



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Alexis Antonio Robles Navarro

Evaluación técnica y económica para la alimentación eléctrica de la línea 7 del Metro de Santiago

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 19 de noviembre del 2018



Evauación técnica y económica para la alimentación eléctrica de la línea 7 del Metro de Santiago

Alexis Antonio Robles Navarro

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Dr. Jorge Mendoza Baeza
Profesor Guía

Sr. Sebastián Fuentealba Toro
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 19 de noviembre del 2018

A todas las personas que me apoyaron en este largo camino, tíos, amigos, abuelos y en especial a mi pareja he hijo que en todo este tiempo han estado a mi lado apoyándome y comprendiéndome.

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera muy en especial a mi correferente, de la empresa Metro de Santiago Don Sebastián Fuentealba, quien fue el gestor de este tema de título, además por su constante orientación, apoyo y buena disposición a lo largo de este trabajo. Junto a esto agradecer también a mi profesor guía Don Jorge Mendoza quien acepto desde el primer día a desarrollar en conjunto este proyecto de titulación.

Agradezco el apoyo de toda mi familia, tíos, abuelos, padres, pero de forma muy especial a mi pareja Tamara Veliz y mi hijo Vicente Robles quienes me han acompañado desde el comienzo de esta difícil etapa de mi vida, juntos hemos tenido que pasar por altos y bajos. Pero me atrevo a decir que sin el apoyo de ellos esto no hubiera sido posible.

También quiero agradecer el apoyo brindado a la empresa de transporte y pasajeros Metro S.A. quien, a través de la gerencia de ingeniería y proyectos operacionales, fue posible desarrollar este trabajo de título, en especial a todas las personas involucradas del área de ingeniería energía y electromecánica, Manuel Penroz, Sebastián Tapia, Edgard Cassaigne, Fabian Elgueta, Diego Alfaro, y Emilio Zavala quienes fueron un aporte en el trabajo de título realizado.

Finalmente agradecer a todos mis amigos y compañeros que estuvieron apoyándome, tanto en los primeros años de carrera, como también a los que han estado en estos últimos años. Imposible olvidar las largas noches de estudio, y los momentos gratos compartidos.

Valparaíso, 19 de noviembre de 2018

Alexis Antonio Robles Navarro

Resumen

La empresa de transportes y pasajeros Metro de Santiago S.A. tiene por objetivo la realización de todas las actividades propias del servicio de transporte de pasajeros en ferrocarriles metropolitanos u otros medios eléctricos complementarios y las anexas a dicho giro, pudiendo con tal fin ejecutar cualquier acto u operación relacionados con el objetivo social [1].

En los últimos años Metro de Santiago ha experimentado un aumento sustancial en la afluencia de pasajeros llegando a 685,1 millones de viajes, lo que significó un aumento del 2,2% en comparación al año 2016, con estas cifras se demuestra que el tren subterráneo continúa siendo protagonista del transporte público capitalino.

Metro de Santiago destina importantes recursos a estudios y proyectos de inversión, tanto de expansión de su red como de mantención y manejo de la infraestructura actual. La inversión en expansión tiene como objetivo consolidar a Metro como la protagonista del sistema de transporte público de la capital, es así donde el objetivo de esta memoria es contribuir con los nuevos proyectos y en específico, con el proyecto de la línea 7 del metro de Santiago.

El proyecto de la línea 7, contempla un trazado de 24,8 kilómetros que beneficia a las comunas de Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Santiago, Providencia, Las Condes y Vitacura, beneficiando a una población estimada de 1 millón 365 mil habitantes. Esta considera una inversión de más de USD 2.500 millones.

Este trabajo de título tiene como finalidad estudiar la alimentación eléctrica de tracción del material rodante asociado a esta línea, por medio de la simulación del software SimMetro 2011, que es una aplicación diseñada por la empresa Insight Ltda. y el, como también realizar una evaluación económica de la opción más conveniente en cuanto a alimentar el centro de distribución de carga de la línea anteriormente mencionada.

Palabras claves: Subestación de tracción, ferrocarril metropolitano, centro de distribución de carga, electrificación, corriente continua, Metro de Santiago.

Abstract

The Company of Transports and Passengers Metro S.A. Its objective is to carry out all the activities of the Passenger Transport Service in railways Metropolitan or other Complementary electric means and the annexes a said turn, being able to carry out any act related to the operation with the social objective [1].

In the last years Santiago Metro has experienced an increase in the substantial influx of passengers reaching this to 685.1 million trips, what an increase of 2.2% compared to 2016 With these figures is that the subway train continues to be protagonist of the capital public Transport.

Metro de Santiago Destina Important Resources a Studies and Projects of Investment, of the so much of expansion of its Network of As maintenance and handling of the current infrastructure. The Expanding Investment Has as Objective To consolidate a metro As the protagonist of the Public Transport System of the capital, its So Where the objective m of this memory is Contribute with the New Projects And in Specific, with the Project of the Line 7 of the Metro from Santiago.

The Project of Line 7, Contemplates the UN plot of 24.8 Kilometers That benefits the communes of Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Santiago, Providencia, Las Condes Vitacura and, benefiting an ANU Estimated Population of 1 Million 365 thousand Inhabitants . This considers an investment of more than 2,500 million dollars.

This title work has as purpose to study the electrical power of traction of rolling stock associated with this line, by means of the simulation of SimMetro 2011 software that is an application by the company designed Insight Ltda. And El, as well as to carry out an evaluation Economic of the Option More convenient is a How Much to Feed the Load Distribution Center of the aforementioned Line.

Key words: Traction substation, metropolitan railway, load distribution center, electrification, direct current, Santiago Metro.

Índice general

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 1 |
| 1 Antecedentes y objetivos | 3 |
| 1.1 Historia | 3 |
| 1.2 Descripción del proyecto de titulación..... | 4 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 5 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 5 |
| 1.2.3 Alcances..... | 5 |
| 2 Características del Metro de Santiago | 6 |
| 2.1 Sistema de alimentación | 6 |
| 2.1.1 Subestación eléctrica de alta tensión (SEAT) | 7 |
| 2.1.2 Centro de distribución de cargas (CDC)..... | 10 |
| 2.1.3 Subestación eléctrica de rectificación (SER)..... | 11 |
| 2.1.4 Subestación de alumbrado y fuerza (SAF) | 13 |
| 2.2 Sistema de captación de la corriente | 13 |
| 2.2.1 Barra guía (Rodadura neumática) | 13 |
| 2.2.2 Tercer riel (Rodadura férrea) | 14 |
| 2.2.3 Catenaria rígida (Rodadura férrea) | 15 |
| 2.2.4 Vía o riel (Retorno eléctrico) | 16 |
| 2.3 Proyecto línea 7 del Metro de Santiago..... | 17 |
| 2.4 Estrategia de trabajo. | 20 |
| 3 Herramienta para ubicación de SER | 21 |
| 3.1 Procedimientos, metodología de cálculo | 21 |
| 3.1.1 Norma IEC 60.146..... | 21 |
| 3.1.2 1ª restricción: Potencia Nominal | 21 |
| 3.1.3 2ª restricción: Caída de tensión..... | 22 |
| 3.2 Simulación, software SimMetro 2011 | 25 |
| 3.2.1 Funcionamiento | 25 |
| 3.2.2 Componentes del modelo | 26 |
| 3.2.3 Material rodante | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.4 Funciones de cálculo, limitaciones y mejoras | 32 |
| 4 Características de la Línea 7 y simulación | 34 |
| 4.1 Parámetros | 34 |
| 4.1.1 Características de la línea 7 | 34 |
| 4.1.2 Estaciones y perfil de velocidad | 34 |
| 4.1.3 Pendientes del trazado..... | 35 |
| 4.1.4 Parametros operacionales de interestaciones | 36 |
| 4.1.5 Parametros eléctricos de la vía. | 37 |
| 4.1.6 Características del material rodante | 41 |
| 4.1.7 Características del grupo rectificador (SER) | 44 |
| 4.2 Normativa | 45 |
| 4.2.1 Tensión y frecuencia | 46 |
| 4.2.2 Parámetros de rendimiento del sistema de alimentación eléctrica | 47 |
| 4.3 Criterios de operación y simulaciones | 50 |
| 4.3.1 Resultados para 5 SER a 90 segundos de despacho..... | 50 |
| 4.3.2 Resultados de potencia, para subestación rectificadora de tracción SER..... | 54 |
| 4.4 Conclusiones del capítulo | 56 |
| 5 Alimentadores | 59 |
| 5.1 Rutas y características | 59 |
| 5.2 Rutas a establecer | 60 |
| 5.2.1 Primera ruta | 60 |
| 5.2.2 Segunda ruta | 61 |
| 5.2.3 Conclusión de ruta | 62 |
| 5.3 Análisis técnico y económico del tramo Neptuno - San Pablo | 62 |
| 5.3.1 Alternativa 1: Túnel | 64 |
| 5.3.2 Alternativa 2: Postación | 66 |
| 5.3.3 Alternativa 3: Soterrado | 67 |
| 5.3.4 Conclusiones del análisis..... | 69 |
| 5.4 Proyección de demanda energética y potencia a instalar | 70 |
| 5.5 Metodología de cálculo y estudio de alimentadores | 72 |
| 5.5.1 Dimensionamiento eléctrico..... | 72 |
| 5.5.2 Corriente nominal y diseño | 73 |
| 5.5.3 Factor de seguridad (F ₁)..... | 74 |
| 5.5.4 Factor de corrección por cantidad de conductores en ductos (F ₂)..... | 74 |
| 5.5.5 Factor de corrección por variación de la temperatura ambiente (F ₃)..... | 74 |
| 5.5.6 Factor de corrección conductor en EPC (F ₄) | 75 |
| 5.5.7 Capacidad de corriente..... | 76 |
| 5.6 Dimensionamiento por capacidad al cortocircuito..... | 76 |
| 5.6.1 Corriente cortocircuito para dimensionamiento de cables. | 76 |
| 5.7 Resumen del calculo de conductores..... | 77 |
| Discusión y conclusiones..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| Bibliografía | 80 |
| A Parametros y tensiones de la vía por simulaciones | 82 |
| A.1 Parametros de línea 7 | 82 |
| A.2 Grafica de tensión en pantógrafo de trenes traccionando | 83 |
| B Potencia de SER por simulación y potencia de SAF proyectada | 96 |
| B.1 Figuras SER, simulación 90 segundos de despacho (Curva de carga AW Figura 4-6) | 96 |
| B.2 Figuras SER, simulación 90 segundos de despacho (Curva de carga AW al 100% de exigencia) | 98 |
| B.3 Figuras SAF, Cuadro de carga de estaciones en linea 6..... | 101 |
| C Riesgos de operación y evaluación económica | 103 |
| C.1 Túnel..... | 105 |
| C.2 Postacion..... | 105 |
| C.3 Soterrado..... | 107 |
| D Conductores | 109 |
| D.1 Características y ficha técnica monoconductor 22 kv al 133% de aislación | 109 |

Introducción

Hasta la mitad del siglo *XIX* la ciudad de Santiago no requería de un sistema de transporte público, ya que aún era posible recorrer a pie mucho de sus trayectos (la ciudad mantenía un ritmo cansino y premoderno). No obstante, su rápida y progresiva expansión demográfica y económica demandó una red de transporte capaz de relacionar lo más rápido posible las distintas áreas de la ciudad. Así en el año 1857 se inauguró en la Alameda una línea de carros de sangre, el primer medio de transporte público capitalino. Años más tarde sucedieron varios cambios importantes a la red de transporte capitalino, como lo fueron la aparición de las “góndolas” (buses a gasolina) en 1922 también los “trolleybuses” en 1947, estos últimos dejaron de circular en 1957, dando paso a los microbuses a combustible diésel.

Años más tarde, en la capital, ya se tenía un transporte consolidado de micros, pero en 1965 se fortaleció el proyecto de construir un ferrocarril subterráneo en la capital como parte de un plan para lograr un tránsito más rápido en la ciudad. Luego de varios estudios, el 29 de mayo de 1969, el gobierno encabezado por el presidente Eduardo Frei Montalva comenzó con la construcción de la línea 1 del Metro de Santiago en la esquina de la Alameda con las Rejas. Inaugurándose más tarde en el año 1975[2].

Metro de Santiago en el año 2007, pasa a ser el actor principal del transporte metropolitano de la capital, con la implementación del nuevo sistema público de transporte denominado “Transantiago” el cual establece como columna vertebral del transporte metropolitano, al ferrocarril metropolitano incrementando su afluencia en un 81%.

A través del tiempo Metro de Santiago, ha ido expandiendo su red, en conjunto con la expansión demográfica que ha llevado a cabo la ciudad. Esta expansión ha ido de la mano de los cambios y adelantos tecnológicos que es posible ver reflejado en las distintas Líneas que componen el sistema de red ferroviaria metropolitana.

Actualmente el sistema de red ferroviaria metropolitana es considerado uno de los más modernos de latino América, debido a la recientemente inauguración de la línea 6 (noviembre, 2017) la cual posee pilotaje automático de trenes, esta tiene una extensión de 10 kilómetros que conecta a siete comunas de la capital en un tiempo aproximado de 20 minutos. Además, se espera que a finales del 2018 entre en operación la nueva línea 3, agregando a la red 21,7 kilómetros, con esto

se espera que la red de metro complete un total de 142 kilómetros de extensión, convirtiéndose esta en el número 25° de la red más extensa del mundo y el segundo a nivel latino americano.

Los nuevos proyectos de la estatal esperan reducir hasta un 70% los tiempos de viaje de 2,7 millones de personas, lo que implicara aumentar significativamente la velocidad de construcción de las líneas existentes hasta ahora, pasando de 5,3 km/año a construir 8,3 km/años, por lo que los estudios implicados al área eléctrica serán de gran importancia para la continuación de las futuras expansiones de la red.

Este proyecto de título, desarrolla principalmente las características técnicas y económicas de la alimentación eléctrica desde la subestación eléctrica de alta tensión, hacia el centro de distribución de carga, mediante alimentadores de media tensión, en donde son distribuidos hacia las futuras subestación de rectificación de tracción y subestación de alumbrado y fuerza; respectivamente

Además de esta introducción, este trabajo de titulación se compone de cinco capítulos. En el capítulo uno, se hace una descripción general de lo que es la empresa de transportes y pasajeros Metro S.A. su historia sus hitos, una pequeña descripción del proyecto Línea 7, alcances y objetivos. En el capítulo dos se hace hincapié a las distintas formas de alimentar el material rodante, a través de distintas tecnologías, describiendo cada una de ellas y estableciendo las rutas actuales para alimentar los distintos puntos de la red. En el capítulo tres se describe dos formas de calcular el número de subestaciones de rectificación de tracción, para fines prácticos solo se realizará el cálculo de estas a través del simulador SimMetro S.A. En el capítulo cuatro, describe los distintos parámetros de diseño de la línea férrea como el material rodante del proyecto de la nueva línea 7 del metro de Santiago, lo que es necesario a la hora de simular el comportamiento de tracción de esta línea. En el capítulo cinco, con la información recopilada de los ítems anteriores, se describe y se evalúa las dos alternativas que se presentan bajo las condiciones descritas, estableciendo la ruta más efectiva para la eventual alimentación eléctrica de la nueva línea 7 del Metro de Santiago.

1 Antecedentes y objetivos

Este capítulo tiene como finalidad dar a conocer al lector los antecedentes relevantes, de la historia de la empresa de transportes y pasajeros Metro S.A. también se incorpora una breve descripción de los temas a tratar y sus objetivos a seguir para un correcto desarrollo.

1.1 Historia

En el año 2017 Metro de Santiago celebró 42 años de operación. El tren subterráneo ha ido creciendo junto a Santiago y sus ciudadanos, y se ha convertido en una parte importante de la historia y el desarrollo económico de la ciudad. En promedio el 2017 se registró alrededor de 2.5 millones de viajes por día laboral.

Metro de Santiago nace de la preocupación de las autoridades con que Santiago cuente con un medio masivo de transporte. Así a mitad del siglo XX, se comienza a mirar, como las grandes ciudades del mundo solucionan el problema que trae consigo el crecimiento y la densificación poblacional en la ciudad. Tras el análisis de distintas alternativas que ayuden a solucionar los problemas de congestión vial, la más recurrida y aceptada fue la de un transporte subterráneo para la ciudad.

El 24 de octubre de 1968, el entonces presidente de la república, Eduardo Frei Montalva, firmó el decreto que marca el nacimiento del metro de Santiago. El proyecto quedó en manos de la dirección general de obra públicas a través de su dirección de planeamiento.

El primer tren salió a la línea el 15 de mayo de 1975, recorriendo San Pablo y Estación Central, luego de un periodo de cuatro meses de marcha blanca, se inició oficialmente las operaciones las que continúan hasta la actualidad. Dos años más tarde se entregó la primera extensión de la línea 1 y así continuó una serie de extensiones y nuevos proyectos, que fueron masificando sus recorridos a lo largo de la ciudad, la que fue extendiéndose gracias a la actividad económica.

El 2007 se inaugura el nuevo sistema de transporte de la capital, denominado Transantiago en que metro de Santiago pasó a formar en parte de él, este sistema significó un enorme desafío para la empresa la que duplicó su demanda al incorporar nuevos clientes. Por lo cual Metro se hizo más masivo duplicando con ello su rentabilidad social.

Metro de Santiago a lo largo de sus últimos años ha crecido continuamente buscando una mejora continua a lo largo de todos sus procesos, como lo son estos: Nuevas expansiones con la más moderna tecnología en pilotaje automático (Línea 6 y prontamente Línea 3), Mejoramiento de disminución de tasas de averías, logrando reducir a casi la mitad las fallas de alto impacto y bajar el tiempo de impacto a clientes y la incorporación del plan de accesibilidad del sistema de transporte, que involucra la construcción de más de 100 ascensores en 37 estaciones de la red, el objetivo de esta medida es que personas con discapacidad o movilidad reducida pueda desplazarse dentro y hacia las salidas de las estaciones [3].

1.2 Descripción del proyecto de titulación

En este proyecto de titulación se hace una introducción a los lineamientos de la empresa, el desarrollo de esta a través del tiempo, tecnología disponible y las distintas formas de alimentación existentes en la red, para la alimentación del material rodante.

Además, se presenta toda la red de alimentación necesaria para poder operar las distintas Líneas y talleres, estaciones y todo servicio que involucre la movilidad de los pasajeros, ya que la falta de este hace imposible operar el servicio a los niveles actuales ofertados.

Una vez analizados estos puntos anteriormente mencionados se hará hincapié a las distintas normativas, para establecer una correcta interoperabilidad del sistema ferroviario; para ello se apoyará en el documento base de la unión europea denominado “Interoperabilidad del Sistema Ferroviario Dentro de la Unión Europea” (ETI), para el estudio se enfocará principalmente los ítems sobre seguridad y requisitos mínimos que deberá cumplir la Línea férrea para una correcta interoperabilidad del sistema. Para ello será necesario realizar un estudio vía simulación de la red con los materiales rodantes involucrados.

Posteriormente, en base de los resultados obtenidos se podrá diseñar los alimentadores mediante las distintas normativas existentes para la red de media tensión, sin olvidar el análisis económico que este involucra para determinar la mejor alternativa de alimentación eléctrica de la futura Línea 7 del ferrocarril subterráneo de la capital de Santiago de Chile.

1.2.1 Objetivo general

- Estudiar y analizar la alternativa más conveniente para la alimentación eléctrica de la línea 7 del metro de Santiago, en términos de inversión y costos de operación con alta confiabilidad y seguridad.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar las diferentes alternativas para alimentar la línea 7, considerando costos económicos e independencia del suministro.
- Comprender la operación y las consideraciones técnicas de diseño del sistema de transporte eléctrico (metro), para proyectar una explotación robusta del sistema.
- Aplicar la normativa vigente en la unión europea, como guía para cumplir con las especificaciones técnicas de interoperabilidad del material rodante, considerando el criterio de operación N-1.
- Analizar y realizar proyecciones de demanda energética de la nueva Línea 7, para un correcto dimensionamiento de los conductores.

1.2.3 Alcances

Los alcances y limitaciones de este estudio son:

- Debido a que el proyecto se encuentra recién en etapa de ingeniería básica, se realizaran en algunos casos supuestos, fundados en la experiencia de la construcción de las nuevas líneas 6 y 3, esto debido a la similitud con el nuevo proyecto.
- La normativa relacionada directamente con la explotación de trenes, se considerará la utilizada en Europa preferentemente las normativas europeas (en consideración que Chile no dispone de normativa propia para estos casos), debido a que Metro de Santiago cuenta principalmente con un estándar europeo en toda su red actual.
- Toda proyección o diseño planteado será diseñado bajo el criterio N-1, que establece un estándar de planificación y operación de los sistemas eléctricos, de manera que estos puedan enfrentar la falla de alguno de sus componentes, sin que dicha falla genere una caída general del sistema, o provoque una operación de las instalaciones por sobre sus capacidades permitidas [4].

2 Características del Metro de Santiago

En los siguientes ítems, se expondrán las características técnicas, más relevantes que acompañan a la red de trenes metropolitano de la ciudad de Santiago. Esto ayudara a comprender de mejor manera las distintas tecnologías existentes y como se realiza la distribución eléctrica para los distintos subsistemas.

2.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación eléctrica y la energía que este proporciona, es principalmente un producto absolutamente necesario para su operación y para la continuidad del servicio, ya que sin este no es posible realizar el traslado de pasajeros y sus servicios auxiliares.

