

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**PROYECTO TÉCNICO DE ENFOQUE INVESTIGATIVO  
“ANÁLISIS DEL IMPACTO ELÉCTRICO DEL  
MATERIAL RODANTE TRANVÍA DE CUENCA EN LA  
LÍNEA DE CORRIENTE CONTINUA”**

Autores

Jaime Luis Ortega Pintado

Juan Javier Pillco Criollo

Tutor

Prof. Julio César Viola (Ph. D.)

Cuenca, Mayo de 2017

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Jaime Luis Ortega Pintado con documento de identificación No. 0105798409 y Juan Javier Pillco Criollo con documento de identificación No. 0105083646 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación: “Análisis del impacto eléctrico del material rodante tranvía de cuenca en la línea de corriente continua”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital en la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



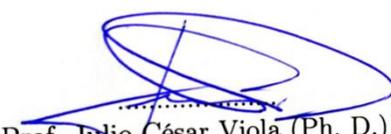
Jaime Ortega  
0105798409  
Mayo de 2017



Javier Pillco  
0105083646  
Mayo de 2017

## CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutela fue desarrollado el trabajo de titulación “Análisis del impacto eléctrico del material rodante tranvía de cuenca en la línea de corriente continua”, realizado por Jaime Luis Ortega Pintado y Juan Javier Pillco Criollo, obteniendo el Proyecto Técnico enfoque Investigativo, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.



Prof. Julio César Viola (Ph. D.)  
0151422953  
Mayo de 2017

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Jaime Luis Ortega Pintado con documento de identificación No. 0105798409 y Juan Javier Pillco Criollo con documento de identificación No. 0105083646, autores del trabajo de titulación “Análisis del impacto eléctrico del material rodante tranvía de cuenca en la línea de corriente continua” certificamos que el total contenido del proyecto técnico enfoque investigativo es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, Mayo del 2017



Jaime Ortega  
0105798409



Javier Pillco  
0105083646

## **Dedicatoria**

*Este trabajo está dedicado Dios, por darme salud, sabiduría y constancia en toda mi carrera universitaria.*

*A mis queridos padres, Luis y Teresa, quienes con su dedicación, esfuerzo y perseverancia me apoyaron en todo momento, me supieron aconsejar, darme ejemplo de vida y darme alientos de ánimo.*

*A mis hermanos, Fernanda y Dubal, por ser la razón para continuar superándome cada día, por siempre apoyarme en las decisiones tomadas y ser la alegría en los momentos difíciles.*

*A mis padrinos, Ángel y Carmita, quienes son ejemplo de vida y superación, y por darme el impulso para iniciar y terminar mi carrera universitaria*

**Jaime Ortega**

*A dios por brindarme salud y sabiduría para concluir una meta más en mi vida profesional. A mis padres Joselo y Clara ya que ellos con su esfuerzo y sacrificio me apoyaron que todo momento, además enseñándome buenos modales y consejos de superación para terminar una etapa de mi vida profesional.*

*A mis tíos William y Patricia quienes con su apoyo y consejos de superación me ayudaron para terminar mis estudios universitarios, a mis abuelitos tanto paternos como maternos quienes siempre me alentaban a ser un profesional en la vida.*

**Javier Pillco**

## **Agradecimientos**

*Un agradecimiento muy especial a nuestro docente tutor, profesor Julio Cesar Viola, quien con sus conocimientos, enseñanzas y paciencia supo darnos las pautas correctas para la realización y finalización de este proyecto.*

*Además un agradecimiento extensivo a la Unidad Ejecutora del Proyecto Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca, quienes nos colaboraron con información de proyecto.*

*A una gran persona y excelente profesional dentro de la unidad ejecutora, el Ing. Agustin Peñaherrera.*

*A nuestros queridos padres, hermanos, familiares y amigos, quienes nos brindaron todo su apoyo, confianza y consejos al momento de tomar las decisiones.*

*Javier Pillco  
Jaime Ortega*

## Resumen

El estudio del tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca permite tener un conocimiento acerca del funcionamiento de este en la vida real, para ello es necesario seguir un procedimiento el cual contemple las características del sistema ferroviario y permita obtener resultados cercanos a la realidad.

En este caso para el desarrollo del estudio, en primera instancia se determinan las características del tranvía a emplear y de la localidad donde éste va a operar.

En una segunda instancia, de acuerdo con la información recopilada se determina: las velocidades de operación, espacios entre paradas y tiempo involucrados en el funcionamiento del tranvía.

En una tercera instancia, mediante las ecuaciones de energía potencial y energía cinética se determinan las energías mecánicas involucradas en el funcionamiento del tranvía.

En una cuarta instancia, con las ecuaciones de transformación de energía se determinan las potencias y corrientes eléctricas requeridas para provocar el movimiento del tranvía.

En una quinta instancia, un modelo similar al real se desarrolla en Simulink, en el cual se implementa el sistema de tracción con subestaciones, líneas de alimentación y tranvías. Además se desarrolla una metodología que permita encender y apagar las cargas colocadas en el modelo.

Finalmente, mediante el modelo de Simulink, se determina la variación del voltaje en la catenaria para diferentes etapas de operación del tranvía. Considerando los casos más críticos de operación y determinando las posibles restricciones para la red y las propuestas para evitar estas restricciones.

# Abstract

This study deals with the modeling of “Cuatro Ríos de Cuenca” tramway, including the analysis of its main characteristics and the obtention of results close to real life operation.

The first part of the study focuses in the most relevant characteristics of the tramway and the city of Cuenca.

Based on the information obtained in the previous part, the second part determines speeds of operation, distances between stops and involved times.

The third part presents the equations of potential, kinetic and mechanic energy along the tramway route.

The fourth part centers in the calculation of electric power and current levels based on the required mechanic energy and on the energy conversion efficiency.

In the fifth part a model is developed in Simulink which implements the traction system, feeder substations, feeding lines and trolleys.

Finally, the model is used to determine voltage variations in the overhead and underground lines for different stages of tramway operation. Critical cases, where peak currents occur, are identified and recommendations are made to overcome this limitations.

# Prefacio

Este documento presenta los resultados de la variación del voltaje que se produce en los sistemas ferroviarios cuando sobre estos, se encuentran operando una cierta cantidad de tranvías.

En este caso, el sistema ferroviario analizado corresponde al proyecto tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca.

Para determinar la variación del voltaje se consideran las características más importantes de los tranvías y de la localidad por donde estos van a operar. Estas características permiten determinar las energías mecánicas y eléctricas, involucradas en el funcionamiento del tranvía. Además, estas características, permiten determinar el modelo del sistema ferroviario a desarrollarse en Simulink de MATLAB.

El modelo desarrollado permite determinar la variación del voltaje que se produce en el hilo de contacto cuando por el mismo se desplaza un tranvía.

# Índice general

Problema de Estudio . . . . .	1
Justificación . . . . .	1
Grupo Objetivo . . . . .	1
Objetivos . . . . .	1
General . . . . .	1
Específicos . . . . .	1
<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1. Introducción a los sistemas ferroviarios</b>	<b>3</b>
1.1. Historia de la tracción eléctrica . . . . .	4
1.2. Motores de tracción . . . . .	5
1.2.1. Motores de corriente continua . . . . .	5
1.2.2. Motores de corriente alterna . . . . .	5
1.3. Sistemas de electrificación ferroviaria . . . . .	6
1.3.1. Sistemas en corriente alterna . . . . .	6
1.3.2. Sistemas en corriente continua . . . . .	6
1.3.2.1. Línea aérea de contacto (LAC) . . . . .	7
1.3.2.2. Alimentación por el suelo (APS) . . . . .	7
1.3.2.3. Subestaciones de tracción en CC . . . . .	8
1.4. Dinámica de la tracción eléctrica . . . . .	8
1.4.1. Energía cinética . . . . .	9
1.4.2. Energía potencial . . . . .	9
1.5. Cinemática de los trenes . . . . .	9
1.5.1. Movimiento rectilíneo uniforme no acelerado . . . . .	10
1.5.2. Movimiento rectilíneo uniforme acelerado . . . . .	10
1.6. Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca . . . . .	11
1.6.1. Evaluación socioeconómica . . . . .	11
1.6.2. Inversión . . . . .	11
1.6.3. Trazado ferroviario . . . . .	11
1.6.4. Escenario de demanda de pasajeros . . . . .	12
<b>2. Modelado energético del sistema ferroviario</b>	<b>13</b>
2.1. Descripción del recorrido del tranvía . . . . .	14
2.1.1. Trazado . . . . .	14
2.1.2. Altitudes del trazado . . . . .	14
2.1.3. Paradas . . . . .	14
2.2. Características del tranvía . . . . .	15
2.2.1. Características eléctricas . . . . .	15
2.2.1.1. Frenado regenerativo . . . . .	16
2.2.2. Cargas y masas del material rodante . . . . .	16

## *Índice general*

2.3.	Descripción eléctrica de la alimentación . . . . .	17
2.3.1.	Distribución en corriente alterna a 22 kV . . . . .	17
2.3.2.	Distribución en corriente continua a 750 V . . . . .	17
2.3.2.1.	Características eléctricas y posiciones de las subestaciones . . . . .	18
2.4.	Modelado de las energías mecánicas . . . . .	18
2.4.1.	Estudio de aceleración, velocidad y espacio . . . . .	18
2.4.2.	Modelado de la energía cinética . . . . .	20
2.4.2.1.	Energía cinética en la vía derecha . . . . .	20
2.4.2.2.	Energía cinética en la vía izquierda . . . . .	21
2.4.3.	Modelado de la energía potencial . . . . .	22
2.4.3.1.	Energía potencial en la vía derecha . . . . .	22
2.4.3.2.	Energía potencial en la vía izquierda . . . . .	22
2.5.	Modelado eléctrico . . . . .	23
2.5.1.	Potencias y corrientes en la vía derecha . . . . .	24
2.5.2.	Potencias y corrientes en la vía izquierda . . . . .	25
<b>3.</b>	<b>Implementación del modelo en SIMULINK</b>	<b>27</b>
3.1.	Modelado del sistema ferroviario . . . . .	28
3.1.1.	Modelado de las subestaciones en Simulink . . . . .	28
3.1.2.	Modelado de la LAC, APS y vía de retorno en Simulink . . . . .	28
3.1.3.	Modelado del tranvía en Simulink . . . . .	31
3.1.4.	Modelado del sistema de control de las cargas en Simulink . . . . .	32
3.2.	Determinación de los potenciales puntos de interés . . . . .	33
3.3.	Evaluación de la tensión en los puntos de interés . . . . .	34
3.3.1.	Tramo 1 con consumo de energía . . . . .	35
3.3.2.	Tramo 2 con consumo de energía . . . . .	37
3.3.3.	Tramo 3 con consumo de energía . . . . .	38
3.3.4.	Tramo 4 con consumo de energía . . . . .	39
3.3.5.	Tramo 5 con consumo de energía . . . . .	41
3.3.6.	Tramo 1 con regeneración de energía . . . . .	43
3.3.7.	Tramo 2 con regeneración de energía . . . . .	45
3.3.8.	Tramo 3 con regeneración de energía . . . . .	47
3.3.9.	Tramo 4 con regeneración de energía . . . . .	48
3.3.10.	Tramo 5 con regeneración de energía . . . . .	50
<b>4.</b>	<b>Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones</b>	<b>53</b>
4.1.	Análisis de resultados . . . . .	54
4.1.1.	Consumo de energía . . . . .	54
4.1.2.	Regeneración de energía . . . . .	54
4.2.	Conclusiones . . . . .	56
4.3.	Recomendaciones . . . . .	57
	<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>
	<b>A. Anexos</b>	<b>60</b>
A.1.	Programación para el tramo 1 . . . . .	61
A.2.	Programación para el tramo 2 . . . . .	64
A.3.	Programación para el tramo 3 . . . . .	67

*Índice general*

A.4. Programación para el tramo 4 . . . . .	70
A.5. Programación para el tramo 5 . . . . .	73
A.6. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 1 . . . . .	75
A.7. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 2 . . . . .	76
A.8. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 3 . . . . .	77
A.9. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 4 . . . . .	78
A.10. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 5 . . . . .	79

# Índice de figuras

1.1. Línea aérea de contacto (LAC). . . . .	7
1.2. Trazado de la ruta del Proyecto Tranvía de Cuenca. [1] . . . . .	12
2.1. Conexión de las subestaciones de tracción. . . . .	17
2.2. Energía cinética en la vía derecha. . . . .	21
2.3. Energía cinética de la vía izquierda. . . . .	21
2.4. Energía potencial de la vía derecha. . . . .	22
2.5. Energía potencial de la vía izquierda. . . . .	23
2.6. Diagramas de bloque para la conversión de energía. . . . .	24
2.7. Potencias de la vía derecha. . . . .	24
2.8. Corrientes de la vía derecha. . . . .	25
2.9. Potencias en la vía izquierda. . . . .	25
2.10. Corrientes en la vía izquierda. . . . .	26
3.1. Modelado de la subestación. . . . .	28
3.2. Modelo de la subestación representada en un bloque subsistema de Simulink. . . . .	29
3.3. Modelado de la catenaria y vía de retorno mediante resistores en Simulink. . . . .	30
3.4. Tramos resultantes de la vía férrea derecha e izquierda. . . . .	30
3.5. Tramo único de la catenaria y vía de retorno. . . . .	31
3.6. Modelado del tranvía mediante fuentes de corriente controlada. . . . .	31
3.7. Modelado de las fuentes de corriente en el tramo único del tranvía. . . . .	32
3.8. Bloque MATLAB-Function empleado en el sistema de control del encendido y apagado de las fuentes de corriente. . . . .	32
3.9. Des-concatenado de la señal de control de las fuentes de corriente. . . . .	33
3.10. Trayectoria para el tramo 1 con consumo de energía. . . . .	35
3.11. Corrientes de consumo en el tramo 1. . . . .	35
3.12. Voltajes resultantes en el tramo 1 con consumo. . . . .	36
3.13. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 1 con consumo. . . . .	36
3.14. Comportamiento de las subestaciones 1 y 2 con consumo. . . . .	36
3.15. Trayectoria para el tramo 2 con consumo de energía. . . . .	37
3.16. Corrientes de consumo en el tramo 2. . . . .	37
3.17. Voltajes resultantes en el tramo 2 con consumo. . . . .	38
3.18. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 2 con consumo. . . . .	38
3.19. Comportamiento de las subestaciones 2 y 3 con consumo. . . . .	38
3.20. Trayectoria para el tramo 3 con consumo de energía. . . . .	39
3.21. Corrientes de consumo en el tramo 3. . . . .	39
3.22. Voltajes resultantes en el tramo 3 con consumo. . . . .	39
3.23. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 3 con consumo. . . . .	40
3.24. Comportamiento de las subestaciones 3 y 4 con consumo. . . . .	40
3.25. Trayectoria para el tramo 4 con consumo de energía. . . . .	40

## *Índice de figuras*

3.26. Corrientes de consumo en el tramo 4. . . . .	41
3.27. Voltajes resultantes en el tramo 4 con consumo. . . . .	41
3.28. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 4 con consumo. . . . .	41
3.29. Comportamiento de las subestaciones 4 y 5 con consumo. . . . .	42
3.30. Trayectoria para el tramo 5 con consumo de energía. . . . .	42
3.31. Corrientes de consumo en el tramo 5. . . . .	42
3.32. Voltajes resultantes en el tramo 5 con consumo. . . . .	43
3.33. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 5 con consumo. . . . .	43
3.34. Comportamiento de la subestación 5 con consumo. . . . .	43
3.35. Trayectoria para el tramo 1 con regeneración de energía. . . . .	44
3.36. Corrientes de regeneración para el tramo 1. . . . .	44
3.37. Voltajes resultantes en el tramo 1 con regeneración. . . . .	44
3.38. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 1 con regeneración. . . . .	45
3.39. Comportamiento de las subestaciones 1 y 2 con regeneración. . . . .	45
3.40. Trayectoria para el tramo 2 con regeneración de energía. . . . .	46
3.41. Corrientes de regeneración en el tramo 2. . . . .	46
3.42. Voltajes resultantes en el tramo 2 con regeneración. . . . .	46
3.43. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 2 con regeneración. . . . .	47
3.44. Comportamiento de las subestaciones 2 y 3 con regeneración. . . . .	47
3.45. Trayectoria para el tramo 3 con regeneración de energía. . . . .	47
3.46. Corrientes de regeneración para el tramo 3. . . . .	48
3.47. Voltajes resultantes en el tramo 3 con regeneración. . . . .	48
3.48. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 3 con regeneración. . . . .	48
3.49. Comportamiento de las subestaciones 3 y 4 con regeneración. . . . .	49
3.50. Trayectoria para el tramo 4 con regeneración de energía. . . . .	49
3.51. Corrientes de regeneración en el tramo 4. . . . .	49
3.52. Voltajes resultantes en el tramo 4 con regeneración. . . . .	50
3.53. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 4 con regeneración. . . . .	50
3.54. Comportamiento de las subestaciones 4 y 5 con regeneración. . . . .	50
3.55. Trayectoria para el tramo 5 con regeneración de energía. . . . .	51
3.56. Corrientes de regeneración en el tramo 5. . . . .	51
3.57. Voltajes resultantes en el tramo 5 con regeneración. . . . .	51
3.58. Variación de voltaje en la catenaria del tramo 5 con regeneración. . . . .	52
3.59. Comportamiento de la subestación 5 con regeneración. . . . .	52
A.1. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 1. . . . .	75
A.2. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 2. . . . .	76
A.3. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 3. . . . .	77
A.4. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 4. . . . .	78
A.5. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 5. . . . .	79

# Índice de cuadros

1.1. Precios de la inversión inicial[1] . . . . .	11
2.1. Altitudes máximas y mínimas del recorrido. . . . .	14
2.2. Paradas en la vía derecha e izquierda. [2] . . . . .	15
2.3. Características dimensionales del tranvía Citadis 302. . . . .	16
2.4. Características eléctricas del material rodante. . . . .	16
2.5. Cargas y masas propuestas para el material rodante. . . . .	17
2.6. Potencia de los rectificadores en las subestaciones. . . . .	18
2.7. PK de las subestaciones de tracción . . . . .	18
2.8. Espacios requeridos en la aceleración y frenado. . . . .	19
2.9. Resultados de la energía cinética en la vía derecha. . . . .	21
3.1. PK de inicio y fin de cada tramo de vía férrea. . . . .	30
3.2. Puntos de interés en el consumo de energía para cada tramo de vía férrea. . . . .	34
3.3. Puntos de interés en la regeneración de energía para cada tramo de vía férrea. . . . .	34
4.1. Resultados obtenidos de la variación de voltaje para el caso de consumo de energía. . . . .	54
4.2. Resultados obtenidos de la variación de voltaje para el caso de regeneración de energía. . . . .	55

---

## Problema de estudio

El nuevo transporte público Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca es un sistema de transporte eléctrico que se incorpora a la red de media tensión 22kV de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS) y que formara parte del plan de movilidad de la ciudad de Cuenca siendo este un transporte amigable con el medio ambiente También se analizará el impacto sobre la red de Corriente Continua (CC) en distintos escenarios de cargas.

## Justificación

En este trabajo se realizará la modelación del comportamiento del Sistema de Transporte Tranvía Cuatro Ríos de Cuenca, permitiendo conocer el comportamiento del mismo e investigando de manera exhaustiva los potenciales problemas que podría ocasionar la operación y explotación del Tranvía en su fase inicial o fase de pruebas Dentro de los efectos conocidos que tiene la regeneración y consumo de energía están las fluctuaciones sobre el sistema eléctrico. Estos efectos dependen fuertemente de las combinaciones aleatorias que pueden darse, temporal y espacialmente, entre dos o más tranvías. El Grupo de Investigación de Energías (GIE) cuenta con investigadores que han trabajado previamente con modelados equivalentes y con cuya tutoría se pretende poder interpretar los datos obtenidos en los estudios previos realizados por el contratista del proyecto.

## Grupo Objetivo

El proyecto técnico planteado representará un beneficio a la compañía que operará el Proyecto Tranvía de Cuenca y podrá ser articulado con otras investigaciones que avancen sobre el estudio integral del sistema eléctrico. También el presente trabajo se beneficiará al grupo de investigación GIE ya que esta investigación está en concordancia con las líneas de investigación actuales que el grupo posee, puntualmente las de control de convertidores de potencia y eficiencia energética.

## Objetivos

### General

- Análisis del impacto eléctrico del material rodante tranvía de cuenca en la línea de corriente continúa

### Específicos

- Modelado energético del comportamiento eléctrico del material rodante en diferentes escenarios
- Evaluación del comportamiento de la carga y/o tensión al momento que el tren realice una tracción o frenado

- 
- Análisis del comportamiento que provocaría a la red de corriente continua

## Introducción

En el año 2009 la Municipalidad de Cuenca comenzó a analizar propuestas de construir una nueva red de transporte público que resulte en un beneficio directo para la ciudadanía y que además se complementara con el existente Sistema Integrado de Transporte y que permitiera una adecuada integración en la ciudad por su condición de Patrimonio Cultural de la Humanidad.

Este nuevo sistema de movilidad planteado permitiría además generar ahorros en cuanto a costos y tiempo de viaje, ayudaría a la conservación del centro histórico, generaría un menor impacto ambiental y ayudaría al descongestionamiento vehicular que ocurre en las horas pico.

Para el año 2010, la Municipalidad de Cuenca realizó los estudios de pre factibilidad, los cuales posteriormente sirvieron de insumo para que el Gobierno francés otorgara los fondos no reembolsables para los estudios de factibilidad. Estos estudios concluyeron en la primera línea de tranvía denominada “Cuatro Ríos” que conectará el suroeste con el noreste de la ciudad con una distancia total aproximadamente de 20,4 km considerando las dos vías

Por último, en 2011, la Municipalidad de Cuenca llevó a cabo un proceso de régimen especial para la “Realización de los Estudios Complementarios y de Ingeniería Básica de la Red Primaria de Transporte de la Ciudad de Cuenca: Tranvía de los Cuatro Ríos” cuyo contrato fue otorgado a la Ingeniería ETS (Euskal Trenbide Sarea) en septiembre del mismo año.

La planificación de una red de transporte tanto en la situación actual como en la futura, es un proceso complejo en el que deben tenerse en cuenta las características de la movilidad de la ciudad, sus previsiones de crecimiento, el tráfico vehicular existente, las características operacionales de las líneas, etc. Para ello se considera necesaria la elaboración de un modelo de transporte que permita analizar todos estos parámetros conjuntamente, de forma que las previsiones de demanda actual y futura se ajusten a los datos reales. [1]

# 1. Introducción a los sistemas ferroviarios

## 1.1. Historia de la tracción eléctrica

Los sistemas ferroviarios en sus inicios, usaban la máquina de vapor para provocar el movimiento del ferrocarril. En los inicios; el ferrocarril tuvo buena acogida debido a que satisfacía las necesidades de esos tiempos tanto en el transporte de carga y de pasajeros; sin embargo, con el incremento de la demanda el ferrocarril comenzó a generar problemas para la sociedad. Uno de los principales problemas es la cantidad de humo que el ferrocarril generaba y que afectaba en la salud de las personas debido al uso de carbón en las máquinas de vapor. Además los costos de mantenimiento eran elevados. [3]

Estas dificultades motivaron a buscar nuevas fuentes de energía para el ferrocarril resaltando en el campo de la electricidad. Los primeros modelos usaban baterías como fuente de energía, siendo un sistema poco eficiente; muy por debajo de los ferrocarriles con máquina de vapor y alcanzando una velocidad de 6.4 Km/h. Posteriormente; el primer ferrocarril eléctrico en la historia de la tracción eléctrica fue presentado por la empresa Siemens & Halske en la exposición industrial de Berlín en el año de 1879 el cual realizaba un recorrido de 300 m y se alimentaba por un tercer carril o riel con una velocidad de 40 km/h. Finalmente un cable aéreo proveía de energía a las maquinas eléctricas y el primer ferrocarril eléctrico para uso de transporte de personas fue el tranvía de Berlín en el año de 1881 siendo su recorrido desde la estación de Litcherfelde hasta la estación Escuela Militar. [3, 4, 5]

Un considerable avance del tren eléctrico es el tren bala, el cual circula en varias ciudades del mundo como Japón desde 1964 y alcanza una velocidad de 250 Km/h. [4]

La evolución del tipo de alimentación que han tenido las locomotoras a lo largo de los años se presentan a continuación:

- En 1879; la primera locomotora eléctrica de marca Siemens Halske, con una potencia nominal de 2 kW y con un voltaje nominal de 150 Vcc (Voltaje en corriente continua).
- En 1920; la locomotora mejoro sus características con una potencia de 1000 kW, con un voltaje de 3000 Vcc y una velocidad de hasta 120 Km/h.
- En 1930; las locomotoras de CA (corriente alterna) con una tensión de servicio de 10 kV y motores de tipo conmutador.
- En 1950; las locomotoras CA incorporan un transformador y rectificador de ignitrones conectados a motores de CC (corriente continua) con una tensión nominal de 1500 Vcc.
- En 1960; las locomotoras y metros son controlados con la electrónica de potencia mediante el uso de tiristores.
- En 1970, inicia la utilización de motores de inducción para la tracción de locomotoras, suburbanos y metros.
- En 1980, la electrónica de potencia se empleó para el control y señalización de los sistemas ferroviarios.
- En 1990, la técnica por PWM (Pulse-width modulation - modulación por ancho de pulso) permite mejorar el control de los motores sincrónico en los tranvías.

