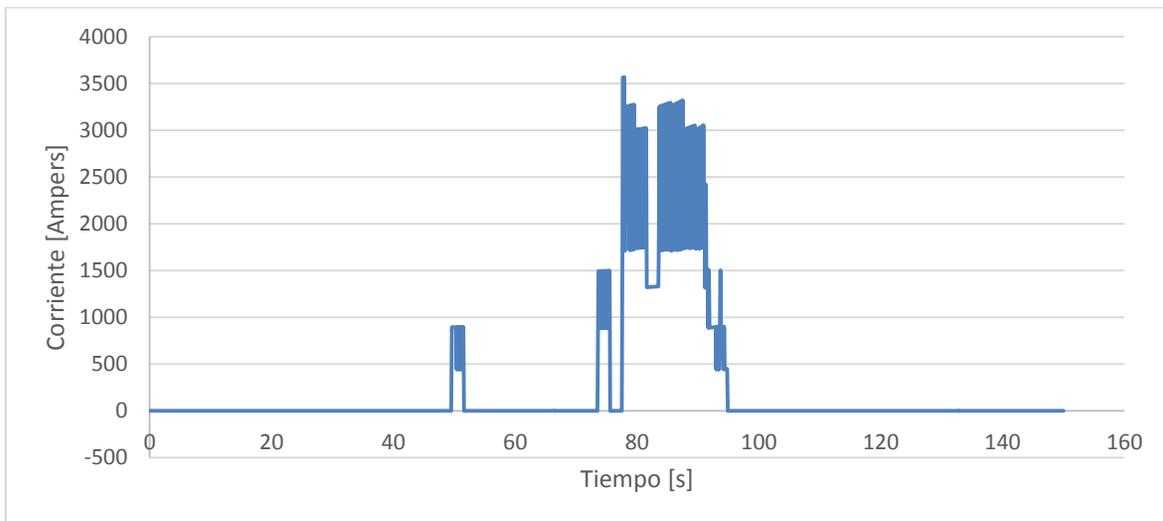


Figura 4.20: Corriente del sistema de manejo de energía 2

En la Figura 4.20 se muestra la corriente que absorbe el segundo sistema de manejo. Este sistema se encuentra en la subestación 3 y absorbe energía durante el frenado del tren 2. El pico máximo de corriente que absorbe este sistema es de 3563 A.

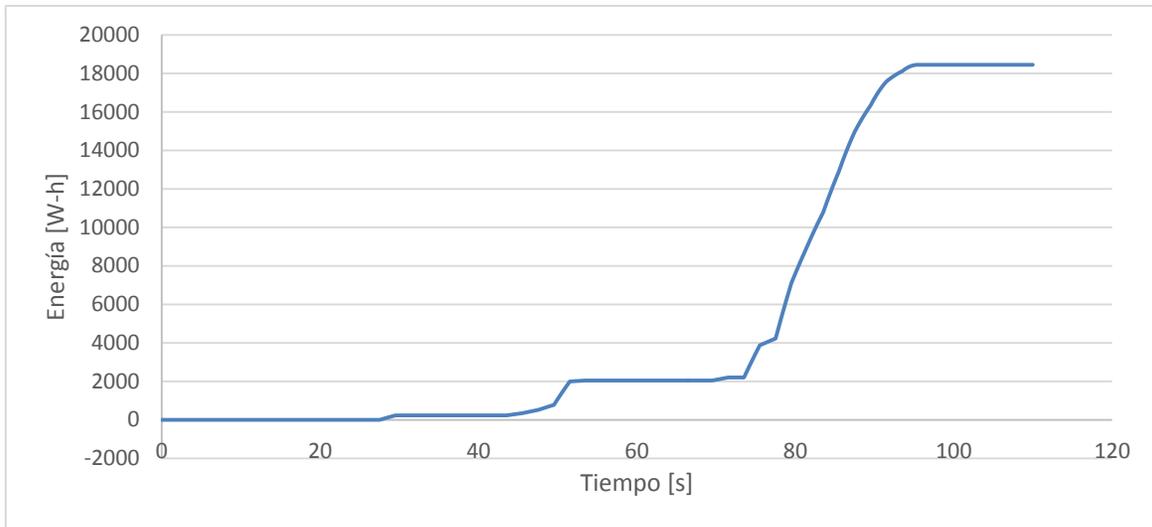


Figura 4.21: Energía disponible total durante el frenado de los dos trenes.

En la Figura 4.21 se muestra la energía disponible durante el frenado de los dos trenes, esta es de 18.4 kW-h y representa la suma de la energía que entregan los dos trenes durante el frenado regenerativo.

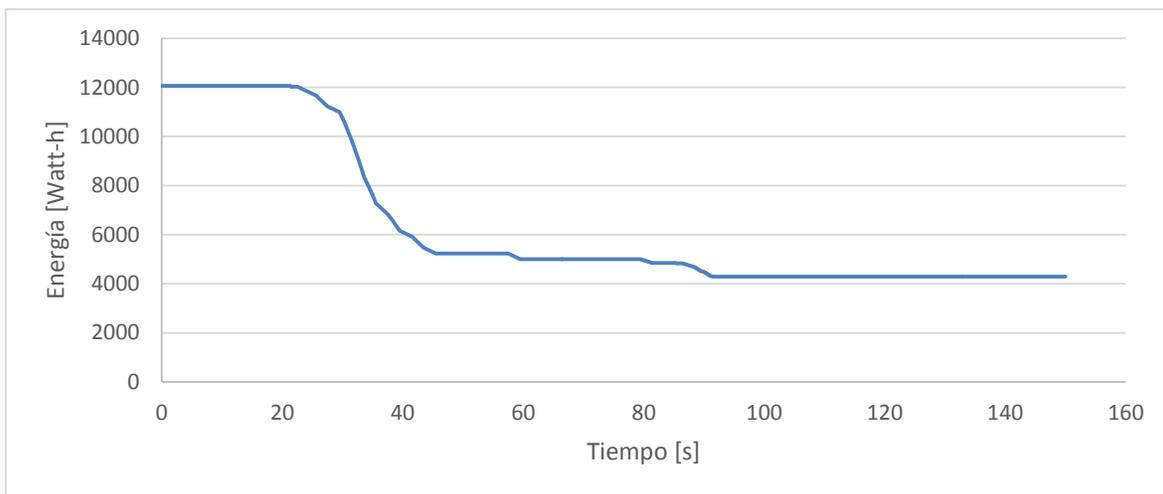


Figura 4.22: Energía entregada por el sistema de manejo de energía 1

En la Figura 4.22 se muestra la energía que el primer sistema de manejo entrega durante la aceleración del tren 1. Este sistema inicia con 12 kW-h y desciende hasta los 4.29 kW-h, lo que da como resultado una energía total entregada de 7.71 kW-h.