Hoy en día, a escala global, casi la mitad de las redes ferroviarias de tracción eléctrica tiene el sistema de tracción en corriente continua. En los sistemas de metro y tranvía, las tensiones que normalmente utilizan, son de 600 V y 750 V. En el resto de los sistemas ferroviarios en corriente continua, las tensiones 1.500 V y 3.000 V, en función de la potencia y el número de trenes que circula por la línea [5]. El sistema de tracción eléctrico de tracción de Metro de Santiago, opera en 750 V de corriente continua nominal, para sus líneas (1, 2, 4, 4A y 5), en cambio para las líneas (3 y 6) operan con una tensión de 1.500 V de corriente continua nominal.

Metro de Santiago dispone de un sistema de alimentación que le permite disminuir la exposición ante cortes en el suministro, esto es gracias a que cada subestación eléctrica de alta tensión cuenta con dos puntos de conexión con el sistema eléctrico nacional (SEN), por lo tanto se tiene conexión directa en cuatro puntos del SEN, que alimentan las Líneas 1, 2, 5, 6 y prontamente la Línea 3 (ver Figura 2-2), junto a esto cuenta con dos puntos más para la alimentación de la línea 4 y 4A (ver Figura 2-3). En resumen la empresa actualmente cuenta con tres sistemas de alimentación de energía eléctrica y cada uno de ellos se encuentran duplicados, esta condición cumple con el criterio de contingencia N-1 del sistema, es decir los mecanismos de control operacional se encuentran diseñados con criterios redundantes, estos funcionan de manera stand by, de manera que, ante la ausencia de uno de los sistemas, el otro entra en operación en forma indeterminada manteniendo la operación normal de la red [4].

Tabla 2-1 Características generales de las líneas (Fuente: Metro de Santiago)

| | Tensión de operación | Extensión en [km] | N° de SER Monogrupa | N° de SER Bigrupa |
|----------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Línea 1 | 750 Vdc. | 20.4 km. | 1 | 9 |
| Línea 2 | 750 Vdc. | 20.7 km. | 6 | 4 |
| Línea 3 | 1.500 Vdc. | 21.7 km. | - | 4 |
| Línea 4 | 750 Vdc. | 24.7 km. | 1 | 8 |
| Línea 4A | 750 Vdc. | 7.7 km. | - | 2 |
| Línea 5 | 750 Vdc. | 29.7 km. | 10 | 5 |
| Línea 6 | 1.500 Vdc. | 15.3 km. | - | 3 |

La empresa, actualmente tiene un consumo promedio anual 519 GWh proyectado para el año 2019 (Fuente: Metro de Santiago), este consumo se divide en dos grandes grupos, en donde el 70% representa el consumo de tracción del material rodante y el 30 % en alumbrado y fuerza de las interestaciones entre otros. A continuación, se desglosa los consumos por las distintas líneas operativas y una proyección de la línea 3 (con fecha de inauguración, diciembre 2018/enero 2019) Tabla 2-1 y Tabla 2-2. Estas se encuentran desglosadas en dos grupos, debido a que la subestación eléctrica de alta tensión SEAT Neptuno y SEAT Lord Cochrane son los encargados de alimentar las líneas 1, 2, 3, 5, 6; por otra parte, el centro de distribución de cargas (CDC) Vicente Valdés es el encargado de alimentar las líneas 4 y 4A, los que se detallan más adelante.

Tabla 2-2 Consumos proyectados para el año 2019 SEAT Neptuno (NP) y SEAT Lord Cochrane (LC), (Fuente: Metro de Santiago)

| | Línea 1 | Línea 2 | Línea 3 | Línea 5 | Línea 6 | SEAT | CCA | SEAT NP |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------|-----|---------|
| Consumo Energía (GWh) | 135 | 83 | 46 | 137 | 33 | 3 | 1 | 438 |

Tabla 2-3 Consumo proyectado para el año 2019 CDC Vicente Valdés (Fuente: Metro de Santiago)

| | Línea 4 | Línea 4A | Vicente Valdés |
|-----------------------|---------|----------|----------------|
| Consumo Energía (GWh) | 70 | 10 | 80 |

2.1.1 Subestación eléctrica de alta tensión (SEAT)

El sistema cuenta con dos subestaciones eléctricas de alta tensión, la primera es de propiedad de la empresa Metro de Santiago (SEAT Lord Cochrane), ubicada en el CCA y la segunda es propiedad de la empresa Transelec (SEAT Neptuno), ubicada en las cercanías de la interestación Neptuno,

estas realizan un retiro importante de energía eléctrica, directamente al sistema eléctrico nacional (SEN), a continuación, se muestra en la Figura 2-1 los diagramas unilineales simplificado de estos.

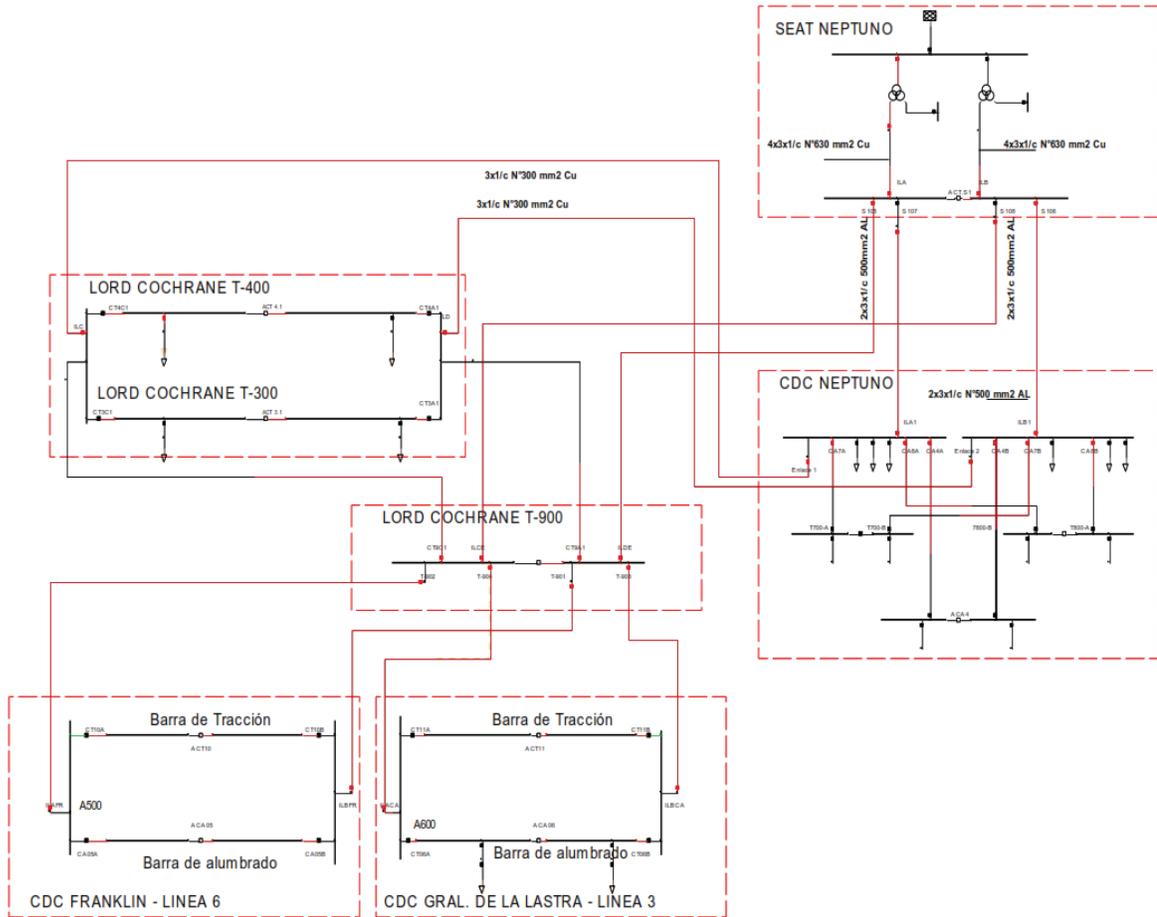


Figura 2-1 Diagrama unilineal de SEAT Neptuno y Lord Cochrane

Actualmente el sistema cuenta con una capacidad en el SEAT Neptuno de dos transformadores (220/20.4 kV) de 80 MVA cada uno, ampliable a 4 x 80 MVA, y en el SEAT Lord Cochrane se dispone de tres transformadores (110/20 kV) de 40 MVA, respectivamente. Estos alimentadores no permiten realizar transferencias de energía entre ellos, por lo que se hace necesario constar con dicho respaldo ante situaciones de emergencia en alguno de los alimentadores. Cabe mencionar que los distintos departamentos ya se encuentran trabajando en dichas mejoras, esto con la finalidad de brindar mayor respaldo y confiabilidad al sistema, que ayudara en gran medida con la continuidad del servicio.

En la Figura 2-2, es posible observar su ubicación geográfica de sus instalaciones, además es importante mencionar que la subestación eléctrica de alta tensión Lord Cochrane, es la primera que entro en operación, por lo que la disponibilidad de espacio físico para una futura ampliación no es factible.

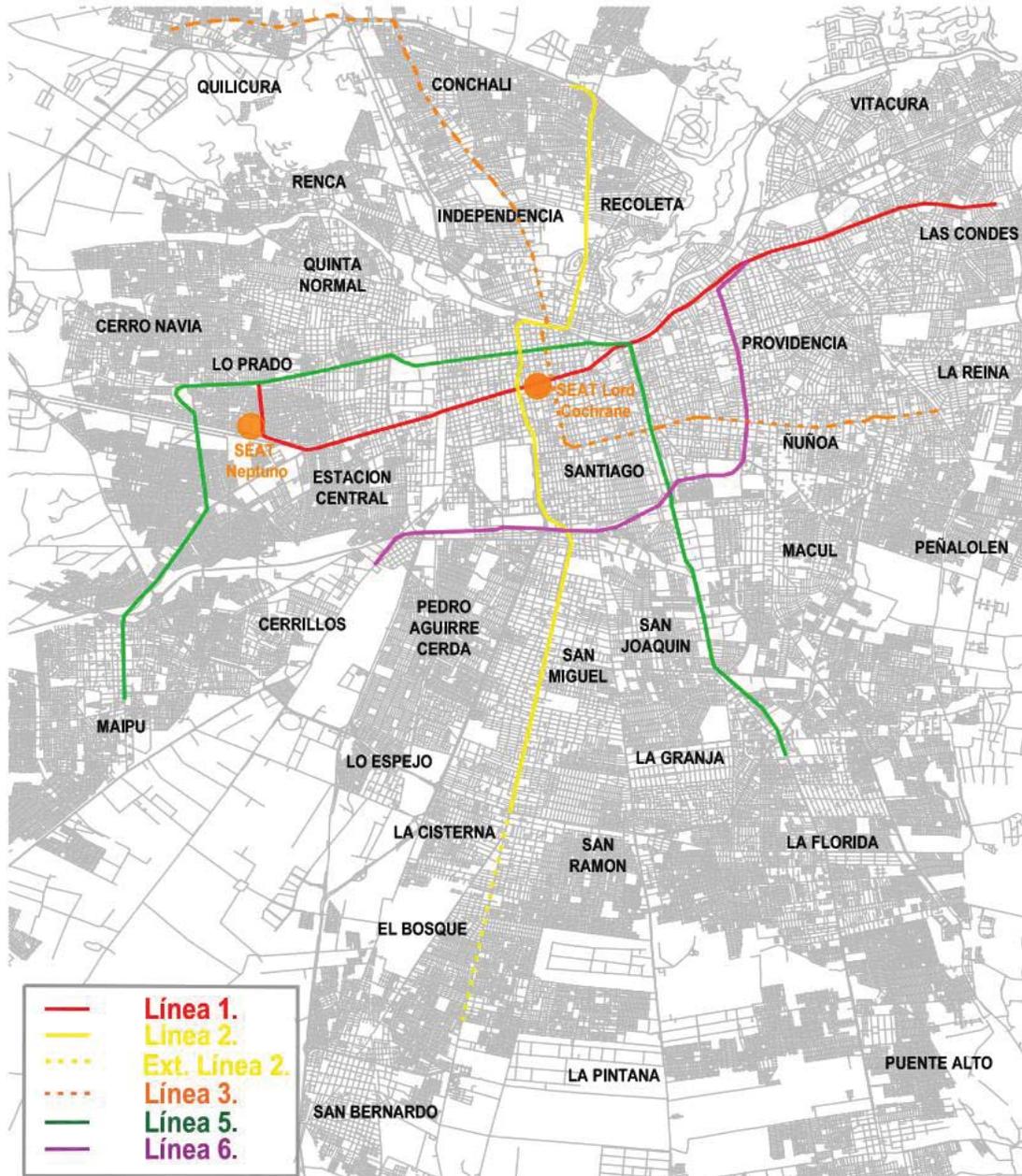


Figura 2-2 Red de Metro alimentado por SEAT (Neptuno/Lord Cochrane)

Para la alimentación eléctrica de las líneas 4 y 4A, se realiza mediante la distribución de energía del centro de distribución de carga (CDC) Vicente Valdés, que a su vez se encuentra alimentado por dos subestaciones que pertenecen a la empresa ENEL (Subestación eléctrica Macul y Santa Raquel), las que proporcionan alimentadores en media tensión (20kV). En la Figura 2-3, es posible georreferenciar su ubicación física.

Es importante mencionar que la distribución de los alimentadores en 20 kV, es realizada a través de bandejas y canaletas destinadas ubicadas en los costados de la vía (Túneles, viaducto o superficie).

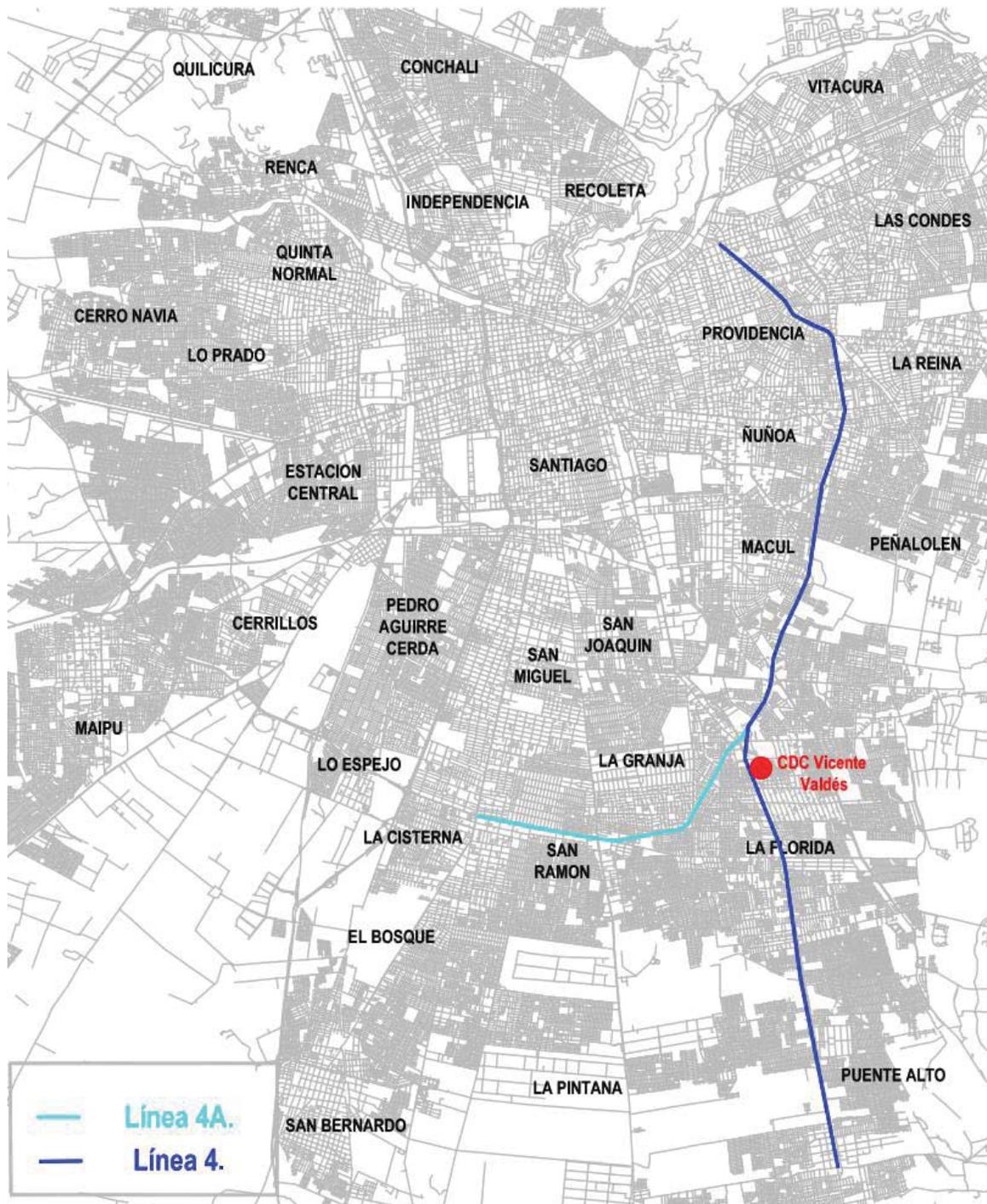


Figura 2-3 Red de Metro alimentada por CDC Vicente Valdés

2.1.2 Centro de distribución de cargas (CDC)

El Centro de distribución de cargas (CDC), es un recinto encargado de distribuir la alimentación eléctrica de media tensión 20kV en corriente alterna, tanto de las SAF como de las SER. Este recinto se ubica en un punto de la línea a alimentar y contiene las celdas de media tensión,

interruptores, seccionadores, relés de protecciones entre otros dispositivos. Estos equipos permiten ser operados por el sistema SCADA que permite comandar y controlar cada uno de ellos.

2.1.3 Subestación eléctrica de rectificación (SER)

Las subestaciones eléctricas de rectificación (SER) son las encargadas de proporcionar la energía eléctrica de tracción del material rodante y sus servicios auxiliares. Para el caso de todas las líneas que operan en el Metro de Santiago, la corriente es proporcionada en forma de corriente continua (D.C), esta energía es captada de diferentes formas (como se explican en el ítem 2.2).

La SER se ubica en los recintos dentro de las estaciones, como también así al interior del túnel, estas en ocasiones pueden ser ubicadas al exterior, cercana a una interestacion de metro.

La rectificación de la tensión se realiza por medio de rectificadores que comúnmente utilizan diodos de potencia y tiristores de potencia (estos son de alta capacidad de sobrecarga y una alta tensión de bloqueo). Para el caso de los frenados regenerativos del material rodante, estas SER, por su diseño no cuentan con la capacidad de inyectar la energía generada al sistema, por lo que solo será posible recuperar está a través de los trenes más próximos, o en el peor de los casos se disipará en forma de calor en la línea.

El esquema básico de una subestación de rectificación con un rectificador hexafasico, de 6 pulsos, se muestra en la Figura 2-4. Este tipo de subestación consta de un transformador trifásico, en donde el primario del transformador se conecta a la red de distribución de media tensión de 20kV y en el secundario se conecta al puente rectificador.

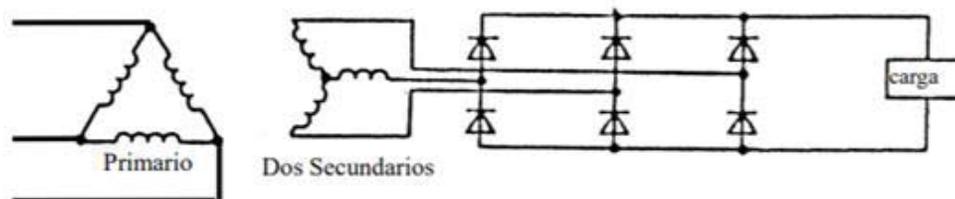


Figura 2-4 Rectificador hexafásico, 6 pulsos (puente graetz)

En el esquema de una subestación de rectificación con un rectificador, de 12 pulsos, se muestra en la Figura 2-5. Este tipo de subestación consta de un transformador trifásico de 3 enrollados, en donde el primario del transformador es conectado a la red de distribución de media tensión de 20kV y el lado secundario consta de dos enrollados, cada uno de ellos acoplado a uno de los secundarios con las configuraciones en estrella y delta como se muestra en la Figura 2-5.

De esta forma, las tensiones de salida de la configuración en triangulo estarán desfasados -30° respecto de la configuración en estrella y se obtendrán 12 pulsos rectificadas en lugar de seis.

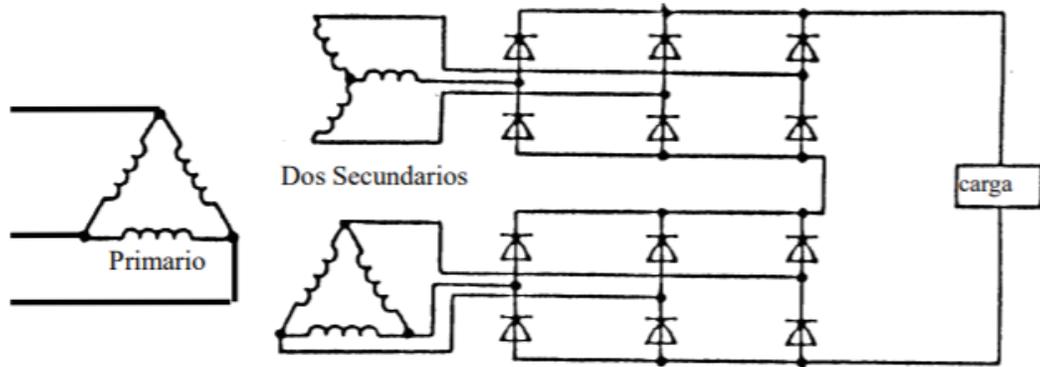


Figura 2-5 Rectificador dodecafásico, 12 pulsos (formado por dos puentes de graetz hexafásico)

La alimentación de las SER se realiza de forma radial, alimentando en la mayoría de los casos desde un solo punto en común denominado (CDC), tiene la ventaja de ser redes muy sencillas en su instalación y en las protecciones eléctricas (Ver Figura 2-6).