## 1.2. Motores de tracción

Los motores de tracción son los encargados de proporcionar la tracción necesaria a las ruedas del tranvía para provocar su desplazamiento. Estos motores deben ajustarse a las necesidades de arranque, frenado y niveles de tensión del tranvía, ya sea en corriente continua o en corriente alterna.

### 1.2.1. Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua fueron los primeros motores empleados en los sistemas de tracción ferroviario debido a las características que estos presentaban como es el control de la velocidad por medio de la variación del voltaje; sin embargo, las características constructivas de los mismos obligaron a dejarlos de usar.

El uso de las escobillas para alimentar el bobinado del rotor fue una de las primeras causas para su desuso. Con el uso del motor las escobillas tienden a deteriorarse y desgastarse, lo que generaba suciedad para el motor. El desgaste de las escobillas representaba un mantenimiento continuo del motor tanto para el cambio de las piezas desgastadas como para la limpieza del motor. [6, 7]

Estos motores básicamente constan de dos partes: el rotor y el estator. El rotor cuenta con un bobinado cilíndrico y es también llamado inducido. El estator es la parte estática de la máquina; de igual manera cuenta con un bobinado asentado sobre polos y es también llamado inductor. Generalmente se empleaba motores de CC con excitación en serie debido a las características de este tipo de configuración. [6, 7]

### 1.2.2. Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna de igual manera, convierten la energía eléctrica en energía mecánica de rotación, siendo este motor el más empleado en los sistemas ferroviarios, debido a las ventajas que presenta sobre el motor de corriente continua. Entre las principales ventajas están, que no requiere de escobillas para energizar el rotor, ya que este no requiere ser energizado. Además de la robustez del motor frente a la suciedad y bajo mantenimiento requerido.

En este tipo de motor la frecuencia es la que define la velocidad de giro, donde: la velocidad de giro incrementa conforme incrementa la frecuencia como muestra (1.1); donde es necesario mantener la tensión constante para el correcto funcionamiento del motor. [8]

$$n_s = \frac{60 * f}{p} (1 - s) \tag{1.1}$$

Donde:

$n_s$	es la velocidad sincrona [ $min^{-1}$ ]
$f$	es la frecuencia [ $Hz$ ]
$p$	es el par de polos de la máquina
$s$	es el deslizamiento

El uso de motores con imanes permanentes en tranvías es común, debido a que estos motores permiten devolver parte de la energía consumida a la red principal, actuando como generadores en la etapa de frenado del tranvía. Son motores de tipo sincrónicos que no cuentan con bobinado en el rotor, sino que este es remplazado por imanes permanentes. [7]

### 1.3. Sistemas de electrificación ferroviaria

Los sistemas de electrificación ferroviarios son los encargados de proporcionar la energía necesaria a los tranvías. En la mayoría de los sistemas ferroviarios; la electrificación es en corriente continua, sin embargo este tipo de alimentación tiene la desventaja de operar a bajas tensiones y requerir de altas corrientes debido a que los vehículos de tracción demandan potencias altas. [5]

Existen 2 tipos de alimentación para la tracción eléctrica con las siguientes características:

- Alimentación a corriente continua con niveles de tensiones de 0,6 - 0,75 - 1,5 y 3 kV.
- Alimentación a corriente alterna a frecuencias de 60/50 Hz y tensiones de 25 kV.

#### 1.3.1. Sistemas en corriente alterna

Los sistemas de corriente alterna se usan en su gran mayoría, para los trenes de alta velocidad debido a la elevada potencia que requiere los trenes. Es necesario alimentar la catenaria con la máxima tensión posible con el fin de reducir la corriente demandada por el tranvía.

En las especificaciones técnicas de interoperabilidad para ferrocarriles de alta velocidad se ha adoptado la tensión de 25 kV, en sus configuraciones de 1x25 kV y 2x25 kV. [6, 7, 5]

#### 1.3.2. Sistemas en corriente continua

Para los sistemas de corriente continua es necesario utilizar rectificadores de energía que permitan transformarse de CA a CC. Esta necesidad da paso a las subestaciones de tracción; las cuales se distribuyen a lo largo de la vía férrea y tiene la finalidad de rectificar la energía, además de establecer los voltajes en niveles adecuados para los tranvías. Este tipo de alimentación es utilizado para los sistemas ferroviarios como metros y tranvías, ya que estos sistemas se caracterizan por tener cortas longitudes de recorrido.

Los valores de tensiones empleados en los sistemas de corriente continua como se explicó anteriormente, son significativamente menores a los usados en los sistemas de corriente alterna. [6, 7, 5]

### 1.3.2.1. Línea aérea de contacto (LAC)

La línea aérea de contacto es un sistema de alimentación aéreo como se observa en la figura 1.1, el cual permite transportar la energía eléctrica desde los rectificadores de potencia que se encuentran ubicados en las subestaciones de tracción hasta el material rodante que se encuentra en la vía ferroviaria.



Figura 1.1.: Línea aérea de contacto (LAC).

#### Características Electromecánicas

- Hilo de contacto: BC 150mm<sup>2</sup> según la normativa EN50149.
- Tensión eléctrica nominal: 750 Vcc.
- Tensión mecánica en zona regulada: 1500daN.
- Tensión mecánica máxima en zona no regulada: 1900 daN a -5°C.

#### Características Generales

1. El hilo de contacto se encuentra en paralelo a la vía ferroviaria y entre cada poste LAC se desplaza en forma de zigzag respecto al eje de la vía férrea con la finalidad de que el desgaste del pantógrafo no se produzca en un solo punto.
2. Al existir variaciones de la temperatura, el hilo de contacto se puede dilatar o contraer por lo que es necesario utilizar un mecanismo de tensado, generalmente mediante contrapesos ubicados a distancias de 500 a 1.000 m y que permiten mantener la tensión mecánica del hilo de contacto.
3. La altura del hilo de contacto con respecto al riel está en un rango mínimo de 4,60m y a un máximo de 6,40 m.

### 1.3.2.2. Alimentación por el suelo (APS)

El sistema de alimentación por suelo tiene como objetivo reemplazar la LAC por un sistema de alimentación urbano electrificado por un tercer riel (APS), el cual está integrado a la plataforma de la vía.

El sistema APS no representa un peligro para las personas u objetos que circulen sobre el debido a que, el APS nunca se encuentra energizado en su totalidad. Este

sistema suministra la energía al tranvía por medio de secciones de riel. Las secciones son energizadas siempre y cuando estas se encuentren dentro dentro del área ocupada por el material rodante.

El sistema APS ofrece las mismas características eléctricas de la LAC, además:

- El tren puede arrancar en cualquier punto de la vía.
- Permite operar a una velocidad máxima de 50 km/h.

### 1.3.2.3. Subestaciones de tracción en CC

Las subestaciones de tracción en CC proveen de energía a la LAC o APS y generalmente son diseñadas para sistemas ferroviarios como metros o tranvías. Se caracterizan por encontrarse distribuidas a lo largo del sistema ferroviario; evitando así fuertes caídas de tensión en los cables de LAC y APS.

### Ventajas de las S/E de tracción en CC

1. Los rectificadores de gran potencia son de tipo puente doble dodecafásico por lo tanto permite disminuir la ondulación (armónicas) en el voltaje del lado de continua y también las armónicas de corriente en la alimentación de alterna.
2. La carga al sistema trifásico es equilibrada y de alto factor de potencia.

### Desventajas de las S/E de tracción en CC

1. Los interruptores de conexión hacia la vía deben ser capaces de cortar corrientes de decenas de miles de amperios (A). Sin embargo el soplado del arco mediante aire comprimido y difusores de calor para su desionización, permiten extinguirlo sin dañar los contactos.
2. Los rectificadores de diodos no permiten la recuperación de la energía desde CC a AC. El frenado regenerativo debe consumir la energía cinética de los trenes que están frenando, ya sea alimentando otros trenes o disipando la energía sobrante mediante reóstatos.

## 1.4. Dinámica de la tracción eléctrica

La dinámica de los sistemas ferroviarios al igual que otros sistemas mecánicos de movimiento se estudian mediante la segunda ley de Newton, la cual establece que: “Cuando una fuerza desbalanceada actúa en una partícula, esta se acelera en la dirección de la fuerza con una magnitud que es proporcional a ésta fuerza” y que se representa mediante la siguiente ecuación. [9, 10]

$$F = m * a \tag{1.2}$$

Donde:

- F es la fuerza resultante expresada en newtons [N]  
m es la masa expresada en kilogramos [Kg]

a es la aceleración expresada en metros por segundo al cuadrado [ $m/s^2$ ]  
En el sistema internacional (SI), la unidad de medida es el newton [ $N$ ], la cual indica que es necesario  $1N$  para mover una masa de  $1Kg$  con una aceleración de  $1m/s^2$ , o dicho de otra manera  $1N = kg\ m/s^2$ . [9, 10]

### 1.4.1. Energía cinética

La energía cinética es la capacidad que tiene un cuerpo de ejercer un trabajo. La cantidad de energía cinética de un cuerpo depende de su velocidad y masa; donde: dos cuerpos que se desplazan a igual velocidad pero con diferente masa tienen diferente energía cinética y se emplea mediante la siguiente ecuación.

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2 \tag{1.3}$$

Donde:

$E_c$  es la energía cinética expresada en julios [ $J$ ]

$m$  es la masa del cuerpo expresada en kilogramos [ $kg$ ]

$v$  es la velocidad del cuerpo expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

En el SI la unidad de la energía cinética es el julio (J) y que expresa la relación entre la masa y la velocidad, o dicho de otro manera  $J = kg * m^2/s^2$ .

### 1.4.2. Energía potencial

La energía potencial hace referencia a la energía requerida por un cuerpo para desplazarse de un punto hacia otro en diferente altura. Esta energía relaciona la masa del cuerpo, la gravedad y la diferencia de altura que el cuerpo debe desplazarse, para ello se emplea la siguiente ecuación.

$$Ep = m * g * h \tag{1.4}$$

Donde:

$E_p$  es la energía potencial expresada en julios [ $J$ ]

$m$  es la masa del cuerpo expresada en kilogramos [ $kg$ ]

$g$  es la gravedad de  $9,81\ m/s^2$  [ $m/s^2$ ]

$h$  es la altura expresada en metros [ $m$ ]

## 1.5. Cinemática de los trenes

El movimiento rectilíneo; es una rama de la mecánica que permite determinar la aceleración, velocidad, espacio y tiempo requeridos por un cuerpo para desplazarse de un lugar a otro. Este estudio se caracteriza por realizar ciertas consideraciones a los cuerpos estudiados, como es: considerar que el cuerpo se desplaza en línea

recta, es decir la trayectoria recorrida no presenta curvaturas. Otra consideración que realiza el estudio es considerar a todo cuerpo como una partícula.

En el caso de los tranvías, el concepto de movimiento rectilíneo es completamente aplicable aun cuando la trayectoria plantada presente curvas o giros y esto se debe a las características constructivas de las ruedas del tranvía, las cuales cuentan con una pestaña vertical que encaja con las rieles y permiten compensar la fuerza de tracción en las curvas. [11, 12, 13]

### 1.5.1. Movimiento rectilíneo uniforme no acelerado

El movimiento rectilíneo uniforme no acelerado se caracteriza por considerar una aceleración igual a 0, provocando que la velocidad sea constante y que el espacio recorrido incremente de manera proporcional con el tiempo como muestran (1.5), (1.6) y (1.7) respectivamente. [9]

$$a = 0 \tag{1.5}$$

$$v = \text{constante} \tag{1.6}$$

$$s = v * t + s_o \tag{1.7}$$

Donde:

$a$  es la aceleración expresada en metros por segundo al cuadrado [ $m/s^2$ ]

$v$  es la velocidad expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

$s$  es el espacio expresada en metros [ $m$ ]

$t$  es el tiempo expresada en segundos [ $seg$ ]

$s_o$  es el espacio inicial expresada en metros [ $m$ ]

### 1.5.2. Movimiento rectilíneo uniforme acelerado

El movimiento rectilíneo uniforme acelerado se caracteriza por considerar una aceleración constante; provocando que la velocidad incremente de manera proporcional al tiempo, mientras que el espacio recorrido incremente de manera parabólica como muestran (1.8), (1.9) y (1.10) respectivamente. [9]

$$a = cte \tag{1.8}$$

$$v = a * t + v_o \tag{1.9}$$

$$s = \frac{1}{2} * a * t^2 + s_o \tag{1.10}$$

Donde:

$a$  es la aceleración expresada en metros por segundo al cuadrado [ $m/s^2$ ]

$v$  es la velocidad expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

$s$  es el espacio expresada en metros [ $m$ ]

$t$  es el tiempo expresada en segundos [ $seg$ ]

$v_o$  es la velocidad inicial expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

$s_o$  es el espacio inicial expresada en metros [ $m$ ]

## 1.6. Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca

### 1.6.1. Evaluación socioeconómica

La evaluación socioeconómica consiste en garantizar la generación de beneficios para la sociedad. Es una herramienta que sirve para la selección, evaluación, financiamiento y monitoreo de los proyectos de inversión. Consiste en comparar los beneficios con los costos que dichos proyectos implican para la sociedad y determinar el efecto que el proyecto tendrá sobre el bienestar de la sociedad.[1]

La metodología de análisis empleada ha consistido en proyectar los beneficios y costos del proyecto para un horizonte de 33 años (3 de construcción y 30 de operación) y posteriormente reducir dichos beneficios y costos a una tasa de descuento. [1]

### 1.6.2. Inversión

La inversión inicial del proyecto, a valores de mercado, asciende a un total de \$ 232 millones sin considerar IVA, y su desglose se presenta en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1:** Precios de la inversión inicial[1]

Item	Descripción	P.Total
1	Estructuras	3,67
2	Desviación y protección de redes	9,76
3	Obra civil tranviaria	8,63
4	Infraestructura y vía	30,13
5	Urbanización	11,64
6	Paradas	2,56
7	Sistemas de señalización	9,74
8	Sis. de operación y administración	9,75
9	Patios y talleres	24,44
10	Integración ambiental	0,395
11	Electrificación	33,60
12	Otras inversiones	23,10
13	Material móvil	64,40
	<b>Sub total</b>	<b>231,81</b>

### 1.6.3. Trazado ferroviario

El trazado tiene una longitud aproximada de 10,2 km por vía, de los cuales: 4 km son a través del centro histórico de la ciudad. La primera parte del recorrido se encuentra en la avenida de las Américas con una longitud de 3,5 km; en este tramo se localizan 7 paradas y la zona de patio y talleres ubicado a un lado del trazado. El segundo tramo corresponde al centro histórico de la ciudad de Cuenca en el cual el sentido de circulación oeste-este se da a través de la avenida Gran Colombia, con una longitud de 3,8 km y 7 paradas. El sentido este-oeste es a través de las calles Mariscal Lamar y Gaspar Sangurima con 3,8 km de longitud y 8 paradas. La tramo

final corresponde a la avenida España, el cual tiene una longitud de 2,9 km y 5 paradas.

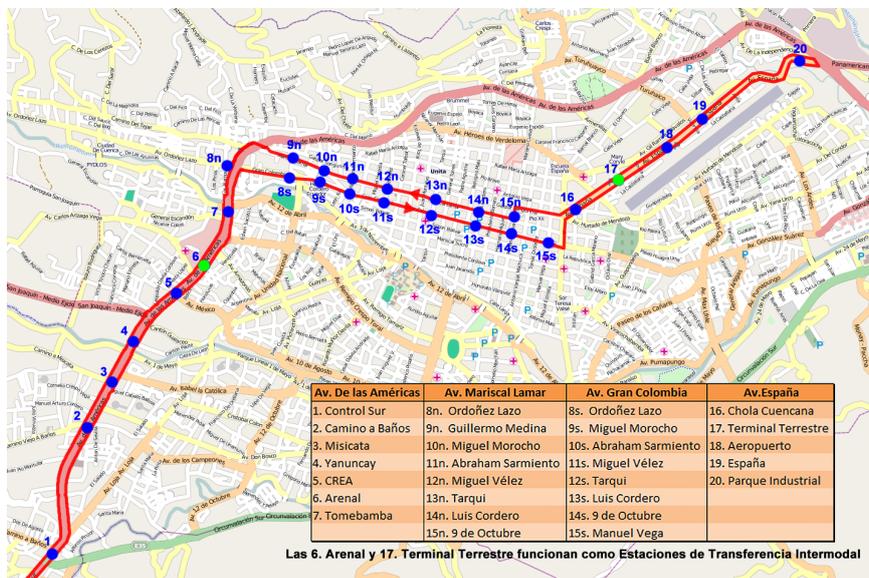


Figura 1.2.: Trazado de la ruta del Proyecto Tranvía de Cuenca. [1]

#### 1.6.4. Escenario de demanda de pasajeros

Los datos de demanda de pasajeros para los escenarios futuros se estima en un número de pasajeros diarios superiores a los 200.000 pasajeros. Esta cantidad dependería mucho del factor económico, específicamente del precio que tendrá el boleto cuando el proyecto se encuentre en operación. [1]

En función de la tarifa final que se implante y de los crecimientos finales de pasajeros, la demanda diaria se situará entre los 110.000 y 130.000 pasajeros en el año de la puesta en funcionamiento y entre los 160.000 y los 212.000 pasajeros diarios en un largo o corto plazo. En el año de la puesta en servicio la demanda en hora punta podría situarse en torno a los 11.000 pasajeros hora; en el futuro, estos valores pueden llegar hasta los 21.000 pasajeros hora. [1]

## 2. Modelado energético del sistema ferroviario

## 2.1. Descripción del recorrido del tranvía

El proyecto Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca considera un sistema ferroviario que atraviesa la ciudad de Cuenca desde el sector del Parque industrial al norte de la ciudad hasta el sector del control sur en el sur de la ciudad.

La descripción geográfica del trazado permite conocer los parámetros relevantes que tiene el recorrido del tranvía tales como: altitudes del trazado, pendientes máximas y mínimas, distancias entre paradas y el número de paradas planteadas para el tranvía.

### 2.1.1. Trazado

El proyecto cuenta con una longitud de 10,2 km por cada vía y de 20,4 km aproximadamente en su recorrido total. El trazado del recorrido se encuentra dividido en 3 tramos: [2, 14]

1. El primer tramo del recorrido se localiza en la avenida de las Américas con una longitud de 3,5 km aproximadamente.
2. El segundo tramo corresponde al centro histórico de la ciudad, por lo tanto el sentido de circulación es de oeste-este y se da a través de la avenida Gran Colombia con una longitud de 3,8 km aproximadamente, mientras que el sentido este-oeste es a través de las calles Mariscal Lamar y Gaspar Sangurima con una longitud de 3,8 km aproximadamente.
3. La parte final del trazado corresponde a la avenida España, presentando una longitud de 2,9 km aproximadamente.

El trazado de la vía férrea, además considera la construcción de un tramo único, el cual se encuentra propuesto para los primeros metros de vía, desde el PK 0 hasta el PK 630 para posteriormente dividirse en dos vías: vía derecha y vía izquierda. [14]

### 2.1.2. Altitudes del trazado

Las altitudes que tiene el recorrido del tranvía describen la distancia vertical de un punto con respecto al nivel del mar. Se debe tener en cuenta que la altitud de la ciudad de Cuenca es de aproximadamente 2550 msnm. [2, 15]

En la tabla 2.1 se detallan las altitudes máximas y mínimas que tiene el recorrido del tranvía y la diferencia de altitud en la que el material rodante se estará movilizand.

**Tabla 2.1:** Altitudes máximas y mínimas del recorrido.

Altitud Máxima	Altitud Mínima	Diferencia de Altitud
2585,54	2489,63	95,91

Como se puede observar en la tabla 2.1, el material rodante se movilizará en un rango de 95.91 m entre la altitud máxima y mínima del recorrido.

### 2.1.3. Paradas

El recorrido del tranvía cuenta con un total de 27 paradas en todo su trayecto: 7 paradas se encuentran localizadas en el tramo de la avenida de las Américas; 8

paradas en el tramo de la calle Mariscal Lamar; 7 paradas en la calle Gran Colombia; y 5 paradas en el tramo de la Avenida España. Por otra parte la distancia entre paradas oscila entre los 400 y 600 metros. En la tabla 2.2 se presentan las paradas para cada vía férrea junto con sus puntos kilométricos (PK). [15, 2]

**Tabla 2.2:** Paradas en la vía derecha e izquierda. [2]

Vía Derecha	PK[m]	Vía Izquierda	PK[m]
Río Tarqui	163	Parque Industrial	10113
El Salado	770	Milchichig	9000
Misicata	1271	Aeropuerto	8379
Río Yanuncay	1858	Terminal Terrestre	7746
Avenida México	2300	Chola Cuencana	7294
Feria Libre	2970	Sangurima	6818
Río Tomebamba	3388	Antonio Borrero	6415
Gran Colombia	3973	Padre Aguirre	6062
Unidad Nacional	4366	Mercado 3 de Noviembre	5605
Corazón de Jesús	4839	Convención del 45	5013
Coronel Talbot	5404	Sector la Cuadra	4701
Santo Domingo	5893	Parque Molinero	4259
Luis Cordero	6303	Calle del Arrayán	3743
Tomás Ordóñez	6895	Río Tomebamba	3389
Chola Cuencana	7288	Feria Libre	2975
Terminal Terrestre	7740	Avenida México	2307
Aeropuerto	8374	Río Yanuncay	1862
Milchichig	8996	Misicata	1276
Parque Industrial	10107	El Salado	774
		Río Tarqui	163

## 2.2. Características del tranvía

El tranvía de Cuenca es el modelo Citadis 302 fabricado por la compañía ALSTOM. Este tipo de tranvía se caracteriza por tener 5 módulos, 2 módulos motorizados con cabina en los extremos de tipo ARPEGE 350 M 1600, 2 módulos suspendidos con dos puertas dobles por lado y un módulo central de tipo ARPEGE 350P 1600 sobre el cual se encuentra instalado el sistema APS, además estos vehículos son caracterizados por su bidireccionalidad con la finalidad de que el operador conduzca en cualquier extremo del tranvía. [16, 14]

Las características de dimensionamiento del material rodante se presentan en la tabla 2.3.

### 2.2.1. Características eléctricas

Las principales características eléctricas del tranvía de Cuenca se presentan en la tabla 2.4. [16, 17]

**Tabla 2.3:** Características dimensionales del tranvía Citadis 302.

Características	Dimensiones
Ancho exterior	2,4 m
Longitud total	32,5 m
Altura total	3,28 m
Altura del suelo	0,360
Masa del bogie motor	3,350 kg
Masa del bogie portador	2,500 kg
Masa del tranvía sin carga	41939 kg
Diámetro de las ruedas del bogie motor nuevas	0,610 m
Diámetro de las ruedas del bogie motor gastadas	0,530 m

**Tabla 2.4:** Características eléctricas del material rodante.

Característica	Descripción
Nivel de Alimentación	750 Vcc
Tipos de Alimentación	Sistema LAC y APS
Sistema de Tracción	Motores Trifásicos Asíncronos
Potencia del Motor	120kW

El tranvía Citadis 302 cuenta con cuatro motores de tracción, dos por cada modulo y cada motor impulsa un par de ruedas. Los sistemas de alimentación LAC y APS se encuentran montados sobre el modulo central del tranvía, en donde: El sistema de captación LAC se encuentra sobre el techo del tranvía, mientras que el sistema APS se encuentra en la parte inferior del tranvía.