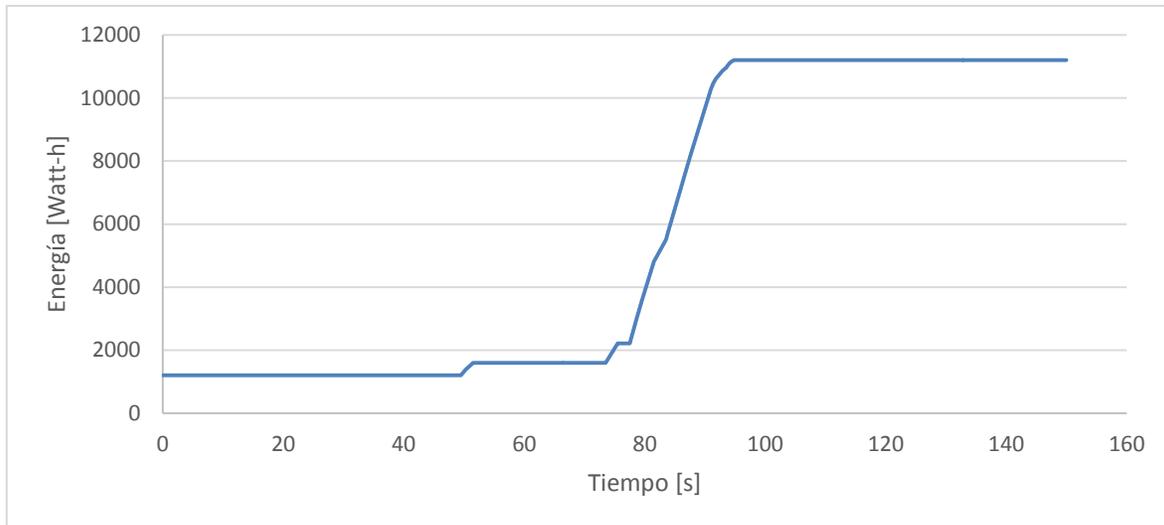


Figura 4.23: Energía absorbida por el sistema de manejo de energía 2

En la Figura 4.23 se muestra la energía absorbida por el sistema de manejo 2 durante el frenado del tren 1. Esta energía inicia en 1.2 kW-h y al final del recorrido llega hasta los 11.2 kW-h, lo que representa una energía total absorbida de 10 kW-h lo que representa un 54 % de la energía total disponible.

Como se puede apreciar la energía que se puede absorber al momento del frenado es mayor que la que se entrega en el momento de la aceleración, lo que muestra que a nivel de simulación es factible implementar este tipo de sistema.

A continuación se presenta el resultado del modelado del volante de inercia, del cual obtenemos la velocidad de referencia que en un futuro podría ser utilizada para controlar la máquina de inducción. Para este caso se tomó un volante con un momento de inercia $J = 161.65 \text{kgm}^2$.

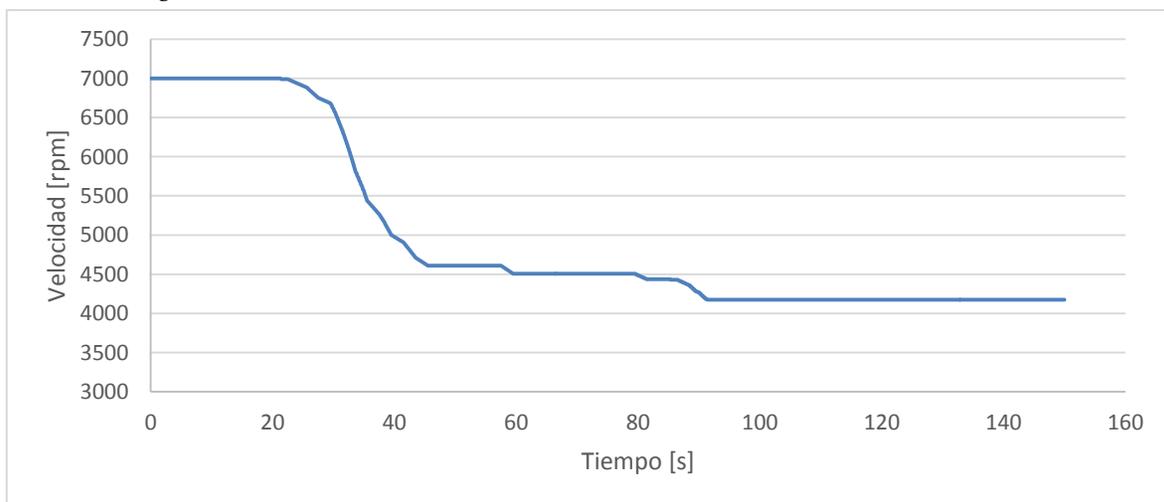


Figura 4.24: Velocidad del volante de inercia 1

En la Figura 4.24 se muestra el perfil de velocidad del volante de inercia perteneciente al sistema de manejo de energía 1. Este perfil muestra el sistema de manejo en la etapa de descarga con una velocidad inicial de 7000 rpm, después de entregar energía su velocidad cae a las 4174 rpm.

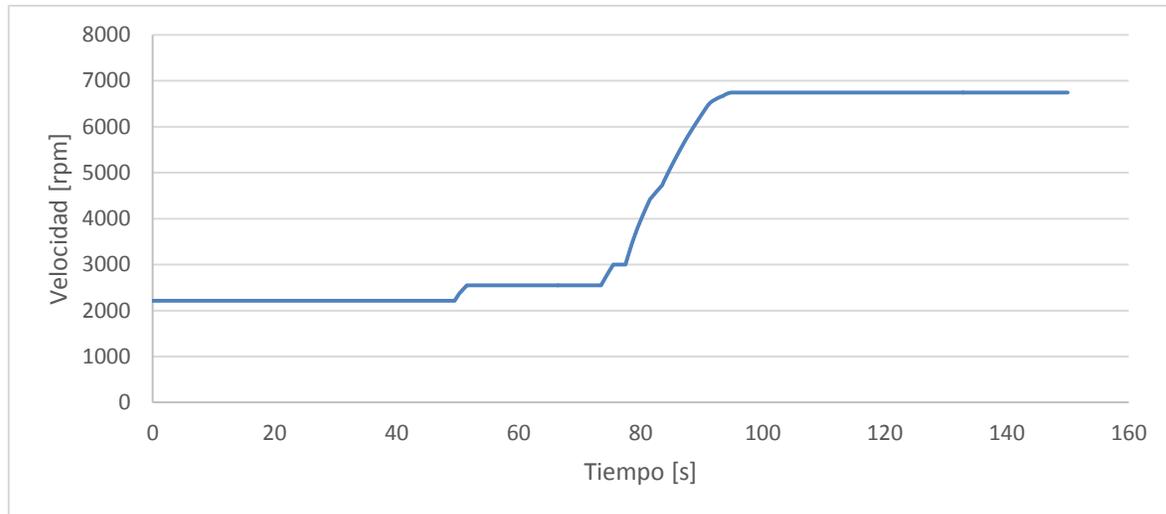


Figura 4.25: Velocidad del volante de inercia 2

En la Figura 4.25 se muestra el perfil de velocidad del volante de inercia perteneciente al sistema de manejo 2. Este sistema se encuentra en la etapa de carga y su velocidad inicial es de 2213 rpm, en el momento del frenado del tren 1 el sistema de recuperación 2 absorbe energía del bus y su velocidad se incrementa hasta las 6745 rpm.

En la Tabla 4.2 se muestra un concentrado de los valores de las subestaciones 2 y 3 en donde se encuentran los sistemas de manejo de energía, los valores de interés se muestran para cada caso planteado.

Tabla 4.2: Concentrado de valores puntuales para los 4 casos de simulación planteados.