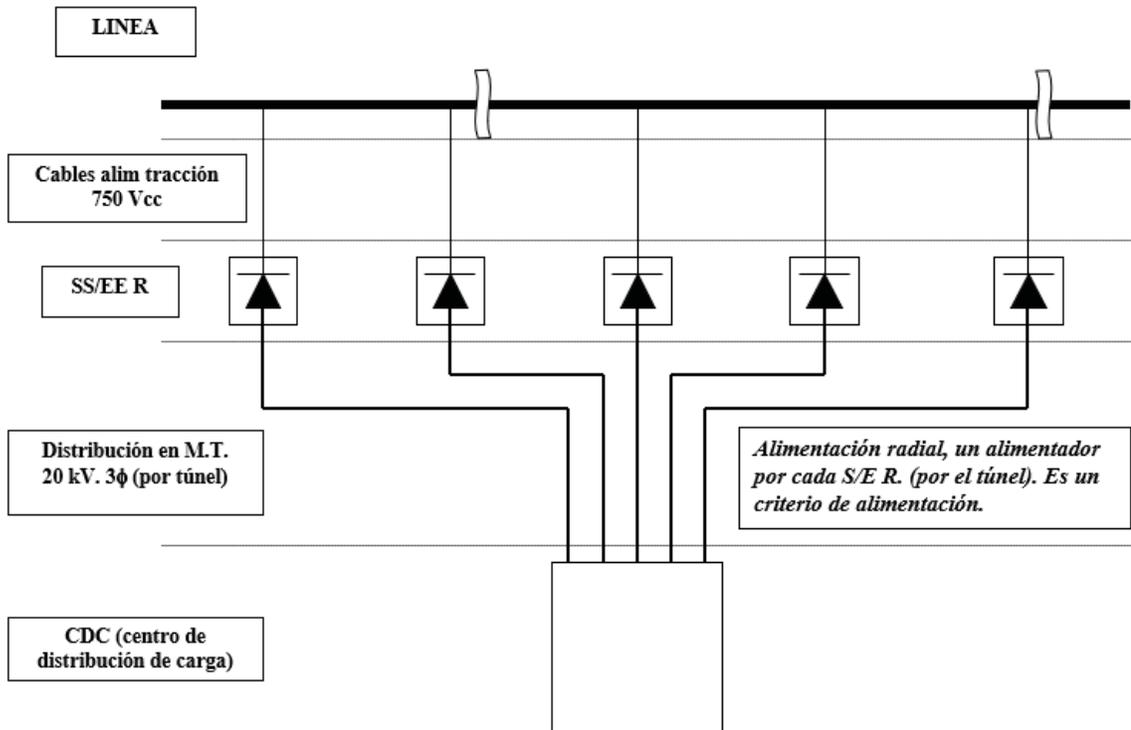


Figura 2-6 Alimentación de SER en forma radial [7]

2.1.4 Subestación de alumbrado y fuerza (SAF)

Las subestaciones de alumbrado y fuerza (SAF), son las encargadas de suministrar la energía eléctrica de baja tensión a las estaciones, tanto para el alumbrado y fuerza, como para los equipos que funcionan en ella. En cada estación hay dos SAF, SAF1 (por vía 1) y SAF2 (por vía 2), estas al igual que las SER se alimentan a partir de una distribución de media tensión de 20 kV, que provienen del CDC alimentando en forma de anillo por cada estación (ver Figura 2-7).

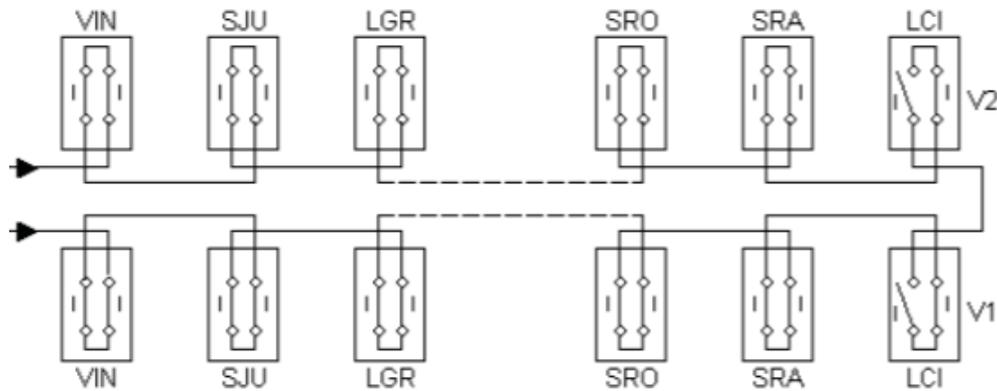


Figura 2-7 Ejemplo de distribución radial SAF (Fuente: Anexo descripción del sistema línea 4, Metro de Santiago)

2.2 Sistema de captación de la corriente

En este punto, se muestra las distintas formas, en que el material rodante recibe la energía que proporciona las subestaciones de rectificación de tracción (SER).

En la actualidad, el Metro de Santiago cuenta con tres formas distintas de captación de energía eléctrica. Las que se describen a continuación:

2.2.1 Barra guía (Rodadura neumática)

La Barra Guía es un perfil metálico en forma de ángulos o de "L" invertida, cada vía cuenta generalmente con dos de estas, estas barras se encuentran separadas a una distancia determinada entre los bordes interiores de sus caras verticales, la cual se denomina "escantillón de barra guía" como se observa en la Figura 2-6. Estas barras permiten el guiado del material rodante mediante el neumático guía horizontal, y transmite los esfuerzos laterales de guiados y centrífuga a la barra guía, que es soportada, fijada y aislada eléctricamente por los elementos conocidos como "aisladores".

El sistema de barra guía también cuenta con un riel metálico, denominado riel de seguridad, este además se utiliza para el retorno eléctrico del material rodante (Ver Figura 2-8).

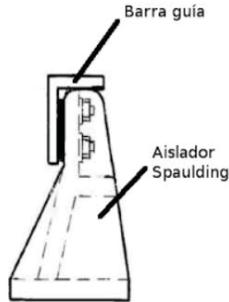


Figura 2-8 Barra guía y aislador

Las barras guías también tienen la función de alimentar con energía eléctrica al material rodante, el que es alimentado por medio de una tensión de 750 V de corriente continua, así como también es el encargado de transmitir la radiofrecuencia o THF, en otros países tiene la función de soportar el tapiz del pilotaje automático como es en el caso de México.

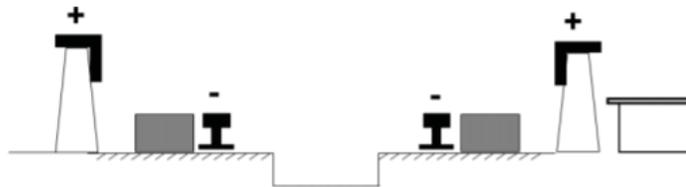


Figura 2-9 Esquema de vía (rodadura neumática, barra guía)

Actualmente el metro de Santiago cuenta con 70,6 km de línea de tracción con este tipo de tecnología, donde se encuentra presente en las líneas 1, 2 y 5, además con la extinción de la línea 2 se sumarán 5,1 km, alcanzando los 75,7 km para diciembre del 2025.

2.2.2 Tercer riel (Rodadura férrea)

El sistema de alimentación por tercer riel es uno de los sistemas de electrificación ferroviaria más antiguos y comunes que existen. Hasta el día de hoy continúan construyéndose nuevas líneas con este sistema, cuya utilización no ha sido abandonada en absoluto.

En caso que el material rodante sea de rodadura metálica es posible utilizar un tercer riel para suministrar la corriente de los coches motrices, este es una barra o perfil de acero laminado paralelo a la vía el cual va montado sobre unos aisladores de poliéster como se observa en la Figura 2-10, a su vez van montados sobre zapatas de acero, las cuales van sujetas a la longerinas de hormigón o bloques según el caso que corresponda mediante cuatro pernos de anclaje.



Figura 2-10 Aislador y zapata de sujeción del tercer riel

La función del tercer riel es entregar energía eléctrica necesaria para la tracción de los trenes (750 V de corriente continua). La energía es captada a través de un frotador o patín ubicado a cada costado del boguie motriz. Por lo general el tercer riel se ocupa en la mayoría de sistemas de metro del mundo.

Metro de Santiago cuenta con esta tecnología en las líneas 4 y 4A., con una longitud que llega a los 32,4 km.

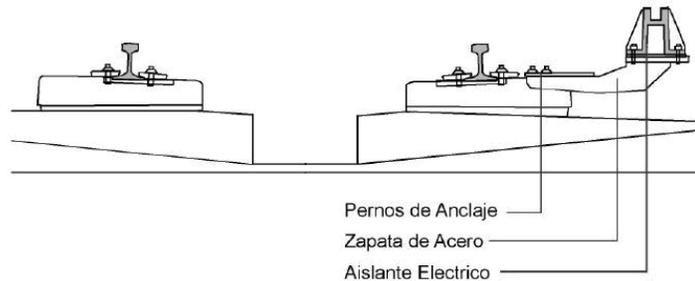


Figura 2-11 Esquema de sujeción del tercer riel

2.2.3 Catenaria rígida (Rodadura férrea)

El sistema de catenaria rígida permite la electrificación de los túneles con gálibo reducido. Para ello se prescinde el cable sustentador y se utiliza como hilo de contacto un perfil de aluminio, que, con la rigidez, permitiendo la captación de corrientes por el pantógrafo.

Tanto el hilo como el perfil son montados sin fuerza de tracción y por tal motivo ambos están menos expuestos que una línea de contacto convencional. su extensión suele ser de vanos no superior a los 12 metros de largo, este posee múltiples beneficios, como disminuir considerablemente el peligro de electrocución por contacto directo, además es posible mezclar catenarias rígidas con flexibles (Ver Figura 2-12).

Metro de Santiago opera con este tipo de tecnología en sus nuevas líneas automáticas (Línea 6 y 3), con una tensión de 1.500 V de corriente continua, además la nueva línea 7, también contará con este tipo de tecnología y en la misma tensión de operación.



Figura 2-12 Catenaria rígida compuesta por el perfil de aluminio el conductor de cobre y el aislador de sujeción (Fuente: *Electrificación y estudios ferroviarios e2f*)

A continuación, en la Figura 2-13. Es posible observar que la tensión positiva es la que viaja por medio de la catenaria y al igual que las otras tecnologías, las vías metálicas están destinadas al retorno de energía (negativo).

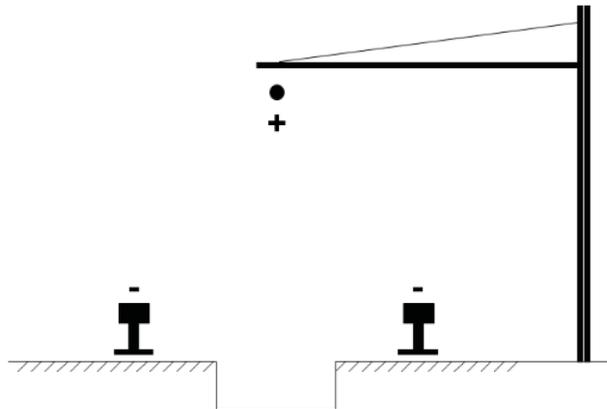


Figura 2-13 Esquema de vía de rodadura metálica con catenaria (Fuente: *Asignatura 6011 tracción eléctrica, U de Chile*)

2.2.4 Vía o riel (Retorno eléctrico)

La vía no solo es la encargada de guiar y soportar el material de tracción. Eléctricamente cumple un rol muy importante, ya que conforma el circuito de retorno de los motores de tracción y todo el equipo auxiliar del coche hasta la subestación eléctrica de rectificación (SER), este en algunos casos también se utiliza como circuito de señalización de vías y balizamiento.

El circuito eléctrico de retorno, está constituido por los rieles que deben estar aislados intencionalmente de la tierra para evitar las corrientes de fuga, como se muestra en la Figura 2-14. Estas corrientes de fuga están asociadas a las corrientes parasitas que involucran una serie de inconvenientes que pueden verse afectados los equipos externos, personas e infraestructura.

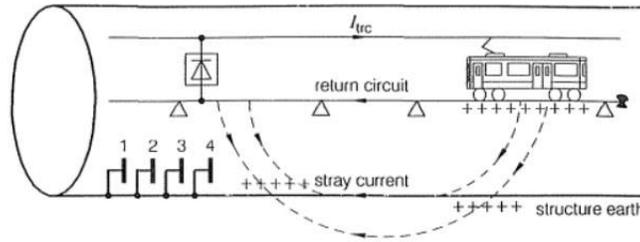


Figura 2-14 Esquema circuito de retorno para material rodante de corriente continua (Fuente: Siemens *contact lines for electric railways*)

En la Figura 2-15, se representan dos esquemas en donde *a)* muestra un circuito de retorno sin un conductor de refuerzo, lo que produce un aumento de pérdidas y caída de tensión y una corriente de retorno que se conecta por tierra de forma deliberada. Para el caso *b)* se observa un refuerzo a través de un conductor que es interconectado al riel a pequeños intervalos (en la práctica esta conexión se realiza cada 600 metros aproximadamente), esto evita sustancialmente las corrientes de fuga, como también así las pérdidas y caídas de tensiones del sistema.

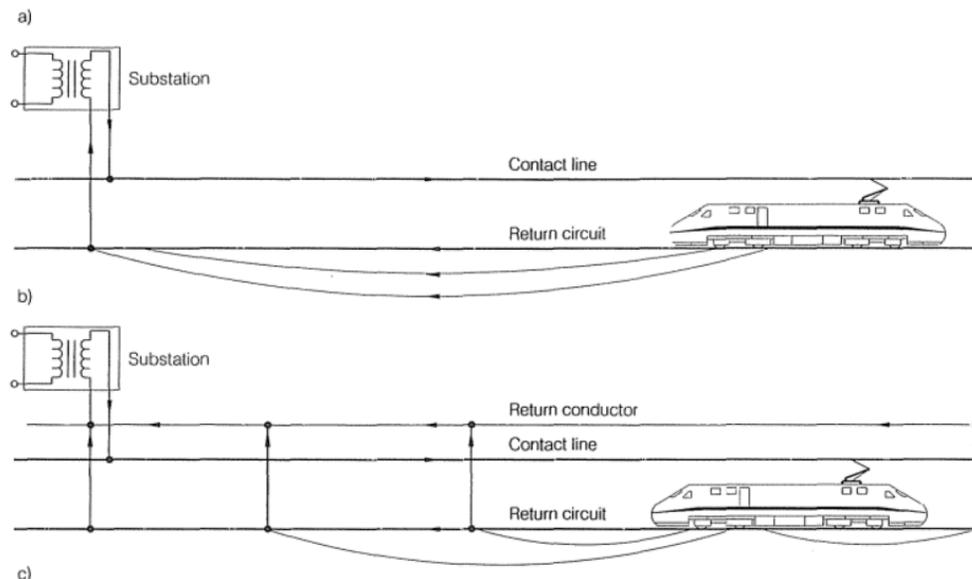


Figura 2-15 Seguimiento de la corriente de retorno para sistema de corriente continua (Fuente: Siemens *contact lines for electric railways*)

2.3 Proyecto línea 7 del Metro de Santiago

Como parte del plan de inversiones en transporte urbano abordado por el gobierno para la ciudad de Santiago, se define la incorporación de la Línea 7, a la red actual de Metro, con una longitud aproximada de 25,1 km y 19 estaciones, de forma subterránea. El comienzo de las obras se estima que inicie el 2020, para comenzar con la puesta en marcha en el 2026, con un costo que asciende a los USD 2.528 millones.

Conceptualmente, se establece que esta nueva Línea conectará, en sus extremos, a las comunas de Renca y Vitacura en aproximadamente 35 minutos, pasando con su desarrollo por las comunas de Renca, Cerro Navia, Quinta Normal, Santiago, Providencia, Las Condes y Vitacura (Ver trazado en la Figura 2-16). El trazado de esta nueva Línea incluye aspectos tales como: la incorporación de nuevas comunas a la red de Metro (Renca, Cerro Navia y Vitacura); además se desarrolla paralelamente a la Línea 1 en un tramo importante, con lo que ayuda a descongestionar en parte esta línea; otros hitos importantes a considerar son los intercambios con la Línea 2 y 3 en estación Cal y Canto, Línea 1 y 5 en estación Baquedano, Línea 1 en estación Pedro de Valdivia y Línea 6 en la futura estación Isidora Goyenechea, además entre los tramos de las estaciones José Miguel Infante y Salvador Gutiérrez, se genera un desvío hacia el poniente, para desarrollar los talleres (donde se encontrará la pequeña y gran revisión del material rodante) y cocheras de esta nueva Línea.



Figura 2-16 Trazado proyecto línea 7

En cuanto a la utilización de la tecnología ferroviaria y del material rodante, esta Línea constará con pilotaje automático de trenes y con una alimentación eléctrica por medio de catenaria rígida, en una tensión de 1.500 V de corriente continua, también contará con puertas de andenes al igual que las últimas dos Líneas recién inaugurada y construida (6 y 3) [5].

A continuación, en la Tabla 2-4 y 2-5 se muestra el nombre de las futuras estaciones y sus intersecciones de avenidas u o calles, como también en la Figura 2-17, se observa la red de Metro junto al proyecto Línea 7.

Tabla 2-4 Nombre de interestaciones y calles de intersección

| N° | Comuna | Estación | Calles de Intersección |
|----|---------------|---------------------|---|
| 1 | Renca | Brasil | En Vicuña Mackenna con Avenida Brasil. |
| 2 | Renca | José Miguel Infante | En Vicuña Mackenna con José Miguel Infante. |
| 3 | Cerro Navia | Salvador Gutiérrez | En Rolando Peterson con Salvador Gutiérrez |
| 4 | Cerro Navia | Huelén | En Mapocho Sur con Huelén. |
| 5 | Quinta Normal | Neptuno | En Mapocho con Neptuno. |
| 6 | Quinta Normal | Radal | En Mapocho con Radal. |
| 7 | Quinta Normal | Walker Martínez | En Mapocho con Mendoza (W. Martínez) |
| 8 | Santiago | Matucana | En Mapocho con Matucana. |
| 9 | Santiago | Ricardo Cumming | En Mapocho con Ricardo Cumming. |

Tabla 2-5 Nombre de interestaciones y calles de intersección (continuación)

| N° | Comuna | Estación | Calles de Intersección |
|----|-------------|--------------------|--|
| 10 | Santiago | Cal y Canto | En Balmaceda, entre Bandera y Puente. |
| 11 | Santiago | Baquedano | En Vicuña Mackenna con Parque Forestal. |
| 12 | Providencia | Pedro de Valdivia | En Avenida Providencia con Monseñor Sótero Sanz. |
| 13 | Providencia | Isidora Goyenechea | En Vitacura con Isidora Goyenechea. |
| 14 | Vitacura | Vitacura | En Vitacura con Paul Claudel. |
| 15 | Vitacura | Américo Vespucio | En Alonso de Córdova con Vespucio Norte. |
| 16 | Las Condes | Parque Araucano | En Cerro Colorado con Rosario Norte. |
| 17 | Vitacura | Gerónimo de A. | En Kennedy Norte con Padre Hurtado. |
| 18 | Vitacura | Padre Hurtado | En Kennedy Norte con Padre Hurtado. |
| 19 | Vitacura | Estoril | En Kennedy Sur con Estoril |

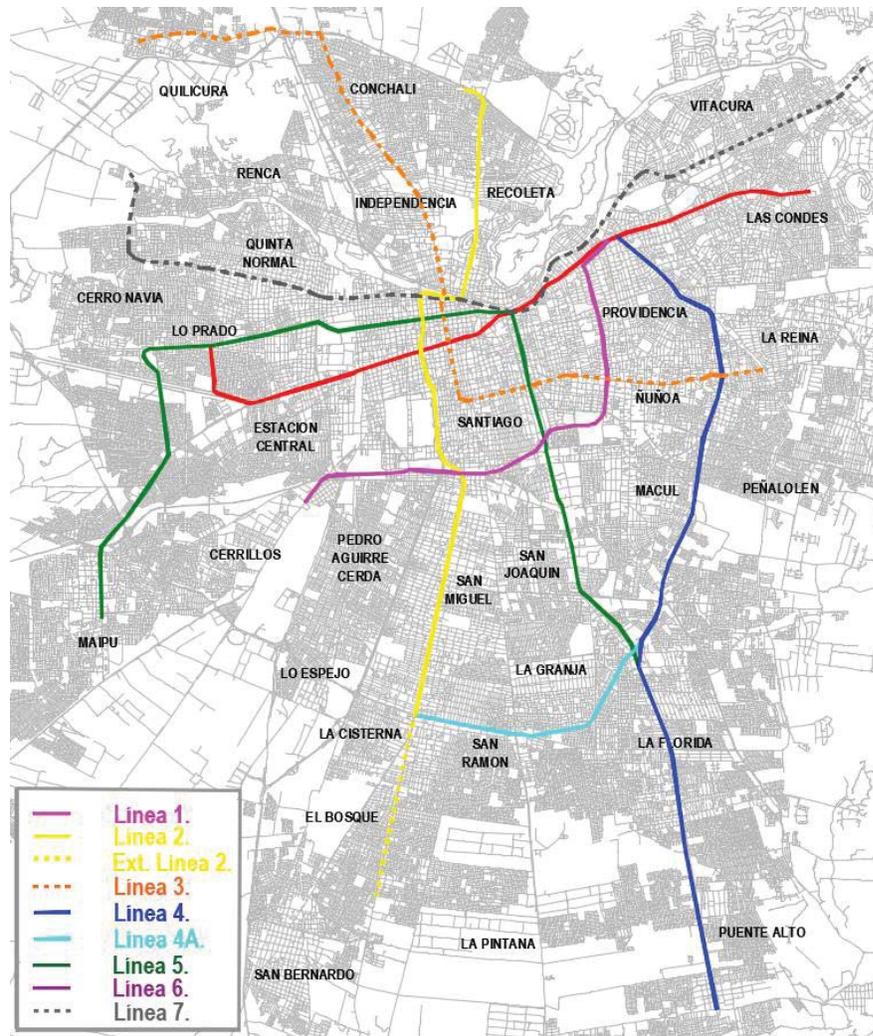


Figura 2-17 Red Metro de Santiago (incluye proyecto línea 7)

2.4 Estrategia de trabajo.

En el siguiente punto se exponen los estudios y trabajos que se llevarán a cabo. Principalmente se aborda el estudio de potencia y ubicación geográfica de las subestaciones de tracción, esto con la finalidad de cumplir con el criterio de diseño N-1 ante situaciones de compleja operatividad del sistema. Para ello es necesario contar con los parámetros de diseño (línea férrea, material rodante, ubicaciones geográficas entre otros) y un software capaz de realizar estos cálculos, que se adecue a las normativas actuales.