### 2.2.1.1. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es una característica de los sistemas ferroviarios como es el metro y tranvia, la cual permite recuperar parte de la energía consumida. Este sistema transforma la energía mecánica del tranvía en movimiento en energía eléctrica. Esta transformación de energía se produce en la etapa de frenado; donde los motores del tranvía dejan de funcionar como motores y empiezan a funcionar como generadores; invirtiendo el flujo eléctrico del sistema ferroviario. La energía regenerada puede ser consumida por otros tranvías del sistema ferroviaria ó almacenada en bancos de batería; sin embargo, en cualquier caso, el freno regenerativo no permite detener completamente al tranvía por lo que es necesario emplear frenos de fricción.

### 2.2.2. Cargas y masas del material rodante

Las cargas y masas que se utilizan para el modelado del tranvía, es el resultado de la suma de los pesos en los ejes de los bogies. Estos pesos se pueden clasificar en 3 estados de carga: vehículo sin carga, vehículo con carga nominal y vehículo con carga máxima, como muestra la tabla 2.5. Los pesos son calculados con respecto a la demanda de pasajeros en la fase de operación del tranvía y a su vez la masa promedio que se estima de un pasajero es de aproximadamente 70 kg. [16, 17]

**Tabla 2.5:** Cargas y masas propuestas para el material rodante.

Estado	Pasajeros	Masa [Kg]
Vehículo sin Carga	Solo Conductor	41939
Vehículo con carga normal	$4p/m^2$	56454
Vehículo con carga máxima	$6p/m^2$	61892

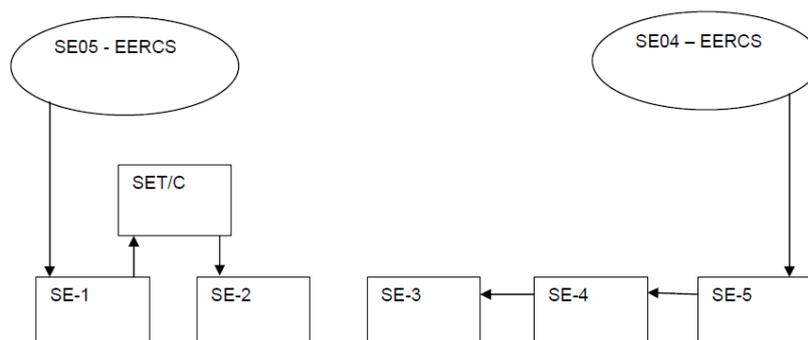
## 2.3. Descripción eléctrica de la alimentación

### 2.3.1. Distribución en corriente alterna a 22 kV

El sistema eléctrico será alimentado por la Empresa Eléctrica Regional Centrosur (EERCS), por dos alimentadores principales y exclusivos para el tranvía que se conectan con un circuito trifásico de 22kV a las subestaciones SE-1 y SE-5 como se indica en la figura 2.1.

En situación normal de funcionamiento, la configuración del sistema es:

- La SE 05 de la EERCS alimenta a las subestaciones: SE-1, SE P/T 1 SE-2 del sistema ferroviario.
- La SE 04 de la EERCS alimenta a las subestaciones: SE-3, SE-4, SE-5 del sistema ferroviario.



**Figura 2.1.:** Conexión de las subestaciones de tracción.

### 2.3.2. Distribución en corriente continua a 750 V

El sistema de tracción estará alimentado por 2 tipos de sistemas: Línea Aérea de Contacto (LAC) y la Alimentación Por Suelo (APS) y la energía es proporcionada por 5 subestaciones de tracción ubicadas a lo largo del recorrido.

El nivel de tensión de servicio es de 750 Vcc donde para la vía derecha, el sistema de tracción se divide en: LAC desde la parada Río Tarqui hasta la parada Corazón de Jesús; APS desde la parada Corazón de Jesús hasta la parada Tomás Ordóñez y nuevamente LAC desde la parada Tomás Ordóñez hasta la parada Parque Industrial. Para la vía izquierda el sistema de tracción se divide en: LAC desde la parada Río Tarqui hasta la parada Sector la Cuadra; APS desde la parada Sector la Cuadra hasta la Parada Sangurima y nuevamente LAC desde la parada Sangurima hasta la parada Parque Industrial. [18]

### 2.3.2.1. Características eléctricas y posiciones de las subestaciones

Cada subestación de tracción cuenta con un rectificador de 12 pulsos de 900 kW como se indica en la tabla 2.6.

**Tabla 2.6:** Potencia de los rectificadores en las subestaciones.

Subestaciones	Grupo Rectificadores
Patio y Talleres	900 kW
SE-1, SE-2, SE-3, SE-4, SE-5	900kW

Cada rectificador es alimentado por un transformador con una potencia nominal de 1000 kVA y construido en base a la norma IEC 146-1 que admiten las siguientes características de sobrecargas:

- 100 % de la potencia nominal de manera permanente.
- 150 % de la potencia nominal durante 2 horas
- 300 % de la potencia nominal durante 1 minuto

Por otra, parte las subestaciones están construidas de tipo convencional: 3 de tipo interior y 2 de tipo subterráneas como se presenta en la tabla 2.7

**Tabla 2.7:** PK de las subestaciones de tracción

Subestación	Tipo	PK [m]
SE - 1	Interior	0135
SE - 2	Interior	2710
SE - 3	Subterránea	5100
SE - 4	Subterránea	7370
SE - 5	Interior	9680

## 2.4. Modelado de las energías mecánicas

El estudio dinámico permite determinar las cantidades de energías requeridas para provocar el desplazamiento del tranvía, siendo estas la energía cinética y la energía potencial; las cuales permitirán determinar la potencia y corriente eléctrica requeridas por el sistema.

### 2.4.1. Estudio de aceleración, velocidad y espacio

El estudio inicia con la determinación de las aceleraciones, velocidades y espacios involucrados dentro del funcionamiento del tranvía, teniendo presente las restricciones que este tiene como es una aceleración de 0,7 m/s y una velocidad máxima de 50 km/h en ciertos tramos y de 30 km/h para otros tramos.

Para el estudio se consideraron tramos comprendidos entre dos paradas; donde, primero se determina el tiempo de aceleración requerido para pasar de 0 a 50km/h ó 30 km/h dependiendo del tramo estudiado se emplea la siguiente ecuación.

$$t = \frac{v - v_0}{a} \quad (2.1)$$

Donde:

- $t$  es el tiempo expresada en segundos [*seg*]
- $v$  es la velocidad expresada en metros por segundo [*m/s*]
- $a$  es la aceleración expresada en metros por segundo al cuadrado [*m/s<sup>2</sup>*]
- $v_0$  es la velocidad inicial expresada en metros por segundo [*m/s*]

Empleando (2.1) se determina el tiempo de aceleración y de frenado, considerando que, en el caso de aceleración  $V_0$  es igual a 0, mientras que en el caso de frenado,  $V_0$  es igual a la velocidad del tranvía, pudiendo ser 30 Km/h ó 50 Km/h.

Una vez determinado el tiempo involucrado para alcanzar la velocidad final, el cálculo de la distancia recorrida será mediante la siguiente ecuación.

$$s = \frac{1}{2} * a * t^2 + s_0 \quad (2.2)$$

Donde:

- $s$  es el espacio expresada en metros [*m*]
- $s_0$  es el espacio inicial expresada en metros [*m*]
- $t$  es el tiempo expresada en segundos [*seg*]

De igual manera, empleando (2.2) se calcula el espacio requerido en la aceleración como en el frenado; sin embargo, para ambos casos es espacio  $s_0$  se considera igual a 0.

Al aplicar cada una de estas ecuaciones de acuerdo con aceleración y frenado se obtiene la tabla 2.8 donde; se presentan las velocidades y los espacios requeridos para el arranque o frenado en condiciones de carga ligera, carga nominal y carga máxima.

**Tabla 2.8:** Espacios requeridos en la aceleración y frenado.

Aceleración	Velocidad [km/h]	Espacio[m]
arranque	50	137,79
frenado	50	220,93
arranque	30	49,60
frenado	30	79,54

Con los valores de tiempo y espacio, tanto de aceleración como de frenado, se debe determinar el espacio y tiempo no acelerado, es decir, el espacio y tiempo en el que el tranvía debe mantener la velocidad constante. Para ello primero se debe restar el espacio total del tramo analizado con los espacios empleados en la aceleración y frenado, como muestra la siguiente ecuación.

$$s_{noacelerado} = s_{total} - s_{aceleración} - s_{frenado} \quad (2.3)$$

Donde:

$s_{noacelerado}$  es el espacio no acelerado expresado en metros [ $m$ ]

$s_{total}$  es el espacio total del tramo analizado expresado en metros [ $m$ ]

$s_{aceleración}$  es el espacio requerido en la aceleración expresado en metros [ $m$ ]

$s_{frenado}$  es el espacio requerido en el frenado expresado en metros [ $m$ ]

Para estimar el tiempo de velocidad constante se debe emplear la siguiente ecuación.

$$t = \frac{s}{v} \quad (2.4)$$

Donde:

$s$  es el espacio expresada en metros [ $m$ ]

$v$  es la velocidad expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

Este análisis se debe realizar tanto para la vía derecha como para la vía izquierda. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que en el análisis en la vía derecha, el recorrido del tranvía va desde un PK menor a uno mayor, mientras que en el caso de la vía izquierda sucede lo contrario y por ende esta vía debe de ser analizada desde un PK mayor a uno menor.

### 2.4.2. Modelado de la energía cinética

El modelado de la energía cinética del tranvía se realiza en base al recorrido geográfico que tendrá el mismo cuando se encuentre en operación, para ello, por cada PK del recorrido con un muestreo de aproximadamente 20 m entre cada PK se analiza la energía cinética requerida en dicho punto.

En este caso, de igual manera es necesario calcular la energía cinética requerida por el tranvía con los tres tipos de carga propuesta, carga ligera, carga media y carga máxima y mediante (2.5) se determina la energía cinética requerida.

$$Ec = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2.5)$$

Donde:

$Ec$  es la energía cinética expresada en julios [ $J$ ]

$m$  masa del cuerpo expresada en kilogramos [ $kg$ ]

$v$  es la velocidad expresada en metros por segundo [ $m/s$ ]

#### 2.4.2.1. Energía cinética en la vía derecha

La energía cinética en la vía derecha se muestra en la figura 2.2, donde se observa que la mayor energía requerida para generar movimiento de parada a parada en un total de 18 paradas es para el tranvía con carga máxima requiriendo una energía cinética de 5,9695 MJ. Además entre el PK 4839 y el PK 7288 se encuentran ubicadas 5 paradas en las que se necesita la menor cantidad de energía con respecto al resto de paradas.

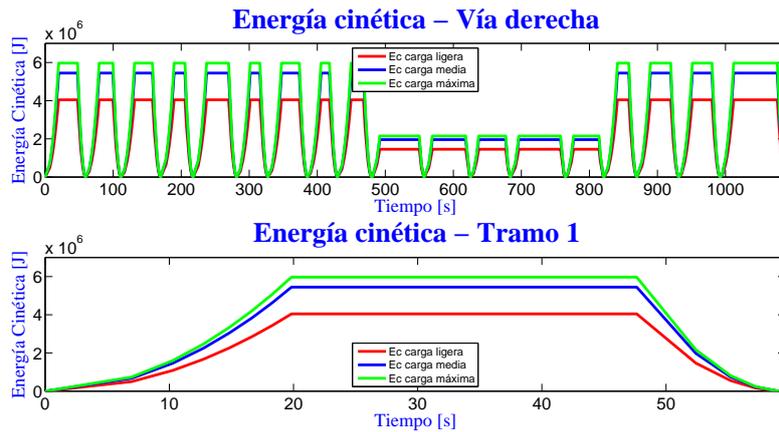


Figura 2.2.: Energía cinética en la vía derecha.

En la tabla 2.9 se detalla las energías requeridas para cada estado de carga.

Tabla 2.9: Resultados de la energía cinética en la vía derecha.

Estado de Carga	E. cinética max [MJ]	E. cinética min [MJ]
Vehículo sin Carga	4,0452	1,4562
Vehículo con carga normal	5,4450	1,9602
Vehículo con carga máxima	5,9695	2,1490

### 2.4.2.2. Energía cinética en la vía izquierda

La energía cinética correspondiente a la vía izquierda se muestra en la figura 2.3 donde se observa que la mayor cantidad de energía requerida para generar movimiento de parada a parada en un total de 19 paradas es para el vehículo con carga máxima con una energía cinética de 5,9695 MJ , además se muestra que entre el PK 4260 y el PK 6820 se encuentran ubicadas 6 paradas en las que se requieren menor cantidad de energía con respecto al resto de paradas.

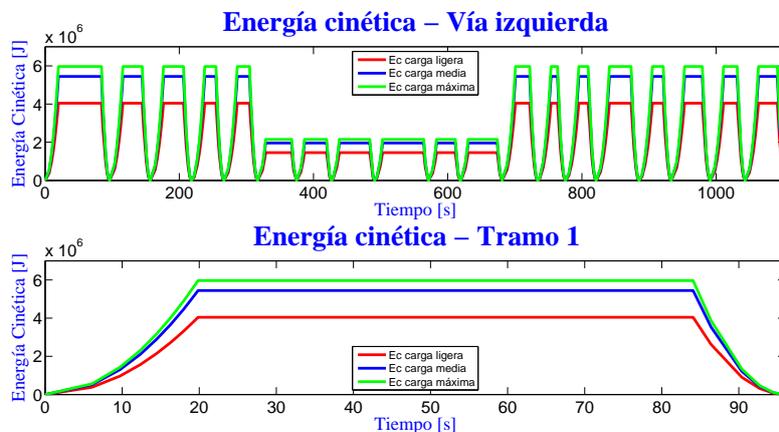


Figura 2.3.: Energía cinética de la vía izquierda.

### 2.4.3. Modelado de la energía potencial

El modelado de la energía potencial de igual manera se realiza en base al recorrido geográfico que tendrá el tranvía cuando este se encuentre en operación. Para este caso, además de requerir los PK de la trayectoria, es necesario adjuntar la altitud a cada PK. En este caso de igual manera se debe calcular la energía potencial, para los tres tipos de masas propuestas, considerando una gravedad de  $9,8m/s^2$  y empleando (2.6) se determina la energía potencial requerida en cada PK.

$$Ep = m * g * h \quad (2.6)$$

Donde:

- $Ep$  es la energía potencial del cuerpo expresada en julios [ $J$ ]  
 $m$  es la masa del cuerpo expresada en kilogramos [ $kg$ ]  
 $g$  es la gravedad [ $m/s^2$ ]  
 $h$  es la altitud en el punto expresada en metros [ $m$ ]

#### 2.4.3.1. Energía potencial en la vía derecha

La energía potencial en la vía derecha se muestra en la figura 2.4, donde la energía potencial máxima requerida es de 57,6140 MJ en el PK 1200; además se puede notar que conforme el tranvía se desplaza por la trayectoria planteada, la energía potencial requerida es menor.

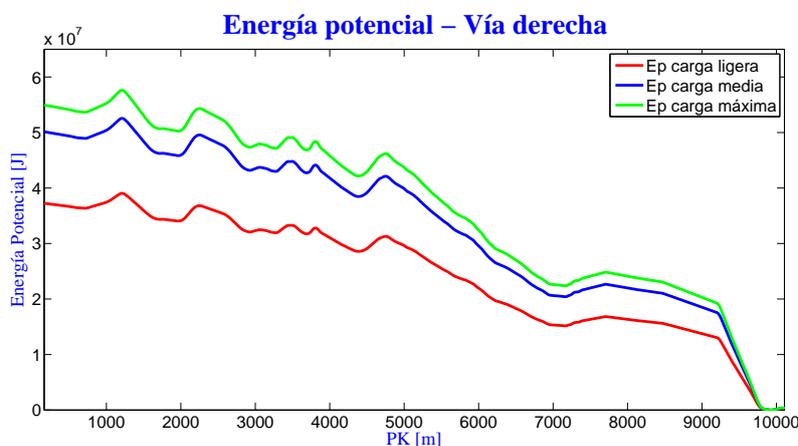


Figura 2.4.: Energía potencial de la vía derecha.

#### 2.4.3.2. Energía potencial en la vía izquierda

La energía potencial de la vía izquierda se muestra en la figura 2.5 donde se observa que la energía potencial máxima es de 57,5473 MJ en el PK 1220, además a medida que incrementa el PK de análisis, la energía potencial en cada punto es menor, similar al efecto en la vía derecha, sin embargo en este caso el recorrido del tranvía es en sentido inverso, de un PK mayor a un PK menor.

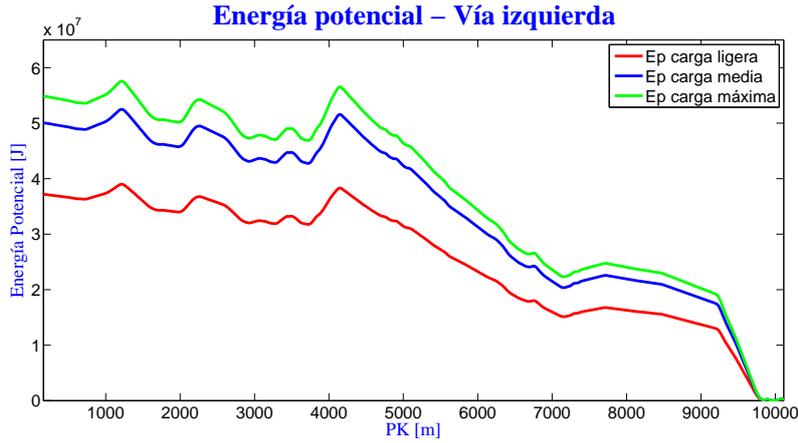


Figura 2.5.: Energía potencial de la vía izquierda.

## 2.5. Modelado eléctrico

El modelado eléctrico consiste en determinar el consumo eléctrico que tendrá el tranvía cuando se encuentre en operación, para ello se requiere de las energías cinéticas y potenciales determinadas en cada PK de la vía férrea. Se requiere además de la eficiencia de cada equipo que interviene en el proceso de conversión entre energías eléctrica y mecánica los cuales son: cajas reductoras, motores de tracción e inversores.

En primera instancia es necesario determinar la energía total de cada PK mediante (2.7) y para obtener la energía total en potencia se emplea (2.8).

$$E_T = E_c + E_p \quad (2.7)$$

$$P_T = \frac{E_t - E_{t-1}}{t_t - t_{t-1}} \quad (2.8)$$

Donde:

- $E_T$  es la energía total en cada PK [J]
- $P_T$  es la potencia mecánica requerida en cada PK [W]
- $E_t$  es la energía en el PK analizado [J]
- $E_{t-1}$  es la energía en el PK anterior al analizado [J]
- $t_t$  es el tiempo en el PK analizado [seg]
- $t_{t-1}$  es el tiempo en el PK anterior al analizado [seg]

Con la potencia mecánica en cada PK se debe determinar la potencia eléctrica en el mismo punto, para ello se emplea la siguiente ecuación.

$$P_{in} = P_{out} * (1 + (1 - \eta)) \quad (2.9)$$

Donde:

- $P_{in}$  es la potencial de ingreso [W]

$P_{out}$  es la potencia de salida [W]  
 $\eta$  es la eficiencia de cada elemento

La ecuación (2.9) debe ser empleada en todos los elementos que intervienen en la conversión de energía; considerando en primera instancia la  $P_{out}$  es igual a la potencia mecánica en las ruedas en dicho punto, mientras que para el resto de elementos la  $P_{out}$  del elemento analizado es igual a la  $P_{in}$  del elemento anterior como muestra la figura 2.6.

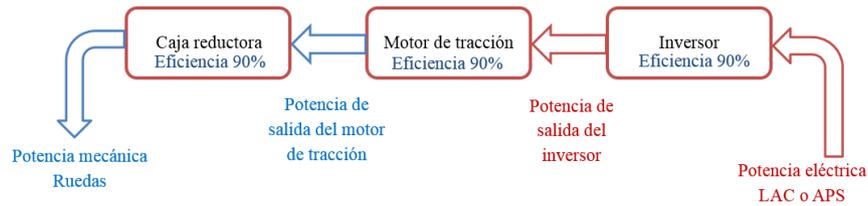


Figura 2.6.: Diagramas de bloques para la conversión de energía.

Finalmente se debe determinar la corriente requerida por el tranvía en dicho PK y para ello se emplea (2.10) donde se considera una tensión nominal de 750 voltios de la línea aérea de contacto o del sistema APS

$$I = \frac{P}{V} \tag{2.10}$$

Donde:

- $I$  es la corriente en el PK analizado [A].
- $P$  es la potencia total determinada en el mismo PK [W].
- $V$  es el voltaje nominal de alimentación al tranvía de 750 V.

### 2.5.1. Potencias y corrientes en la vía derecha

La variación de la potencia eléctrica de la vía derecha se muestra en la figura 2.7 donde se puede observar que existen varios picos de demanda donde se necesitará mayor potencia para ejercer el movimiento de los trenes en el recorrido

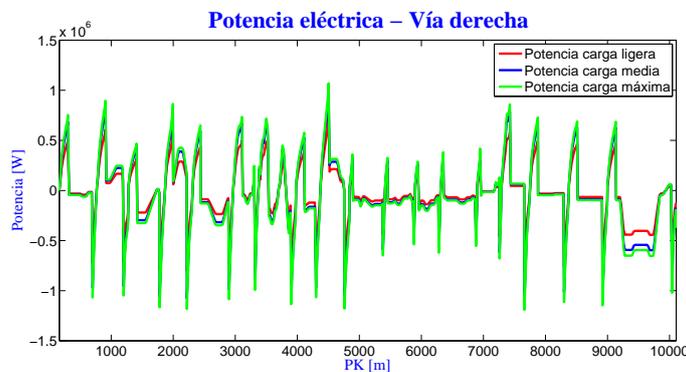
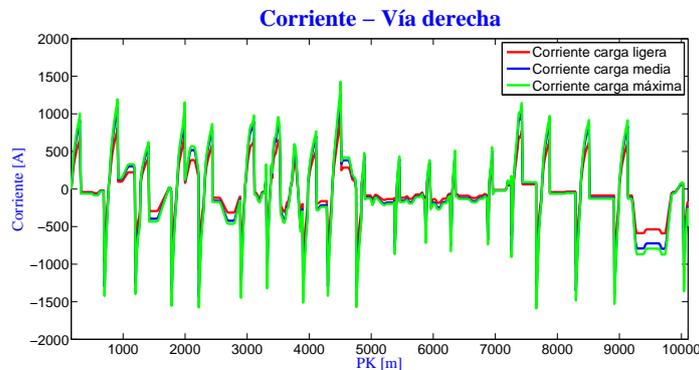


Figura 2.7.: Potencias de la vía derecha.

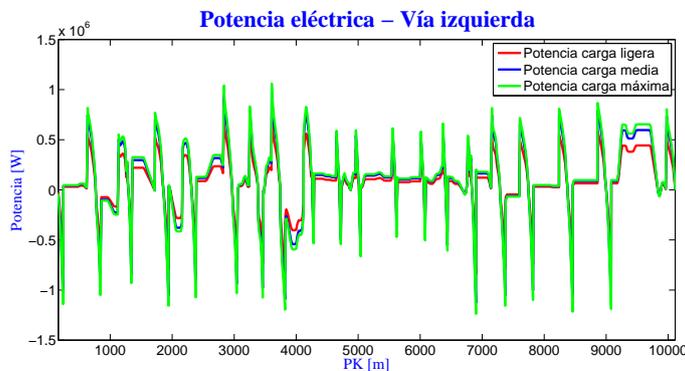
En la figura 2.8 se presentan las corrientes que requiere el tranvía para el recorrido de la vía derecha; además se observa que existen corrientes mayores a 1000 A para el caso de consumo de energía y corrientes superiores a  $-1800$  A para el caso de regeneración de energía donde el tranvía tiene la capacidad de devolver energía hacia la catenaria.