		Voltaje Max y Min [V]	Voltaje Max y Min con sistema de recuperación [V]	Porcentaje de compensación de voltaje [%]	Corriente Max y Min [A]	Corriente Max y Min con sistema de recuperación [A]	Corriente IR1 Max [A]	Corriente IR2 Max [A]	Energía sistema de recuperación 1 [kW-h]	Energía sistema de recuperación 2 [kW-h]
Caso 1	Subestación 2	793, 641	781, 691	-7.80	2122, -883	1139, -669	3754	3563	7.71	10
	Subestación 3	818, 645	789, 670	3.55	2032, -1381	1593, -800				
Caso 2	Subestación 2	789, 670	783, 708	-5.67	1600, -780	850, -665	3360	3319	6.1	8.9
	Subestación 3	818, 706	787, 719	3.79	877, -1348	607, -753				
Caso 3	Subestación 2	784, 668	770, 705	-5.54	1640, -700	900, -650	3368	3100	7.05	9.6
	Subestación 3	804, 688	775, 720	3.61	1240, -1080	1100, -590				
Caso 4	Subestación 2	785, 670	780, 708	-5.67	1600, -700	840, -650	3300	3060	5.8	7.1
	Subestación 3	800, 706	780, 718	2.50	900, -1080	640, -555				

Como se puede apreciar el caso más crítico es el 1 que consiste en que los dos trenes salen al mismo tiempo. Se observa que la energía que se recupera es mayor a la entregada durante la aceleración del tren. El porcentaje de compensación de voltaje más grande es en el caso más

crítico y es de 7.8 %. Y el porcentaje de energía absorbida por el sistema de manejo es de 54% de la total disponible.

4.5 Análisis de resultados

4.5.1 Resultado del modelado y simulación del tren

En este trabajo se emplea un análisis de fuerzas para determinar los niveles de energía y potencia que se presentan durante el recorrido del tren. Los resultados obtenidos se compran con los resultados encontrados en la literatura para el recorrido de un vehículo eléctrico, los datos obtenidos fueron muy cercanos y favorables.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación del recorrido del tren este modelado permite tener la base para poder obtener datos y con estos datos dimensionar la potencia y cantidad de energía que debe ser capaz de almacenar el sistema de manejo de energía.

4.5.2 Resultado del modelado y simulación de la red eléctrica.

Para el modelado y simulación de la red eléctrica que alimenta al tren se realiza una comparación del comportamiento del voltaje y corriente utilizando inductancias y resistencias como elementos implícitos en las barra guía del tren con un modelo que utiliza solo las resistencias. Los resultados mostraron que el comportamiento del voltaje y la corriente están prácticamente determinados por las resistencias parásitas.

De acuerdo a esto se planteó un modelo que contempla cinco subestaciones y dos trenes, esto con el objetivo de realizar una simulación que contemple distintos casos que se pudieran presentar.

Los resultados muestran que se puede compensar hasta en un 7.8 % las variaciones de voltaje en la red de alimentación producto de la aceleración y frenado de un tren.

4.5.3 Resultados del modelo y simulación del sistema de manejo de energía.

Para la integración del sistema de manejo de energía se realizó una simplificación mediante las expresiones de potencia del lado de la red de alimentación y el volante de inercia. Esto proporciono una expresión que relaciona los parámetros físicos del volante de inercia con la corriente y el voltaje del bus de alimentación.

Esta etapa muestra que se puede absorber hasta un 54% de la energía disponible durante el frenado, esto con ayuda de la estrategia de control de energía.

Capítulo 5: Conclusiones.

En esta sección se desarrollan las conclusiones del presente trabajo de tesis, las aportaciones, problemáticas y los trabajos futuros que se sugieren de manera complementaria.

5.1 Conclusiones.

Las principales conclusiones a las que se llegó durante este trabajo de tesis se enlistan a continuación.

- El modelado del tren permitió conocer a nivel de simulación las cantidades de energía disponibles durante el frenado del tren. Gracias a esto fue posible establecer la potencia del sistema de recuperación y la energía que debía almacenar el volante de inercia que lo integra.
- Tomar como referencia la potencia y la energía promedio del modelado del tren en los ocho perfiles de velocidad obtenidos por medio del GPS permitió absorber el 54% de la energía total disponible durante el frenado de los trenes.
- El modelo del bus de alimentación permitió observar el efecto de los sistemas de recuperación de energía sobre el mismo en las variables de corriente y voltaje de cada subestación. Cabe mencionar que el modelo empleado es sencillo debido a que solo se consideran resistencias como elementos parásitos en la barras guía y debido a que no se tiene información del comportamiento real del bus de alimentación no es posible validar su modelado.
- La estrategia de control de energía a nivel de simulación logró determinar los momentos en los que el sistema de recuperación inyectara o absorbiera energía del bus de alimentación. Logrando recuperar parte de la energía disponible y compensar en cierta medida las variaciones de voltaje, en el caso más crítico este valor fue del 7.8%.
- La simulación del sistema completo permite de manera fácil poder cargar distintos perfiles de velocidad así como modificar características físicas en el modelo del bus de alimentación, el modelo del sistema de recuperación y el modelo del tren para poder adaptarla a distintos escenarios. El modelo es flexible y puede adecuarse a la representación de sistemas similares a través de la definición de parámetros del sistema.

5.2 Problemática que se presentó durante el desarrollo del tema de tesis

Uno de los principales obstáculos para la realización del trabajo de tesis fue la poca información disponible sobre las características específicas de operación y componentes de los trenes eléctricos y con esto poder validar los resultados de simulación. Posteriormente una vez modeladas todas las partes del sistema llevo un tiempo lograr integrarlas en una sola simulación en la que actuara la estrategia de control de energía en función de las variables del bus de alimentación.

5.3 Aportaciones.

Como principal aportación se considera el hecho de que en la simulación se tengan cinco subestaciones de corriente directa y se puedan tener dos trenes moviéndose de una estación a otra. Estos trenes pueden salir al mismo tiempo y si se desea uno después del otro, además los parásitos en las barras guía son calculados en función de la distancia que recorre el tren. Otra aportación es considerada en el modo de acoplar el sistema de recuperación de energía al bus de alimentación sin tener que adentrarse en el modelado del inversor y la máquina de inducción.

5.4 Trabajos futuros.

Como trabajo futuro se plantea la validación de los modelos propuestos por medio de información real del comportamiento y operación de un sistema de trenes eléctricos específico. Además de la posibilidad de adentrarse en el modelado y control de la máquina de inducción y el inversor que controlarían al volante de inercia. Por otro lado se podría llevar a cabo un modelo a escala que represente el sistema y adaptar la estrategia de control de energía para poder observar el comportamiento de las variables de interés como voltaje y corriente en el bus de alimentación.

Referencias.

[1-28]

- [1] D. G. d. P. Energética, "Balance Nacional de Energía," S. d. P. E. y. D. Tecnológico, Ed., ed, 2011.
- [2] S. d. t. c. M. d. l. c. d. Mexico. (2008 a la fecha). *Datos de operación*. Available: <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/caractecnicas.html#n>
- [3] W. Günselmann, "Technologies for increased energy efficiency in railway systems," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, pp. 10 pp.-P.10.
- [4] Á. J. López López, R. Rodríguez Pecharrómán, M. A. Cucala García, and A. Fernández Cardador, "Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos," 2013.
- [5] M. V. C. Pedro Estévez Irizar, Egoitz Iturritxa Zubiri, Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A., "Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes," in *ElecRail*, 2008.
- [6] A. A. Jamali, N. M. Nor, and T. Ibrahim, "Energy storage systems and their sizing techniques in power system ??? A review," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 2015, pp. 215-220.
- [7] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-10.
- [8] R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, "Energy savings in public transport," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 3, pp. 26-36, 2008.
- [9] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, and D. Iannuzzi, "Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles Based on Power Management Control of Wayside Lithium-Ion Capacitor Storage," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 275-286, 2014.
- [10] M. C. Falvo, R. Lamedica, R. Bartoni, and G. Maranzano, "Energy saving in metro-transit systems: Impact of braking energy management," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, 2010, pp. 1374-1380.
- [11] R. Teymourfar, G. Farivar, H. Iman-Eini, and B. Asaei, "Optimal stationary super-capacitor energy storage system in a metro line," in *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011 2nd International Conference on*, 2011, pp. 1-5.
- [12] M. B. Richardson, "Flywheel energy storage system for traction applications," in *Power Electronics, Machines and Drives, 2002. International Conference on (Conf. Publ. No. 487)*, 2002, pp. 275-279.