Para ello se exponen los estudios matemáticos y normativos; como también un pequeño extracto de la utilización del software. Una vez iterado los distintos escenarios con sus restricciones, se procede al estudio técnico de alimentación y el cálculo de ampacidad.

3 Herramienta para ubicación de SER

A continuación, se expone una síntesis de como calcular las ubicaciones de las SER, estas herramientas son el cálculo matemático (formulas y procedimientos), como a su vez un software que realiza estos cálculos, de manera iterativa; con la finalidad de optimizar los tiempos de trabajo y minimizar los errores asociados a fallas humana. Por lo tanto, en el siguiente capítulo se dará énfasis al software “SimMetro 2011”.

3.1 Procedimientos, metodología de cálculo

El procedimiento para la ubicación de subestaciones de rectificación se basa en la minimización de costos, tomando como restricciones el cumplimiento de la norma IEC 60.146, además que la tensión en cualquier punto de la red este por sobre el mínimo exigido.

3.1.1 Norma IEC 60.146

La publicación N° 146 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) detalla algunos aspectos a considerar de las Subestaciones de Rectificación de Gran Tracción clase F. En resumen, las SER deben ser diseñadas de manera tal que sean capaces de soportar los siguientes niveles de corriente nominal:

- 1,5 veces la corriente nominal durante 2 horas.
- 2 veces la corriente nominal durante 30 minutos.
- 3 veces la corriente nominal durante 1 minuto.
- 4 veces la corriente nominal durante 10 segundos.

Gracias a esta norma, es posible diseñar las SER de manera tal que sean capaces de suministrar, durante un periodo de 2 horas, la potencia requerida en caso de falla de la SER adyacente, considerando como potencia nominal de estas. Así, en caso de falla, es posible operar durante la hora punta sin que se degrade el sistema.

3.1.2 1ª restricción: Potencia Nominal

La potencia suministrada $P_0(l)$ por una SS/EE para alimentar un tramo de línea de longitud “ l ” se define como (3-1).

$$P_0(l) = 4 * U_0 * i(0) \quad (3-1)$$

Donde U_0 corresponde al voltaje nominal en la línea e $i(0)$ la corriente a la salida de la subestación de rectificación, corriente que se obtiene mediante la ecuación (3-2).

$$\frac{U_0 * T}{3.600 * C * N_c * 10^3} e^{-\frac{r_x * T}{7.200 * C * N_c * 10^3} i(0)^2} \int_0^{i(0)} e^{-\frac{r_x * T}{7.200 * C * N_c * 10^3} i^2} di = \frac{l}{2} \quad (3-2)$$

Con T el intervalo de explotación, C el consumo específico de cada coche, N_c el número de coches por tren, r_x la resistencia lineal de una sola vía y $\frac{l}{2}$ la distancia que la subestación debe ser capaz de alimentar.

La potencia $P_0(l)$ es capaz de alimentar el tramo en condiciones normales, pero además debe ser capaz de tomar la carga de la SER vecina en caso que esta falle. Es por esto que en el diseño se debe considerar que en caso que una SS/EE falle, la subestación vecina debe ser capaz de alimentar un sector de línea de largo $\frac{l}{2}$ y por el otro lado un sector de línea de largo $\frac{3 * l}{2}$.

La potencia que consume la porción de línea de largo $\frac{l}{2}$ es la mitad de la potencia normalmente consumida: $P_0(l) / 2$. En cambio, la potencia consumida en la porción de largo $\frac{3 * l}{2}$ es la mitad de la potencia consumida cuando la distancia que separa las SS/EE R es $3 * l$: $P_0(3 * l) / 2$. De esta manera, se define la potencia de auxilio P_a como (3-3).

$$P_a = \frac{1}{2} * P_0(l) + \frac{1}{2} * P_0(3 * l) \quad (3-3)$$

Para relacionar esta potencia de auxilio con la potencia nominal de la subestación de rectificación, solo basta tener en consideración las normas para equipos de tracción. Según esto, las SS/EE deben ser capaces de soportar 1,5 veces la corriente nominal por un lapso de 2 horas, y es por esto que la potencia nominal P_{nom} de la subestación debe ser tal que se cumpla (3-4).

$$P_{nom} \geq \frac{P_a}{1,5} = \frac{1}{3} P_0(l) + \frac{1}{3} P_0(3 * l) \quad (3-4)$$

Considerando esta condición de diseño de la línea, se asegura que cada una de las subestaciones de rectificación estará en condiciones de suministrar, durante un periodo de 2 horas, la potencia necesaria en caso de falla de la SER adyacente. Además, la potencia instalada debe ser tal de poder soportar las sobrecargas de corta duración, debido a partida simultánea de trenes, efecto considerado en los otros dos puntos de la norma.

3.1.3 2ª restricción: Caída de tensión

El segundo criterio es considerar el límite admisible de caída de tensión. Pues la tensión en la línea no debe caer por debajo de la tensión mínima para la operación de los trenes. Por lo tanto, se debe cumplir la condición de la Ecuación (3-5).

$$U_0 - \Delta U \geq U_{min} \quad (3-5)$$

En donde U_0 es la tensión nominal de la línea y ΔU es la suma de todas las caídas de tensión en el sistema, caídas que se estudiarán a continuación. Para estudiarlas, se considerará la configuración típica de una SER con respecto a la línea, tal como muestra la Figura 3-1.

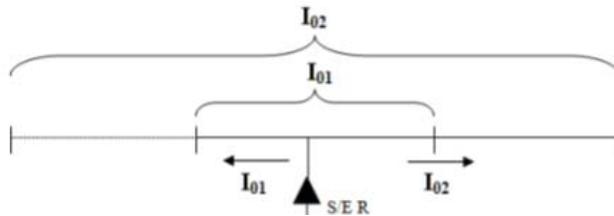


Figura 3-1 Configuración típica SER (Fuente: Manual SimMetro 2011)

Las caídas de tensión en la línea se calculan a partir del caso más restrictivo, el cual corresponde cuando una SER de los extremos se encuentra fuera de servicio. Las caídas de tensión que se consideran en la restricción son:

- **Caída de tensión interna de la SER:** Como muestra la Figura 3-2, la característica bajo carga de una SER es lineal en una amplia zona de funcionamiento, en donde:

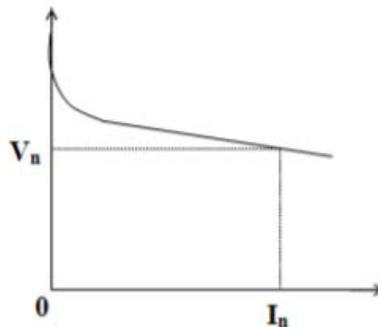


Figura 3-2 Características bajo carga SER (Fuente: Manual SimMetro 2011)

$$V_{cc} = V_v - R_i * I_{cc} \quad (3-6)$$

Donde: V_v : Tensión de salida rectificador en vacío (en V).
 R_i : Resistencia interna o de conmutación (en Ω).
 I_{cc} : Corriente salida SER. $I_{cc} = 2 * (I_{01} + I_{02})$

El valor V_v se calcula suponiendo un valor de la tensión en vacío superior a la tensión nominal, para considerar de esta forma la caída de tensión que se produce en los diodos al entrar estos en conducción:

$$V_v = \sqrt{2} * V_{ff} * \frac{\sin(\pi/p)}{\pi/p} \quad (3-7)$$

Donde: p : N° de pulsos del rectificador.

V_{ff} : Tensión efectiva entre fases del secundario del transformador de la SER.

- **Caída de tensión en la línea:** Para determinar la caída de tensión en la línea, se considera que la carga está concentrada en el punto medio del mayor, de esta manera la caída de tensión es definida en la Ecuación (3-8).

$$\Delta U_L = r_x * \frac{l_{02}}{2} * I_{02} \quad (3-8)$$

Donde: r_x : Resistencia de la línea (en Ω/km).

l_{02} : Longitud lado mayor línea (en km).

I_{02} : Corriente lado mayor línea (en A).

- **Caída de tensión por la partida de un tren:** Esta caída de tensión solo aparece cuando un tren parte. A pesar de esto, se considera en el cálculo de las caídas de tensión, para ser conservadores en el cálculo y así no tener problemas debido a la partida de un tren. Esta caída de tensión se calcula mediante la fórmula (3-9).

$$\Delta U_p = r_x * I_p * L_{02} \quad (3-9)$$

Donde: I_p : Corriente de partida de un tren.

L_{02} : Longitud lado mayor (en km).

- **Caída de tensión en los cables de alimentación de tracción:** Los cables de alimentación de tracción van desde la SER hasta la vía, a través de una galería o multiducto o directamente si la SER se encuentra en la línea. En ambos casos es necesario considerar su longitud, además del número de cables positivos que debe ser igual al número de cables negativos. La caída de tensión en los cables de alimentación de tracción se calcula a partir de la formula (3-10).

$$\Delta U_c = \frac{2 * R_c * L_G * (I_{01} + I_{02}) * 2}{N_c} \quad (3-10)$$

Donde: R_c : Resistencia por km de cada cable de tracción (en Ω/km).

L_G : Longitud entre la SER y la vía (en km).

N_c : N° cables positivos = N° cables negativos.

El primer factor 2 se justifica debido a que se considera tanto el positivo como el retorno por el negativo, y el segundo factor 2 se justifica dado que son dos vías.

Considerando el cálculo de las distintas caídas de tensión, y que la caída de tensión total es la suma de todas, y por lo tanto se calcula mediante la fórmula.

$$\Delta U = \sqrt{2} * V_{ff} * \frac{\sin(\pi/p)}{\pi/p} + r_x * \frac{l_{02}}{2} * I_{02} + r_x * I_p * L_{02} + \frac{2 * R_c * L_G * (I_{01} + I_{02}) * 2}{N_c} \quad (3-11)$$

- **Cálculos económicos para determinar potencia nominal optima:** El cálculo del número de subestaciones de rectificación mínimo necesario, se repite para distintas potencias

nominales normalizadas de SER, obteniéndose para cada potencia normalizada un número mínimo de subestaciones que cumplan las restricciones ya planteadas.

Así se obtienen el número N de subestaciones mínimas a instalar, de potencia nominal P_N y las respectivas pérdidas de joule P_j . Además, se debe tener en consideración los costos de inversión C_1 , costos de mantenimiento anuales C_M , y los costos del kWh y kVA para así poder capitalizar las pérdidas C_{perd} anuales.

Considerando los costos ya mencionados para las distintas alternativas de subestaciones consideradas, se busca la alternativa que satisfaga las condiciones e implique un menor costo. Si consideramos una tasa de retorno i y evaluamos el proyecto a n años, se evalúa el costo de cada alternativa mediante la fórmula.

$$F_{costos} = C_1 + \sum_{k=1}^n \frac{C_{Mk} + C_{perd k}}{(1+i)^k} \quad (3-12)$$

Este costo se evalúa para las distintas opciones de diseño según el P_{nom} de la SER escogido, escogiendo aquellas alternativas que implique un menor costo.

3.2 Simulación, software SimMetro 2011

SimMetro 2011, es una herramienta digital diseñada por la empresa Insight Ltda. para realizar simulaciones de la red de tracción del metro de Santiago, en diferentes escenarios de operación (intervalos de explotación, velocidades, capacidad de transporte entre otros parámetros). Su desarrollo se basa en el trabajo de varios años, durante los cuales se han generado modelos que han permitido obtener resultados para evaluar el comportamiento de la red de tracción en las diferentes condiciones de operación.

3.2.1 Funcionamiento

En la siguiente Figura 3-3, muestra el esquema general de funcionamiento del sistema. En ella se puede observar claramente que existen tres aplicaciones, la Interfaz de usuario SM2011.exe, MetroDB.exe como herramienta para el manejo de la base de datos y el motor de cálculo

SM2011E.exe. este último posee 3 módulos seleccionables a través de la variable MODULE_TO_RUN.

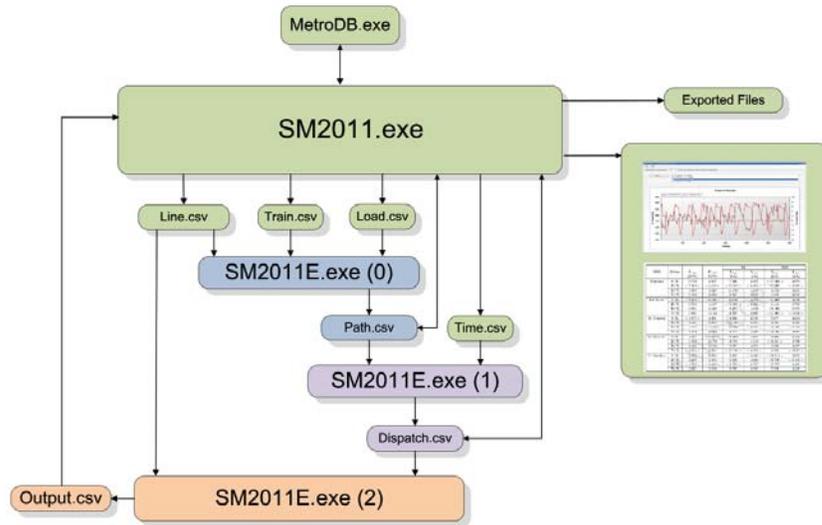


Figura 3-3 Esquema de funcionamiento del software (Fuente: Manual SimMetro 2011)

El primer módulo del motor de cálculo consiste en un optimizador de trayectorias y se ejecuta si la variable antes mencionada es igual a 0. Este módulo requiere de tres archivos de entrada, el primero contiene la información asociada a las líneas (Line.csv), el segundo la de los trenes (Train.csv) y finalmente el tercer archivo, entrega los niveles de carga de pasajeros considerados para los cálculos (Load.csv).

El resultado es el archivo Path.csv con las trayectorias que resultan al hacer el producto cruz entre el número de tramos de interestaciones de las líneas, los trenes y las cargas.

El segundo módulo genera los despachos de los trenes a partir de un archivo de trayectorias (Path.csv) y otro con los tiempos asociados a la espera en las estaciones, frecuencia en la inyección de trenes, tiempo de retorno de los trenes, tiempo de simulación, etc. (Time.csv). El archivo de resultados de este módulo es Dispatch.csv.

El ultimo modulo consiste en un Solver no lineal de flujos de carga DC. Los archivos de entrada son el de los datos de línea (Line.csv) y el de despacho de trenes Dispatch.csv. Todos los archivos de resultados de los diferentes módulos son leídos por la interfaz de usuario, la que permite graficar, procesar y, en algunos casos, exportar la información generada por el motor de cálculo.

3.2.2 Componentes del modelo

Los componentes del modelo se agrupan en dos conjuntos, el de todos los asociados a las líneas y los que tienen relación con el material rodante. A continuación, se describen los aspectos considerados para la modelación de los diferentes componentes para simular el comportamiento de una red de tracción.

3.2.2.1 Líneas

Las líneas poseen elementos y características que resultan relevantes para obtener resultados consistentes en las simulaciones. En general, los elementos se encuentran distribuidos a lo largo de toda su extensión. La posición de cada elemento se denomina PK (Punto kilométrico), siendo este un valor numérico que eventualmente puede tener un valor negativo.

Para todos los casos, se considera que en los extremos de las líneas se encuentran las estaciones de partida y llegada llamadas Depart y Arrive respectivamente. La característica de regeneración de los trenes en una línea se modela mediante el circuito equivalente como se muestra en la Figura 3-4.

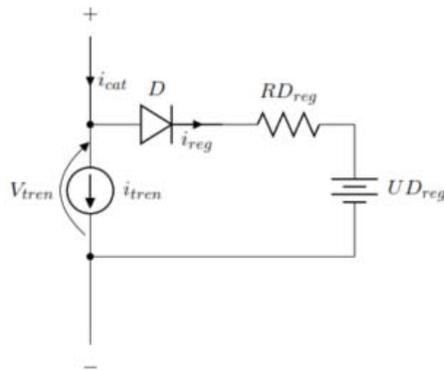


Figura 3-4 Circuito equivalente de regeneración para un tren (Fuente: Manual SimMetro 2011)

Cabe señalar que, si bien se ha definido la regeneración como una característica de las líneas, los parámetros del circuito equivalente deben ser definidos de acuerdo al tipo de tren utilizado en cada simulación. La Figura 3-5, muestra la curva característica del diodo del circuito equivalente de regeneración de la Figura 3-4. Como se puede ver, el parámetro RD_{reg} permite ajustar la pendiente de la zona lineal de operación y UD_{reg} define donde corta la recta de la zona lineal con el eje de las tensiones. Además de estos dos parámetros se ha incluido en el modelo KD_{reg} , el cual permite ajustar la curvatura de la zona no lineal. El modelo anterior también es válido para la característica del diodo del circuito equivalente de las SER's.

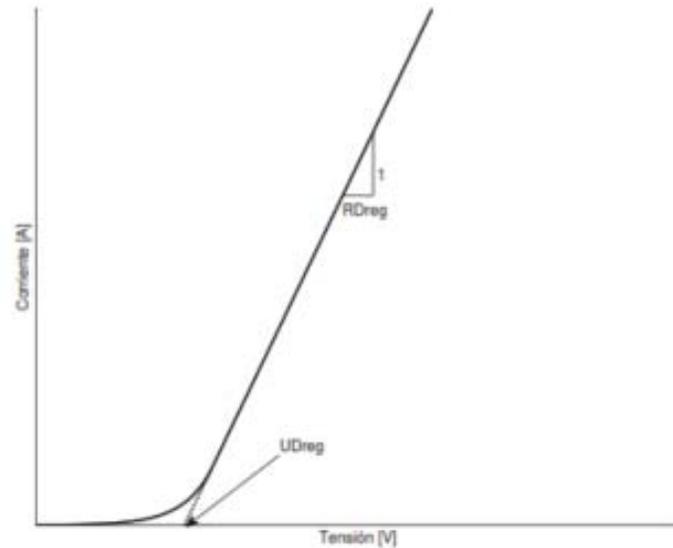


Figura 3-5 Curva característica del circuito equivalente de regeneración (Fuente: Manual SimMetro 2011)

3.2.2.2 Aspectos constructivos

Los aspectos constructivos considerados en el modelo se describen a continuación:

- **Gradiente:** Resulta evidente que el grado de inclinación de las vías afecta la dinámica desarrollada por los trenes, por lo que es necesario incluir la información de los gradientes a lo largo de toda la extensión de la línea.
- **Límites de velocidad:** Con el fin de lograr resultados consistentes, se debe tomar en cuenta en el cálculo de las trayectorias óptimas las restricciones de operación de los trenes en las vías. Los límites de velocidad máxima son un ejemplo de estas.
- **Rieles, barra o catenaria:** La distribución de la energía eléctrica a lo largo de la línea se realiza a través de barras o catenaria (terminal positivo) y rieles (terminal negativo).

Cabe señalar que los parámetros de las vías se ingresan al modelo considerando el circuito paralelo entre las barras (r_p) y rieles (r_n) de cada vía.

La Figura 3-6, muestra el circuito equivalente considerado en el modelamiento de estos elementos (barra o catenaria y rieles).