**Figura 2.8.:** Corrientes de la vía derecha.

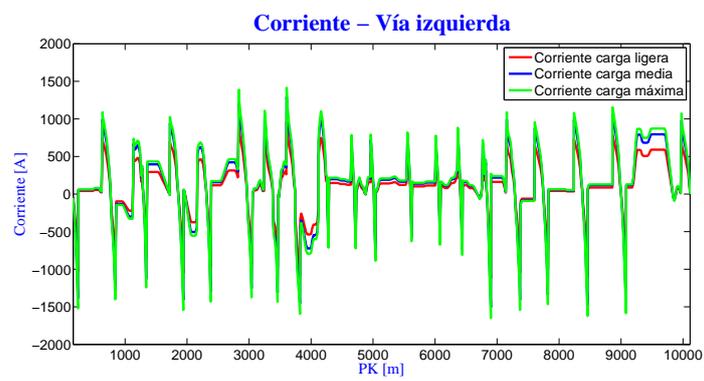
### 2.5.2. Potencias y corrientes en la vía izquierda

La variación de la potencia para la vía izquierda se muestra en la figura 2.9 donde de igual manera existen picos de potencia donde se requiere de mayores potencias para ejercer el movimiento de los trenes y por ende se requerirá de mayores corrientes.



**Figura 2.9.:** Potencias en la vía izquierda.

En la figura 2.10 se presenta la variación de corriente para la vía izquierda. En este caso, de igual manera, la corriente de consumo al realizar la tracción supera los 1000A y  $-1800$  A para el caso de regeneración de energía.



**Figura 2.10.:** Corrientes en la vía izquierda.

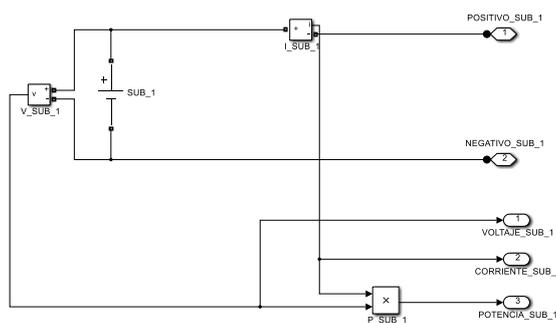
### 3. Implementación del modelo en SIMULINK

### 3.1. Modelado del sistema ferroviario

El modelado del sistema ferroviario en Simulink es parte vital del estudio energético del tranvía, debido a que el modelo permite determinar el comportamiento del voltaje en la catenaria cuando sobre el sistema férreo operen los tranvías. El modelado en Simulink debe contener las diferentes partes que conforman el sistema ferroviario, como son las subestaciones de tracción, los sistemas de alimentación y los tranvías. Además en el modelo se desarrollo un esquema de control para el encendido y apagado de las fuentes de corriente que representan al tranvía.

#### 3.1.1. Modelado de las subestaciones en Simulink

El modelado de las subestaciones en Simulink pretende emular el comportamiento de los sistemas encargados de proveer de energía al sistema ferroviario. Para ello, considerando que el tranvía requiere de corriente continua para su operación, se emplea una fuente de voltaje de corriente continua con una tensión nominal de 750 V como se puede apreciar en la figura 3.1.



**Figura 3.1.:** Modelado de la subestación.

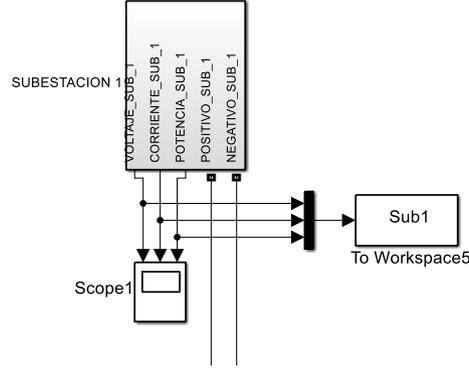
Como se puede apreciar en la figura 3.1, al modelo de la subestación se le agregan elementos de medición como un voltímetro y un amperímetro. Estos elementos permiten medir el voltaje y corriente de la subestación respectivamente permitiendo posteriormente calcular la potencia entregada por ésta.

De manera similar se modelan las 5 subestaciones del sistema, las cuales se representan mediante un bloque de subsistema (sub-system) de Simulink, como se muestra en la figura 3.2.

#### 3.1.2. Modelado de la LAC, APS y vía de retorno en Simulink

El modelado de la LAC, APS y vía de retorno en Simulink se realiza mediante resistores conectados en serie, los cuales representan la resistencia óhmica que tiene el conductor y el hierro empleado en el sistema de alimentación.

Para el modelado se considera el trazado de la vía férrea, el cual proporciona las distancias entre PK. Generalmente la distancia entre PK es de 20 metros; sin embargo, existen ciertas distancias menores debido a PK intermedios. Estos PK representan



**Figura 3.2.:** Modelo de la subestación representada en un bloque subsistema de Simulink.

la ubicación de las paradas, el inicio de la etapa de frenado o el final de la etapa de aceleración del tranvía.

Para estimar el valor de la resistencia equivalente del conductor entre PK se emplea 3.1 para el conductor de APS y LAC y 3.2 para la vía de retorno.

$$R_{idax} = R_{conductor} * S_{PKaPK} \quad (3.1)$$

$$R_{retornox} = R_{hierro} * S_{PKaPK} \quad (3.2)$$

Donde:

$R_{enviox}$  es el valor de la resistencia para LAC y APS [ $\Omega$ ]

$R_{retornox}$  es el valor de la resistencia para la vía de retorno [ $\Omega$ ]

$R_{conductor}$  es la resistencia por unidad de longitud del conductor de LAC ó APS [ $\Omega/m$ ]

$R_{hierro}$  es la resistencia por unidad de longitud del conductor de LAC ó APS [ $\Omega/m$ ]

$S_{PKaPK}$  es la distancia entre PK [ $m$ ]

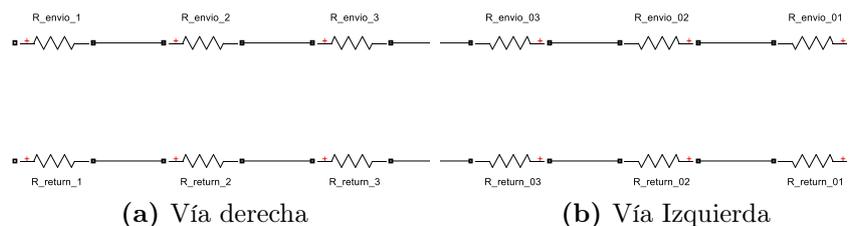
Con los valores calculados para los resistores de LAC, APS y vía de retorno, tanto para la vía derecha como para la vía izquierda, se debe colocar en el modelo la cantidad necesaria de resistores.

En la figura 3.3, se muestra la forma de conexión de los resistores, donde, los resistores nombrados como  $R_{envio}$  representan la LAC o APS, mientras que los resistores nombrados como  $R_{retorno}$  representan la vía de retorno. Cada resistor debe ser cargado con el valor de resistencia correspondiente al tramo que representa. Este modelado se realiza para mantener la similitud con el modelo real.

Considerando que las subestaciones están distribuidas en todo el sistema ferroviario y que estas representan un nodo firme de tensión, la vía férrea es dividida en tramos. Cada tramo esta comprendido entre dos subestaciones contiguas.

El resultado es un total de 5 tramos de vía férrea que representan a la vía derecha y a la vía izquierda, que se pueden apreciar en la figura 3.4 y cuyos PK de inicio y fin se presentan en la tabla 3.1.

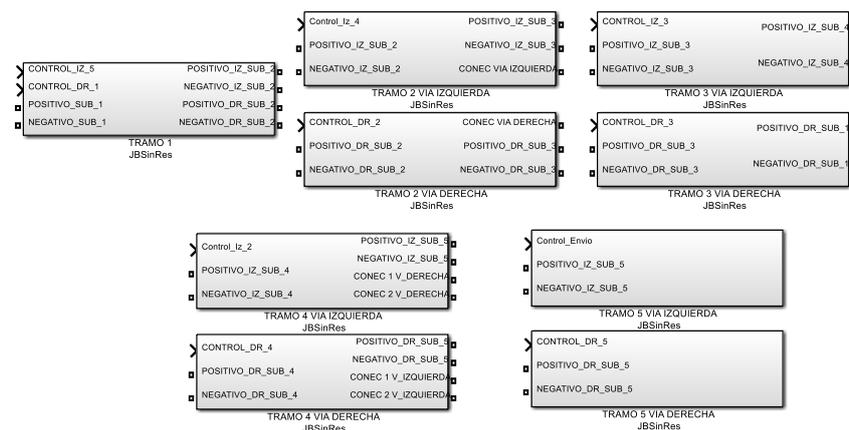
### 3. Implementación del modelo en SIMULINK



**Figura 3.3.:** Modelado de la catenaria y vía de retorno mediante resistores en Simulink.

**Tabla 3.1:** PK de inicio y fin de cada tramo de vía férrea.

vía férrea	Vía derecha			Vía izquierda		
	PK inicio	PK fin	Tipo	PK inicio	PK fin	Tipo
Tramo 1	0.00	2680	LAC	0.00	2680	LAC
Tramo 2	2680	4839	LAC	2680	4701	LAC
Tramo 3	4839	6895	APS	4701	6818	APS
Tramo 4	6895	9570	LAC	6818	9570	LAC
Tramo 5	9570	10107	LAC	9570	10113	LAC



**Figura 3.4.:** Tramos resultantes de la vía férrea derecha e izquierda.

Como se puede apreciar en la figura 3.4, el tramo 2, 3, 4 y 5, están representados por dos bloques subsistemas, donde un bloque representa a la vía derecha y, el otro bloque representa a la vía izquierda. El tramo 1 esta representado por un bloque subsistema debido a que los tramos iniciales de las vías derecha e izquierda se encuentran dentro de un mismo bloque.

Los tramos iniciales se encuentran en un mismo bloque debido a la característica del tramo único en la vía férrea. El tramo único es la convergencia de las vías derecha e izquierda en una sola vía, la cual esta comprendida entre los PK 0 y 630, como muestra la figura 3.5, donde, del PK 630 hacia atrás existe un solo modelado de vía, y del PK 630 hacia adelante, la vía férrea se divide en vía derecha y vía izquierda.

Esta característica provoca que las potencias entregadas o receptadas por la subestación 1 circulen por el tramo único para posteriormente distribuirse de acuerdo a las necesidades de cada tramo.

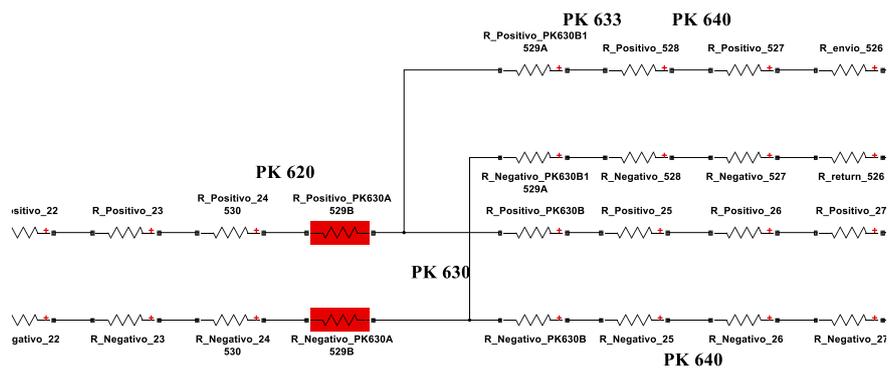


Figura 3.5.: Tramo único de la catenaria y vía de retorno.

#### 3.1.3. Modelado del tranvía en Simulink

El modelado del tranvía en Simulink consiste en representar mediante cargas el consumo o regeneración de energía que tendrá el tranvía cuando este se encuentre en operación. Se plantea colocar fuentes de corriente controladas en cada PK de la vía férrea modelada, de tal manera que, las fuentes se conecten entre la LAC o APS y la vía de retorno en el sentido positivo-negativo, como se muestra en la figura 3.6. Las fuentes se irán activando una a la vez de manera secuencial para representar el movimiento del tranvía y para esto hará falta un esquema de control de encendido-apagado para estas, el cual se explica en la siguiente sección.

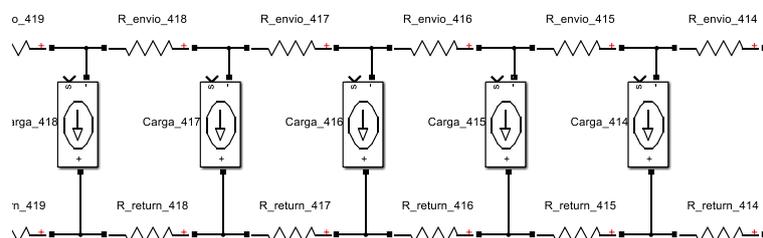


Figura 3.6.: Modelado del tranvía mediante fuentes de corriente controlada.

Las cargas en el tramo único serán representadas por una sola fuente de corriente como se puede apreciar en la figura 3.7. Estas fuentes deben ser activadas correctamente cuando se realice el proceso de simulación, debido a que, en ciertos PK, las fuentes se emplean únicamente para el tranvía derecho o el tranvía izquierdo por el arranque o frenado de los mismo. Para el resto del recorrido en el tramo único, la fuente se emplea para el tranvía derecho y para el tranvía izquierdo.

Se denomina tranvía derecho al tranvía que circula en la vía derecha y que opera en el sentido izquierda-derecha, y tranvía izquierdo al tranvía que circula en la vía izquierda y opera en el sentido derecha-izquierda. Además cada fuente se identifica con una etiqueta única. En este caso cada fuente de corriente es numerada de acuerdo con el sentido de operación del tranvía.

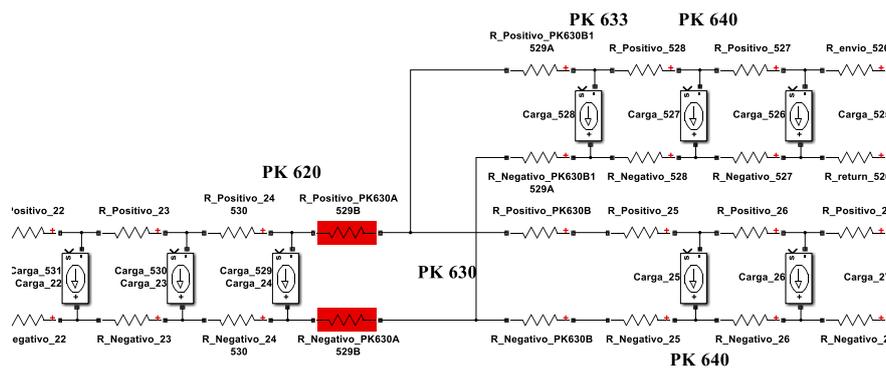


Figura 3.7.: Modelado de las fuentes de corriente en el tramo único del tranvía.

#### 3.1.4. Modelado del sistema de control de las cargas en Simulink

El modelado del sistema de control de las cargas en Simulink consiste en desarrollar una metodología que permita accionar las diferentes cargas en el tiempo y ubicación de acuerdo a cómo el tranvía o los tranvías se desplazan por la vía férrea. Se considera el bloque MATLAB-Function como herramienta para desarrollar esta metodología como se muestra en la figura 3.8.

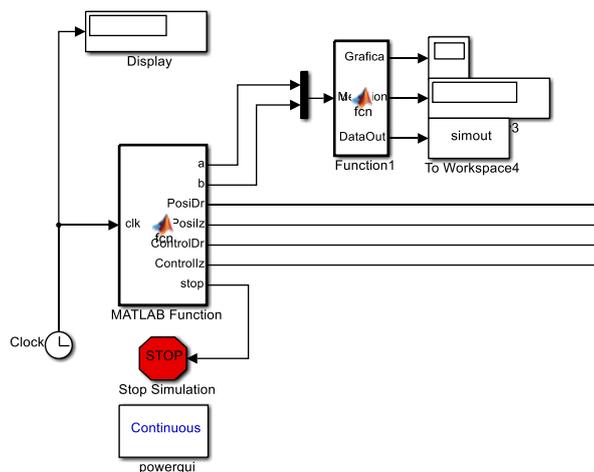


Figura 3.8.: Bloque MATLAB-Function empleado en el sistema de control del encendido y apagado de las fuentes de corriente.

El bloque MATLAB-Function permite ingresar líneas de programación de manera similar a un *script* de MATLAB, permitiendo desarrollar códigos que se ejecutaran de acuerdo con las necesidades del programa.

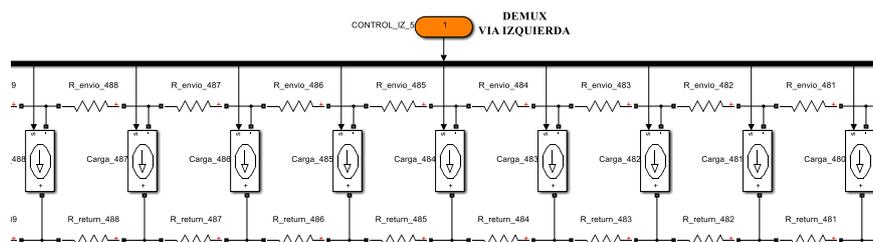
En este caso el bloque es el encargado de modificar el valor de la corriente de las fuentes colocadas en la vía férrea, de tal manera que, al correr la simulación en forma continua, las fuentes de corriente aumentan o disminuyen automáticamente la magnitud de su corriente dando el efecto de recorrido del tranvía sobre la vía férrea.

Con el fin de lograr este objetivo, es necesario crear varias variables de programa tanto internas como externas, siendo las variables: `ControlDR`, `ControlIz`, `TramoxDr`,

`TramoxIz` y `clk` las variables de programa más importantes.

Las variables `ControlDR` y `ControlIz` son de tipo vector que enlazan el programa de control con las fuentes de corriente de la vía derecha e izquierda, respectivamente. Estas variables permiten modificar la magnitud de la corriente que circula por cada fuente de acuerdo con lo requerido por el programa. En las variables `ControlDR` y `ControlIz` se cargan con el valor de la corriente requerida para cada fuente.

Al demultiplexar estas variables por medio de un demultiplexador como se muestra en la figura 3.9, cada valor es asignado a una sola fuente, para que este valor aumente o reduzca la corriente que circula por la misma.



**Figura 3.9.:** Des-concatenado de la señal de control de las fuentes de corriente.

Las variables `TramoxDr` y `TramoxIz` son de tipo vector y representan todos los valores de corriente que se producen dentro del tramo analizado, tanto para la vía derecha como para la vía izquierda, respectivamente. Estas variables son cargadas dentro del programa de control y únicamente se emplean como variables de lectura y cuyos valores serán cargados en las variables `ControlDR` y `ControlIz`.

Finalmente la variable `clk` representa el tiempo de simulación y permite el intercambio en los valores leídos de las variables `TramoxDr` y `TramoxIz` y los valores cargados tanto en posición como en magnitud en las variables `ControlDR` y `ControlIz`.

## 3.2. Determinación de los potenciales puntos de interés

Los puntos de mayor interés para el estudio serán aquellos PK en los que eventualmente se produzcan los picos de consumo o de regeneración de energía. Para determinar los potenciales puntos de interés se requiere de los resultados obtenidos en el capítulo 2, los cuales indican la corriente requerida en los diferentes PK de la vía férrea.

La determinación de los potenciales puntos de interés se debe realizar en cada tramo de vía férrea, resultando un total de 4 puntos de interés por tramo, donde: 2 puntos serán para el caso de consumo de energía y 2 para el caso de regeneración de energía. Un punto de consumo o de regeneración corresponde a la vía derecha y el otro punto de consumo o de regeneración corresponde a la vía izquierda. Los puntos considerados para los 5 tramos se presentan en la tabla 3.2 para el caso de consumo de energía y en la tabla 3.3 para el caso de regeneración de energía.

**Tabla 3.2:** Puntos de interés en el consumo de energía para cada tramo de vía férrea.

Puntos de consumo de energía				
Tramo vía férrea	Vía Derecha		Vía Izquierda	
	Consumo Corriente [A]	PK [m]	Consumo Corriente [A]	PK [m]
Tramo 1	1194,17	907,79	1090,20	636,21
Tramo 2	1426,08	4503,79	1414,59	3605,21
Tramo 3	510,03	6352,60	882,72	6365,40
Tramo 4	1145,37	7425,79	1155,90	8862,21
Tramo 5	83,06	10023,85	1072,60	9975,21

**Tabla 3.3:** Puntos de interés en la regeneración de energía para cada tramo de vía férrea.

Puntos de regeneración de energía				
Tramo vía férrea	Vía Derecha		Vía Izquierda	
	Regeneración Corriente [A]	PK [m]	Regeneración Corriente [A]	PK [m]
Tramo 1	-1576,07	2220	-1542,02	1940
Tramo 2	-1571,00	4760	-1594,54	3820
Tramo 3	-864,79	5380	-886,03	5040
Tramo 4	-1588,73	7660	-1649,86	6900
Tramo 5	-1361,39	10040	-89,79	9860

### 3.3. Evaluación de la tensión en los puntos de interés

La evaluación de la tensión en los puntos de interés se realiza mediante el modelo desarrollado en Simulink. Para realizar la evaluación de la tensión se realizan ciertas consideraciones, siendo estas las mencionadas a continuación:

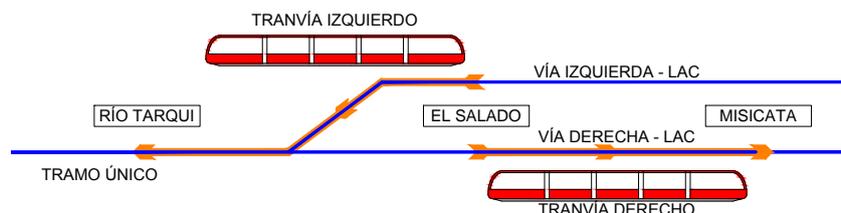
1. En el tramo analizado únicamente operan dos tranvías, uno por la vía derecha y otro por la vía izquierda.
2. Los tranvías operan independientemente el uno del otro, en condiciones de carga máxima y manteniendo las características de aceleración, desaceleración y velocidad.
3. Los picos de corriente de cada tranvía son coincidentes en el tiempo, es decir se supone la peor condición.

En la evaluación de la tensión se plantean dos grandes casos de estudio: uno con consumo de energía y otro con regeneración de energía, donde uno y otro tienen como diferencia fundamental el signo de la corriente. La corriente con signo positivo indica el caso de consumo de energía, mientras que, la corriente con signo negativo indica el caso de regeneración de energía.

### 3.3.1. Tramo 1 con consumo de energía

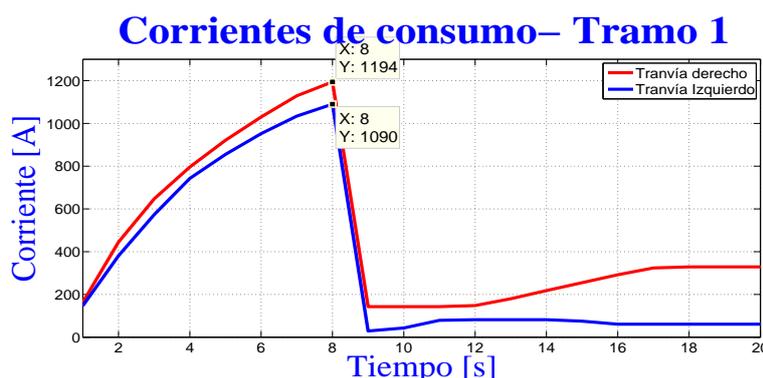
El primer caso analizado de consumo de energía corresponde al primer tramo de vía férrea, el cual se sitúa entre las subestaciones 1 y 2.

En este caso se considera que el tranvía derecho parte de la parada “El Salado” hacia la parada “Misicata”, mientras que el tranvía izquierdo parte de la parada “El Salado” hacia la parada “Río Tarqui”, como se muestra en la figura 3.10.