- [13] P. Kascak, R. Jansen, B. Kenny, and T. Dever, "Demonstration of attitude control and bus regulation with flywheels," in *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, 2004, pp. 2018-2029 vol.3.
- [14] H. Daeki, L. Hyeongcheol, and K. Jaeho, "Development of a mathematical model of a train in the energy point of view for the international conference on control, automation and systems 2007 (ICCAS 2007)," in *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07. International Conference on*, 2007, pp. 350-355.
- [15] P. J. Kollmeyer, L. W. Juang, and T. M. Jahns, "Development of an electromechanical model for a Corbin Sparrow electric vehicle," in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 2011, pp. 1-8.
- [16] Y. Wen, Y. Chenkun, and H. Zhongsheng, "A novel energy efficient operation strategy for a train based on model-free adaptive predictive control," in *Control Conference (CCC), 2012 31st Chinese*, 2012, pp. 7286-7291.
- [17] P. Shakouri, A. Ordys, M. Askari, and D. S. Laila, "Longitudinal vehicle dynamics using Simulink/Matlab," in *Control 2010, UKACC International Conference on*, 2010, pp. 1-6.
- [18] V. H. Gonz, x00E, M. lez, P. C, x00E, R. rez, *et al.*, "Modeling and simulation of the power train of an electric vehicle," in *Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2013 IEEE International Autumn Meeting on*, 2013, pp. 1-6.
- [19] S. George, R. V. Chacko, and A. Mathew, "Off-line and real-time simulation Modelling of Electric Vehicle power train," in *Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD), 2014 Annual International Conference on*, 2014, pp. 1-8.
- [20] D. C. Cismaru, M. A. Drighiciu, and D. A. Nicola, "SIMULINK model for study of energy efficient train control," in *Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 1-4.
- [21] K. D. Pham, R. S. Thomas, and W. E. Stinger, "Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system," in *Railroad Conference, 2001. Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint*, 2001, pp. 141-160.
- [22] E. b. G. Santiago Burbano de Ercilla, Carlos García Muñoz, *Física General* vol. 32 va Ed.
- [23] S. d. t. c. m. d. l. c. d. México. (2008 a la fecha). *Características generales del material rodante*. Available: <http://www.metro.df.gob.mx/operacion/caractecnicas.html#n>
- [24] J. Chen, Y.-z. Wu, D.-f. Wang, W.-g. Xu, and G.-j. Wen, "Notice of Retraction
Research on aerodynamic drag reduction of heavy commercial vehicle," in *Computer Engineering and Technology (ICCET), 2010 2nd International Conference on*, 2010, pp. V5-191-V5-194.
- [25] M. V. M. Uresty, "Programa de mantenimiento en las vías sobre neumáticos del metro de la ciudad de México," Escuela superior de ingeniería mecánica, Instituto Politecnico Nacional, 2005.
- [26] J. A. Edminister, *Teoría y problemas de electromagnetismo*: McGRAW-HILL, 1992.

- [27] J. E. Vrancik, "Prediction of windage power loss in alternators," *National aeronautics and space administration, Lewis research center*, October 1968.
- [28] Y. Ikezawa, H. Fujimoto, D. Kawano, Y. Goto, M. Tsuchimoto, and K. Sato, "Bench test of minimum time autonomous driving for electric vehicle based on optimization of velocity profile considering energy constraint," in *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE*, 2015, pp. 004609-004614.

6. Anexo A

Propiedades físicas de las barras guía:

Propiedades eléctricas:

Ángulo de 6" x 4" x 7/8" en acero A-34-2NE con 0.02927 Ω /km a 60 grados centígrados.

Propiedades mecánicas:

Resistencia a la tensión	3304 a 4218 Kg./cm ² = R
Límite elástico	2320 kg/cm ²
Esfuerzo máximo / R	0.61 a 0.477 en curva
Esfuerzo máximo / R	0.432 a 0.338 en recta
Esfuerzo máximo / LE	0.867 en curva
Esfuerzo máximo/ LE	0.614 en recta

Composición química:

Carbono:	≤ 0.14 %
Silicio:	≤ 0.20 %
Manganeso:	0.4 % a 0.85 %
Fósforo:	≤ 0.06 %
Azufre:	≤ 0.04 %
Fósforo + Azufre:	≤ 0.07 %
Hierro:	El resto de la composición.

7. Anexo B

$$I_1 = \frac{((A \text{Re}_4 + B) \text{Re}_3 + C) \text{Re}_2 - R_1 I R_1 (D \text{Re}_3 + E (R p_{11} + R p_{12}))}{(F \text{Re}_3 + G) \text{Re}_2 + (R p_1 + \text{Re}_1 + R_1) (H \text{Re}_3 + I)} \quad (8.1)$$

Dónde:

$$A = (I_L - I R_1) R p_{12} + (I_L - I R_1 + I R_2) R p_2 - (R_1 + R_2 + \text{Re}_5 + R p_{11} + R p_{21} + R p_{22}) I R_1 + I_L R_2 + (I_L + I_{L2} + I R_2) (R p_{22} + \text{Re}_5) + R p_{21} (I_L + I R_2) \quad (8.2)$$

$$B = (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) [(I_L - I R_1) R p_{12} - (R_1 + R_2 + R p_{11}) I R_1 + (I_L - I R_1 + I R_2) R p_2 + I_L R_2] \quad (8.3)$$

$$C = [(I_L - I R_1) R p_{12} - (R_1 + R p_{11}) I R_1] \begin{bmatrix} (R_2 + \text{Re}_5 + R p_2 + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 \\ + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2) \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

$$D = (R_2 + \text{Re}_5 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12} + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12}) \quad (8.5)$$

$$E = (R_2 + \text{Re}_5 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12} + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2) \quad (8.6)$$

$$F = (R_1 + R_2 + \text{Re}_1 + \text{Re}_5 + R p_1 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12} + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_1 + R_2 + \text{Re}_1 + R p_1 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12}) \quad (8.7)$$

$$G = (R_1 + \text{Re}_1 + R p_1 + R p_{11} + R p_{12}) \begin{bmatrix} (R_2 + \text{Re}_5 + R p_2 + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 \\ + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2) \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

$$H = (R_2 + \text{Re}_2 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12} + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2 + R p_{11} + R p_{12}) \quad (8.9)$$

$$I = (R p_{11} + R p_{12}) [(R_2 + \text{Re}_5 + R p_2 + R p_{21} + R p_{22}) \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + R p_{21} + R p_{22}) (R_2 + R p_2)] \quad (8.10)$$

$$I_3 = \frac{(A_2 \text{Re}_4 + B_2) \text{Re}_3 + C_2}{(D_2 \text{Re}_4 + E_2) \text{Re}_3 + F_2} \quad (8.11)$$