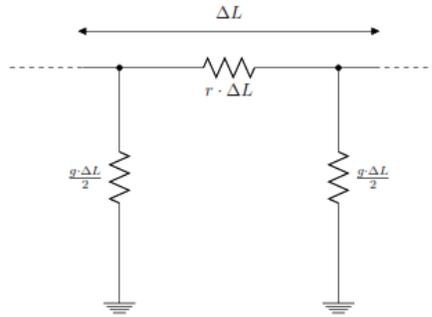


Figura 3-6 Circuito equivalente correspondiente a un tramo de riel o barra (Fuente: *Manual SimMetro 2011*)

Donde r , g , ΔL corresponden a la resistencia longitudinal, conductancia longitudinal y largo del tramo de vía considerado respectivamente.

Con el fin de dar una mayor flexibilidad al modelo, los parámetros de resistencia y conductancia de las barras y los rieles se definen como una función que depende de la posición a lo largo de la línea. Esto último permite simular un escenario en que se evalué, por ejemplo, el cambio del material rodante de los rieles en un tramo determinado de la línea.

- **Estaciones:** Para el modelamiento de las Estaciones de la línea solo es necesario conocer su posición, para ello se considera que están concentradas en un sólo punto y que su PK se encuentra en el centro de cada estación.

Subestaciones de rectificación (SER's): Las SER's están constituidas por uno o dos grupos de rectificación y varios elementos de maniobras. Los grupos poseen puentes de diodos de 6 pulsos alimentados desde una subestación principal a través de un alimentador exclusivo de 20 kV y un transformador que baja el nivel de tensión. La Figura 3-7, muestra el circuito equivalente utilizado para modelar las SER's. Las líneas punteadas no corresponden a conexiones eléctricas.

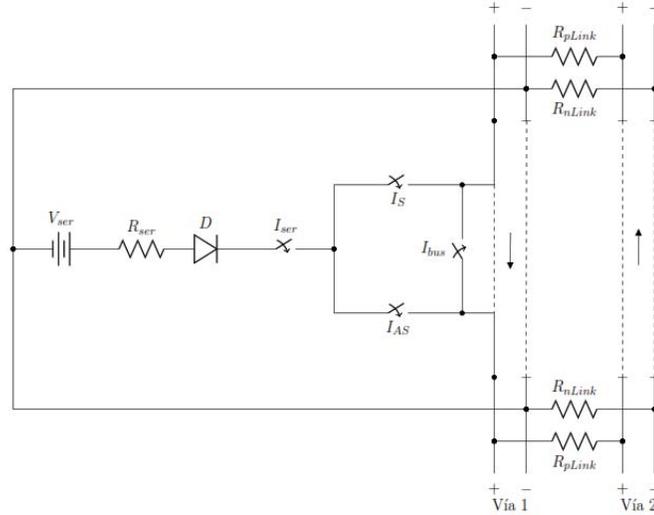


Figura 3-7 Circuito equivalente de la SER (Fuente: Manual SimMetro 2011)

La tensión interna V_{ser} depende del ajuste del tap del transformador correspondiente. El cálculo de la resistencia interna de la subestación de rectificación se realiza según la siguiente Ecuación (3-13).

$$R_{ser}(i) = \left(\frac{3}{\pi} * X_{ac}(i) + \left(2 - \frac{3}{2 * \pi} \sqrt{\frac{2 * \sqrt{2} * X_{ac}(i) * I_{dc\ Nom}(i)}{V_{ac}(i)}} \right) * R_{ac}(i) \right) * 10^3 \quad (3-13)$$

Donde:

$R_{ser}(i)$: Resistencia interna del i-ésimo grupo rectificador en (m Ω).

$X_{ac}(i)$: Reactancia del Cto. Equiv. en el lado de alterna del i-ésimo grupo rectificador en (Ω).

$R_{ac}(i)$: Resistencia del Cto. Equiv. En el lado de alterna del i-ésimo grupo rectificador en (Ω).

$V_{ac}(i)$: Tensión alterna nominal del i-ésimo grupo rectificador en (V).

$I_{dc\ Nom}(i)$: Corriente nominal del i-ésimo grupo rectificador en (A).

Los grupos de $X_{ac}(i)$ y $R_{ac}(i)$ se determinan en base al circuito equivalente en el lado de alterna para cada grupo rectificador.

3.2.3 Material rodante

El material rodante se ha disgregado de manera jerárquica partiendo de los motores, pasando por los coches y finalmente los trenes.

- **Motores:** Para modelar los motores es suficiente contar con la información de las características de torque y eficiencia versus la velocidad en los modos de operación de

tracción y frenado. La Figura 3-8, muestra la curva de torque versus velocidad de un motor de tren.

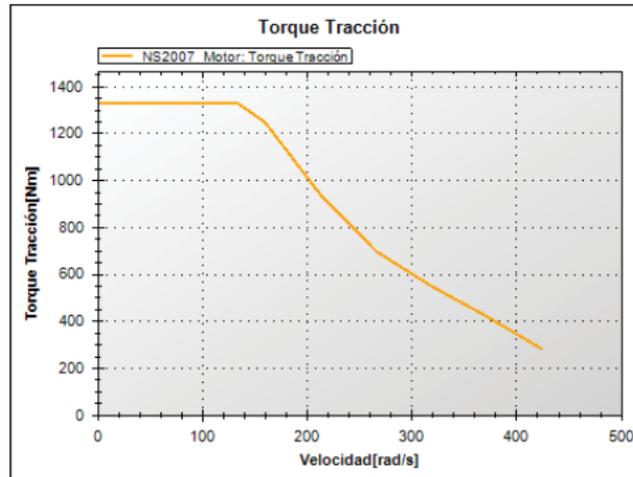


Figura 3-8 Curva de tracción de un motor (Fuente: Manual SimMetro 2011)

- Coches:** Los coches poseen diversos parámetros que dependen de las características constructivas, como son el peso o tara, el número de asientos, el área, la potencia de sus servicios auxiliares, la relación de reducción, el diámetro de las ruedas, etc. y de fuerza, similares a las de los motores. Dependiendo del fabricante y el modelo de los trenes existen diferentes coches, pero en general existen tres tipos, los coches motrices con cabina (M), los coches motrices (N) y los remolques (R), estos últimos no tienen motores. La Figura 3-9 muestra el plano de un coche motor con cabina.

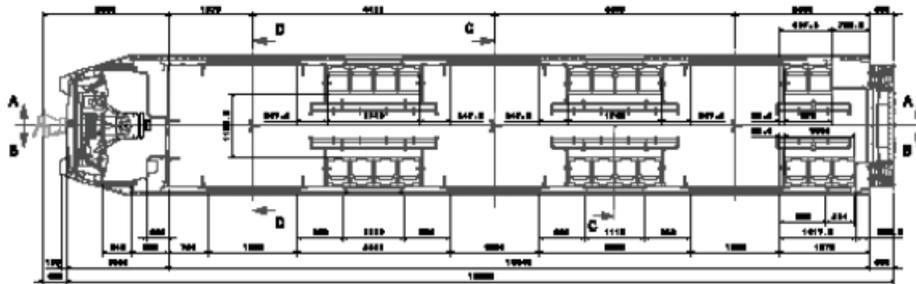


Figura 3-9 Dimensiones de un coche motor con cabina (Fuente: Manual SimMetro 2011)

Las características de fuerza de los coches se pueden obtener a partir de las características de los motores y los parámetros constructivos. Seleccionando solamente el número de motores o directamente de los datos entregados por el fabricante. Cada coche tiene ciertas capacidades de transportar pasajeros. La masa total de los pasajeros transportados se obtiene según la siguiente Ecuación (3-14).

$$M_{pas} = M * (n + A * AW) \quad (3-14)$$

Donde: M_{pas} : Masa total de pasajeros del coche en (kg).

M : Masa promedio de un pasajero, se asume que corresponde a 70 (kg/pas).

n : Número de asientos del coche.

A : Área para el traslado de pasajeros en (m^2).

AW : Carga de pasajeros en (pas/ m^2).

- **Trenes:** Los trenes se forman a partir de los coches, dependiendo del modelo y el fabricante. Los parámetros constructivos de cada configuración se obtienen a partir de los coches. Por ejemplo, la potencia de servicios auxiliares de un tren, se calcula al sumar todas las potencias de los servicios auxiliares de los coches que lo componen. Por otro lado, la característica de fuerza de un tren resulta de la suma de todas las características de los coches que lo componen. Para obtener la característica de eficiencia de los trenes existen diversas formas de hacerlo, una manera razonable es calcular el promedio de las características de los coches. La Figura 3-10 muestra un ejemplo para la configuración de un tren. Además de los parámetros derivados desde los coches, existen otros propios de los trenes, como por ejemplo las aceleraciones máximas, velocidad del freno neumático, resistencia al avance etc.



Figura 3-10 Ejemplo de configuración de un tren

3.2.4 Funciones de cálculo, limitaciones y mejoras

SimMetro es capaz de realizar diversos cálculos del dimensionamiento eléctrico del material rodante asociado a la línea férrea en estudio, principalmente en corriente continua (750, 1.500 y 3.000 volts). Este permite obtener consumo de las subestaciones de rectificación y el material rodante, pérdidas del sistema de tracción, tensión de catenarias, barras guía y riel/tierra, velocidad y posición de los trenes. Como restricción del software solo permite simulaciones a marcha tendida (velocidad máxima), estos resultados son entregados en formato CSV (Comma-Separated Values), por lo que se incluye una serie de códigos creados en VBA (Visual Basic for Applications) para obtener nueva información a través de estos resultados.

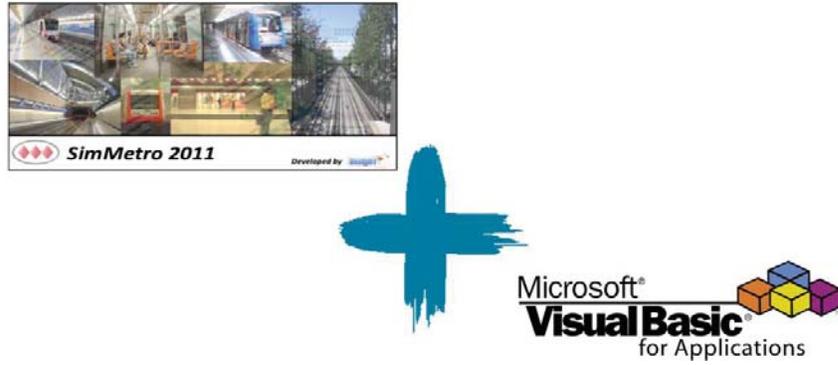


Figura 3-11 Representación de la unión de dos softwares, para facilitar y mejorar los resultados obtenidos.

Como se ilustran en la Figura 3-11, representa la unión de ambos softwares muy distintos, pero con una única finalidad, que es el estudio y diseño de la línea férrea en base a los datos del material rodante.

Visual Basic para aplicaciones, utiliza los datos proporcionados por el software SimMetro (como se ilustra en la Figura -12) para el ordenamiento y clasificación de los datos, además de calcular la tensión media útil en la zona (zonas que son delimitadas entre cada estación), gracias a su código es posible programar el análisis continuo, de más de un archivo ayudando a facilitar el largo proceso de datos.

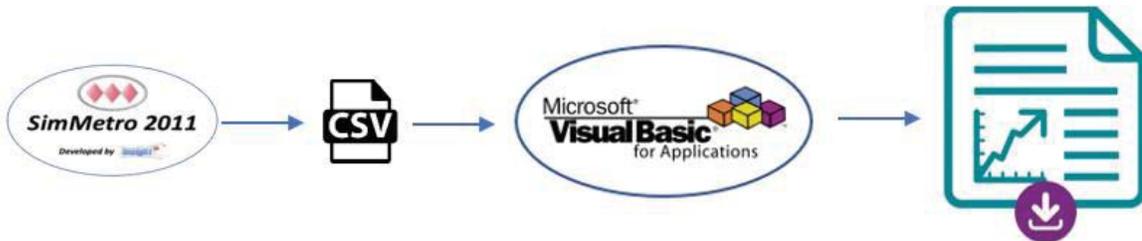


Figura 3-12 Diagrama de procesamiento de datos

4 Características de la Línea 7 y simulación

En el siguiente capítulo se expondrán los diferentes parámetros utilizados en la simulación de explotación del material rodante, para dimensionar de manera correcta el número de subestaciones de rectificación (SER), potencia y configuración técnica de estas.

4.1 Parámetros

En el siguiente ítem, se exponen los datos utilizados en la evaluación de los distintos escenarios expuestos en este capítulo.

4.1.1 Características de la línea 7

Las características generales de la nueva línea 7 del metro de Santiago, se describen en la siguiente Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Características generales Línea 7

| Parámetros | Valor | Unidad |
|-----------------|-------|--------|
| Tramo | L7 | - |
| Longitud aprox. | 25,1 | Km. |
| Tensión nominal | 1.500 | Vdc |

4.1.2 Estaciones y perfil de velocidad

El proyecto de la línea 7 cuenta con 19 estaciones, las cuales se encuentran ubicadas en los diferentes PK (punto kilométrico), distanciados en promedio 1,398 km. La velocidad de operación será de 80 km/h, no obstante, será necesario considerar limitantes de velocidad en algunos puntos más importantes de la línea, esto es debido a la presencia de curvas a lo largo del trazado. Estos se encuentran prestablecidos por el área de “Vías y Catenarias”, quienes ya han realizado un estudio previo del diseño de la línea 7, los valores considerados se muestran a continuación considerando los trazados de Vía 1 y Vía 2 respectivamente, (Ver Tabla 4-2).

Tabla 4-2 Posición PK y perfil de velocidad máxima

| Nombre de interestacion | PK | Velocidad Máx. vía 1. [Km/m] | Nombre de interestacion | Velocidad Máx. vía 2. [Km/m] |
|-------------------------|--------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| Depart | 10+000 | V[65] | Depart | V[65] |
| Brasil | 10+360 | V[65] | Estoril | V[65] |
| José Miguel I. | 11+030 | V[77] | Padre Hurtado | V[80] |
| Salvador Gutiérrez | 12+345 | V[80] | Gerónimo de A. | V[80] |
| Huelén | 13+380 | V[77] | Parque Araucano | V[80] |
| Neptuno | 15+490 | V[80] | Américo Vespucio | V[77] |
| Radal | 16+935 | V[80] | Vitacura. | V[77] |
| Walker Martínez | 17+975 | V[77] | Isidora Goyenechea | V[80] |
| Matucana | 19+252 | V[80] | Pedro de Valdivia | V[80] |
| Ricardo Cumming | 20+210 | V[80] | Baquadano | V[77] |
| Cal y Canto | 21+820 | V[80] | Cal y Canto | V[80] |
| Baquadano | 23+515 | V[80] | Ricardo Cumming | V[80] |
| Pedro de Valdivia | 25+975 | V[77] | Matucana | V[80] |
| Isidora Goyenechea | 27+526 | V[80] | Walker Martínez | V[80] |
| Vitacura | 28+725 | V[80] | Radal | V[77] |
| Américo Vespucio | 29+798 | V[77] | Neptuno | V[80] |
| Parque Araucano | 30+966 | V[77] | Huelén | V[80] |
| Gerónimo de A. | 32+621 | V[80] | Salvador Gutiérrez | V[77] |
| Padre Hurtado | 33+995 | V[80] | José Miguel I. | V[80] |
| Estoril | 35+523 | V[80] | Brasil | V[65] |
| Arrive | 35+980 | V[65] | Arrive | V[65] |

4.1.3 Pendientes del trazado

El movimiento del tren depende en gran medida a las fuerzas presentes en la marcha del tren, las cuales determinan su aceleración. Las pendientes y curvas presentes en la vía son parámetros importantes a la hora de analizar la explotación del material rodante, ya que este influirá en el esfuerzo de tracción, por lo que se hace vital conocer estos valores a la hora de realizar una correcta simulación.

En la Figura 4-1, en base a los datos proporcionados por el área de “Vías y Catenaria” se ilustra un perfil de la línea en base a sus estaciones y cotas. Cabe destacar que en el perfil mostrado no figura el aporte dinámico de las curvas; el que es necesario incluir al momento de simular (Datos calculados y anexados en el apéndice A, sección A.1). Tras el breve análisis comparativo, con las otras líneas operativas u o construidas (1, 2, 3, 4, 4A, 5 y 6) se llega a la conclusión que la línea 7, es la línea con mayor pendiente a lo largo de toda la red.

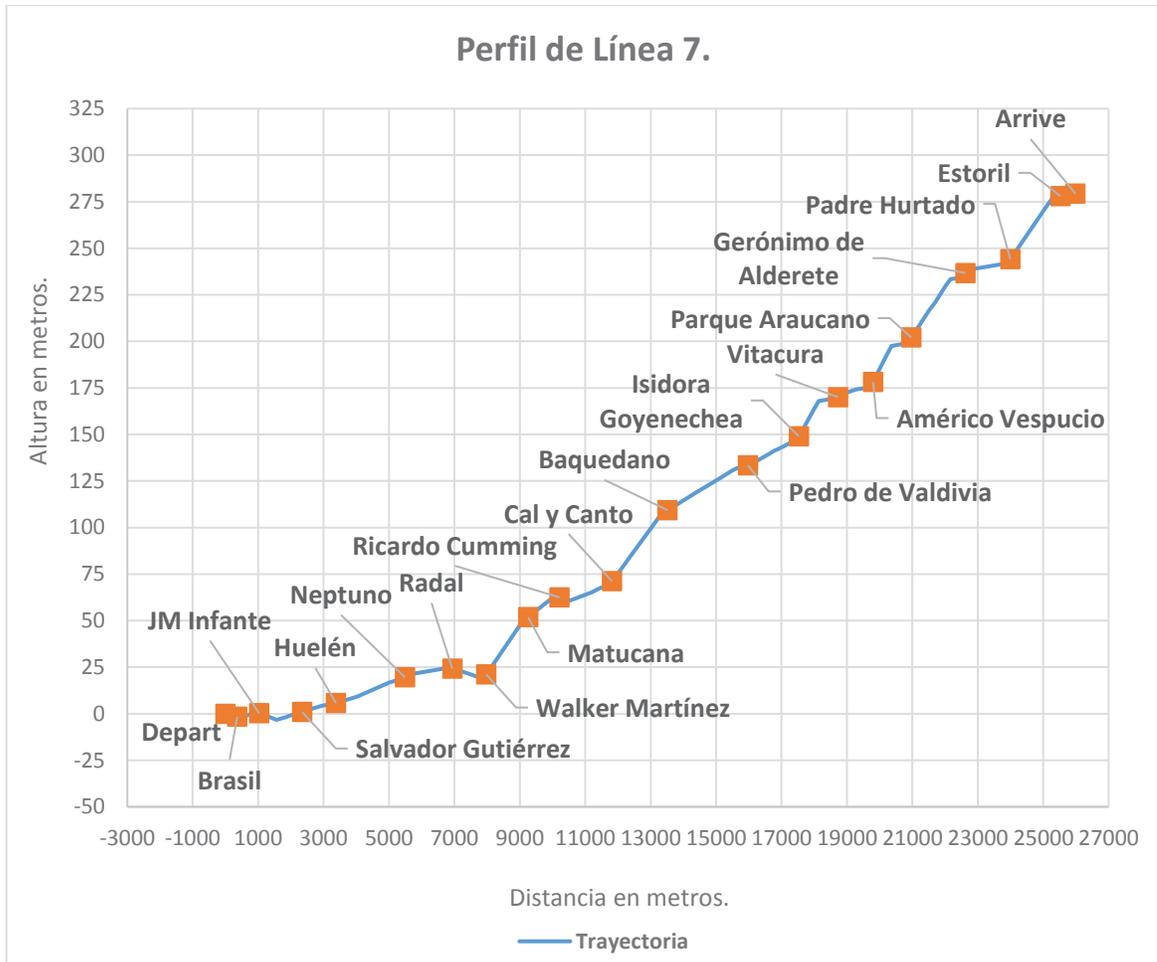


Figura 4-1 Perfil de cotas, Línea 7

4.1.4 Parametros operacionales de interestaciones

En las Tabla 4-3, se muestra los tiempos de detención del material rodante en cada una de las interestaciones, para ajustar estos intervalos a la realidad operacional, se ha considerado un tiempo de error de ± 2 Segundos, que es ingresado en el software, este cuenta con la capacidad de simula las interrupciones de los usuarios al ingreso de un tren colapsado, interrumpiendo el cierre de puertas él que ocasionará una detención mayor en las interestaciones.

Tabla 4-3 Cuadro de tiempos de detención por estación

| Interestaciones | Tiempo vía 1. | Tiempo vía 2. |
|------------------------|---------------|---------------|
| Est. Brasil | 45 | 45 |
| Est. José Miguel I. | 25 | 20 |
| Est. Salvador G. | 25 | 20 |
| Est. Huelén | 25 | 20 |
| Est. Neptuno | 25 | 20 |
| Est. Radal | 25 | 20 |
| Est. Walker M. | 25 | 20 |
| Est. Matucana | 35 | 25 |
| Est. Ricardo C. | 25 | 30 |
| Est. Cal y Canto | 45 | 35 |
| Est. Baquedano | 45 | 35 |
| Est. Pedro de Valdivia | 45 | 35 |
| Est. Isidora | 45 | 35 |
| Goyenechea | 45 | 35 |
| Est. Vitacura | 20 | 25 |
| Est. Américo Vespucio | 20 | 25 |
| Est. Parque Araucano | 20 | 25 |
| Est. Gerónimo de A. | 20 | 25 |
| Est. Padre H. | 20 | 25 |
| Est. Estoril | 45 | 45 |

Además de los intervalos mostrados, es necesario considerar los distintos tiempos de despacho, para el caso del material rodante, como también el tiempo de retorno, la aceleración y desaceleración de confort de los pasajeros, en la Tabla 4-4, se adjuntan estos valores.