**Figura 3.10.:** Trayectoria para el tramo 1 con consumo de energía.

Para el desarrollo del estudio se consideran las corrientes producidas dentro de las trayectorias planteadas y, en la figura 3.11 se presenta la variación de corriente en el tramo.



**Figura 3.11.:** Corrientes de consumo en el tramo 1.

Como se muestra en la figura 3.11, la evolución de corriente de cada tranvía mantiene cierta similitud, alcanzando una corriente de hasta 1194 A para el tranvía derecho y de hasta 1090 A para el tranvía izquierdo, para posteriormente tomar valores de corriente menores.

Al circular corriente por la LAC o por la APS, el voltaje resultante, es decir, el voltaje entre la LAC o APS y la vía de retorno para el punto de contacto del tranvía es menor al nominal como muestra la figura 3.12, donde, a medida que incrementa la corriente del sistema, el voltaje resultante es menor, alcanzando una tensión mínima de 698.9 V para el tranvía derecho y de 706 V para el tranvía izquierdo.

Si se considera el instante de tiempo donde se produce la corriente pico y se analiza la tensión en la catenaria, se puede apreciar como el voltaje disminuye desde el PK de conexión de la subestación hasta el PK de conexión del tranvía como se muestra en la figura 3.13

En la figura 3.13, el voltaje alcanza un valor mínimo de 698.9 V en el PK 907.8, para la catenaria derecha y de 706 V en el PK 636.2, para la catenaria izquierda.

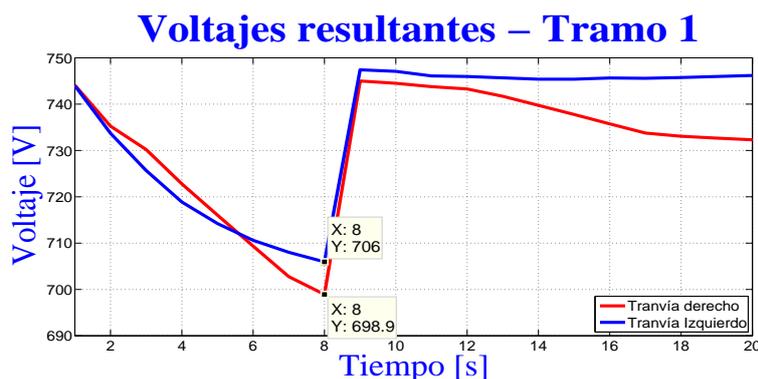


Figura 3.12.: Voltajes resultantes en el tramo 1 con consumo.

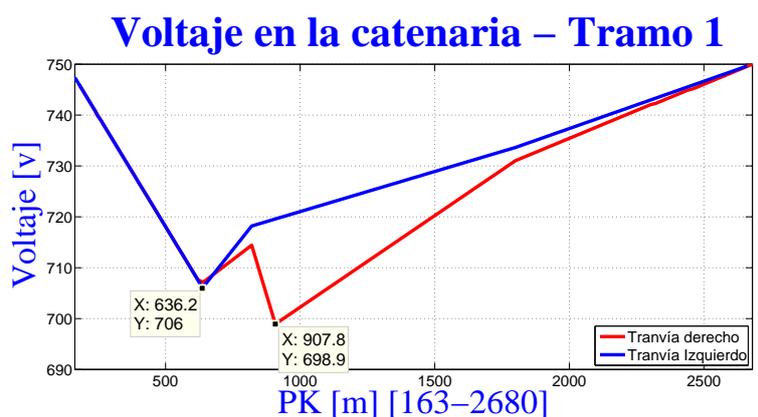


Figura 3.13.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 1 con consumo.

Debido al tramo único en la figura 3.13 existe coincidencia en las gráficas, además en cada catenaria existe un pico de caída de tensión.

A su vez se estima que la subestación 1 provee de la mayor cantidad de energía al sistema como se muestra en la figura 3.14, donde las tensiones nominales de cada subestación se mantienen constantes con un valor de 750 V, mientras que las corrientes varían de acuerdo al consumo de energía, lo cual implica una corriente de hasta 1563 A para la subestación 1 y de hasta 720.8 A para la subestación 2.

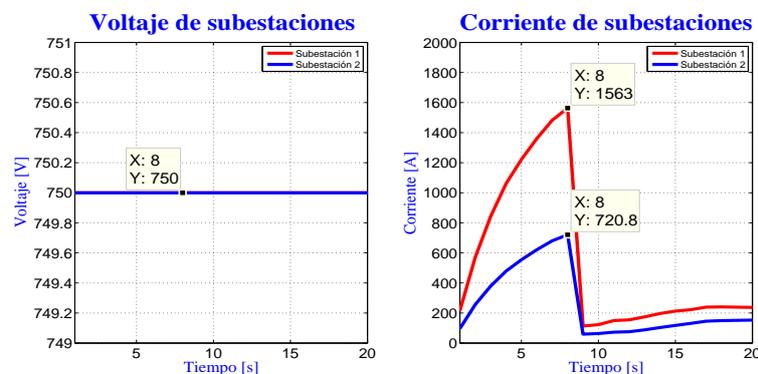


Figura 3.14.: Comportamiento de las subestaciones 1 y 2 con consumo.

Un procedimiento similar se mantiene para el desarrollo de los casos en los tramos restantes, donde, de igual manera, se considera que la gráfica de color rojo representa

al tranvía derecho, catenaria derecha y subestación  $n$ , mientras que la gráfica de color azul representa al tranvía izquierdo, catenaria izquierda y subestación  $n + 1$ , es decir la segunda subestación que se conecta al tramo analizado.

#### 3.3.2. Tramo 2 con consumo de energía

Para el segundo caso analizado de consumo de energía se considera que el tranvía derecho parte de la parada “Unidad Nacional” hacia la parada “Corazón de Jesús”, y que, el tranvía izquierdo parte de la parada “Calle del Arrayán” hacia la parada “Río Tomebamba” como se muestra en la figura 3.15.

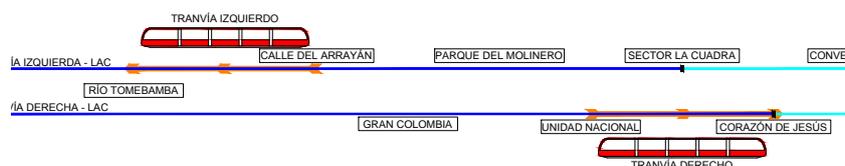


Figura 3.15.: Trayectoria para el tramo 2 con consumo de energía.

Para el desarrollo de este caso se consideran las corrientes producidas por las trayectorias planteadas como muestra la figura 3.16, donde la corriente alcanza un valor máximo de 1426 A para el tranvía derecho y de 1414 A en el tranvía izquierdo.

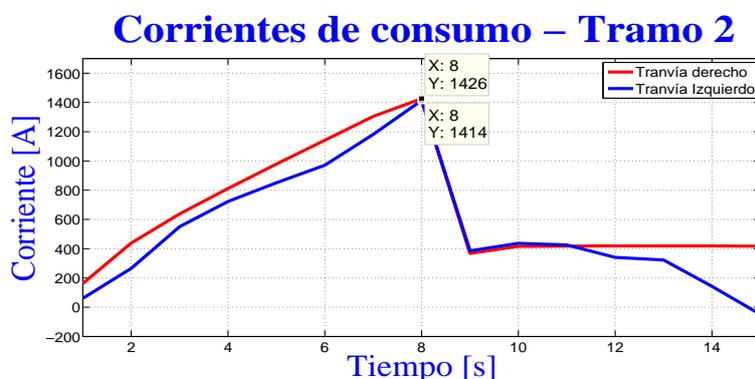


Figura 3.16.: Corrientes de consumo en el tramo 2.

De igual manera la tensión resultante es menor a la nominal, como muestra la figura 3.17, donde el voltaje alcanza un valor mínimo de 704.4 V para el tranvía derecho y de 696.1 V para el tranvía izquierdo.

Si se considera el instante de tiempo donde se produce la corriente pico y se analiza la tensión en la catenaria, como muestra la figura 3.18, se determina que el voltaje alcanza un valor mínimo de 704.4 V en el PK 4504, para la catenaria derecha y un mínimo de 696.1 V en el PK 3605, para la catenaria izquierda.

El comportamiento de las subestaciones se muestra en la figura 3.19, donde el voltaje se mantiene constante con un valor de 750 V, mientras que la corriente es variante alcanzando un valor máximo de 960 A para la subestación 2 y un máximo de 1880 A para la subestación 3. En este caso la subestación 3 provee de la mayor cantidad de energía al sistema.

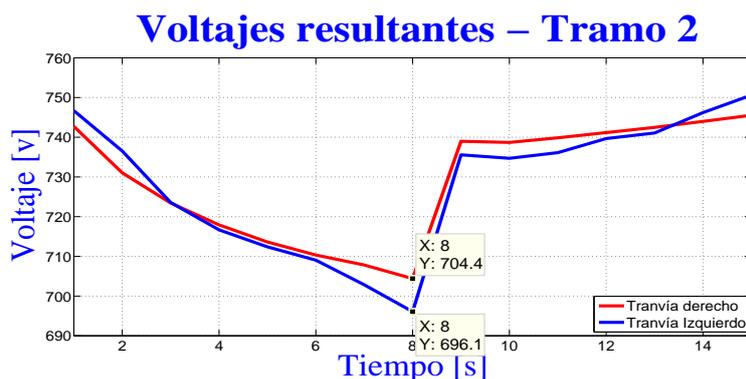


Figura 3.17.: Voltajes resultantes en el tramo 2 con consumo.

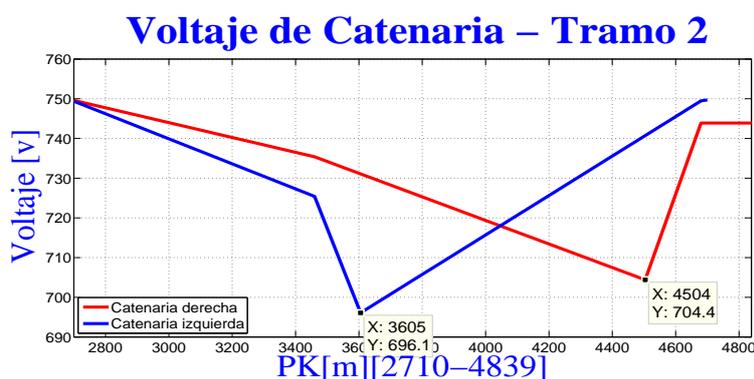


Figura 3.18.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 2 con consumo.

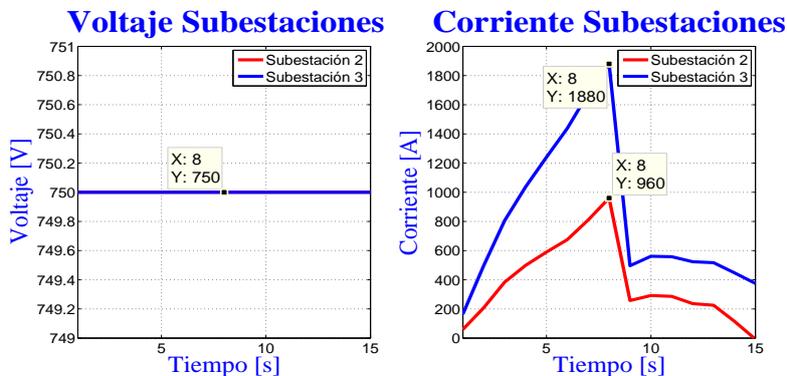


Figura 3.19.: Comportamiento de las subestaciones 2 y 3 con consumo.

### 3.3.3. Tramo 3 con consumo de energía

El tercer caso analizado de consumo de energía es referente al sistema alimentado por APS, donde el tranvía derecho parte de la parada “Luis Cordero” hacia la parada “Tomás Ordoñez”, y el tranvía izquierdo parte de la parada “Antonio Borrero” hacia la parada “Pedro Aguirre”, como muestra la figura 3.20.

La variación de la corriente se muestra en la figura 3.21, donde la corriente alcanza un valor máximo de 510 A para el tranvía derecho y un máximo de 882 A para el tranvía izquierdo.

El voltaje resultante se muestra en la figura 3.22, donde el mismo alcanza un valor mínimo de 727.6 V para el tranvía derecho y un mínimo de 713.1 V para el tranvía

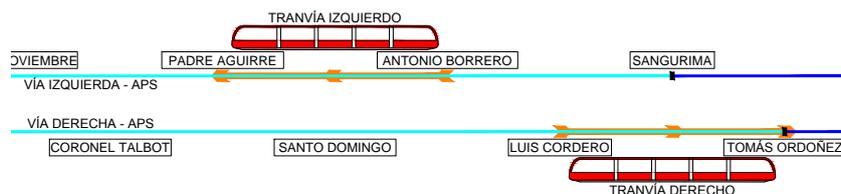


Figura 3.20.: Trayectoria para el tramo 3 con consumo de energía.

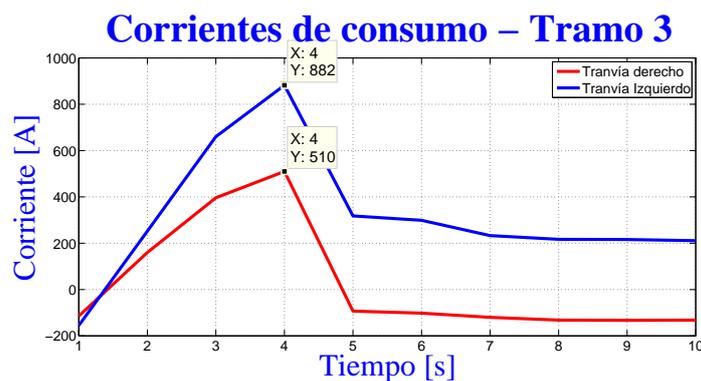


Figura 3.21.: Corrientes de consumo en el tramo 3.

izquierdo.

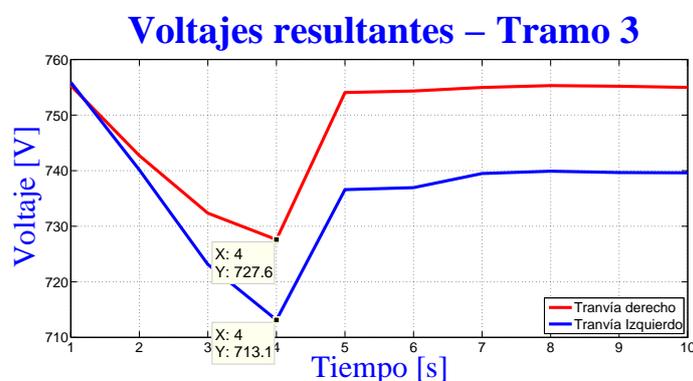


Figura 3.22.: Voltajes resultantes en el tramo 3 con consumo.

Si se analiza el voltaje en la catenaria, como muestra la figura 3.23, el voltaje alcanza un valor mínimo de 727.6 V en el PK 6353, para el tranvía derecho y un mínimo de 713.1 V en el PK 6365, para el tranvía izquierdo.

En la figura 3.24, se presenta el comportamiento de las subestaciones 3 y 4, donde la corriente de la subestación 3 alcanza un valor máximo de 285.2 A, mientras que la corriente de la subestación 4 alcanza un valor máximo de 1107 A.

#### 3.3.4. Tramo 4 con consumo de energía

Para el cuarto caso analizado on consumo de energía se considera que el tranvía derecho parte de la parada “Chola Cuencana” hacia la parada “Terminal Terrestre”,

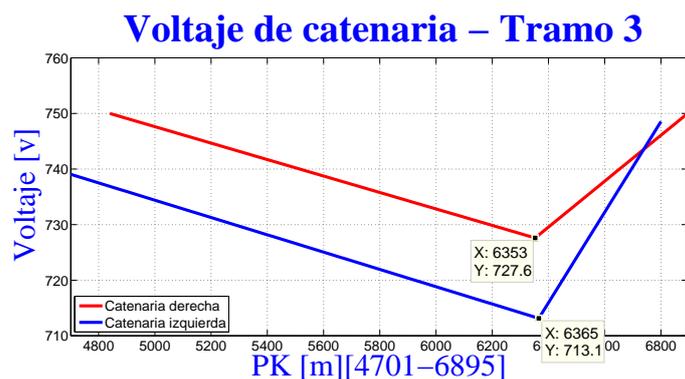


Figura 3.23.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 3 con consumo.

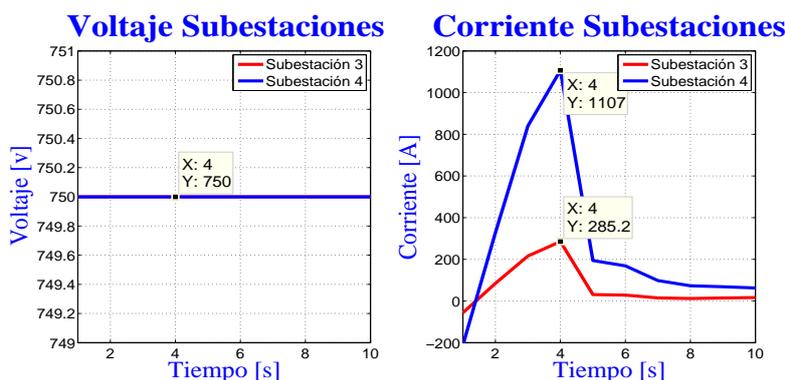


Figura 3.24.: Comportamiento de las subestaciones 3 y 4 con consumo.

mientras que el tranvía izquierdo parte de la parada “Milchichig” hacia la parada “Aeropuerto”, como se muestra en la figura 3.25.

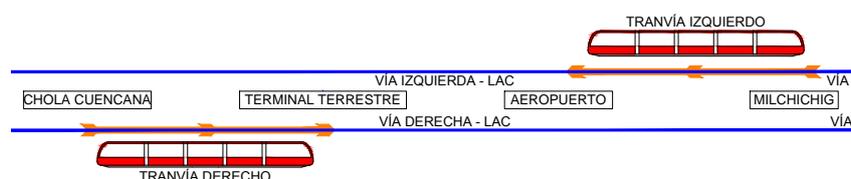


Figura 3.25.: Trayectoria para el tramo 4 con consumo de energía.

La variación de la corriente se muestra en la figura 3.26, donde las corrientes alcanzan un valor máximo de 1145 A para el tranvía derecho y de 1155 A para el tranvía izquierdo.

La variación del voltaje resultante se muestra en la figura 3.27, donde el voltaje resultante alcanza un valor mínimo de 738.7 V para el tranvía derecho y un mínimo de 720.5 V para el tranvía izquierdo.

Al analizar el voltaje en la catenaria como muestra la figura 3.28, el voltaje resultante alcanza un valor mínimo de 738.7 V en el PK 7426, para la catenaria derecha y un mínimo de 720.5 V en el PK 8862, para la catenaria izquierda.

El comportamiento de las subestaciones 4 y 5 se muestra en la figura 3.29, donde la corriente alcanza un valor máximo de 1483 A para la subestación 4 y un máximo

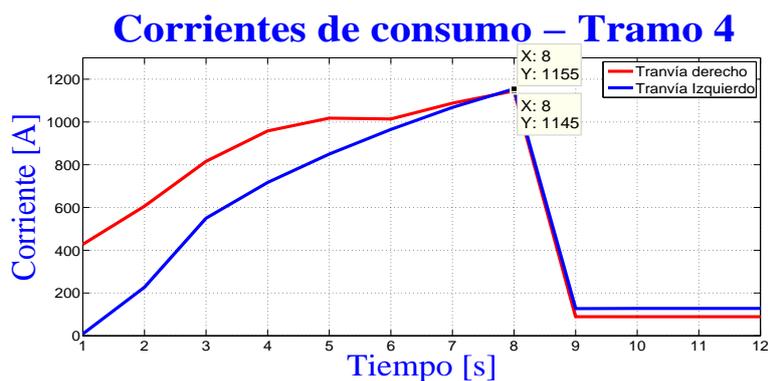


Figura 3.26.: Corrientes de consumo en el tramo 4.

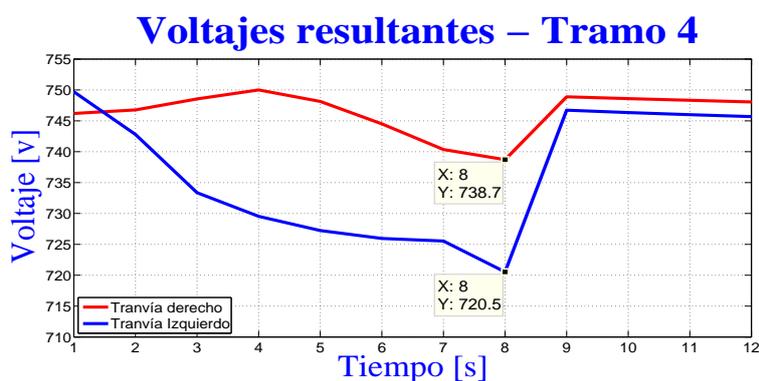


Figura 3.27.: Voltajes resultantes en el tramo 4 con consumo.

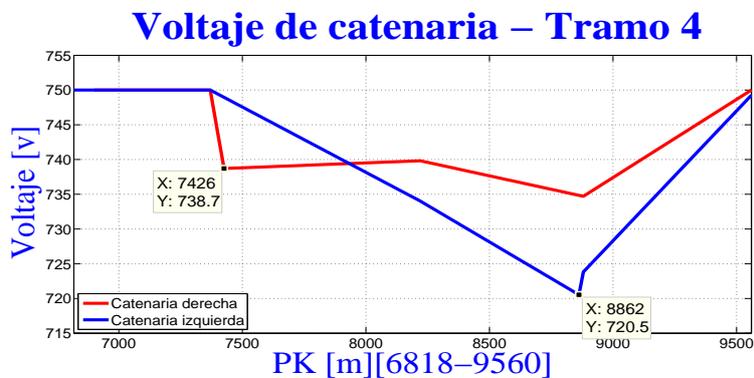


Figura 3.28.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 4 con consumo.

de 816.8 A para la subestación 5.

### 3.3.5. Tramo 5 con consumo de energía

El quinto caso analizado con consumo de energía se desarrolla en los tramos finales de la vía férrea y es alimentado únicamente por la subestación 5.

En este caso, de acuerdo con la tabla 3.2, la corriente máxima en la catenaria derecha no sobrepasa los 100 A por lo que se puede omitir este análisis. El tranvía izquierdo, sin embargo tiene corrientes superiores a los 1000 A por lo que se considera que éste parte de la parada “Parque Industrial” hacia la parada “Milchichig”, como muestra la figura 3.30.

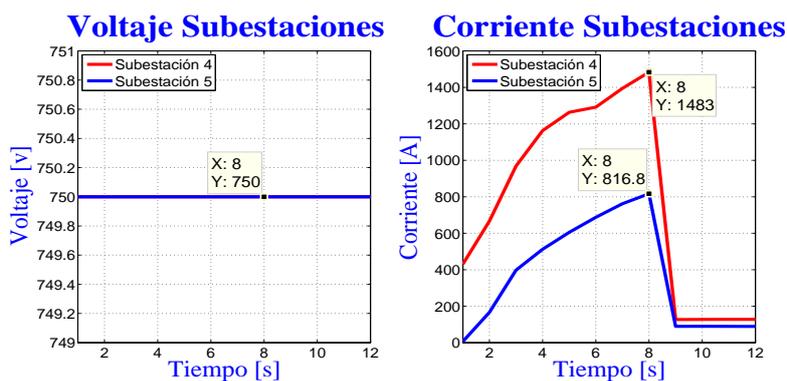


Figura 3.29.: Comportamiento de las subestaciones 4 y 5 con consumo.



Figura 3.30.: Trayectoria para el tramo 5 con consumo de energía.

La variación de corriente se muestra en la figura 3.31, donde la corriente alcanza un valor máximo de 1072 A.