Dónde:

$$A_2 = \left[(I_L - IR_1 + IR_2)(Rp_2 + Rp_{21}) + (I_L + I_{L2} - IR_1 + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) + (I_L - IR_1)R_2 - Rp_{11}IR_1 \right] (Re_1 + Rp_1) \\ + R_1 \left[(I_L + IR_2)(Rp_2 + Rp_{21}) + I_L R_2 + (I_L + I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) \right] + \left[(I_L - IR_1)(Re_1 + Rp_1) + I_L R_1 \right] Rp_{12} \quad (8.12)$$

$$B_2 = \left\{ \left[(I_L - IR_1 + IR_2)Rp_2 + (I_L - IR_1)R_2 - Rp_{11}IR_1 \right] (Re_1 + Rp_1) \right. \\ \left. + \left[(I_L - IR_1)(Re_1 + Rp_1) + I_L R_1 \right] Rp_{12} + \left[(I_L + IR_2)Rp_2 + I_L R_2 \right] R_1 \right\} (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \quad (8.13)$$

$$C_2 = \left[(R_2 + Re_5 + Rp_2 + Rp_{21} + Rp_{22})Re_4 + (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22})(R_2 + Rp_2) \right] \\ \left\{ \left[(I_L - IR_1)(Re_1 + Rp_1) + I_L R_1 \right] Rp_{12} - IR_1 Rp_{11} (Re_1 + Rp_1) \right\} \quad (8.14)$$

$$D_2 = (Re_1 + R_1 + Re_2 + Rp_1)Rp_{12} + (R_2 + Re_2 + Re_5 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{21} + Rp_{22}) \\ (Re_1 + Rp_1) + (R_1 + Re_2)(Rp_2 + Rp_{22} + Re_5 + R_2 + Rp_{21}) + (Re_2 + Rp_{11})R_1 + Re_2 Rp_{11} \quad (8.15)$$

$$E_2 = (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \left[(Re_1 + R_1 + Re_2 + Rp_1)Rp_{12} + (R_2 + Re_2 + Rp_2 + Rp_{11})(Re_1 + Rp_1) \right] \\ + (R_1 + Re_2)(Rp_2 + R_2) + (Re_2 + Rp_{11})R_1 + Re_2 Rp_{11} \quad (8.16)$$

$$F_2 = \left[(R_2 + Re_5 + Rp_2 + Rp_{21} + Rp_{22})Re_4 + (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22})(R_2 + Rp_2) \right] \\ \left[(Re_1 + R_1 + Re_2 + Rp_1)Rp_{12} + (Re_2 + Rp_{11})(Re_1 + Rp_1 + R_1) + Re_2 Rp_{11} \right] \quad (8.17)$$

$$I_6 = \frac{(A_3 Re_4 + B_3)Re_2 + (Rp_1 + Re_1 + R_1)(C_3 Re_4 + D_3)}{(E_3 Re_4 + F_3)Re_2 + (Rp_1 + Re_1 + R_1)(G_2 Re_4 + H_2)} \quad (8.18)$$

Dónde:

$$A_3 = \left[(I_L + IR_2)(Rp_2 + Rp_{21}) + I_L R_2 + (I_L + I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) \right] Rp_{11} \\ + \left[Rp_{12}IR_2 + (I_L - IR_1 + IR_2)(Re_1 + Rp_1) + R_1(I_L + IR_2) \right] Rp_2 \\ + \left[(I_L + I_{L2} - IR_1 + IR_2)(Re_1 + Rp_1) + (I_L + I_{L2} + IR_2)R_1 + Rp_{12}(I_{L2} + IR_2) \right] Rp_{22} \\ + \left[(I_L + I_{L2} - IR_1 + IR_2)Re_5 + (I_L - IR_1 + IR_2)Rp_{21} + (I_L - IR_1)R_2 \right] Re_1 \\ + \left[(I_L + I_{L2} - IR_1 + IR_2)Rp_1 + (I_L + I_{L2} + IR_2)R_1 + Rp_{12}(I_{L2} + IR_2) \right] Re_5 \\ + \left[(I_L - IR_1 + IR_2)Rp_{21} + (I_L - IR_1)R_2 \right] Rp_{11} + \left[R_1(I_L + IR_2) + Rp_{12}IR_2 \right] Rp_{21} + I_L R_1 R_2 \quad (8.19)$$

$$B_3 = \left\{ \begin{aligned} & \left[Rp_{12}IR_2 + (I_L - IR_1 + IR_2)(Re_1 + Rp_1) + R_1(I_L + IR_2) \right] Rp_2 \\ & + R_2 \left[(I_L - IR_1)(Re_1 + Rp_1) + I_L R_1 \right] + \left[(I_L + IR_2)Rp_2 + I_L R_2 \right] Rp_{11} \end{aligned} \right\} (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \quad (8.20)$$

$$C_3 = \left[(I_L + IR_2)(Rp_2 + Rp_{21}) + I_L R_2 + (I_L + I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) \right] Rp_{11} \quad (8.21)$$

$$+ \left[(Rp_2 + Rp_{21})IR_2 + (I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) \right] Rp_{12}$$

$$D_3 = (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \left\{ \left[(I_L + IR_2)Rp_2 + I_L R_2 \right] Rp_{11} + IR_2 Rp_2 Rp_{12} \right\} \quad (8.22)$$

$$E_3 = (R_2 + Re_3 + Re_5 + Rp_2 + Rp_{21} + Rp_{22})Rp_{11} + (R_1 + Re_1 + Re_3 + Rp_1 + Rp_{12})(Rp_2 + Rp_{22})$$

$$+ (R_2 + Re_3 + Re_5 + Rp_{21})Re_1 + (R_1 + Re_3 + Rp_1 + Rp_{12})Re_5 + (R_2 + Re_3 + Rp_{21})Rp_1$$

$$+ (R_1 + Re_3 + Rp_{12})Rp_{21} + (R_2 + Re_3)(R_1 + Rp_{12}) + R_2 Re_3 \quad (8.23)$$

$$F_3 = (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \left[\begin{aligned} & (R_2 + Re_3 + Rp_2)Rp_{11} + (R_1 + Re_1 + Re_3 + Rp_1 + Rp_{12})Rp_2 \\ & + (R_2 + Re_3)(Re_1 + Rp_1 + R_1 + Rp_{12}) + R_2 Re_3 \end{aligned} \right] \quad (8.24)$$

$$G_2 = (R_2 + Re_3 + Re_5 + Rp_2 + Rp_{21} + Rp_{22})Rp_{11} + (Re_3 + Rp_{12})(Rp_2 + Rp_{22} + Re_5 + Rp_{21})$$

$$+ (R_2 + Re_3)Rp_{12} + R_2 Re_3 \quad (8.25)$$

$$H_2 = (Re_5 + Rp_{21} + Rp_{22}) \left[\begin{aligned} & (R_2 + Re_3)Rp_2 Rp_{11} + (Re_3 + Rp_{12})Rp_2 \\ & + (R_2 + Re_3)Rp_{12} + R_2 Re_3 \end{aligned} \right] \quad (8.26)$$

$$I_9 = \frac{(A_4 Re_2 + B_4)Re_3 + C_4}{D_4 Re_3 + E_4} \quad (8.27)$$

Dónde:

$$A_4 = \left[(I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) + Rp_{21}IR_2 \right] R_2 + \left[\begin{aligned} & (I_L + I_{L2} + IR_2)(Rp_{11} + R_1) + Rp_{12}(I_{L2} + IR_2) \\ & + (I_L + I_{L2} - IR_1 + IR_2)(Re_1 + Rp_1) + Rp_2 I_{L2} \end{aligned} \right]$$

$$(Rp_{22} + Re_5) + \left[(I_L + IR_2)(Rp_{11} + R_1) + Rp_{12}IR_2 + (I_L - IR_1 + IR_2)(Re_1 + Rp_1) \right] Rp_{21} \quad (8.28)$$

$$B_4 = (Rp_1 + Re_1 + R_1) \left\{ \begin{aligned} & \left[(I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) + Rp_{21}IR_2 \right] R_2 \\ & + \left[(I_L + I_{L2} + IR_2)Rp_{11} + Rp_{12}(I_{L2} + IR_2) + Rp_2 I_{L2} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\left\{ (Rp_{22} + Re_5) + \left[(I_L + IR_2)Rp_{11} + Rp_{12}IR_2 \right] Rp_{21} \right\} \quad (8.29)$$