Tabla 4-4 Intervalos de explotación del material rodante

| Intervalos de operación. | | |
|---|-----|-----------|
| Tiempo de despacho | 90* | Segundos. |
| Tiempo de retorno | 137 | Segundos. |
| Aceleración y desaceleración de confort | 1 | m/s^2 |

* El tiempo de despacho de 90 segundos es considerado cuando la línea opera al 100% de su capacidad de diseño, no pudiendo superar este tiempo por motivos de seguridad.

4.1.5 Parametros eléctricos de la vía.

Para la alimentación del material rodante, es importante considerar adecuadamente el tipo de catenaria como también considerar los efectos existentes en el riel de la vía; ya que éste en la práctica no solo es utilizado para la circulación del material rodante, ya que es utilizado para el

retorno de las corrientes de tracción hacia la subestación más cercana, como se observa en la Figura 4-2.

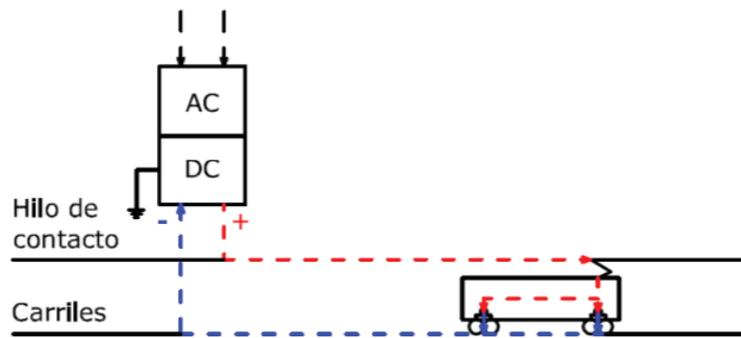


Figura 4-2 Esquema de circulación de flujo energético desde la salida de la subestación hasta su regreso
(Fuente: *Diseño de una subestación de transformación para tracción eléctrica*, pág. 20. Universidad de la Rioja.)

Catenaria Rígida: La catenaria rígida es utilizada a lo largo de toda la vía y al igual que la Línea 6 y 3. Se utiliza el siguiente perfil y cable de cobre, como se indica en la Tabla 4-5. y 4-6.



Figura 4-3 Perfil catenaria rígida tipo PAC 80 (Fuente: *RailTech-KLK Rigid Catenary*)

Tabla 4-5 Datos técnicos correspondiente a PAC 80 (Fuente: *RailTech-KLK Rigid Catenary*)

| Datos Perfil | |
|------------------------------|-----------------------|
| Tipo Perfil | PAC 80 |
| Altura | 80 mm |
| Sección Perfil | 2.202 mm ² |
| Sección Equivalente en Cobre | 1234 mm ² |
| Corriente Máxima Admisible | 3.525 A |

Al considerar la sección equivalente del cobre, se procede a realizar el siguiente calculo correspondiente en base a la siguiente ecuación:

$$R = \rho * \frac{l}{s} \tag{4-1}$$

Donde: R : La resistencia es en ohm.

ρ : Se denomina la resistencia eléctrica específica en ohm*metro.

s : Es la sección transversal en mm²

El perfil PAC 80 tiene una resistencia equivalente a $1.397 \cdot 10^{-5}$ [Ω/m]. (considerando $\rho = \frac{1}{58} \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$, Fuente: Norma UNE 20.003).

A continuación, en la Figura 4-4, es posible observar el tipo de conductor que es utilizado en la catenaria además de los datos técnicos, para los posteriores cálculos.



Figura 4-4 Conductor de contacto Cu-ETP (Fuente: Overhead Catenary Wire)

Tabla 4-6 Datos técnicos correspondientes a Cu-ETP de 150 mm² (Fuente: Overhead Catenary Wire)

| Datos Cable | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Tipo de Conductor | 150 mm ² |
| Propiedades | Cu - ETP |
| Resistencia Eléctrica 20°C | $1.22 \cdot 10^{-4} \Omega m$ |
| Coefficiente | 0.00397 - |

Se considera la resistencia total del sistema, el que se obtiene por medio de la ecuación que relaciona la suma de ambos en forma paralela, por medio de:

$$R_{Total\ Equiv} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Perfil}} + \frac{1}{R_{Conductor}}} \quad (4-2)$$

Utilizando los valores de resistividad del perfil y el conductor, y reemplazando ambos en la Ecuación 4-2 se obtiene una resistencia total de $R_{Total\ Equiv} = 1.253 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$

Una vez obtenido los datos y a su vez verificados se procede a realizar los siguientes cálculos, para establecer la resistencia total del sistema operando a una temperatura de 40°C.

$$\rho_{T=40^{\circ}C}^{Cu} = \rho_{T=20^{\circ}C}^{Cu} [1 + \alpha * (T - 20)] \quad (4-3)$$

Donde: $\rho_{T=40^{\circ}C}^{Cu}$: Es la resistividad del cobre Cu-ETP a 40°C.

$\rho_{T=20^{\circ}C}^{Cu}$: Es la resistividad del Cobre Cu-ETP a 20 °C.

α : Es el coeficiente de temperatura del material Cu-ETP.

T : Temperatura a calcular en °C.

Considerando una temperatura de operación de 40°C se obtiene la siguiente resistencia lineal para una vía de $1.353 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.

Circuito de Retorno: Según las experiencias obtenidas en el sistema de Metro de Ankaray y las publicaciones realizadas por Verband Deutscher Verkehrsunternehmen – VDV (Asociación de empresas alemanas de transporte). Es necesario realizar un estudio detallado de todos los sistemas anexos que se encuentren conectados a tierra, ya que los principales problemas que pueden llegar a presentar son: corrientes parasitas de redes externas, corrientes parasitas del material rodante, corrosión por corrientes dispersas, tensiones fuera de la norma (estas se encuentran contempladas en la UNE EN 50.122-1-2, que no serán analizadas en detalle en este estudio).

A raíz de lo anteriormente mencionado, es que se contempla un conductor de aluminio con aislación, conectado cada 600 metros de 1000 mm²; destinado a cada una de las vías (vía 1 y vía 2). Esto con el fin de evitar los problemas anteriormente mencionados, ya que el alto tráfico puede más de alguno de los problemas presentados en el texto anterior.

La red actual de línea 6 y 3, utilizan un riel tipo UIC 60, el cual se establece los siguientes datos técnicos proporcionados en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7 Tipos de carriles más utilizados en República Checa (*Fuente: Measurement of current flowing through a rail with the use of ohm's method; determination of the impedance of a rail / Table 1 Most frequently rail type in Czech Republic*)

| Type | Weight (kg/m) | Cross-section (Cm ²) | Resistance ($\mu\Omega/m$) |
|--------|---------------|----------------------------------|------------------------------|
| UIC 60 | 60 | 76.86 | 32.5 |
| R 65 | 65 | 82.95 | 30.1 |
| T | 50 | 63.33 | 39.5 |
| S49 | 49 | 62.48 | 40 |

Al considerar el cálculo de resistencias en paralelo se obtiene una resistencia lineal de $1.625 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.

Luego al aplicar la Ecuación 4-4 con un $\alpha = 0.005$ que corresponde al acero se obtiene la siguiente resistencia $1.7875 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$, considerando una temperatura de operación de 40°C.

Para finalizar es necesario considerar el conductor de aluminio que según la Norma UNE 21.096 (Alambre de aluminio industrial recocido, para conductor eléctrico) contempla los siguientes valores:

- Punto 2.1: Resistividad del aluminio, para conductores eléctricos a 20 °C es de $\rho_{T=20^{\circ}C}^{Al} = \frac{1}{35.71} \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$.
- Punto 4.2: Coeficiente de temperatura del aluminio a 20 °C es $\alpha = 0.00407$.

De la Ecuación 4-4, es posible obtener los siguientes resultados, para el conductor Al 1200 mm² su resistencia es de $2.8 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.

Considerando una temperatura de operación de 40°C la resistencia es de $3.03 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.

Para obtener la resistencia total equivalente del circuito de retorno es necesario calcular la resistencia resultante de los rieles y el conductor; por lo que se reduce a la siguiente ecuación:

$$R_{Total\ Equiv} = \frac{1}{\frac{1}{R_{rieles}} + \frac{1}{R_{Conductor}}} \quad (4-4)$$

La resistencia total del circuito de retorno es de $1.124 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.

4.1.6 Características del material rodante

El esfuerzo de tracción del material rodante es uno de los parámetros importantes a la hora de realizar un estudio de explotación, este indicara mediante sus motores el esfuerzo de tracción necesario para mover el tren, el cual es dependiente de la velocidad. En la Figura 4-2, muestra una curva esfuerzo velocidad de un tren, para una pendiente cero y para una carga de AW0: 0 pasajeros por metro cuadrado; AW2: 4 pasajeros por metro cuadrado y AW3: 6 pasajeros por metro cuadrado.

$$F_{tr} = F_{tr}(v) \quad (4-5)$$

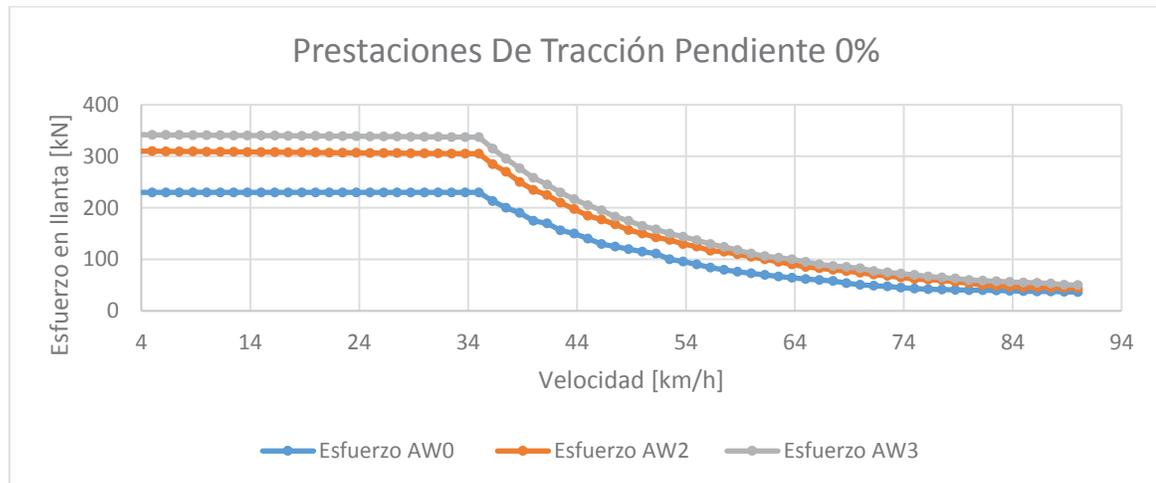


Figura 4-5 Presentación de tracción a pendiente 0% (Fuente: CafThales AS-14, L6 & L3)

Para el software es necesario ingresar solo la curva AW0, ya que este se encarga de calcular el esfuerzo producto del número de pasajeros por metro cuadrado. En la Figura 4-6, se ha proyectado la densidad de pasajeros en base a los datos de primer año de operación (2026), entregados por el área de "Operaciones". Los datos considerados en el siguiente perfil,

corresponden a una exigencia muy superior a lo proyectado para el primer año en un horario de mayor demanda, para así cumplir con la máxima exigencia del sistema.

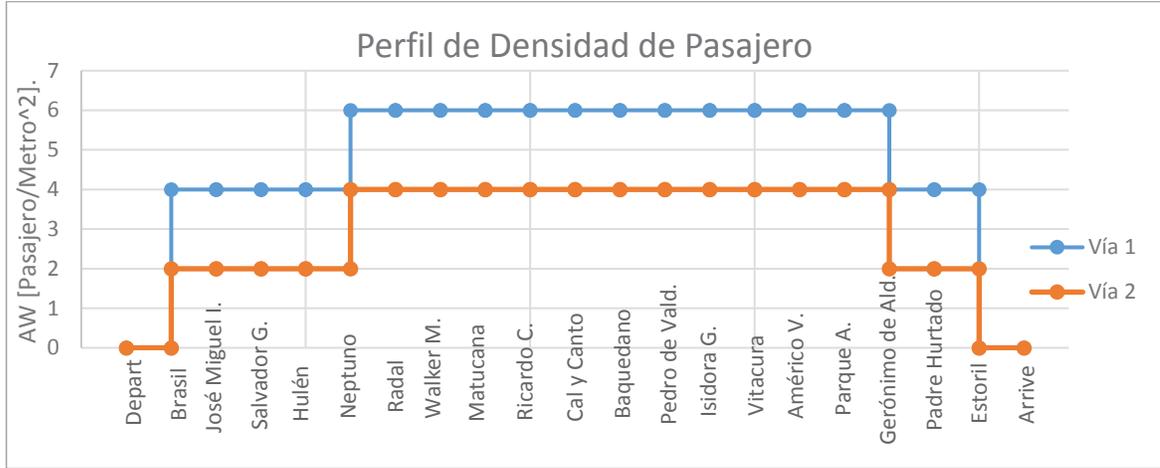


Figura 4-6 Perfil de densidad de pasajeros, proyección a 25 años de operación

La característica del esfuerzo de tracción se define por las tres siguientes variables relevantes [6].

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

Para sacar al tren del reposo se utiliza el máximo esfuerzo de tracción, el cual sujeto al límite de adherencia. En esta etapa se entrega torque constante que corresponde a la primera parte de la curva. En esta etapa se entrega torque constante que corresponde a la primera parte de la curva. Aumentando la velocidad, se llega a un punto en el cual se deja de aplicar torque constante y se suministra potencia constante. Como la potencia es igual a la fuerza por la velocidad, la fuerza de tracción a potencia constante es inversamente proporcional a la velocidad. Esta velocidad de cambio de régimen de los motores este entorno a los 35 km/h. Finalmente existe una velocidad a la cual las fuerzas de resistencia del rodado se igualan a el esfuerzo de tracción, la cual corresponde a la velocidad máxima del tren.

La configuración del tren, se muestra en la Figura 4-7, donde M= Es denominada, unidad cabina motriz; R= Es denominada, unidad cabina remolque (es la encargada de llevar todas las unidades auxiliares, llámense estos compresores entre otros servicios); N= Es denominada, unidad motriz sin cabina de conductor.

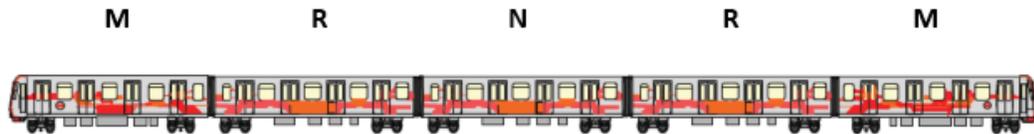


Figura 4-7 Configuración del material rodante utilizado en simulación línea 7 (5 coches)

En un tren en movimiento, existen las llamadas fuerzas de resistencia al rodado. Estas fuerzas se oponen al movimiento del tren al movimiento de este en la vía y se expresa como una función cuadrática dependiente de la velocidad [7]:

$$F_r(v) = A + B * v + C * v^2 \quad (4-6)$$

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

$$F_r(v) = (A + B * v)P + C * N + D * S * v^2 \quad (4-7)$$

En este caso la fuerza se expresa en kilogramos, P es la masa en toneladas, N es número de ejes, la velocidad en km/h y S en metros cuadrados, es la superficie equivalente del vehículo la cual aplica sólo para el equipo tractor al ir a la cabeza del tren. Para los vagones, coches y carros no se utiliza S, solamente se multiplica el coeficiente D por la velocidad al cuadrado. En la siguiente Tabla 4-8, se adjuntan los valores para los coeficientes de la fórmula de Davis.

Tabla 4-8 Coeficientes de resistencia al avance (Coeficiente de Davis)

| Coeficientes de Davis (Resistencia al Avance) | |
|--|-------------|
| A [N/kg] | 0,012 |
| B [N*s/(kg*m)] | 0,00016 |
| C [N*s^2/(kg*m^2)] | 2,62346E-06 |

Todas las simulaciones que se llevan a cabo se realizan con la máxima carga, la cual es considerada como 6 pasajeros por metro cuadrado, en resumen, de estos datos y los del material rodante se adjunta la siguiente Tabla 4-9.

Tabla 4-9 Cuadro de resumen, material rodante

| Parámetro | Valor | Unidad |
|------------------------------------|-------|--------|
| Nº Coches motrices por tren | 3 | [-] |
| Nº motores por coche motriz | 4 | [-] |
| Diámetro rueda | 0,79 | [m] |
| Razón reducción | 7,51 | [-] |
| Eficiencia reducción | 95 | [%] |
| Nº Asientos | 44 | [-] |
| Área, Pasajeros De Pie | 33 | [m^2] |
| Pasajero Total | 1210 | [-] |
| Peso Promedio por Pasajero | 70 | [kg] |
| Masa en carga | 84700 | [kg] |
| Velocidad de aplicación freno mec. | 10 | [km/h] |

4.1.7 Características del grupo rectificador (SER)

Cada SER es la encargada de realizar transformación 20 kV a 1500 V en corriente continua (como se realiza en las nuevas líneas 6 y 3), esto es posible realizarse a través de un transformador que reduce la tensión de 20 kV a 1110 V aproximadamente (Corriente alterna).

El tipo de rectificador a utilizar es uno de 12 pulsos, al igual que las líneas 3 y 6, lo que ayuda a reducir la distorsión armónica total (THD), en comparación a los rectificadores de 6 pulsos que se encuentran instalados en la línea 1. La elevación del número de pulsos mejora la calidad de la tensión en el lado de D.C y la calidad de la corriente de entrada en el lado A.C. En primer caso, porque la tensión de salida se aplan a medida que aumenta el número de pulsos en un periodo de 2π . En el segundo caso, porque la corriente de entrada se hace más sinusoidal al aumentar el número de escalones en un periodo de 2π (un periodo de 2π corresponde al periodo en segundos la tensión de alimentación a la entrada). Actualmente en la industria el rectificador de 12 pulsos es muy popular debido a la simplicidad de su conexión, sin embargo, la distorsión armónica total (THD) de la corriente de línea (i_A) no alcanza los requerimientos armónicos establecidos por estándares internacionales, por lo que normalmente filtros pasivos complementan la eliminación de corrientes armónicas inyectadas al sistema eléctrico.

La Figura 4-8, muestra la corriente i_A y su espectro armónico a la entrada del rectificador de 12 pulsos. Esta corriente tiene una naturaleza aproximadamente sinusoidal con 12 escalones en un periodo de 2π . Por comparación se muestra lo mismo para el rectificador de 6 pulsos. Claramente los armónicos 5, 7, 17, 19, 29, 31, etc., han sido cancelados al interactuar los dos rectificadores de seis pulsos, cuya tensión tienen un desfase de 30° .

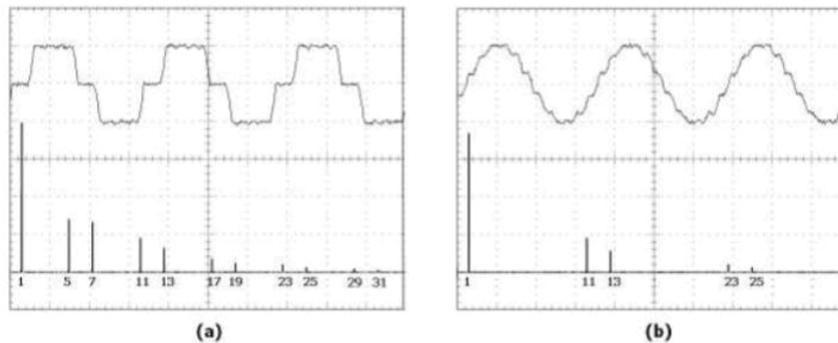


Figura 4-8 Corriente i_A y espectro armónico: a) rectificador de 6 pulsos; b) rectificador de 12 pulsos

A continuación, la tensión es rectificada, para obtener una tensión de vacío de aproximadamente 1570 V (Corriente continua).

En la ecuación (2-1) representa la relación entre la tensión alterna (U_a) y la tensión continua (V_v), donde (p) es el número de pulsos que cuenta la SER. Para el caso de la subestaciones que se consideraran en la línea 7, los rectificadores serán de 12 pulsos y de una potencia nominal de 4000 kW por SER observa las distintas ecuaciones que dé y a continuación, realizar la rectificación eléctrica de esta, obteniendo una tensión en vacío de aproximadamente 1500 V, la que se verifica

a continuación en la ecuación (2-1) donde $p = N^\circ$ de pulsos del rectificador y $U_a =$ Tensión alterna entre fases del secundario del transformador de poder [6].

$$V_v = \sqrt{2} * \frac{\sin \frac{\pi}{p}}{\frac{\pi}{p}} * U_a \quad (4-8)$$

$$V_v = 1.569.8 \text{ [Volts]}$$

Para determinar la tensión nominal, es necesario conocer la resistencia interna del rectificador como también así la potencia (P) de este, el cálculo de la tensión a plena carga se muestra en la siguiente ecuación (2-2).

$$V_n = V_v - R_{int} * I_n \quad (4-9)$$

$$V_n = \frac{P}{I_n} \quad (4-10)$$

Donde la potencia del rectificador es de 4.000 kW y la resistencia interna $R_{int}=0.025 \text{ } [\Omega]$ [9], se tiene lo siguiente al evaluar y reemplazar en las ecuaciones (2-2) y (2-3).

$$V_n = 1.569,8 - 0.025 * \frac{4000 * 10^3}{V_n}$$

$$V_N = 1.503 \text{ [Volts]}$$

La tensión V_N calculada es la tensión continua nominal, con la que opera las líneas anteriormente mencionadas.