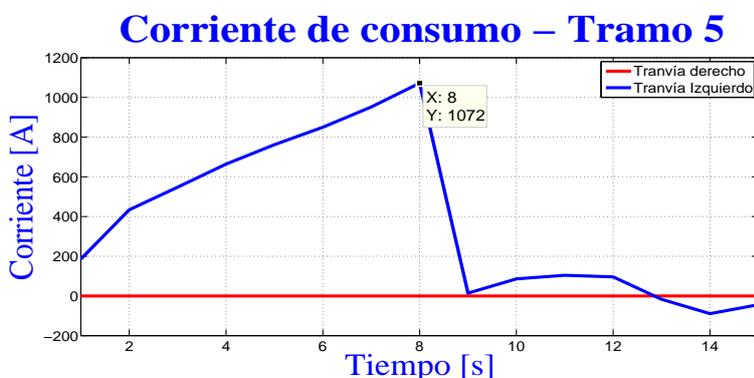


Figura 3.31.: Corrientes de consumo en el tramo 5.

La variación del voltaje resultante se presenta en la figura 3.32, donde el voltaje alcanza un valor mínimo de 674.6 V.

Al analizar la tensión en la catenaria como muestra la figura 3.33, se determina que el voltaje resultante alcanza un valor mínimo de 674.6 V en el PK 9975, y que se mantiene constante en los PK posteriores.

El comportamiento de la subestación 5 se muestra en la figura 3.34, donde la corriente de la subestación alcanza un valor máximo de 1072 A.

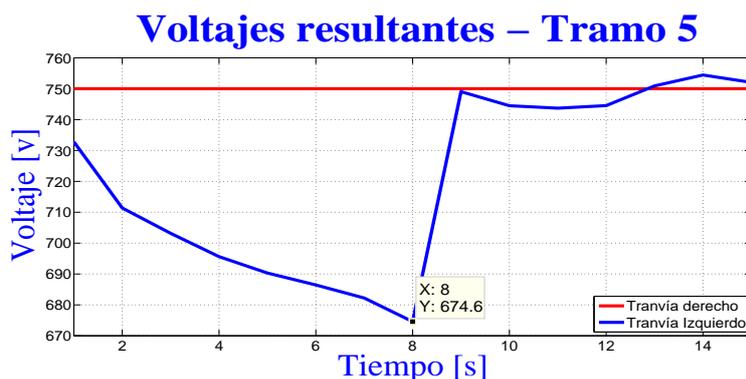


Figura 3.32.: Voltajes resultantes en el tramo 5 con consumo.

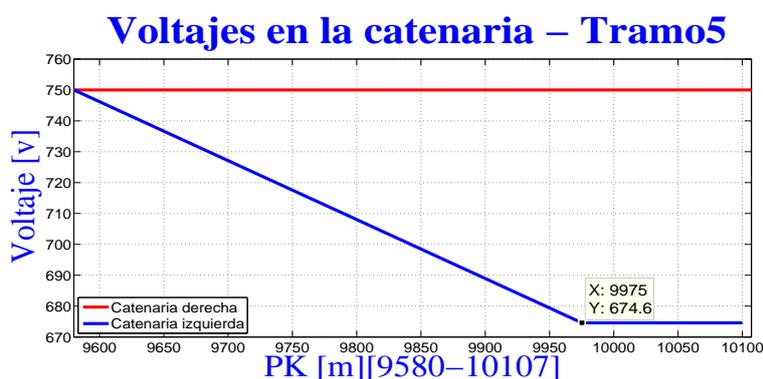


Figura 3.33.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 5 con consumo.

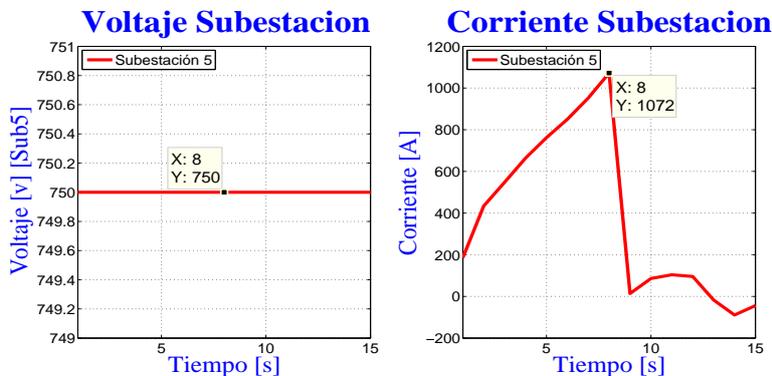
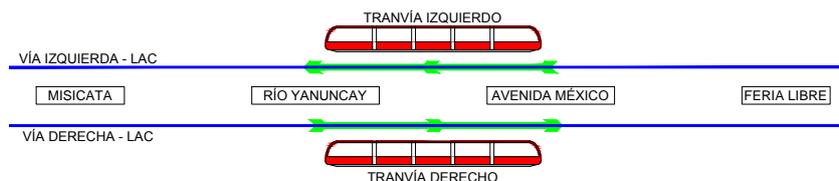


Figura 3.34.: Comportamiento de la subestación 5 con consumo.

### 3.3.6. Tramo 1 con regeneración de energía

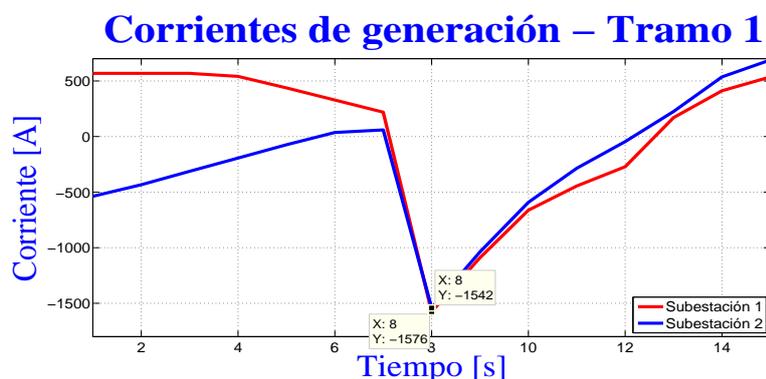
El primer caso analizado con regeneración de energía corresponde al primer tramo de vía férrea conectado a las subestaciones 1 y 2. En este caso el tranvía derecho parte de la parada “Río Yanuncay” hacia la parada “Avenida México”, mientras que el tranvía izquierdo parte de la parada “Avenida México” hacia la parada “Río Yanuncay”, como se muestra en la figura 3.35.

Para el análisis de este caso se consideran las corrientes producidas por las trayectorias planteadas como muestra la figura 3.36. En esta figura, las corrientes analizadas son de signo negativo provocando que las corrientes que circulan por las fuentes físicas sean de sentido inverso y que la fuente de corriente se comporte como generador.



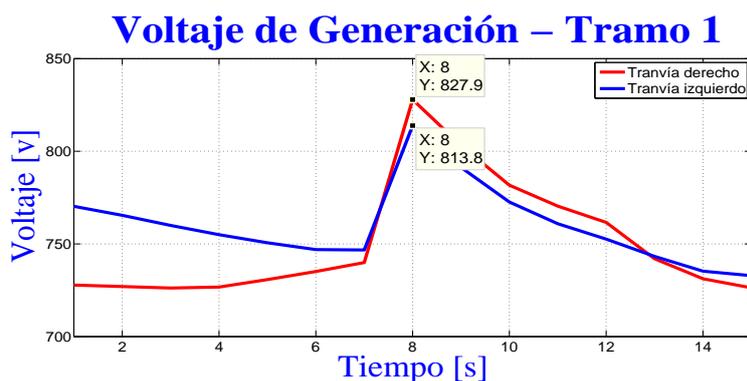
**Figura 3.35.:** Trayectoria para el tramo 1 con regeneración de energía.

Al analizar la figura 3.36 se determina que la corriente alcanza un valor máximo de -1576 A para el tranvía derecho y de -1542 A para el tranvía izquierdo.



**Figura 3.36.:** Corrientes de regeneración para el tramo 1.

La variación de la corriente provoca que la tensión resultante varíe como se muestra en la figura 3.37, donde el voltaje resultante alcanza un valor máximo de 827.9 V para el tranvía derecho y un máximo de 813.8 V para el tranvía izquierdo.



**Figura 3.37.:** Voltajes resultantes en el tramo 1 con regeneración.

Si se considera el instante de tiempo donde se producen la corriente pico y se analiza la tensión en la catenaria como muestra la figura 3.38, se determina que, el voltaje disminuye su valor desde el PK de conexión de la fuente hasta el PK de conexión de la subestación.

Como se puede apreciar en la figura 3.38, el voltaje alcanza un valor máximo de 827.9 V en el PK 2220 para la catenaria derecha, y un máximo de 813.8 V en

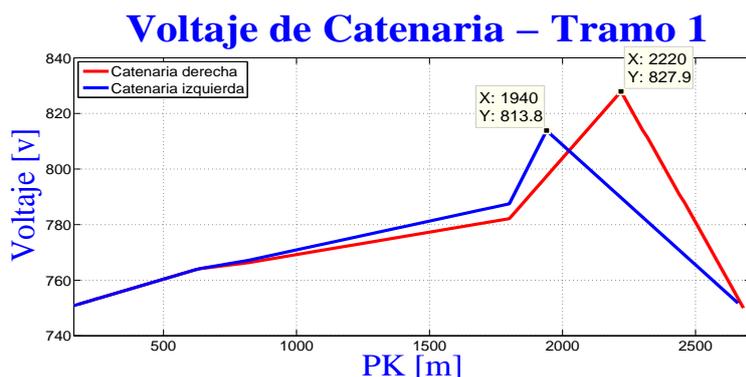


Figura 3.38.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 1 con regeneración.

el PK 1940 para la catenaria izquierda. En este caso las gráficas nuevamente son coincidentes debido al tramo único.

Nuevamente, el comportamiento producido por los tranvías es reflejado en las subestaciones 1 y 2, en las cuales la tensión se mantiene constante con un valor de 750 V, mientras que las corrientes son variantes, alcanzando un valor máximo de -692.2 A para la subestación 1 y un máximo de -2426 A para la subestación 2. En este caso, la subestación 2 soporta la mayor cantidad de energía regenerada.

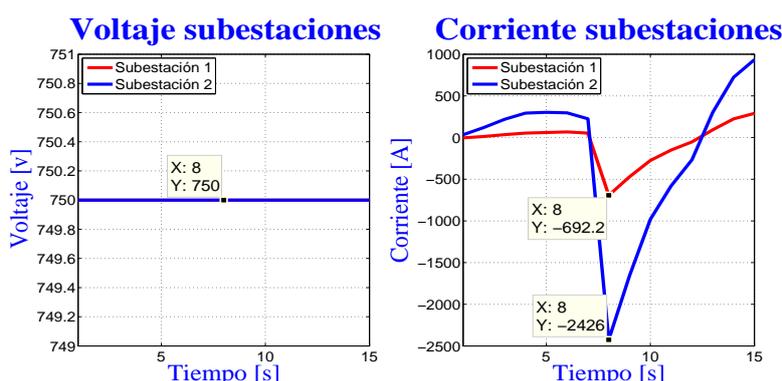


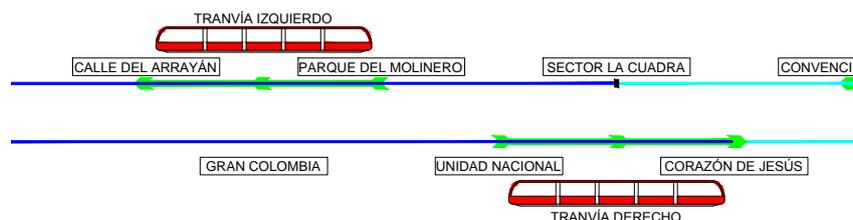
Figura 3.39.: Comportamiento de las subestaciones 1 y 2 con regeneración.

Un procedimiento similar se mantiene para el desarrollo de los casos de consumo de energía en los tramos restantes donde, de igual manera se considera que, las gráficas de color rojo representan al tranvía derecho, catenaria derecha y subestación  $n$ , mientras que las gráficas de color azul representan al tranvía izquierdo, catenaria izquierda y subestación  $n + 1$ , es decir la segunda subestación que se conecta con el tramo analizado.

### 3.3.7. Tramo 2 con regeneración de energía

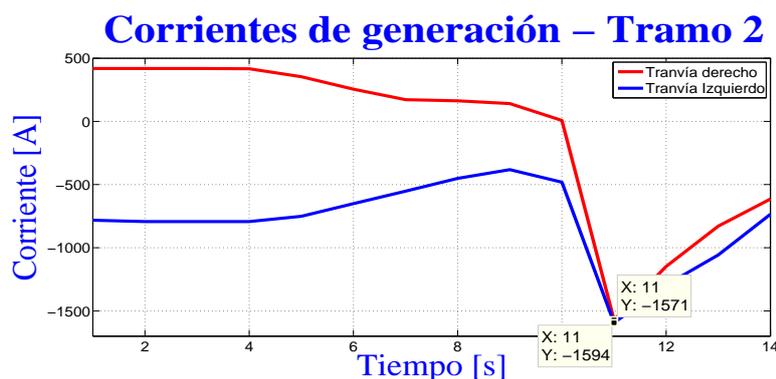
Para el segundo caso analizado con regeneración se considera que el tranvía derecho parte de la parada “Unidad Nacional” hacia la parada “Corazón de Jesús”, y que el tranvía izquierdo parte de la parada “Parque del Molinero” hacia la parada “Calle del Arrayán”, como se muestra en la figura 3.40.

Para el desarrollo de este caso se consideran las corrientes producidas por las trayectorias, como se muestra en la figura 3.41, donde la corriente alcanza un valor



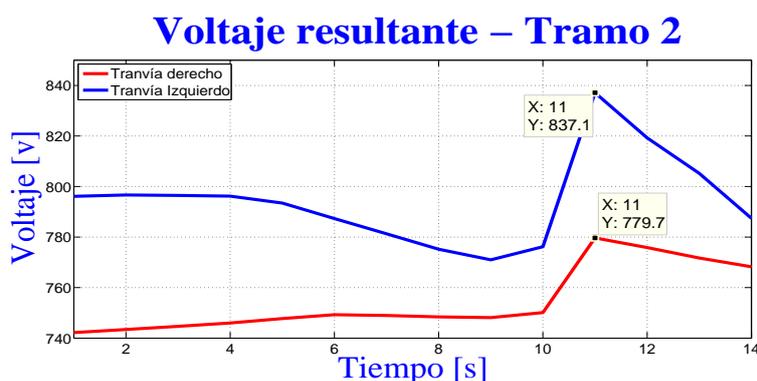
**Figura 3.40.:** Trayectoria para el tramo 2 con regeneración de energía.

máximo de -1571 A para el tranvía derecho, y de -1594 A para el tranvía izquierdo.



**Figura 3.41.:** Corrientes de regeneración en el tramo 2.

Como se puede apreciar en la figura 3.42, el voltaje resultante alcanza un valor máximo de 779.7 V para el tranvía derecho, y un máximo 837.1 V para el tranvía izquierdo.



**Figura 3.42.:** Voltajes resultantes en el tramo 2 con regeneración.

Al analizar la tensión en la catenaria como muestra la figura 3.43, el voltaje alcanza un valor máximo de 779.7 V en el PK 4760 para la catenaria derecha, y un máximo de 837.1 V en el PK 3820 para la catenaria izquierda.

El comportamiento de los tranvías se refleja en las subestaciones 2 y 3, donde el voltaje es constante, mientras que las corrientes varían alcanzando un valor máximo de -769.7 A para la subestación 2 y un máximo de -2395 A para la subestación 3 como se puede apreciar en la figura 3.44.

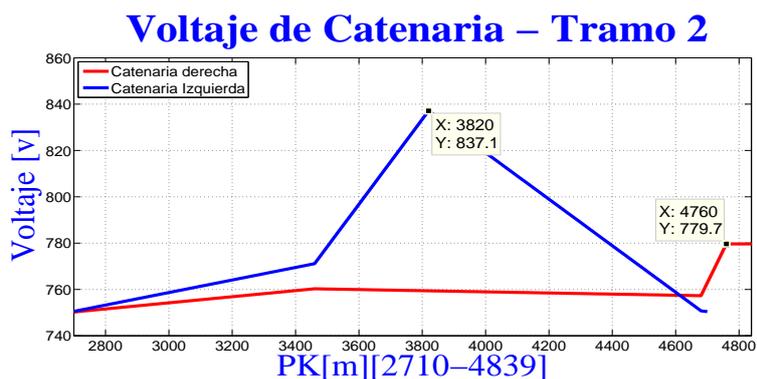


Figura 3.43.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 2 con regeneración.

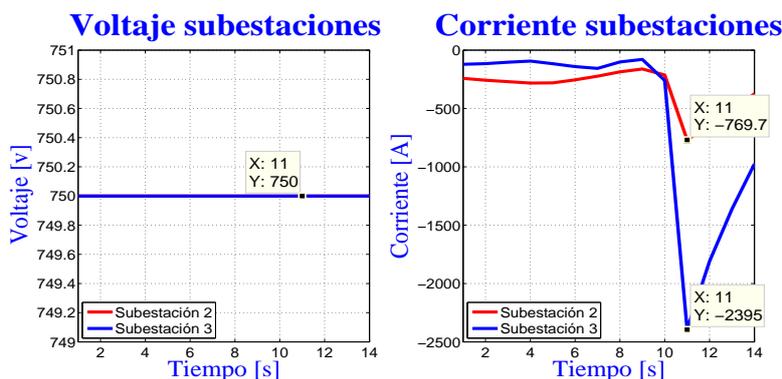


Figura 3.44.: Comportamiento de las subestaciones 2 y 3 con regeneración.

### 3.3.8. Tramo 3 con regeneración de energía

Para el tercer caso analizado con regeneración de energía se considera que el tranvía derecho parte de la parada “Corazón de Jesús” hacia la parada “Coronel Talbot”, y que el tranvía izquierdo parte de la parada “Mercado 3 de Noviembre” hacia la parada “Convención del 45” como se muestra en la figura 3.45.



Figura 3.45.: Trayectoria para el tramo 3 con regeneración de energía.

La variación de corriente se muestra en la figura 3.46, donde la corriente alcanza un valor máximo de  $-854$  A para el tranvía derecho y de  $-886$  A para el tranvía izquierdo.

La variación del voltaje resultante se muestra en la figura 3.47, donde el voltaje resultante alcanza un valor máximo de  $787.4$  V para la catenaria derecha y un máximo de  $814.1$  V para catenaria izquierda.

Al analizar el voltaje en la catenaria como muestra la figura 3.48, el voltaje alcanza un valor máximo de  $787.4$  V en el PK 5380 para la catenaria derecha, y un máximo

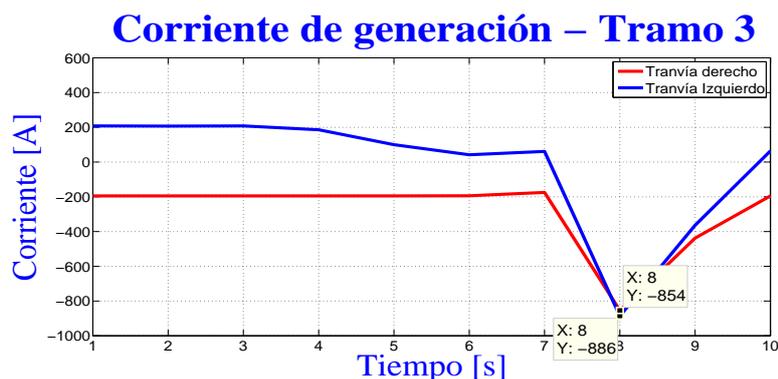


Figura 3.46.: Corrientes de regeneración para el tramo 3.

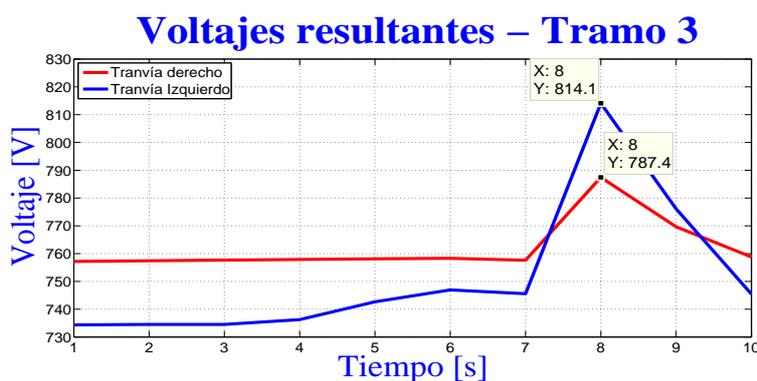


Figura 3.47.: Voltajes resultantes en el tramo 3 con regeneración.

de 814.1 V en el PK 5040 para la catenaria izquierda.

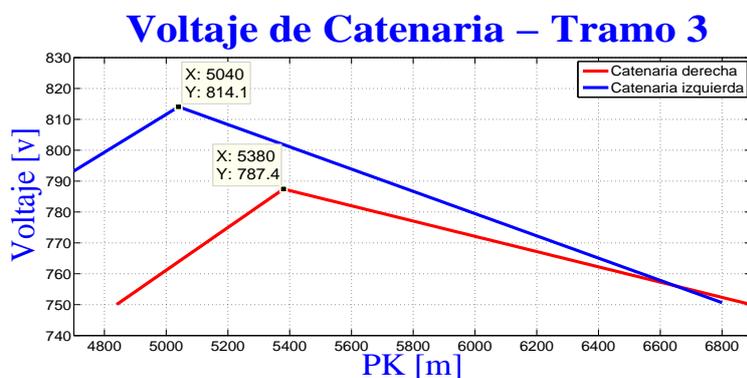


Figura 3.48.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 3 con regeneración.

Como se puede apreciar en la figura 3.49, las corrientes que circulan por cada subestación son variantes alcanzando un valor máximo de -1224 A para la subestación 3 y un máximo de -516.2 A para la subestación 4.

### 3.3.9. Tramo 4 con regeneración de energía

Para el cuarto caso analizado con regeneración se considera que el tranvía derecho parte de la parada “Chola Cuencana” hacia la parada “Terminal Terrestre”, mientras que el tranvía izquierdo parte de la parada “Chola Cuencana” hacia la parada

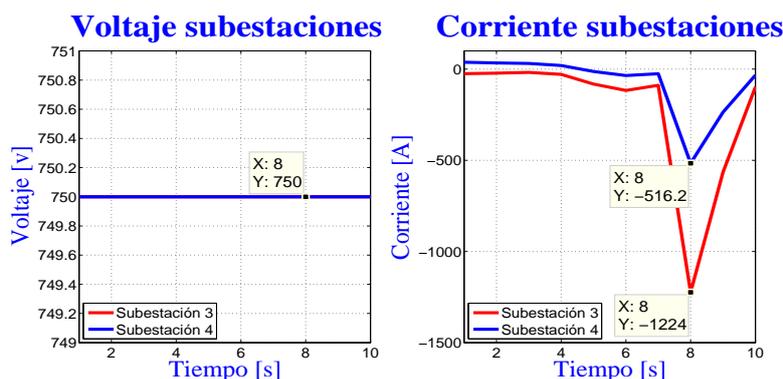


Figura 3.49.: Comportamiento de las subestaciones 3 y 4 con regeneración.

“Sangurima” como muestra la figura 3.50.

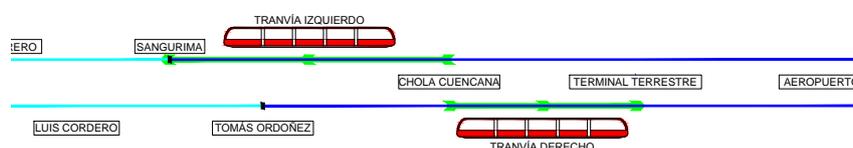


Figura 3.50.: Trayectoria para el tramo 4 con regeneración de energía.

La variación de corriente se muestra en la figura 3.51, donde la corriente alcanza un valor máximo de -1588 A para el tranvía derecho y de -1649 A para el tranvía izquierdo.