$$C_4 = \left[(R_1 + Re_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})Re_2 + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + Re_1 + R_1) \right]$$

$$\left\{ \left[(I_{L2} + IR_2)(Rp_{22} + Re_5) + Rp_{21}IR_2 \right] R_2 + I_{L2}Rp_2(Rp_{22} + Re_5) \right\} \quad (8.30)$$

$$D_4 = \left[\begin{aligned} & (\text{Re}_4 + \text{Re}_5 + Rp_{21} + Rp_{22})R_2 + (R_1 + \text{Re}_1 + \text{Re}_4 + Rp_1 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_{22} + \text{Re}_5) \\ & + (\text{Re}_4 + Rp_{21})(Rp_{11} + Rp_{12} + \text{Re}_1 + Rp_1 + R_1) + (\text{Re}_4 + Rp_2)Rp_{21} + \text{Re}_4 Rp_2 \end{aligned} \right] \text{Re}_2 \\ + (Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \left[\begin{aligned} & (\text{Re}_4 + \text{Re}_5 + Rp_{21} + Rp_{22})R_2 + (\text{Re}_4 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_{22} + \text{Re}_5) \\ & + (\text{Re}_4 + Rp_{21})(Rp_{11} + Rp_{12}) + (\text{Re}_4 + Rp_2)Rp_{21} + \text{Re}_4 Rp_2 \end{aligned} \right] \quad (8.31)$$

$$E_4 = \left[(R_1 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})\text{Re}_2 + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \right] \\ \left[(\text{Re}_4 + \text{Re}_5 + Rp_{21} + Rp_{22})R_2 + (\text{Re}_4 + Rp_2)(Rp_{22} + \text{Re}_5 + Rp_{21}) + \text{Re}_4 Rp_2 \right] \quad (8.32)$$

$$I_{11} = \frac{(A_5 \text{Re}_3 + B_5) + C_5}{D_5 \text{Re}_4 + (\text{Re}_5 + Rp_{21} + Rp_{22})E_5} \quad (8.33)$$

Dónde:

$$A_5 = \left[\begin{aligned} & Rp_{21}I_{L2} + (I_{L2} + IR_2)(R_2 + R_1) + (I_L + I_{L2} + IR_2)Rp_{11} + (R_1 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_2 + Rp_{12})I_{L2} \\ & + Rp_{12}IR_2 + (I_L - IR_1 + IR_2)(\text{Re}_1 + Rp_1) \end{aligned} \right] \text{Re}_2 \quad (8.34) \\ + (Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \left[Rp_{21}I_{L2} + (I_{L2} + IR_2)R_2 + (I_L + I_{L2} + IR_2)Rp_{11} + (Rp_2 + Rp_{12})I_{L2} + Rp_{12}I_{L2} \right] \text{Re}_3$$

$$B_5 = \left[I_{L2}(R_{21} + Rp_2) + (I_{L2} + IR_2)R_2 \right] \left[\begin{aligned} & (R_1 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})\text{Re}_2 \\ & + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \end{aligned} \right] \quad (8.35)$$

$$C_5 = \left\{ \begin{aligned} & \left[\begin{aligned} & (R_1 + R_2 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})\text{Re}_2 \\ & + (R_2 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \end{aligned} \right] \text{Re}_3 \\ & \left[\begin{aligned} & (R_1 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})\text{Re}_2 \\ & + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \end{aligned} \right] (R_2 + Rp_2) \end{aligned} \right\} Rp_{21}I_{L2} \quad (8.36)$$

$$D_5 = \left[\begin{aligned} & (R_1 + R_2 + \text{Re}_1 + \text{Re}_5 + Rp_1 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12} + Rp_{21} + Rp_{22})\text{Re}_2 \\ & + (Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1)(R_2 + \text{Re}_5 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12} + Rp_{21} + Rp_{22}) \end{aligned} \right] \text{Re}_3 \\ + \left[(R_1 + \text{Re}_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})\text{Re}_2 + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + \text{Re}_1 + R_1) \right] (R_2 + \text{Re}_5 + Rp_2 + Rp_{21} + Rp_{22}) \quad (8.37)$$

$$\begin{aligned}
 E_5 = & \left[\begin{array}{l} (R_1 + R_2 + Re_1 + Rp_1 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12})Re_2 \\ + (R_2 + Rp_2 + Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + Re_1 + R_1) \end{array} \right] Re_3 \\
 & + \left[\begin{array}{l} (R_1 + Re_1 + Rp_1 + Rp_{11} + Rp_{12})Re_2 \\ + (Rp_{11} + Rp_{12})(Rp_1 + Re_1 + R_1) \end{array} \right] (R_2 + Rp_2)
 \end{aligned} \tag{8.38}$$

8. Anexo C

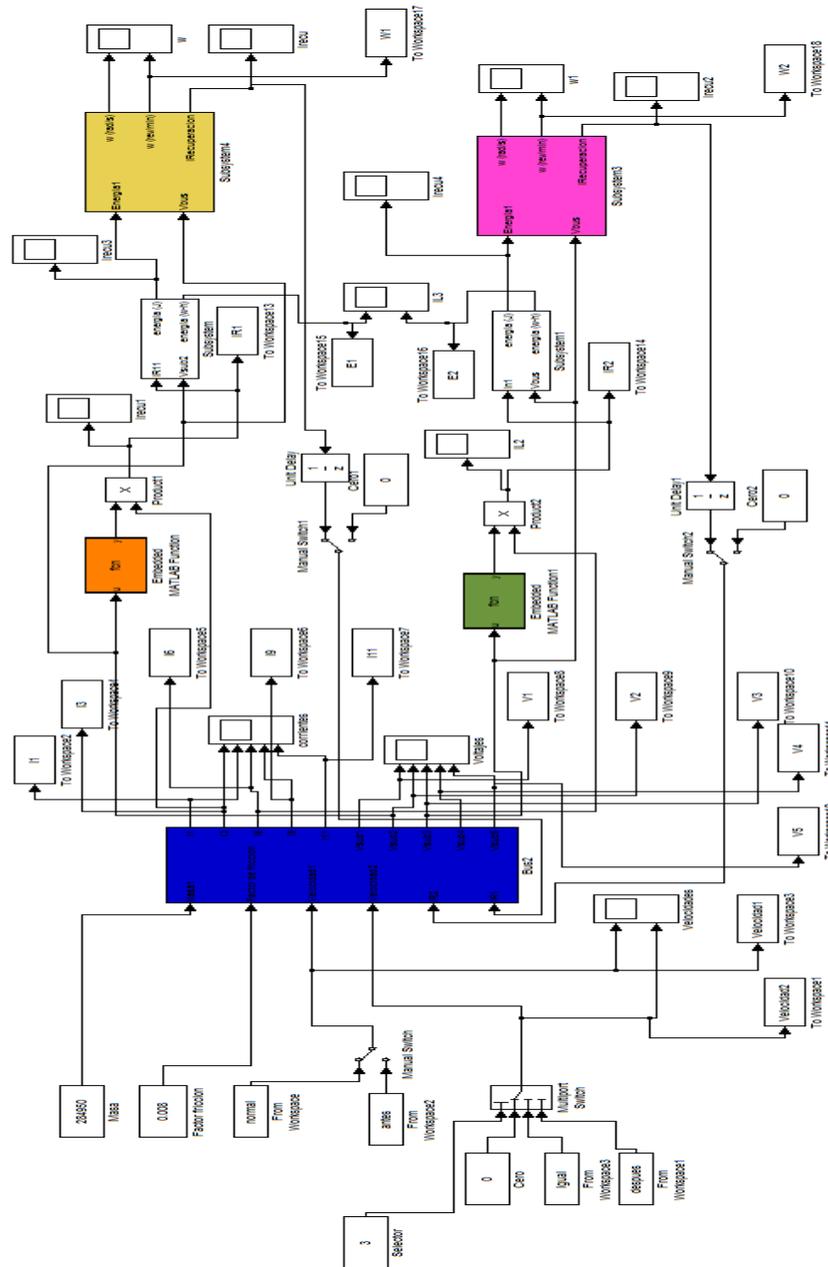


Figura 9.11: Simulación principal, en azul se tiene el bloque que contiene el modelado dinámico del convoy, cálculo de parásitos y el modelo del bus de alimentación. En naranja y verde se tienen los bloques donde se programó la estrategia de control y en amarillo y rosa se tiene el modelo del volante de inercia.