Las características principales del grupo rectificador, se resumen a continuación en la Tabla 4-10, las que han sido contrastadas con el diseño de las líneas 6 & 3.

Tabla 4-10 Características del grupo rectificador de tracción

| Parámetros | Valor | Unidad |
|---|----------|---------|
| Tensión interna equiv. (V_{ser}) | 1550 | [V] |
| Resistencia interna equiv. (R_{ser}) | 25 | [mOhms] |
| RD (Resistencia conducción diodo equiv. rectificador) | 1,0E-05 | [Ohms] |
| UD (Tensión conducción diodo equiv. rectificador) | 0,7 | [V] |
| R_{plink} (Resistencia puente positivo) | 5,00E-05 | [Ohms] |
| R_{nlink} (Resistencia puente negativo) | 1,50E-04 | [Ohms] |

4.2 Normativa

Para el diseño de la línea férrea, se utilizará como apoyo el documento denominado “Especificaciones técnicas de interoperabilidad del material rodante en la Unión Europea” (ETI),

quien es el encargado de citar las distintas normas Europeas correspondientes a los parámetros mínimos u óptimos de operación en la red [8].

Por alcance de esta memoria de titulación solo se analizarán los siguientes ítems referentes al punto 4.2.2.1 Alimentación eléctrica, referidos a las ETI:

4.2.1 Tensión y frecuencia

- i. La tensión y la frecuencia del subsistema de energía serán las de uno de los cuatro sistemas específicos de conformidad con la sección 7 (ETI):
 - a. C.A 25 kV, 50 Hz;
 - b. C.A 15 kV, 16,7 Hz;
 - c. C.C 3 kV;
 - d. C.C 1,5 kV.

Para el caso de la línea 7, como ya ha sido mencionado anteriormente, se utilizará la tensión de operación de 1,5 kV en corriente continua, por lo que no será necesario considerar la normativa referente a frecuencias de operación.

- ii. Los valores y los límites de la tensión y la frecuencia cumplirán lo dispuesto en la norma EN 50.163:2004, apartado 4, para el sistema seleccionado.

Al ir a la norma europea 50.163. se presentará las siguientes especificaciones que deberán cumplirse a lo largo de la red de tracción.

Las tensiones: Las tensiones características que deberán cumplirse se especifican a continuación en la Figura 4-9 (excluidas las sobretensiones).

| Sistemas de electrificación | Tension non permanente la plus basse U_{min2} V | Tension permanente la plus basse U_{min1} V | Tension nominale U_n V | Tension permanente la plus élevée U_{max1} V | Tension non permanente la plus élevée U_{max2} V |
|--|---|---|--------------------------------|--|--|
| corriente continua (valores promedio) | 400 | 400 | 600 ^a | 720 | 800 |
| | 500 ^c | 500 | 750 | 900 ^c | 1 000 |
| | 1 000 | 1 000 | 1 500 | 1 800 ^c | 1 950 |
| | 2 000 | 2 000 | 3 000 | 3 600 | 3 900 ^b |
| corriente alterna (valores efectivos) | 11 000 | 12 000 | 15 000 | 17 250 | 18 000 |
| | 17 500 ^c | 19 000 ^c | 25 000 | 27 500 ^c | 29 000 |
| Condiciones nacionales específicas para Francia, ver Anexo B. | | | | | |
| Las redes de troncales futuras y de tracción local deben cumplir con los sistemas clasificados a 750 V, 1500 V o 3000 V. | | | | | |
| b Condiciones nacionales para Bélgica, ver Anexo B. | | | | | |
| c Condiciones nacionales para el Reino Unido, ver Anexo B. | | | | | |

Figura 4-9 Voltaje nominales y sus límites permisibles en valor y duración

Se deben cumplir los siguientes requisitos:

- a. La duración de los voltajes $U_{\min 1}$ y $U_{\min 2}$ no debe exceder los 2 minutos.
- b. La duración de los voltajes entre $U_{\max 1}$ y $U_{\max 2}$ no debe exceder los 5 minutos.
- c. La tensión de la barra colectora en la subestación cuando está vacía, debe ser menor o igual a la $U_{\max 1}$. Para las subestaciones de C.C, es aceptable ver este voltaje vacío menor o igual a $U_{\max 2}$, dado que cuando hay un tren presente, el valor de la tensión en el pantógrafo de este tren debe de acuerdo con la Figura 4-8 y sus requisitos.
- d. Bajo condiciones normales de operación, los valores de voltaje deben estar dentro del rango $U_{\min 1} < U < U_{\max 2}$.
- e. En condiciones de funcionamiento anormales, los voltajes en el rango $U_{\min 2} < U < U_{\min 1}$ de la Figura 4-8 no deben causar destrucción o defecto.
Nota: El uso de sistemas de reducción de potencia en el tren es probable que limite la presencia de baja tensión en la línea aérea de contacto (ver EN 50.388).
- f. Si se alcanzan los voltajes entre $U_{\max 1}$ y $U_{\max 2}$ solo deben lograrse en condiciones no permanentes, como:
 - Frenado regenerativo.
 - Movimiento de los sistemas de control de tensión, como un regulador mecánico.
- g. Voltaje de operación más bajo. En condiciones de funcionamiento anormales, $U_{\min 2}$ es el límite inferior de la tensión de la línea de contacto para la que se prevé que funcione el material rodante.

Nota: Los valores recomendados para el disparo, relacionados con voltajes bajos: la configuración de los relés sin carga en instalaciones fijas o en material rodante debe estar el 85% y el 95% de $U_{\min 2}$.

Las frecuencias: para fines de esta memoria no será necesario considerar este apartado ya que las tensiones a utilizar son continuas (1,5 kV en C.C).

4.2.2 Parámetros de rendimiento del sistema de alimentación eléctrica

Deberán tenerse en cuenta los parámetros siguientes:

- a. La corriente máxima del tren (4.2.4.1 ETI)
- b. El factor de potencia de los trenes y la tensión útil media (4.2.4.2 ETI)

Corriente máxima del tren: El diseño del subsistema de energía asegura la capacidad de la alimentación para conseguir los rendimientos especificados y para permitir la explotación de los trenes con una potencia inferior a 2 MW sin límite de la corriente o la potencia.

Tensión útil media: La tensión útil media calculada «en el pantógrafo» cumplirá lo previsto en la norma EN 50.388:2012, apartado 8 (excepto el apartado 8.3 que se sustituye por el apartado C.1 del apéndice C). La simulación tendrá en cuenta los valores del factor de potencia real de los trenes. El apartado C.2 del apéndice C ofrece información adicional al apartado 8.2 de la EN 50.388:2012.

Es importante mencionar que esta norma europea no se aplica retrospectivamente al material rodante que ya está en servicio.

- i. **Descripción:** La tensión útil media se calcula mediante simulaciones por computadora de una zona geográfica (zona de estudio) que tiene en cuenta todos los trenes programados para atravesar la zona en un periodo de tiempo apropiado correspondiente al periodo de tráfico pico en el horario. Este periodo de tiempo dado será suficiente para tener en cuenta la carga más alta en cada sección eléctrica en la zona geográfica. Se tendrá en cuenta las características eléctricas de la infraestructura y cada tipo diferente de tren en la simulación.
El voltaje fundamental en el pantógrafo de cada tren en la zona geográfica se analizará en cada paso de tiempo de simulación. Para sistemas D.C, se usará la tensión media y el paso del tiempo en la simulación deber ser lo suficientemente corto para tener en cuenta todos los eventos en el cronograma.
- ii. **U útil media (Zona):** Este es el valor en la zona geográfica analizados en la simulación y proporciona una indicación de la calidad de la fuente de alimentación para toda la zona. Todos los trenes en la zona geográfica, durante el periodo pico de tráfico considerado se incluyen en este análisis ya sea estén en modo de tracción o no (en estado estacionario, tracción, regeneración, inercia) en cada paso de tiempo de simulación. Estos valores deberán ser superior a la tensión indicada en la Figura 4-10, según su tensión de diseño.
- iii. **U útil media (Tren):** Este es el valor medio de todos los voltajes en la misma simulación que el estudio de la zona geográfica, pero solo analiza los voltajes de cada tren en la simulación en cada paso de tiempo en que el tren toma carga de tracción (ignorando los pasos cuando los trenes están estacionarios, regenerando o de cabotaje). Estos deberán ser superior a la tensión indicada en la Figura 4-10, según su tensión de operación.

El valor medio de estos voltajes proporciona un control del rendimiento de cada tren en la simulación y, como resultado, identifica el tren de dimensionamiento, es decir, el tren cuya capacidad de aceleración está más restringida por el débil voltaje.

| Sistema de suministro de potencia. | Tensión útil media mínima $U_{\text{útil media}}$ en el pantógrafo | |
|------------------------------------|--|---|
| | Categoría I, II, III, línea TSI HS | Categoría IV, V, VI, VII línea TSI CR y líneas clásicas |
| | Zona de tren | Zona de tren |
| a.c 25.000 V 50 Hz | 22.500 | 22.000 |
| a.c 15.000 V 16.7 Hz | 14.200 | 13.500 |
| d.c 3.000 V | 2.800 | 2.700 |
| d.c 1.500 V | 1.300 | 1.300 |
| d.c 750 V | N.A. | 675 |
| KEY N.A: no aplica. | | |

Figura 4-10 Tensión útil media mínima $U_{\text{útil media}}$ en el pantógrafo en volts

A continuación, se describen los distintos de tipos de líneas férreas según su categoría (Figura 4-10):

I: Líneas especialmente construidas de alta velocidad equipadas para velocidades generalmente iguales o superiores a 250 km/h.

II: Líneas de alta velocidad especialmente mejoradas, equipadas para velocidades del orden de 200 km/h.

III: Líneas de alta velocidad especialmente mejoradas que tienen características especiales como resultado de limitaciones topográficas, de socorro o de planificación urbana en las que la velocidad debe adaptarse a cada caso.

IV: Red ferroviaria convencional con tráfico mixto, es decir tráfico de pasajeros y mixto 200 km/h como máximo; tráfico de mercancía 140 km/h como máximo.

V: Línea básica renovada mixta, tráfico de pasajeros y mixto 160 km/h como máximo, tráfico de carga 100 km/h como máximo.

VI: Líneas nuevas mixta, tráfico de pasajeros 140 km/h como máximo, tráfico de carga 100 km/h como máximo.

VII: Otras líneas actualizadas, tráfico de pasajeros y mixto 120 km/h y tráfico de mercancías 100 km/h como máximo.

Para el caso del Proyecto línea 7 del Metro de Santiago, se considerará la categoría V que es la que cumple todos los requisitos técnicos anteriormente mencionados. Junto a esta categorización se establece según Figura 4-5, que la tensión útil media o también llamada tensión media útil que deberá cumplir será de $U_{\text{útil media}} = 1.300 \text{ V}$, para la zona y el tren.

Cálculos: La tensión útil media en el pantógrafo puede obtenerse de la siguiente forma:

$$U_{\text{útil media}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} U_{p_i} * |I_{p_i}| * dt}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} |I_{p_i}| * dt} \quad (4-11)$$

Donde:

T_i periodo de integración o estudio sobre el tren $N_0. i$;

n número de trenes considerados en la simulación.

U_{p_i} valor medio instantáneo de la tensión en el pantógrafo del tren $N_0. i$;

$|I_{p_i}|$ modulo del valor medio instantáneo de la corriente continua que pasa a través del pantógrafo del $N_0. i$.

La tensión útil media representa la relación entre la potencia media (activa) calculada para el tren cuando está traccionando y el correspondiente valor medio de la corriente.

Cabe destacar que esta normativa, se considerara para la explotación constante del material rodante, pudiendo excluir dicha condición; ya que solo considera el punto de eficiencia de este y no la inoperatividad del material rodante.

4.3 Criterios de operación y simulaciones

Los criterios de operación, son las condiciones impuestas por la experiencia de las otras líneas y de diseño y superponiéndose a estas las normas actuales vigentes. Todo este conjunto de variables es de gran importancia a la hora de realizar la simulación, como también en la interpretación de los resultados obtenidos.

Las simulaciones presentes son resultados de varias iteraciones realizadas con anterioridad, registrando en este informe los resultados pertinentes.

4.3.1 Resultados para 5 SER a 90 segundos de despacho

Los resultados de las simulaciones, se han realizado bajo el criterio de diseño N-1, mencionados en el alcance de esta memoria.

Para ello se han realizado múltiples simulaciones con una subestación de tracción de 4000kW la que posee una resistencia interna de 0.025Ω y una corriente nominal de $I_N=2667 \text{ A}$ [9]; ésta se encuentra duplicada para cada grupo rectificador como se observa en la Figura 4-11.

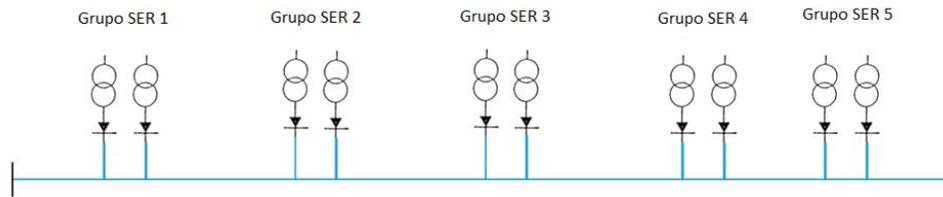


Figura 4-11 Esquema de distribución de las SER a lo largo de la línea férrea, criterio de operación N

En el caso de las simulaciones en condiciones degradada (N-1), se establece simular una falla para un grupo rectificador por simulación (como se aprecia en el ejemplo de la Figura 4-12), considerando para este caso 5 subestaciones de rectificación de tracción, se realizarán 6 simulaciones, para una ubicación establecida, para luego evaluar estas con respecto a las normas EN 50.163:2004, apartado 4 y EN 50.388:2012, apartado 8.

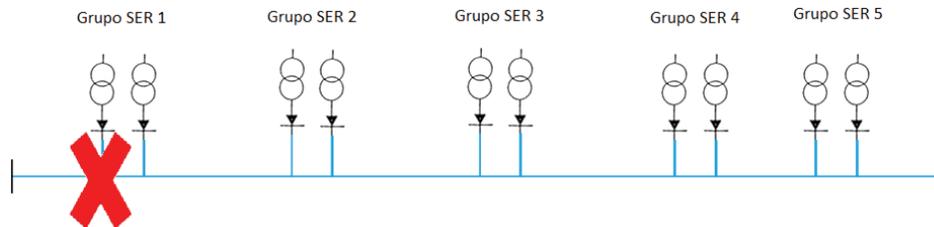


Figura 4-12 Criterio de operación N-1, en grupo SER 1

Para aplicar la norma europea EN 50.388:2012, apartado 8 es necesario poder establecer las zonas de evaluación para una correcta aplicación de esta, por ello se establece que la zona será la que corresponde entre cada interestación, ya que en ella es posible evaluar el material rodante que se encuentra saliendo de la interestación o el que este detenido, es importante destacar que la

evaluación de estos parámetros se realiza en conjunto de ambas vías (vía 1 y vía 2). A continuación, en la Tabla 4-11, se describen las zonas con sus correspondientes estaciones.

Tabla 4-11 Tabla de descripción de Zonas

| Zonas | Interestaciones | Zonas | Interestaciones |
|--------------|---|--------------|---------------------------------------|
| Zona 1 | Est. Depart Est. Brasil | Zona 11 | Est. Cal y Canto Est. Baquedano |
| Zona 2 | Est. Brasil Est. José Miguel I. | Zona 12 | Est. Baquedano Est. Pedro de V. |
| Zona 3 | Est. José Miguel I. Est. Salvador G. | Zona 13 | Est. Pedro de V. Est. Isidora G. |
| Zona 4 | Est. Salvador G. Est. Huelén | Zona 14 | Est. Isidora G. Est. Vitacura |
| Zona 5 | Est. Huelén Est. Neptuno | Zona 15 | Est. Vitacura Est. Vespucio |
| Zona 6 | Est. Neptuno Est. Radal | Zona 16 | Est. Vespucio Est. Parque A. |
| Zona 7 | Est. Radal Est. Walker M. | Zona 17 | Est. Parque A. Est. Gerónimo de A. |
| Zona 8 | Est. Walker M. Est. Matucana | Zona 18 | Est. Gerónimo de A. Est. Padre H. |
| Zona 9 | Est. Matucana Est. Ricardo C. | Zona 19 | Est. Padre H. Est. Estoril |
| Zona 10 | Est. Ricardo C. Est. Cal y Canto | Zona 20 | Est. Estoril Est. Arrive |

Se establece la ubicación optimizada para el perfil de carga de la Figura 4-6, que se muestra en el ítem 4.1.6 “Características del material rodante”.

Tabla 4-12 Ubicación de SER y características

| SER | PK | Tipo | Potencia nominal total |
|----------------------|-----------|-------------|-------------------------------|
| 1 Salvador Gutiérrez | 12+345 | Bi-Grupo | 8000 kW |
| 2 Walker Martínez | 17+975 | Bi-Grupo | 8000 kW |
| 3 Baquedano | 23+515 | Bi-Grupo | 8000 kW |
| 4 Américo Vespucio | 29+798 | Bi-Grupo | 8000 kW |
| 5 Estoril | 35+523 | Bi-Grupo | 8000 kW |

En la Tabla 4-13, se registra las tensiones medias útil calculadas por zona, utilizando la Ecuación 4-8. Estas simulaciones fueron realizadas de modo aleatorias para cada caso, obteniéndose 10 simulaciones por caso, con la finalidad de poder abarcar la mayor cantidad de interrupciones del

servicio y provocar una carga mayor en ciertas zonas (estadísticamente calculada por el software), no respetando el tiempo de detención establecido. Esta tabla es construida con los valores mínimos registrados, considerando los 6 casos (operatividad bajo criterio N, operatividad bajo criterio N-1 para cada SER) con sus correspondientes simulaciones (10 simulaciones por caso).

Para obtener una visualización más crítica respecto al rango de tensión que establece la Norma EN 50.388 (considerando tensiones entre 1500 y 1300 Volts), se ha establecido los siguientes rangos, para evaluar las distintas iteraciones realizadas:

- Fuera de norma (EN 50.388): Bajo 1300 V, fuera del punto de eficiencia (color Rojo)
- En norma (EN 50.388): Entre 1300 V y 1400 V, condición críticamente eficiente (color Amarillo)
- En norma (EN 50.388): Entre 1400 V y 1500 V, condición eficiente (color Verde)

Tabla 4-13 Cuadro de resumen de tensión media útil, mínimas

| | Criterio de operación (N) | SER 1 Salvador Gutiérrez C.O (N-1) | SER 2 Walker Martínez C.O (N-1) | SER 3 Baquedano C.O (N-1) | SER 4 Américo Vespucio C.O (N-1) | SER 5 Estoril C.O (N-1) |
|----------------|----------------------------------|---|--|----------------------------------|---|--------------------------------|
| Zona 1 | 1407.6 | 1357.4 | 1400.6 | 1406.1 | 1407.4 | 1407.6 |
| Zona 2 | 1408.0 | 1347.2 | 1400.1 | 1406.3 | 1407.8 | 1408.0 |
| Zona 3 | 1449.6 | 1389.4 | 1441.8 | 1448.2 | 1449.4 | 1449.5 |
| Zona 4 | 1443.9 | 1378.9 | 1431.0 | 1442.5 | 1443.7 | 1443.9 |
| Zona 5 | 1440.7 | 1405.4 | 1418.2 | 1437.3 | 1440.1 | 1440.6 |
| Zona 6 | 1399.1 | 1369.9 | 1360.3 | 1394.4 | 1398.3 | 1399.0 |
| Zona 7 | 1441.0 | 1429.1 | 1393.1 | 1434.6 | 1439.9 | 1440.9 |
| Zona 8 | 1445.0 | 1438.8 | 1404.8 | 1430.6 | 1443.1 | 1444.8 |
| Zona 9 | 1406.1 | 1399.9 | 1367.3 | 1383.2 | 1402.7 | 1405.7 |
| Zona 10 | 1389.0 | 1384.7 | 1358.5 | 1352.4 | 1383.7 | 1388.3 |
| Zona 11 | 1424.0 | 1421.8 | 1410.1 | 1372.3 | 1417.6 | 1423.4 |
| Zona 12 | 1426.1 | 1425.2 | 1420.4 | 1376.0 | 1409.0 | 1424.5 |
| Zona 13 | 1396.9 | 1396.1 | 1392.3 | 1370.4 | 1361.5 | 1393.1 |
| Zona 14 | 1376.9 | 1376.4 | 1374.1 | 1354.6 | 1332.7 | 1372.3 |
| Zona 15 | 1418.6 | 1418.3 | 1416.9 | 1408.6 | 1367.2 | 1413.3 |
| Zona 16 | 1435.0 | 1434.9 | 1434.1 | 1428.2 | 1378.1 | 1425.2 |
| Zona 17 | 1393.1 | 1393.0 | 1392.4 | 1388.2 | 1350.4 | 1374.4 |
| Zona 18 | 1392.7 | 1392.7 | 1392.2 | 1388.8 | 1361.5 | 1362.5 |
| Zona 19 | 1446.2 | 1446.1 | 1445.9 | 1444.1 | 1428.6 | 1405.6 |
| Zona 20 | 1465.8 | 1465.8 | 1465.6 | 1464.6 | 1455.1 | 1400.9 |

En conclusión, estos nuevos parámetros han ayudado a dilucidar de mejor manera la ubicación física de las subestaciones de rectificación de tracción, ya que se ha podido establecer el

cumplimiento de la normativa con valores muy aceptables tanto en condiciones de operación con criticidad N (se considera las SER operando al 100% de su capacidad de diseño), como también en operación degradada N-1, la que se observa en la Tabla 4-13.