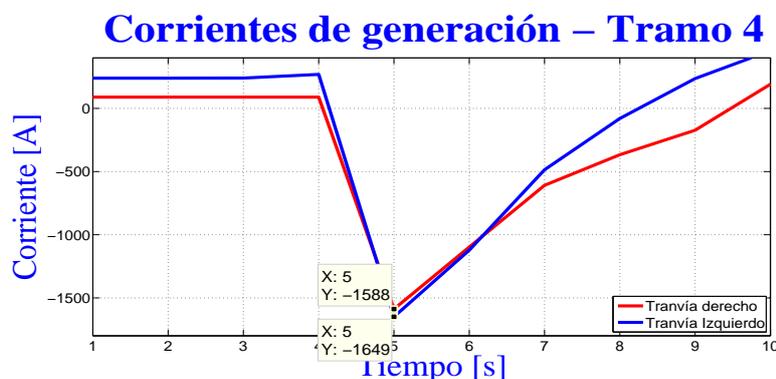


Figura 3.51.: Corrientes de regeneración en el tramo 4.

El voltaje resultante se muestra en la figura 3.52, donde el voltaje alcanza un valor máximo de 808.1 V para el tranvía derecho y un máximo de 888 V para el tranvía izquierdo.

Al analizar la tensión en la catenaria como muestra la figura 3.53, el voltaje alcanza un máximo de 808.1 V en el PK 7660 para la catenaria derecha, y un máximo de 888 V en el PK 6900 para la catenaria izquierda.

El comportamiento de las subestaciones se muestra en la figura 3.29, donde la corriente alcanza un valor máximo de -3007 A para la subestación 4 y un máximo de -230.4 A para la subestación 5.

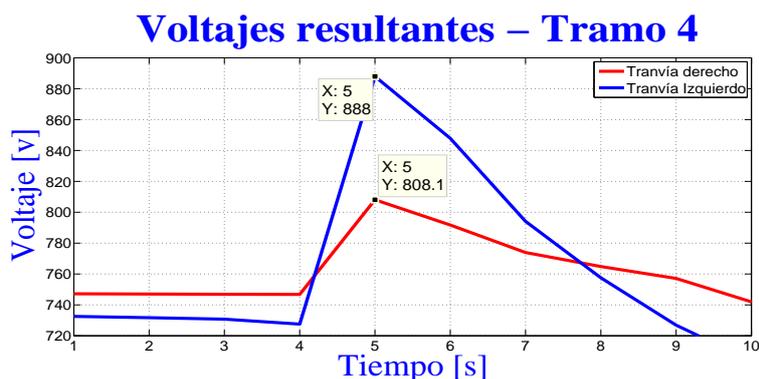


Figura 3.52.: Voltajes resultantes en el tramo 4 con regeneración.

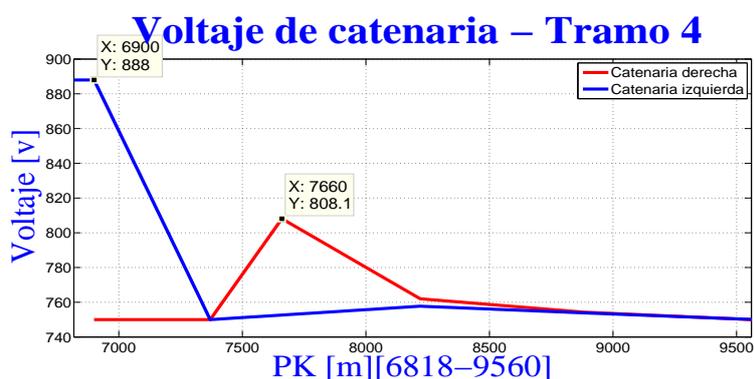


Figura 3.53.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 4 con regeneración.

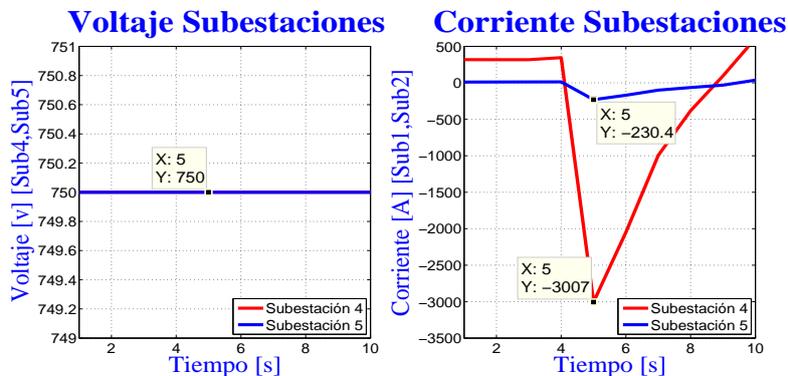


Figura 3.54.: Comportamiento de las subestaciones 4 y 5 con regeneración.

### 3.3.10. Tramo 5 con regeneración de energía

El quinto caso analizado con regeneración se desarrolla en el tramo 5 y que es alimentado por la subestación 5.

En este caso, de acuerdo con la tabla 3.3, la corriente del tranvía izquierdo no sobrepasa los -100 A permitiendo omitir este análisis. El tranvía derecho, sin embargo tiene corrientes superiores a los 1000 A, por lo que se considera que éste parte de la parada “Milchichig” hacia la parada “Parque industrial”, como muestra la figura 3.55. La variación de corriente se muestra en la figura 3.56, donde la corriente alcanza un valor máximo de -1361 A para el tranvía derecho.

La variación del voltaje resultante se muestra en la figura 3.57, donde el voltaje

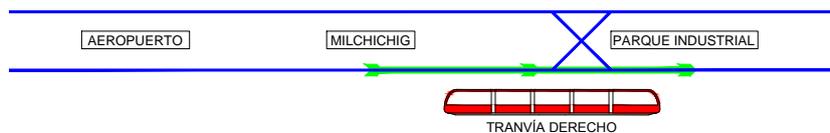


Figura 3.55.: Trayectoria para el tramo 5 con regeneración de energía.

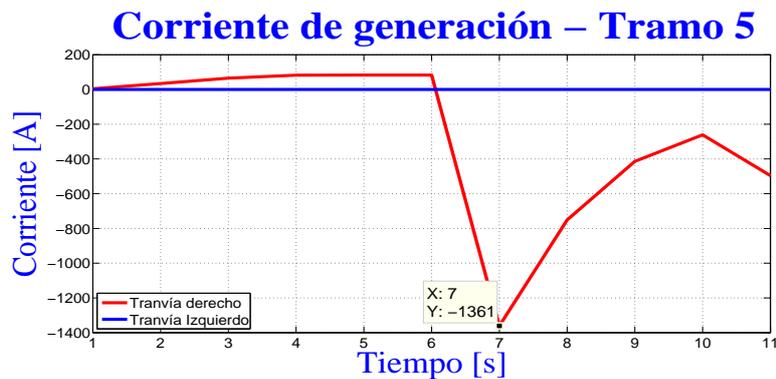


Figura 3.56.: Corrientes de regeneración en el tramo 5.

resultante alcanza un valor máximo de 866.3 V.

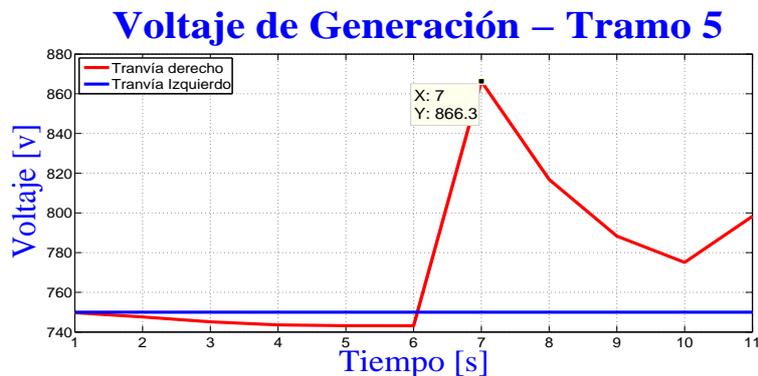


Figura 3.57.: Voltajes resultantes en el tramo 5 con regeneración.

Al analizar la tensión en la catenaria como muestra la figura 3.58, el voltaje alcanza un valor máximo de 866.3 V en el PK 10040, y en los PK posteriores la tensión se mantiene constante por ser un circuito abierto.

El comportamiento de la subestación 5 se muestra en la figura 3.59, donde la corriente alcanza un valor máximo de -1361 A.

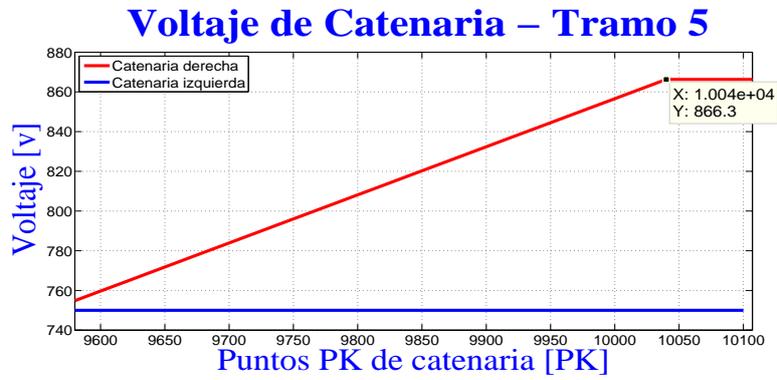


Figura 3.58.: Variación de voltaje en la catenaria del tramo 5 con regeneración.

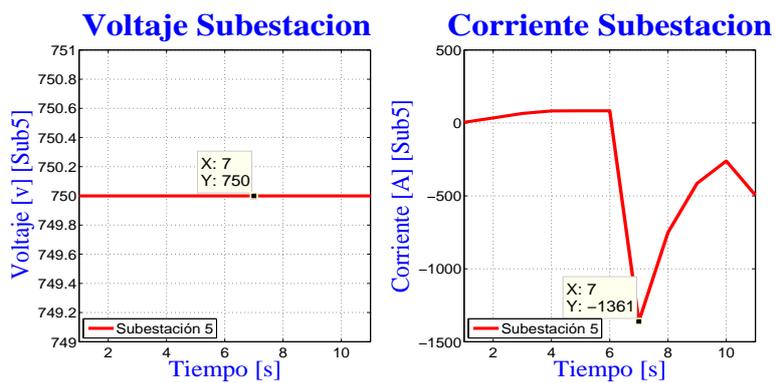


Figura 3.59.: Comportamiento de la subestación 5 con regeneración.

## 4. Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

## 4.1. Análisis de resultados

### 4.1.1. Consumo de energía

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 3 para el caso de consumo de energía, y cuyos resultados se muestran en la tabla 4.1, se considera que:

- Los voltajes resultantes en los diferentes casos no presentan valores inferiores a los 650 V y en especial en el tramo 3 donde los voltajes resultantes no son inferiores a los 700 V. Los voltajes resultantes en ningún caso son menores al límite permitido de 500 V para la correcta operación del tranvía, como establece la norma EN 50163 “Railway applications - Supply voltages of traction systems”. [19]
- Las corrientes pico obtenidas para los distintos tramos tienen un amplio rango, yendo desde un mínimo de 510 A hasta un máximo de 1426 A. En el tramo alimentado por APS la corriente máxima es de 882 A, mientras que en los tramos alimentados por LAC, la corriente supera los 1000 A, existiendo mayor circulación de corriente en los tramos alimentados por LAC.
- En el tramo 2 y 4, las corrientes pico son similares en magnitud, sin embargo el voltaje resultante para cada corriente es completamente diferente. Esto se debe a que las cargas conectadas más cerca de las subestaciones generan una menor caída de tensión, mientras que las cargas conectadas a mayor distancia de las subestaciones generan una mayor caída de tensión.

**Tabla 4.1:** Resultados obtenidos de la variación de voltaje para el caso de consumo de energía.

Tramo	Tranvía	PK	Corriente consumo	Voltaje captado
		[m]	[A]	[v]
1	Derecho	907.8	1194	698.9
	Izquierdo	636.2	1090	706
2	Derecho	4504	1426	704.4
	Izquierdo	3605	1414	696.1
3	Derecho	6353	510	727.6
	Izquierdo	6365	882	713.1
4	Derecho	7426	1145	738.7
	Izquierdo	8862	1155	720.5
5	Derecho	-	-	-
	Izquierdo	9975	1072	674.6

### 4.1.2. Regeneración de energía

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo 3 y cuyos valores se muestran en la tabla 4.2, se considera que:

- Los voltajes resultantes para el caso de regeneración presentan una amplia variación dependiendo del caso analizado y en todos los casos son superiores a los 779 V. Ningún voltaje, sin embargo es superior al límite de 900 V permitiendo

la correcta operación del sistema; no obstante el voltaje resultante en ciertos casos se encuentra muy cerca del límite, y en caso de que el voltaje resultante supere el límite, es necesario el uso de los resistores de frenado, los cuales se encuentran instalados en cada unidad. [19]

- Las corrientes pico analizadas se encuentran en el orden de los 1500 y 1600 A para la LAC y en el orden de los 800 A para la APS. Nuevamente las corrientes más elevadas se producen dentro de los tramos alimentado por LAC.
- El caso de mayor riesgo se produce en el tramo 4 con el tranvía izquierdo donde el voltaje resultante llega hasta los 888 V, estando muy cerca del límite y creando una alerta para el tranvía en esta etapa de operación.

**Tabla 4.2:** Resultados obtenidos de la variación de voltaje para el caso de regeneración de energía.

Tramo	Tranvía	PK	Corriente regene- ración	Voltaje captado
		[m]	[A]	[v]
1	Derecho	2220	-1576	827.9
	Izquierdo	1940	-1542	813.8
2	Derecho	4760	-1571	779.7
	Izquierdo	3820	-1594	837.1
3	Derecho	5380	-854	787.5
	Izquierdo	5040	-886	814.1
4	Derecho	7660	-1588	808.1
	Izquierdo	6900	-1649	888
5	Derecho	10040	-1361	866.3
	Izquierdo	-	-	-

Como se puede apreciar en las apartados anteriores, los voltajes resultantes se encuentra dentro del rango aceptable de 500 y 900 V para la correcta operación del tranvía; sin embargo, en el caso de regeneración, los voltajes resultantes se encuentran mas cerca del límite por lo que; el control y monitoreo constante de estos voltajes es necesario para mantener la estabilidad del sistema.

Es importante considerar que todas las corrientes analizadas son las corrientes máximas por cada tramo y las cuales son producidas por el inicio de la etapa de frenado o por el final de la etapa de aceleración. Las corrientes anteriores y posteriores a estas son de menor valor y deben afectar de menor manera en los niveles de tensión del sistema de tracción.

Un aspecto importante que provoca el incremento o decremento en el voltaje resultante es la configuración del sistema de tracción. Varios tramos del sistema analizado cuentan con varios puntos de inyección de energía, mientras que otros tramos, especialmente los tramos finales cuentan solamente con un solo punto de inyección de energía, provocando que la variación del voltaje resultante sea mayor en estos casos.

Es necesario mantener presente la característica del tramo único porque esta limita la operación de los tranvías en los primeros PK de la vía férrea. Esta limitación provoca que los tranvías puedan o no arrancar desde cierta parada o si un tranvía

tiene que esperar a que otro tranvía se desplace primero; lo cual, se refleja en los voltajes resultantes dentro del tramo.

## 4.2. Conclusiones

Como se muestra en este documento, para realizar el estudio energético a un sistema ferroviario es necesario conocer las características propias del sistema y de las localidades por donde este va a operar.

Entre las características que se consideran de mayor influencia esta la aceleración, velocidad nominal, des aceleración, cargas nominales y cargas máximas para el tranvía, y el trazado de la vía ferroviaria con las altitudes para la localidad. Estas características determinan la magnitud de las corrientes de consumo y de regeneración que tendrá cada tranvía cuando este en operación.

Ciertas características del tranvía como la carga que transporta varía a lo largo del recorrido y posiblemente no pueden ser controladas por el operador; sin embargo, su efecto conlleva a un incremento en la potencia de consumo y de regeneración, pudiendo ser tan fuerte este incremento que los parámetros del sistema como son el voltaje y la corriente pueden sobrepasar el rango permitido y colocar al sistema en un estado de riesgo.

La trayectoria planteada para el tranvía también influye en las potencias de consumo y de regeneración; sin embargo, en este caso la trayectoria no puede ser modificada con la operación del tranvía; por lo que definir una trayectoria óptima antes de la construcción del sistema ferroviario es necesario e indispensable.

Aun cuando los parámetros mencionados y el resto de parámetros propios de la operación del tranvía se encuentran dentro de un rango adecuado, las corrientes de consumo y de regeneración de los mismos superan fácilmente los miles de amperios, especialmente en las etapas de arranque y frenado.

Un sistema de tracción debe mantener los niveles de voltaje dentro del rango permitido aun cuando la carga alimentada sea la máxima permitida. Para ello, se deben considerar varios puntos de inyección de energía. Estos puntos de inyección de energía ayudan a reducir el efecto resistivo del conductor de LAC o APS, reduciendo de esta manera las pérdidas de energía por efectos de transporte desde la subestación hasta el tranvía.

Existen diferentes técnicas para reducir las pérdidas por transporte de energía como incrementar el número de subestaciones o colocar un conductor en paralelo al cable de contacto. Cada técnica, sin embargo debe ser analizada para determinar la que proporcione los mejores resultados tanto técnicos como económicos.

Si bien los estudios realizados a un sistema ferroviario no muestran exactamente los resultados reales, estos resultados son muy cercanos a los reales y permiten tener una idea clara del comportamiento del sistema real. Estos estudios muestran las fortalezas y debilidades que tiene el sistema, siendo de principal interés estas últimas y en especial las que colocan al sistema en una situación crítica con voltajes fuera de rango o con corrientes demasiado elevadas.

### 4.3. Recomendaciones

- Es recomendable contar con un sistema de control principal, el cual analice y controle en tiempo real el sistema ferroviario; permitiendo o negando la operación de ciertos tranvías con el fin de evitar posibles casos críticos para la red. Además el sistema de control debe optimizar la operación del sistema, buscando reducir el consumo energético de la red de corriente alterna. Arrancando o frenando tranvías de manera simultánea con el fin de que la energía regenerada por un tranvía sea consumida por otro tranvía.
- Es recomendable mantener un control constante sobre los voltajes resultantes, con el fin de evitar que estos sobrepasen los rangos establecidos. Cuando se produce un sobre voltaje será necesario conectar cargas de manera directa al tranvía para que consuman parte de la energía generada y permitan disminuir el voltaje resultante. En caso de producirse un bajo voltaje es necesario cambiar las condiciones de operación del tranvía, pudiendo disminuir la aceleración del mismo y evitar así el incremento de la corriente de consumo por efectos de arranque.
- Es recomendable contar con sistemas de control de pasajeros y cargas permitibles por el tranvía, con el fin de que el operador del mismo conozca la carga que transporta y modifique las características de operación del tranvía y evitar que los voltajes resultantes en el sistema de tracción varíen considerablemente.
- Un estudio más avanzado con un software de redes eléctricas como Digsilent, puede ser considerado a futuro. En el caso de este análisis no se contaba con licencia para esta herramienta, pero el uso de Simulink permitió obtener una primera aproximación al estudio del problema.

# Bibliografía

- [1] M. de Cuenca, “Informe final de la modelización del transporte y proyecciones de demanda y oferta.”
- [2] —, “Trazado de vía nota técnica trazado documento de producción,” EUS-KOTREN, Tech. Rep., 03 - 2015.
- [3] D. Cuéllar and R. Méndez, “Las primeras alternativas en la electrificación de los ferrocarriles de vía ancha en España (1907-1930),” p. 23, 2012. [Online]. Available: [http://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cCuellarMendez\\_Lasprimeras.pdf](http://www.ub.edu/geocrit/Simposio/cCuellarMendez_Lasprimeras.pdf)
- [4] M. Camacho and T. Rico, “Transporte de carga ferroviario en México: Perspectivas y realidades,” Universidad Nacional Autónoma de México, Tech. Rep., 2015, méxico.
- [5] J. Prada, “Sistema de electrificación ferroviaria 2x3000v,” Universidad Pontificia Comillas, Tech. Rep., 2009, madrid. [Online]. Available: <https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/4aaa802f1c645.pdf>
- [6] A. Alvarez, *Técnica ferroviaria*, tebar ed., Tebar, Ed., 2013.
- [7] J. González and J. Fuentes, *Ingeniería ferroviaria*, universidad nacional de educación a distancia ed., 2010.
- [8] M. Torrent-Burgués, J. Perat-Benalvides, B. Blanqué-Molina, and S. Soriano-Almodovar, “Caracterización de motores de inducción para tracción ferroviaria a partir del circuito equivalente, incluyendo todas las pérdidas del motor,” p. 9, 2014. [Online]. Available: [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/27367/7179\\_Caracterizaci%F3n+de+motores+\(maqueta+final\).pdf;jsessionid=93E53C593AA596F5B70CD96DE8E09E8F?sequence=1](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/27367/7179_Caracterizaci%F3n+de+motores+(maqueta+final).pdf;jsessionid=93E53C593AA596F5B70CD96DE8E09E8F?sequence=1)
- [9] R. C. Hibbeler, *Ingeniería mecánica - Dinámica*, pearson educación ed., 2010, vol. 12th.
- [10] H. Pérez, *Física 1*, grupo editorial patria ed., 2014.
- [11] R. C. Hibbeler, *Ingeniería mecánica - Estática*, pearson educación ed., 2010, vol. 12th.
- [12] R. Montesdeoca and E. Vásquez, “Análisis de los niveles de servicio mediante la implementación del tranvía en la ciudad de Cuenca,” Universidad Politécnica Salesiana, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7642>
- [13] V. Ruiz and H. Villacreses, “Análisis de los costos operativos entre el sistema de transporte público urbano y el tranvía de la ciudad de Cuenca en el 2014,” Universidad politécnica salesiana, Tech. Rep., 2015. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7762>
- [14] M. de Cuenca, “Principios de operación del sistema - documento de producción,” Tech. Rep., 07 - 2016.

- [15] —, “Reporte de Simulaciones Eléctricas Documento de producción,” ALSTOM, Tech. Rep., 08 - 2016.
- [16] A. Berbey, R. Caballero, J. S. Bobi, J. Brunel, K. Guerra, J. Flores, A. Samaniego, and W. Orozco, “Trenes: material rodante del transporte ferroviario,” p. 5, 2013.
- [17] R. Riviere, B. Caillaud, and Y. Simoni, “Descripción Técnica del Material Rodante - Documento de producción,” ALSTOM, Tech. Rep., 02 - 2015.
- [18] J. Defacq and Y. Simoni, “Memoria de cálculo cables de tracción y feeder - Documento de producción,” ALSTOM, Tech. Rep., 12 - 2014.
- [19] B. Standard, “Railway applications - Supply voltages of traction systems,” p. 7, 2004. [Online]. Available: [https://www.sica.es/download/gesti%C3%B3n\\_y\\_supervisi%C3%B3n/calidad\\_energ%C3%ADa/Norma50163.pdf](https://www.sica.es/download/gesti%C3%B3n_y_supervisi%C3%B3n/calidad_energ%C3%ADa/Norma50163.pdf)
- [20] A. Eugenio, *Introducción a la física: La energía: Transformaciones, transferencias y su aprovechamiento*, maipue ed., Maipue, Ed., 2016.
- [21] D. Seimbille, “Design of power supply system in DC electrified transit railways - Influence of the high voltage network,” p. 68, 2014.
- [22] A. Gómez-Expósito, J. M. Mauricio, and J. Maza-Ortega, “VSC-Based MVDC Railway Electrification System,” p. 10, 2014.
- [23] P. Estévez-Irizar, M. Varela-Cuadrado, and E. Iturritxa-Zubiri, “Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes,” pp. 978 – 984, 2012.
- [24] D. Rubio-Soto and M. Torrent-Burgués, “Caracterización de motores de inducción trifásicos en aplicaciones de tracción,” p. 75, 2014.
- [25] Z. Tian, S. Hillmansen, C. Roberts, P. Weston, L. Chen, N. Zhao, S. Su, and T. Xin, “Modeling and simulation of DC rail traction systems for energy saving,” in *17Th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, October 2014, pp. 2354 – 2359.
- [26] M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger, M. Conte, and M. Pasquali, “Use of electrochemical storage in substations to enhance energy and cost efficiency of tramways,” in *AEIT Annual Conference 2013*, October 2013, pp. 1 – 6.