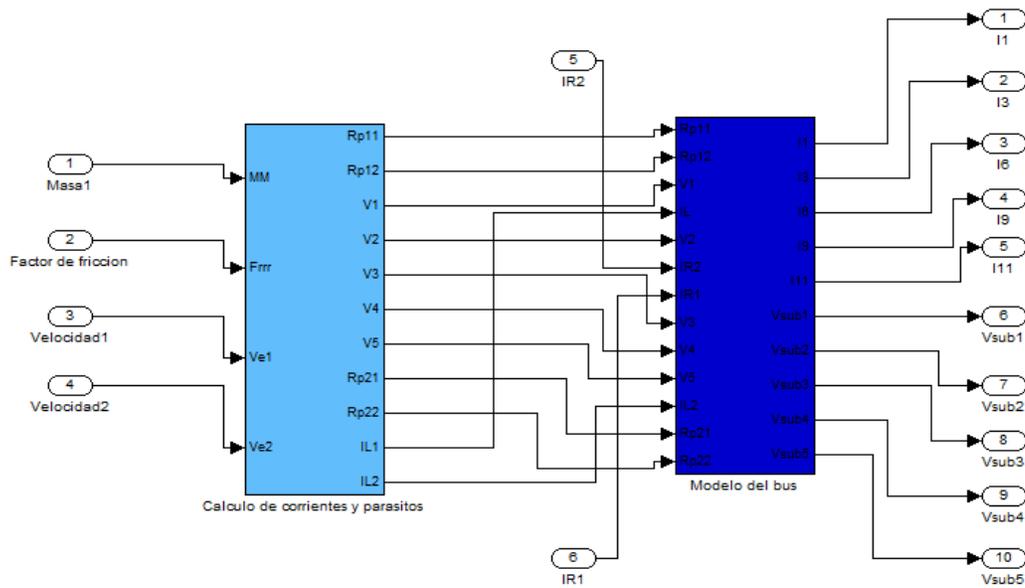


Figura 2: Esta imagen muestra los dos subsistemas que se encuentran dentro del bloque que contiene el modelo dinámico del convoy (Cyan) y el modelo del bus de alimentación (Azul marino).

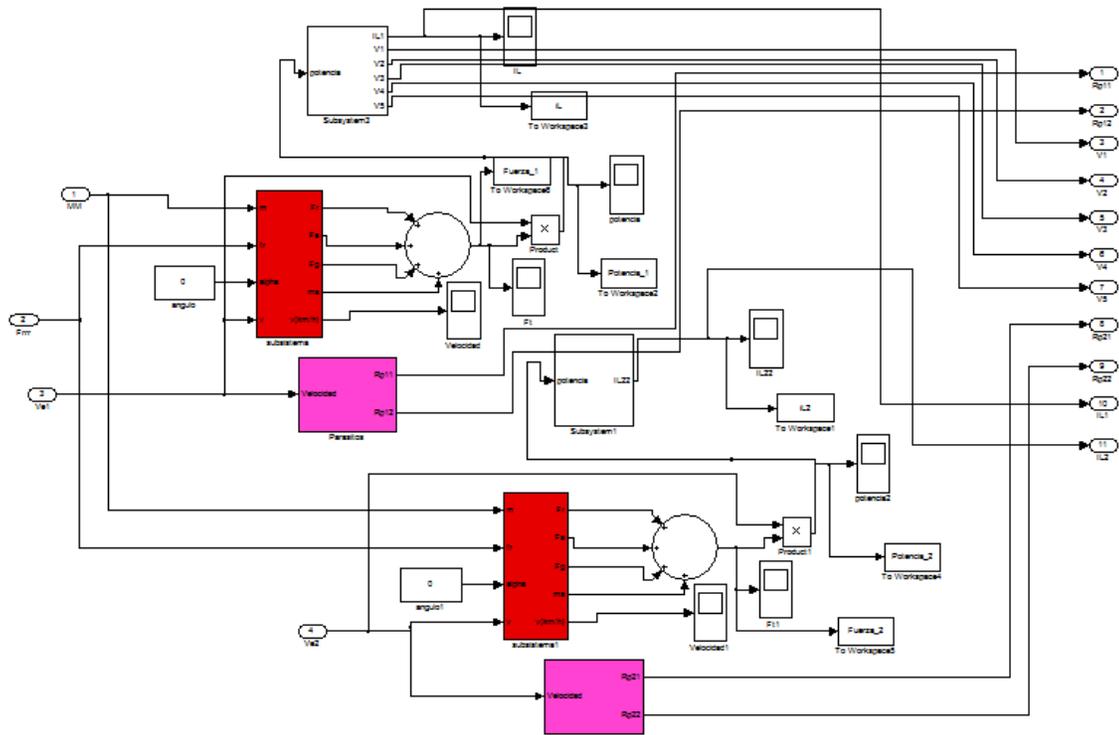


Figura 9.3: Se muestra el contenido del bloque que modela dinámicamente el convoy.

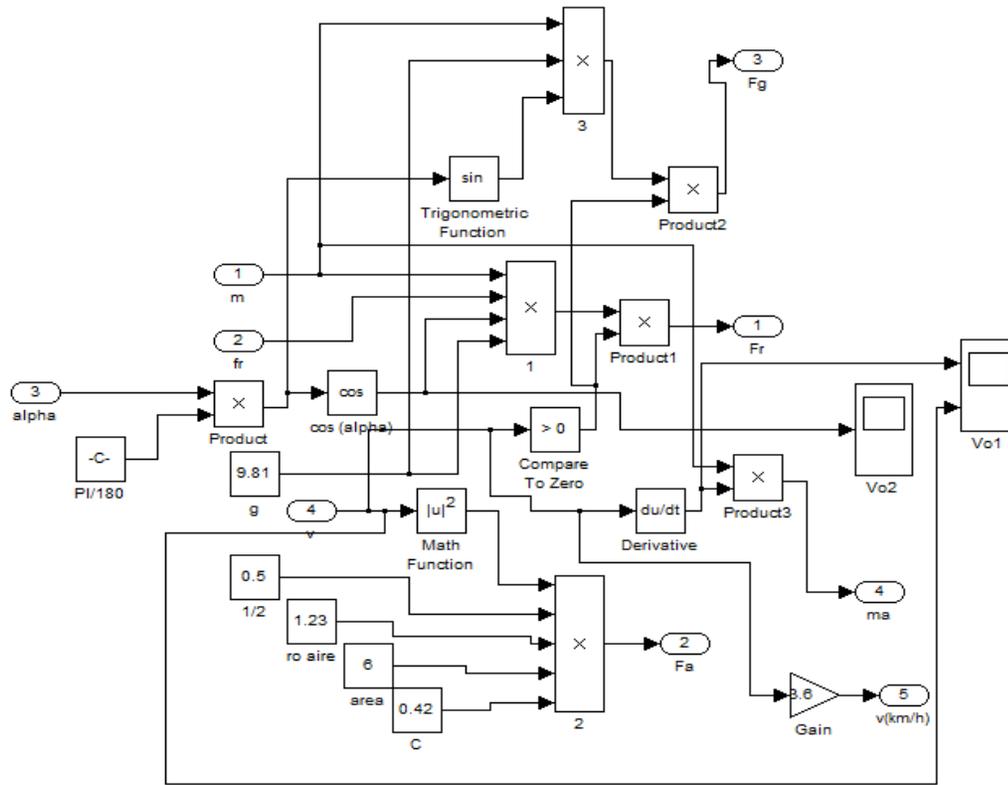


Figura 9.4: Este bloque muestra el contenido del subsistema rojo en donde se calcula la fuerza necesaria para garantizar el perfil de velocidad del convoy.

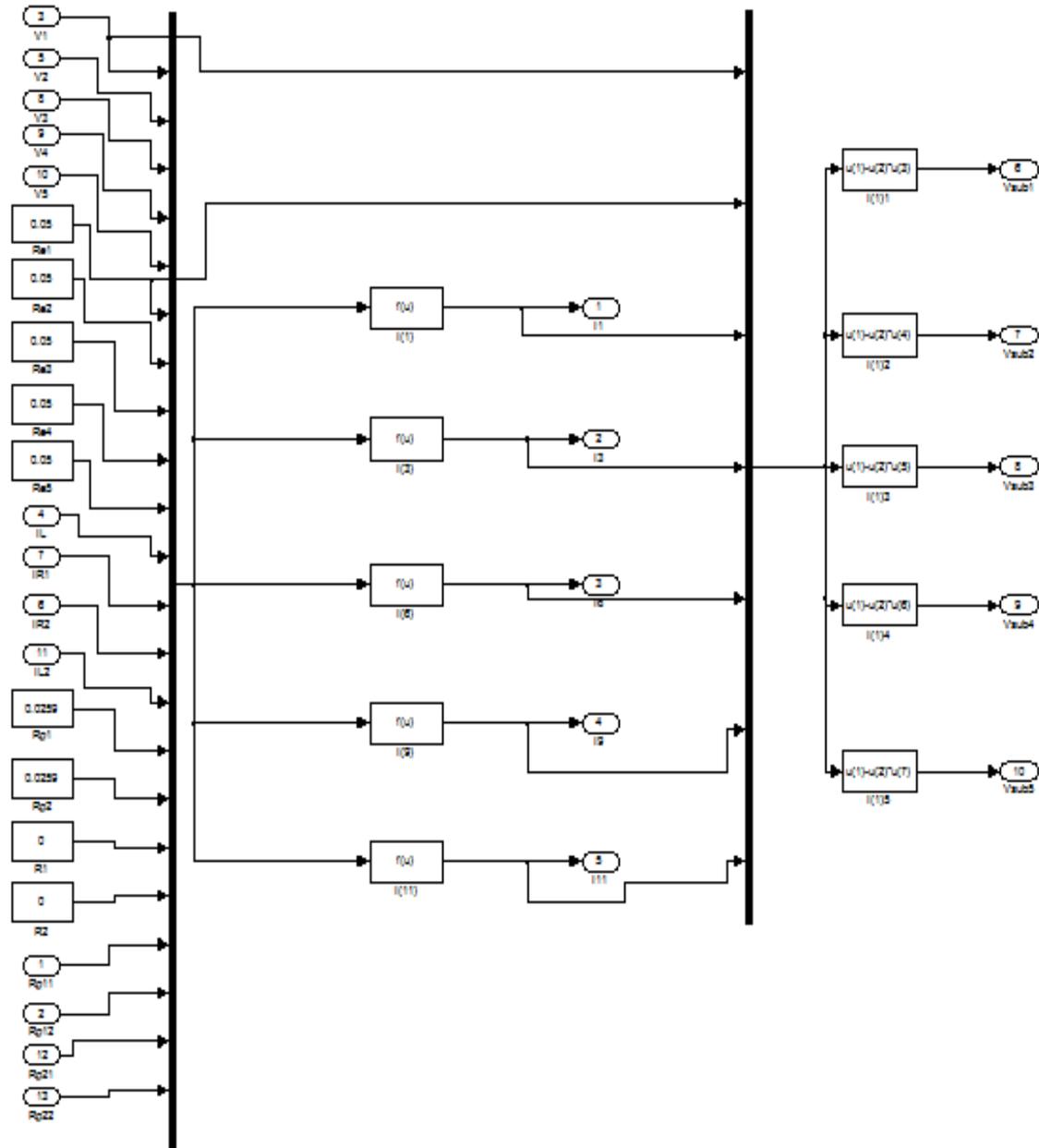


Figura 9.5: En este subsistema se calculan las corrientes y voltajes, debido al tamaño de las expresiones para las corrientes se implementaron mediante bloques con funciones programables.

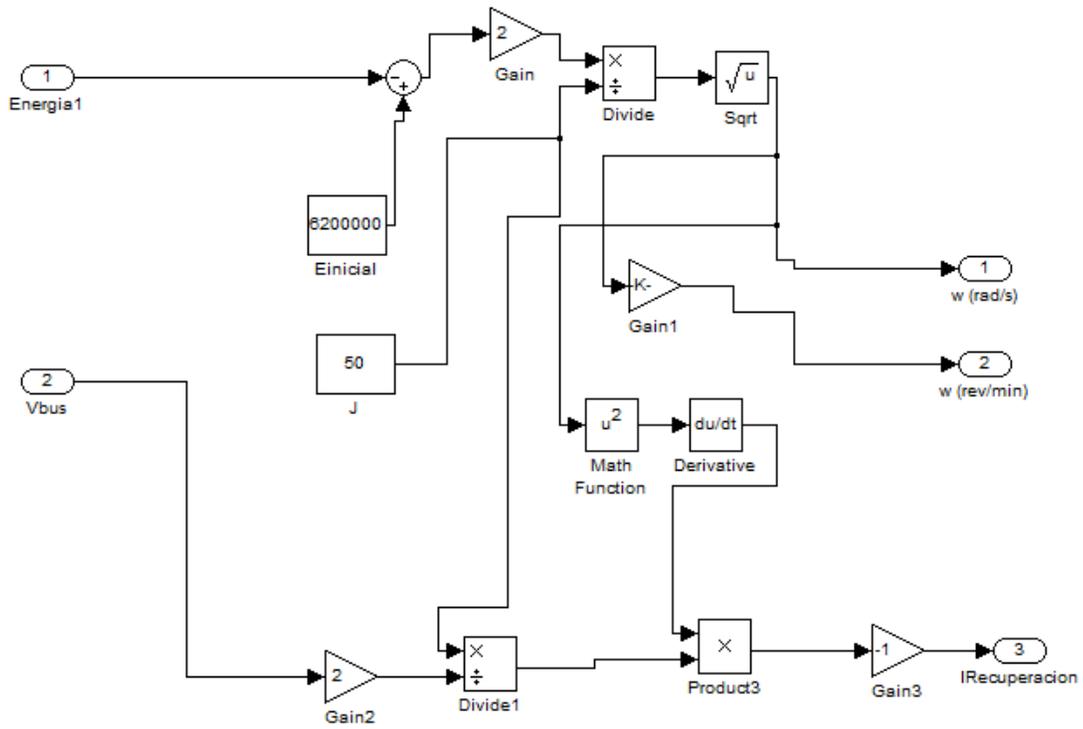


Figura 9.6: En esta ilustración se muestra el diagrama de bloques del modelado del volante de inercia.