## A. Anexos



## A. Anexos

---

```
% 137 valores
% # 33
%=====
% CORRIENTES DE LA VIA IZQUIERDA TRAMO 1
Tramo19Iz=[451,95;403,32;350,19;299,31;246,93;194,55;1
72,10;172,10;172,10;172,10;172,10;172,10;172,10;172,10
;172,10;-1430,45;-845,86;-431,05;-
123,90;92,43;139,86;410,44;582,77;657,80;684,96;677,85
;644,19;580,15;-475,90;-551,47;-553,72;-553,72;-
553,72;-538,75;-434,00;-313,52;-194,55;-
74,08;36,67;59,86;-1542,02;-1038,96;-592,51;-285,88;-
46,75;225,58;536,62;689,55;812,69;889,61;938,89;1026,9
1;-
9,73;39,66;89,04;139,93;189,31;238,70;288,83;338,97;38
9,10;429,51;434,00;434,00;434,00;434,00;434,00;434,00;
434,00;434,00;434,00;434,00;-1240,88;-484,87;-
96,90;180,88;377,60;244,42;591,92;696,68;711,63;670,48
;648,44;705,77;736,23;-329,24;-329,24;-329,24;-
320,26;-284,34;-247,68;-209,52;-172,10;-145,16;-
143,67;-143,67;-143,67;-143,67;-143,67;-143,67;-
1400,42;-857,03;-552,23;-312,54;-
176,98;147,54;381,73;573,86;743,85;855,63;952,65;1034,
20;1090,20;29,93;43,40;79,32;82,31;82,31;82,31;75,58;6
1,36;61,36;61,36;61,36;61,36;61,36;61,36;61,36;61,36;6
1,36;61,36;61,36;61,36;-1520,69;-1007,31;-574,21;-
272,26;-50,65];
% 138 valores
% # PK=521 VECTOR=108 VECTOR INVERT 33
%=====
stop=0;
Reloj=clk-0.5;
%=====
% an=0;
% AdDr=1; %General
% AdIz=1; %General
%=====
% an=-7;
% AdDr=41; %Consumo
% AdIz=113; %Consumo
%=====
an=-7;
AdDr=113; %Generacion
AdIz=41; %Generacion
%=====
% an=-7;
```

```
% AdDr=113; %Caso Especial
% AdIz=43; %Caso Especial
%=====
Posi2Dr=AdDr+an+fix(Reloj);
%=====
Posi19Iz=AdIz+an+fix(Reloj);
%=====
if Posi2Dr<=137
    a = Tramo2Dr(Posi2Dr,1);
    Control11Dr(Posi2Dr,1)=Tramo2Dr(Posi2Dr,1);
    PosiDr=Posi2Dr;
else
    stop=1;
end
%=====
if Posi19Iz<=138
    b = Tramo19Iz(Posi19Iz,1);
    Control5Iz(139-Posi19Iz,1)=Tramo19Iz(Posi19Iz,1);
    PosiIz=139-Posi19Iz;
else
    stop=1;
end
%=====
% Control de la via derecha
%=====
% Control de la via izquierda
%=====
% VECTORES DE CONTROL
Derecha=Control11Dr; % vector 140 queda libre
Izquierda=Control5Iz; % vector 1 queda libre
```



```

% CORRIENTE DE LA VIA IZQUIERDA TRAMO 2
Tramo13Iz=[52,50;304,64;627,51;785,61;182,28;182,28;18
2,28;182,28;191,71;197,54;197,54;197,54;197,99;205,18;
214,15;217,30;217,30;217,30;217,30;217,30;217,30;217,3
0;217,30;-712,40;-
83,64;222,55;265,25;645,92;848,29;1009,29;1103,66;978,
04;773,16;-266,38;-543,24;-598,62;-598,62;-598,62;-
663,71;-782,69;-793,17;-793,17;-793,17;-751,26;-
651,74;-552,22;-451,95;-382,37;-481,89;-1594,54;-
1295,79;-1057,85;-735,87;-
397,07;61,12;266,97;551,88;723,99;851,51;971,80;1182,0
6;1414,59;386,86;437,74;426,51;341,96;323,25;143,67;-
49,39;-10,48;-1433,42;-868,48;-643,03;-554,85;-
417,98;90,35;250,99;370,32;458,17;565,51;803,29;1035,9
9;1109,45;59,86;59,86;140,67;187,07;166,86;103,26;75,5
8;75,58;74,83;15,71;-77,07;-1374,25;-833,58;-532,30;-
293,50;-
156,70;153,78;398,47;606,01;810,69;954,61;1080,55;1252
,01;1388,52;327,74;407,06;462,43;463,93;463,93;463,93;
463,93;463,93;463,93];
% 116 valores
%=====
stop=0;
Reloj=clk-0.5;
%=====
% an=0;
% AdDr=1; %General
% AdIz=1; %General
%=====
% an=-7;
% AdDr=104; %Consumo
% AdIz=62; %Consumo
%=====
an=-10;
AdDr=118; %Generacion
AdIz=50; %Generacion
%=====
Posi9Dr=AdDr+an+fix(Reloj);
%=====
Posi13Iz=AdIz+an+fix(Reloj);
%=====
if Posi9Dr<=122
    a = Tramo9Dr(Posi9Dr,1);
    Control2Dr(Posi9Dr,1)=Tramo9Dr(Posi9Dr,1);
    PosiDerecha=Posi9Dr;

```

```
else
    stop=1;
end

%=====
if Posi13Iz<=116
    b = Tramo13Iz(Posi13Iz,1);
    Control4Iz(117-Posi13Iz,1)=Tramo13Iz(Posi13Iz,1);
    PosiIzquierda=117-Posi13Iz;
else
    stop=1;
end
%=====
% VECTORES DE CONTROL
Derecha=Control2Dr;
Izquierda=Control4Iz;
```



```

Tramo5Iz=[264, 653;651, 175;720, 311;127, 505;-38, 162;-
65, 548;-
32, 325;3, 143;39, 509;74, 977;109, 098;116, 730;116, 730;116
, 730;136, 035;167, 912;172, 850;172, 401;172, 850;182, 278;-
809, 251;-
155, 795;252, 869;660, 868;882, 724;318, 763;299, 457;233, 90
9;217, 297;216, 848;211, 461;179, 136;143, 219;118, 526;118,
077;119, 424;133, 342;151, 749;166, 116;167, 463;-673, 702;-
58, 153;80, 104;350, 255;641, 304;775, 925;167, 463;167, 463;
167, 463;167, 463;167, 912;167, 463;167, 463;167, 463;160, 72
8;151, 300;150, 402;150, 851;150, 402;150, 851;150, 402;150,
402;150, 851;150, 402;150, 851;169, 258;-
627, 020;31, 009;137, 346;468, 218;760, 204;819, 657;198, 890
;179, 585;179, 585;179, 585;179, 585;179, 585;182, 727;199, 7
88;217, 746;232, 113;233, 011;226, 726;219, 093;212, 359;208
, 318;207, 869;208, 318;208, 318;207, 869;208, 318;207, 869;2
08, 318;186, 319;100, 567;42, 651;61, 059;-886, 029;-
364, 751;64, 899;208, 911;566, 863;791, 971;231, 664;231, 215
;227, 175;119, 424;-
4, 490;31, 876;102, 812;107, 751;160, 728;222, 236;172, 401;7
6, 323;61, 508;-722, 335;-136, 494;];
% 119 valores
stop=0;
Reloj=clk-0.5;
%=====
% an=0;
% AdDr=1; %General
% AdIz=1; %General
%=====
% an=-3;
% AdDr=86; %Consumo
% AdIz=25; %Consumo
%=====
an=-7;
AdDr=30; %Generacion
AdIz=99; %Generacion
%=====
Posi15Dr=AdDr+an+fix(Reloj);
%=====
Posi5Iz=AdIz+an+fix(Reloj);
%=====
if Posi15Dr<=115
    a = Tramo15Dr(Posi15Dr,1);
    Control3Dr(Posi15Dr,1)=Tramo15Dr(Posi15Dr,1);
    PosiDerecha=Posi15Dr;

```

```
else
%     stop=1;
end
%=====
if Posi5Iz<=119
    b = Tramo5Iz(Posi5Iz,1);
    Control3Iz(120-Posi5Iz,1)=Tramo5Iz(Posi5Iz,1);
    PosiIzquierda=120-Posi5Iz;
else
    stop=1;
end
%=====
% VECTORES DE CONTROL
Derecha=Control3Dr;
Izquierda=Control3Iz;
```



```

867,24;-867,24;-861,26;-811,87;-793,17;-793,17;-
793,17;-793,17;-793,17;-793,17;-793,17];
% 125 valores
%=====
% CORRIENTE DE LA VIA IZQUIERDA TRAMO 4
Tramo2Iz=[871,73;872,48;871,73;872,48;865,75;814,87;76
0,24;748,27;748,27;748,27;748,27;771,47;854,52;867,99;
867,24;866,50;722,83;472,91;225,23;128,70;128,70;128,7
0;128,70;128,70;128,70;-1584,95;-1084,15;-585,07;-
259,30;9,51;227,37;550,29;717,16;850,68;965,57;1068,02
;1155,90;127,95;128,70;128,70;128,70;128,70;128,70;128
,70;128,70;128,70;127,95;128,70;128,70;128,70;128,70;1
28,70;128,70;128,70;127,95;128,70;124,21;74,83;-
1621,41;-1153,05;-650,85;-333,42;-
76,52;24,50;208,22;505,99;664,52;790,65;898,91;995,32;
1080,66;52,38;52,38;52,38;52,38;52,38;52,38;56,87;62,8
5;62,85;62,11;62,85;62,85;62,85;62,85;62,11;62,85;62,8
5;62,85;62,85;62,11;62,85;62,85;-1465,71;-923,24;-
522,72;-230,28;-
16,61;117,66;363,33;524,16;621,03;724,82;815,29;896,59
;956,69;-89,79;-89,79;-90,54;-89,79;-89,79;-89,79;-
89,79;-89,79;-89,79;-89,79;-89,79;-140,67;-219,24;-
1542,34;-1190,31;-838,97;-467,08;-230,06;-
157,39;141,91;323,76;455,40;676,23;754,73;805,25;944,1
2;1087,97;27,69;127,95;220,74;239,45;239,45;239,45;239
,45;239,45;239,45;239,45;240,19;269,38;-
1649,86;-1122,46;-486,31;-80,03;236,11;457,85];
% 125 valores
%=====
stop=0;
Reloj=clk-0.5;
%=====
% an=0;
% AdDr=1; %General
% AdIz=1; %General
%=====
% an=-7;
% AdDr=32; %Consumo
% AdIz=37; %Consumo
%=====
an=-4;
AdDr=45; %Genera
AdIz=147; %Genera
%=====
Posi15Dr=AdDr+an+fix(Reloj);

```

```
%=====
Posi2Iz=AdIz+an+fix(Relej);
%=====
if Posi15Dr<=147
    a = Tramo15Dr(Posi15Dr,1);
    Control4Dr(Posi15Dr,1)=Tramo15Dr(Posi15Dr,1);
    PosiDerecha=Posi15Dr;
else
    %    stop=1;
end
%=====
if Posi2Iz<=152
    b = Tramo2Iz(Posi2Iz,1);
    Control2Iz(153-Posi2Iz,1)=Tramo2Iz(Posi2Iz,1);
    PosiIzquierda=153-Posi2Iz;
else
    stop=1;
end
%=====
% VECTORES DE CONTROL
Derecha=Control4Dr;
Izquierda=Control2Iz;
```



```
Posi5Dr=AdDr+an+fix(Relej);
%=====
Posi1Iz=AdIz+an+fix(Relej);
%=====
if Posi5Dr<=29
    a = Tramo5Dr(Posi5Dr,1);
    Control5Dr(Posi5Dr,1)=Tramo5Dr(Posi5Dr,1);
    PosiDerecha=Posi5Dr;
else
    stop=1;
end
%=====
if Posi1Iz<=28
%     b = Tram01Iz(Posi1Iz,1);
%     Control1Iz(29-Posi1Iz,1)=Tram01Iz(Posi1Iz,1);
%     PosiIzquierda=29-Posi1Iz;
else
%     stop=1;
end
% VECTORES DE CONTROL
Derecha=Control5Dr;
Izquierda=Control1Iz;
```

## A.6. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 1

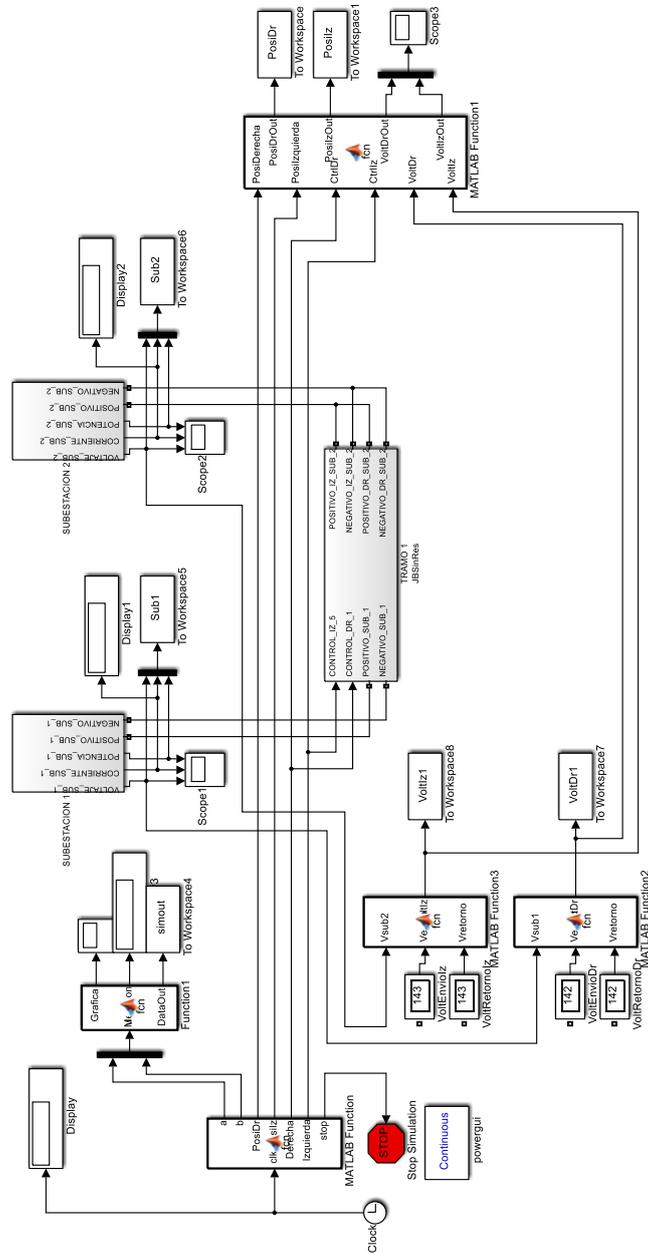


Figura A.1.: Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 1.

## A.7. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 2

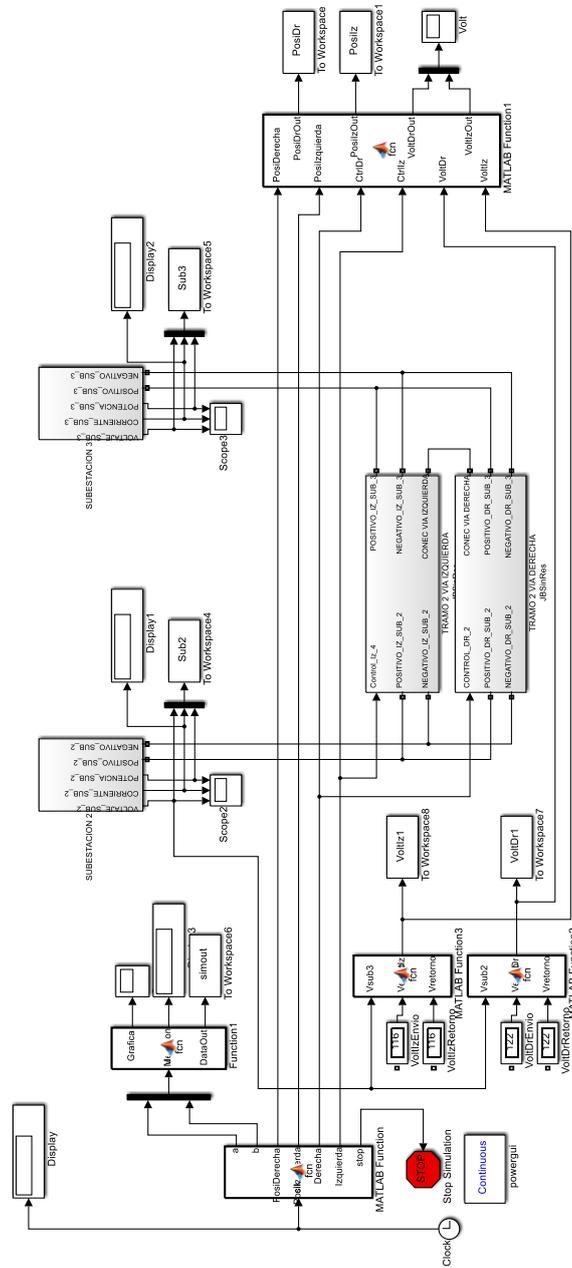


Figura A.2.: Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 2.

## A.8. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 3

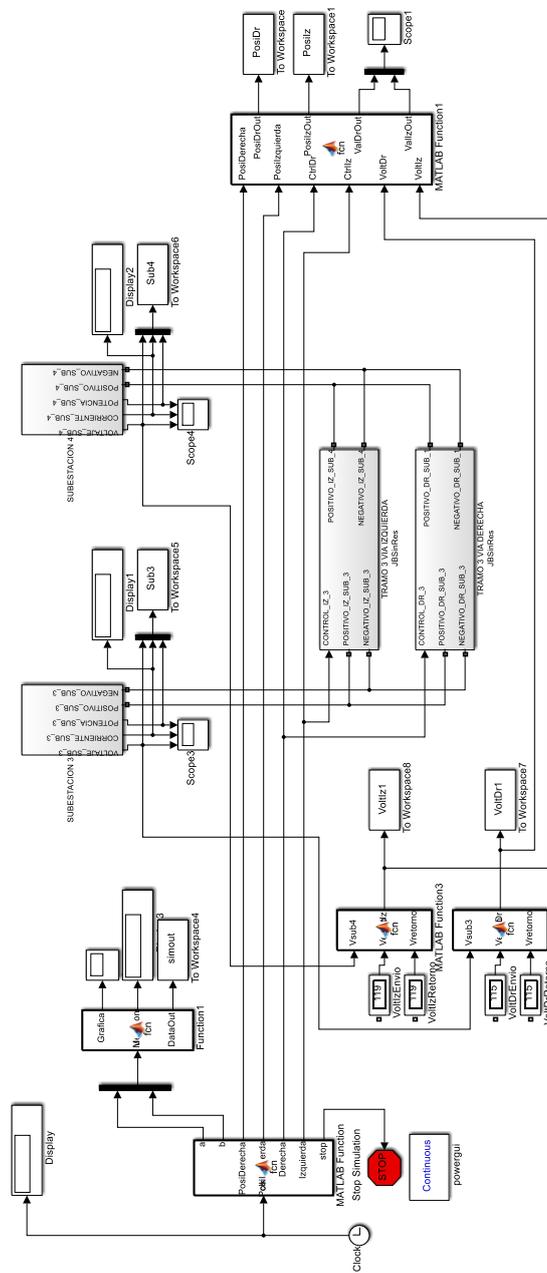


Figura A.3.: Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 3.

## A.9. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 4

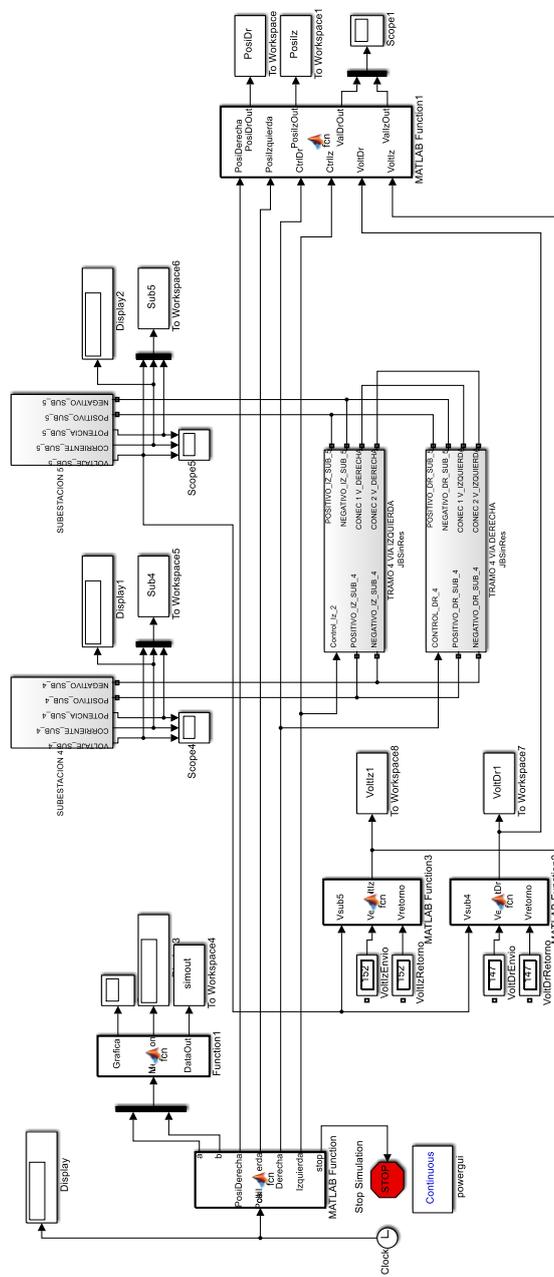


Figura A.4.: Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 4.

## A.10. Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 5

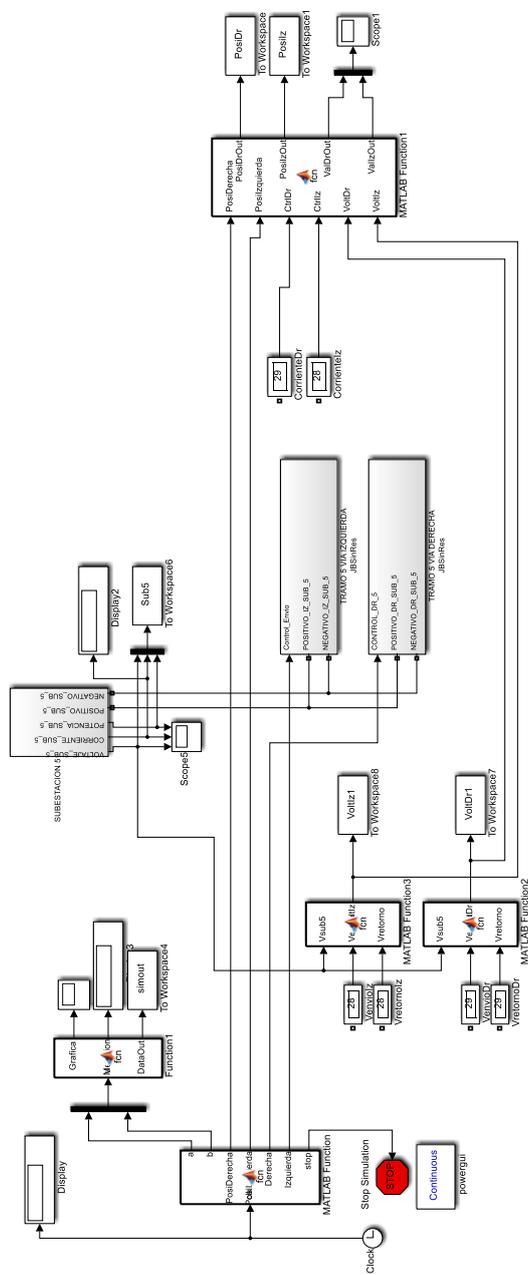


Figura A.5.: Modelo desarrollado en Simulink para el tramo 5.