A continuación, se analiza el registro de las tensiones mínimas con respecto a la norma europea EN 50.163:204, apartado 4; establecido en el ítem 4.2 “Normativa”

En la Tabla 4-14, se resumen las tensiones mínimas registradas a lo largo de la red de tracción durante la simulación (simulación base 600 segundos de explotación), en cada columna se analiza los criterios de operación. Estas se encuentran graficadas en la sección denominada apéndice A, sección A.2 (Figuras A-1, Figura A-2, Figura A-3, Figura A-4, Figura A-5 y Figura A-6)

Tabla 4-14 Tabla resumen, tensión mínima en catenaria

| | SER 1 | SER 2 | SER 3 | SER 4 | SER 5 | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------|
| Criterio de Operación (N) | Criterio de Operación (N-1) | |
| Tensión Mín. en Catenaria [Volts] | 1288.5 | 1275.1 | 1249.9 | 1282.7 | 1284.1 | 1287.9 |

Según la norma EN 50.163, la tensión mínima registrada, para poder operar es de 1000 V por lo que se concluye, que no existe inconvenientes tanto para esta condición, como para la de eficiencia en el material rodante (Norma EN 50.388).

De forma anexa se analiza la respuesta de los parámetros eléctricos, para una carga de pasajeros (AW) al 100% a lo largo de toda la red, que corresponde a 6 pasajeros por metro cuadrado (AW6), esta variable se considera para ambas vías, que en la práctica no se da, ya que siempre el flujo de pasajeros es mayor en un sentido que en el otro. Estos resultados se adjuntan en la Tabla 4-15.

Las zonas marcadas en rojo representan las que se encuentran fuera de la norma EN 50.388 lo que indica solo un bajo rendimiento, pero no se concluye la inoperatividad de esta zona, ya que las tensiones se encuentran sobre la tensión mínima aceptable (ver Tabla 4-16), según la norma EN 50.163.

Al igual que el caso anterior, se adjunta en el apéndice A, sección A.2 las tensiones registradas durante la simulación, las que describen el comportamiento de la tensión del material rodante durante la marcha y su salida de cada interestación. (ver Figura A-7, Figura A-8, Figura A-9, Figura A-10, Figura A-11 y Figura A-12).

Tabla 4-15 Cuadro de resumen de tensión media útil, mínimas

| | Criterio de Operación (N) | SER 1 Salvador Gutiérrez C.O (N-1) | SER 2 Walker Martínez C.O (N-1) | SER 3 Baquedano C.O (N-1) | SER 4 Américo Vespucio C.O (N-1) | SER 5 Estoril C.O (N-1) |
|---------|---------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Zona 1 | 1411.7 | 1306.5 | 1401.4 | 1410.2 | 1411.5 | 1411.7 |
| Zona 2 | 1422.6 | 1319.1 | 1415.7 | 1421.4 | 1422.4 | 1422.6 |
| Zona 3 | 1395.3 | 1297.1 | 1382.9 | 1393.5 | 1395.1 | 1395.3 |
| Zona 4 | 1369.6 | 1306.0 | 1341.9 | 1366.4 | 1369.2 | 1369.6 |
| Zona 5 | 1388.7 | 1342.8 | 1349.7 | 1383.0 | 1387.9 | 1388.6 |
| Zona 6 | 1369.9 | 1344.0 | 1316.5 | 1363.1 | 1369.0 | 1369.8 |
| Zona 7 | 1426.6 | 1412.5 | 1369.9 | 1421.1 | 1425.6 | 1426.4 |
| Zona 8 | 1398.4 | 1390.3 | 1334.1 | 1380.8 | 1395.9 | 1398.1 |
| Zona 9 | 1332.0 | 1326.5 | 1266.8 | 1300.0 | 1328.0 | 1331.6 |
| Zona 10 | 1390.0 | 1385.3 | 1352.9 | 1355.4 | 1384.9 | 1389.4 |
| Zona 11 | 1416.1 | 1413.9 | 1397.2 | 1360.0 | 1409.5 | 1415.5 |
| Zona 12 | 1416.9 | 1415.8 | 1409.0 | 1364.4 | 1398.8 | 1415.3 |
| Zona 13 | 1397.9 | 1397.2 | 1391.8 | 1365.2 | 1365.6 | 1393.7 |
| Zona 14 | 1368.6 | 1368.0 | 1364.6 | 1345.1 | 1317.9 | 1363.2 |
| Zona 15 | 1412.0 | 1411.8 | 1409.4 | 1396.8 | 1355.6 | 1406.6 |
| Zona 16 | 1434.5 | 1434.3 | 1433.5 | 1428.7 | 1381.6 | 1421.8 |
| Zona 17 | 1384.6 | 1384.5 | 1383.6 | 1379.4 | 1341.3 | 1360.5 |
| Zona 18 | 1381.1 | 1381.0 | 1380.4 | 1377.4 | 1348.9 | 1346.3 |
| Zona 19 | 1437.2 | 1437.1 | 1436.8 | 1434.8 | 1420.0 | 1391.4 |
| Zona 20 | 1456.0 | 1456.0 | 1455.9 | 1455.3 | 1447.1 | 1380.8 |

Tabla 4-16 Tabla resumen, tensión mínima en catenaria

| | Criterio de Operación (N) | SER 1 Criterio de Operación (N-1) | SER 2 Criterio de Operación (N-1) | SER 3 Criterio de Operación (N-1) | SER 4 Criterio de Operación (N-1) | SER 5 Criterio de Operación (N-1) |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Tensión Mín. en Catenaria [Volts] | 1220.5 | 1129.9 | 1154.5 | 1172.1 | 1219.6 | 1220.4 |

4.3.2 Resultados de potencia, para subestación rectificadora de tracción SER

Para asegurar un correcto funcionamiento durante las horas punta, es necesario considerar las Normas IEC 60.146; al igual que la Norma EU 50.329, que establecen los parámetros de exigencias

para los transformadores de tracción (Ver extracto en la sección 3.1.1 Norma IEC 60.146), esto se resume a que los Transformadores de tracción no deberán tener una exigencia mayor a lo que se establece en la siguiente Tabla 4-17.

Tabla 4-17 Requerimientos de diseño para transformadores de tracción

| I Nominal | Exigencia en tiempo |
|--------------------|--|
| 1.5 I _n | Veces la corriente nominal durante 2 horas |
| 2 I _n | Veces la corriente nominal durante 30 minutos |
| 3 I _n | Veces la corriente nominal durante 1 minuto |
| 4 I _n | Veces la corriente nominal durante 10 segundos |

Como se estableció en la Tabla 4-12, las potencias de las subestaciones son de 4 MW, por lo tanto, el grupo rectificador al ser considerado Bi-Grupo tendrá una potencia total instalada de 8 MW, una corriente nominal de I_n=5333 amperes, para el caso de la operación en horas punta se establece que la corriente nominal no debe ser superior a 1.5 veces la nominal del grupo. Concluyendo que esta no debe superar los 8000 amperes.

La Tabla 4-18, resume los datos obtenidos y calculados en el apéndice B, sección B.1 “Figuras SER, simulación 90 segundos de despacho (curva de carga AW Figura 4-6)”, en los que se observa que la mayor corriente rms registrada ocurre en la SER 4 la que no supera los 8000 amperes. Estableciendo el cumplimiento de la Norma IEC 60.146.

Tabla 4-18 Cuadro de resumen de potencia de SER (carga AW Figura 4-6)

| | SER 1 | SER 2 | SER 3 | SER 4 | SER 5 |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Potencia [MW] | 7,3 | 8,4 | 9 | 9,6 | 6 |
| Corriente RMS [A] | 4839,1 | 5569,7 | 6003,4 | 6418,4 | 3971,5 |

Al igual que el caso anterior se evalúa el comportamiento del sistema con una curva de carga de pasajeros AW6 (6 pasajeros por metro cuadrado) a lo largo de toda la red, obteniéndose los siguientes resultados adjuntos en la Tabla 4-19, que corresponde al resumen ubicado en el apéndice B, sección B.2 “Figuras SER, simulación 9 segundos de despacho.

Tabla 4-19 Cuadro de resumen de potencia de SER (carga AW al 100% en toda la red)

| | SER 1 | SER 2 | SER 3 | SER 4 | SER 5 |
|-------------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Potencia [MW] | 8,4 | 9 | 9 | 9,6 | 6 |
| Corriente RMS [A] | 6567,6 | 5991,6 | 5968,6 | 6297 | 4408 |

A través de los resultados obtenidos por medio de las simulaciones, con una carga de pasajero por metro cuadrado de AW6, es posible concluir que a pesar del aumento considerable de pasajeros en el material rodante no se observa gran variabilidad en la potencia en las SER 2, 3 y 4; no así en las SER 1 y 4 que si presentan variabilidad más significativa. En conclusión, es posible continuar con la operación del sistema sin sufrir problemas como lo establece la normativa IEC 60.146.

4.4 Conclusiones del capítulo

En base a los resultados obtenidos, por medio de la simulación de tracción eléctrica y junto al documento “Especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema de energía del sistema ferroviario de la unión “quien a su vez involucra las normas EN 50.163, EN 50.388 y IEC 60.146 se concluye lo siguiente:

Las simulaciones presentes en los ítems anteriores corresponden a la mejor respuesta en base a los parámetros mencionados y tomando en cuenta las normativas y consideraciones de estudio personal como lo es la división de rangos, de la tensión media útil de la zona esto con el fin de obtener una diferencia sustancial de los casos evaluados que cumplen dicha normativa.

En ambos casos se han analizado los valores mínimos de las simulaciones, con el fin de buscar una exigencia mayor, esto no considera que sean los resultados esperados para dicho funcionamiento, pero si asegura una continuidad del servicio a pesar de que exista la probabilidad del peor evento.

En base a los valores registrados se menciona lo siguiente:

A través de los gráficos de “Tensión en pantógrafo de trenes traccionando” ubicados en el apéndice A, sección A.1, se observa en todo momento una tensión muy uniforme que se concentra aproximadamente en los 1410 V

Operación, en condiciones normales N (sin fallas):

- ✓ Bajo los resultados obtenidos de la primera simulación a través del cálculo de la tensión media útil, con una media de 1420 V, considerando las peores condiciones, a su vez; registrando una tensión media útil no inferior 1377 V, se establece según la norma EN 50.388 que cumple el principio de eficiencia eléctrica para cada una de las zonas analizadas, concluyendo como la mejor ubicación para este análisis.
- ✓ La norma EN 50.163 establece que la tensión de operación no debe superar nunca los límites superiores correspondientes a 1800 V, los que se demostraron en las Figuras anexadas en el apéndice A, sección A.2, como también así el límite inferior de 1000 V los cuales quedaron registrados en la Tabla 4-14. Afirmando así una continuidad constante del material rodante debido a que la peor condición registra 1288 V.
- ✓ Al analizar el aumento de carga a lo largo de la red se registra una tensión media útil media a lo largo de toda la red de 1400 V, y considerando la, pero condición 1332 V es posible concluir una correcta eficiencia a lo largo de toda la red en base a la norma EN 50.388. en

cuanto a la tensión mínima de operación es de 1220 V, la cual cumple el mínimo establecido en la norma EN 50.163.

Operación, en condición degradado N-1 (con fallas):

- ✓ Al analizar las tensiones registradas para los casos degradados, solo se presenta unas tensiones por debajo de lo exigido en la norma EN 50.388 las que corresponden para el caso de mayor exigencia en las zonas 3 y 9 con una tensión muy cercana a los 1300 V. por considerarse solo una norma de eficiencia energética, para esta condición en particular no se ve afectada la operatividad del material rodante ya que la norma EN 50.163 establece el valor mínimo de tensión de operación que para este caso es de 1130 V que es superior a lo exigido
- ✓ Esto puntos anteriormente mencionados, son importante, ya que se podrá continuar con la explotación de trenes sin afectar el servicio, hasta solucionar la condición degradada del sistema independiente de la curva de carga.

En la Tabla 4-12, se resumen la configuración del número de SER, posición PK y potencia nominal de los equipos. En la Figura 4-12 es posible observar la ubicación geográfica obtenida por los resultados y las conclusiones.

A pesar de la última consideración, es decir la red con una cargabilidad AW6, esta resulta muy improbable, así lo demuestra los índices de operación del Metro de Santiago, los que son posible de observar en las horas punta. Como lo es el caso de la línea 1, el mayor flujo de personas en la mañana se concentra hacia el oriente llegándose a registrar en algunos sectores 6 pasajeros por metro cuadrado, en cambio en el sentido contrario la curva descende entre 4 a 3 pasajeros por metro cuadrado en algunos sectores.

Otro punto importante que se ha podido demostrar, gracias a estas simulaciones, es que la variabilidad en cuanto a la corriente no se registran aumentos considerables, por lo tanto, solo se considerará la configuración descrita en la Tabla 4-12 que se expone en la siguiente Figura 4-12.

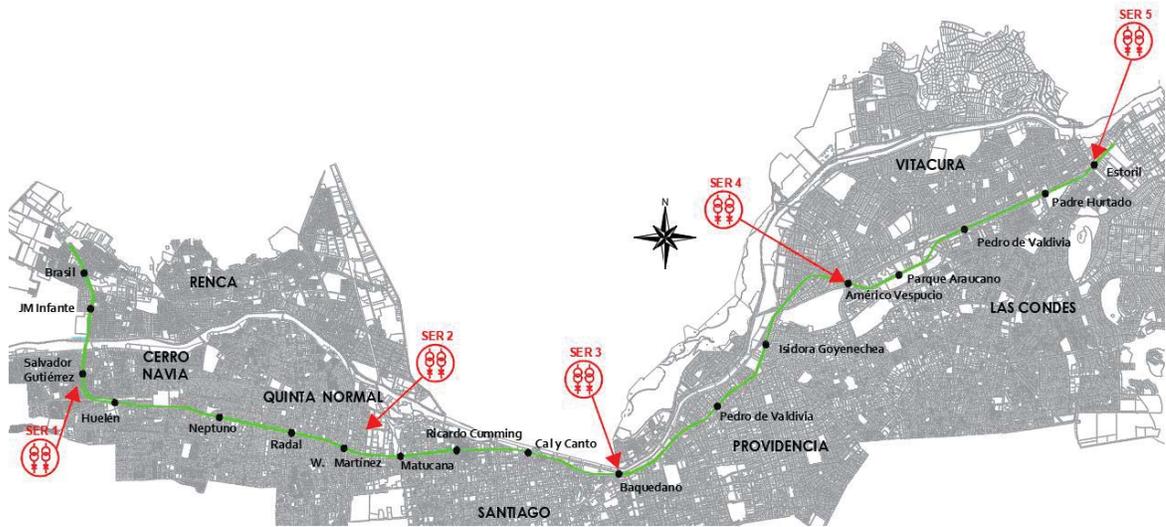


Figura 4-13 Ubicación geográfica de subestación eléctrica de rectificación de tracción

5 Alimentadores

Los alimentadores, son los encargados de realizar la transferencia energética entre las subestaciones de alta tensión SEAT y el CDC (centro de distribución de carga). Estos a su vez deben estar correctamente dimensionado, proyectando una futura expansión de la línea ferroviaria o un aumento de la explotación del material rodante.

A continuación, se expondrán diferente ítem que ayudarán a proyectar de mejor forma las posibles rutas, como también así los costos entre otros factores considerados en este estudio.

5.1 Rutas y características

Debido a que muchas de las líneas o tramos existentes llevan una operación de más de 40 años, es difícil en la actualidad disponer de espacios físicos para proyectar nuevas líneas eléctricas, centros de distribución de carga u otra variable que necesite constar con estos espacios físicos, por lo que las posibles alternativas que son más sencillas y accesibles a simple vista, son rápidamente descartadas, por la alta complejidad de obras civiles en el centro de la ciudad de Santiago.



Figura 5-1 Los óvalos verdes indican puntos de saturación de la red actual de Metro

En la Figura 5-1 se muestra los puntos de saturación indicados por un ovalo de color verde, a continuación, se presentarán dos alternativas que responden a las diferentes exigencias del ferrocarril metropolitano (información respaldada fotográficamente, ver apéndice C).

Cabe mencionar, que en este estudio no se considerará la opción de alimentar este proyecto por medio de la subestación eléctrica de alta tensión Lord Cochrane, debido a que esta no cuenta con capacidad eléctrica disponible. Para realizar expansión es necesario contar disponibilidad en cuanto a las obras civiles; las que tampoco cuentan con capacidad disponible.

Por lo anteriormente mencionado y por la capacidad que cuenta la SEAT Neptuno, se analizará la alternativa de poder alimentar el nuevo CDC desde esta subestación eléctrica de alta tensión.

5.2 Rutas a establecer

En el siguiente ítem, se establece dos posibles rutas

5.2.1 Primera ruta

La siguiente alternativa establece proyectar los alimentadores eléctricos desde las dependencias de SEAT Neptuno a un nuevo CDC, ubicado en las cercanías de la interestacion Cal y Canto (esto debido a la disponibilidad logística de las obras civiles). En la Figura 5-2, es posible observar la ruta de la trayectoria.

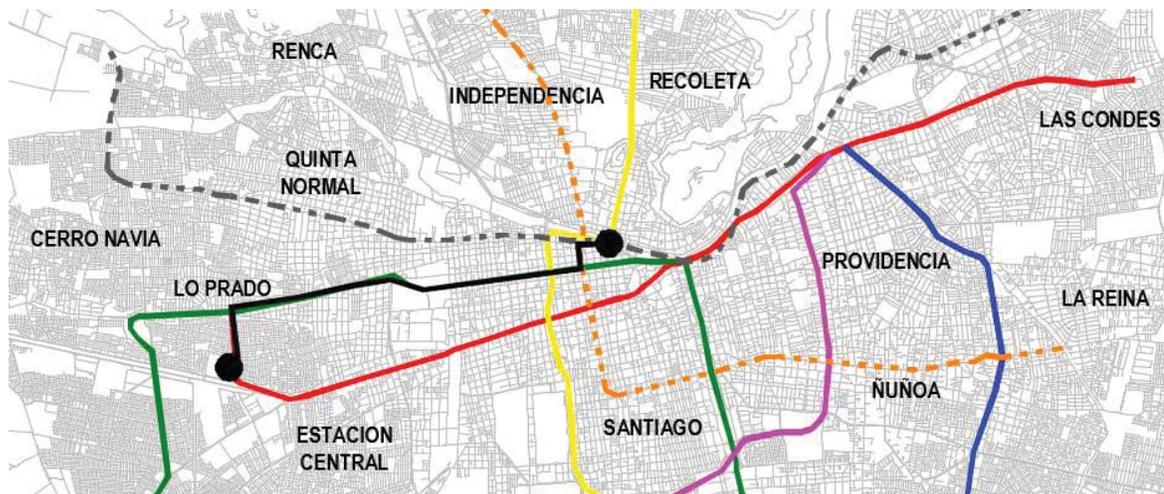


Figura 5-2 Primera ruta (Ruta proyectada en color negro desde estación Neptuno, por línea 5, luego línea 3 y a continuación línea 7, para llegar hasta la futura estación combinación Cal y Canto)

En la Tabla 5-1, se menciona las rutas con su posible desplazamiento y distancias correspondientes, estas con el fin de evaluar los distintos medios de transporte eléctricos (llámense estos túneles, portación o soterrado).

Tabla 5-1 Trayectoria de alimentador CDC Cal y Canto.

| Tramo (intersección a intersección) | Tipo de desplazamiento | Distancia en [km] |
|--|---------------------------|-------------------|
| Neptuno/Dorsal Hasta Neptuno/San Pablo | Túnel/Postación/Soterrado | 1.15 |
| Estación San Pablo hasta Estación Plaza de Armas | L5 | 3.1 |
| Estación Plaza de Armas hasta Estación Cal y Canto | L3 | 0.8 |
| Total | | 5.05 |

5.2.2 Segunda ruta

Como segunda opción se ha establecido la siguiente ruta mostrada en la Figura 5-3, la que involucra salir del taller Neptuno por la calle Neptuno hacia el norte por la misma calle para llegar a la estación Neptuno (línea 7), luego se continua por línea 7 hasta el CDC Cal y Canto.



Figura 5-3 Segunda ruta (Ruta proyectada en color negro desde estación Neptuno hasta la futura estación combinación Cal y Canto)

En la siguiente Tabla 5-2, se registra las rutas además del posible tipo de desplazamiento y las distancia en kilómetros.

Tabla 5-2 Trayectoria de alimentación CDC Cal y Canto

| Tramo (intersección a intersección) | Tipo de desplazamiento | Distancia en [km] |
|---|-------------------------------|--------------------------|
| Neptuno/Dorsal Hasta Neptuno/San Pablo | Túnel/Postación/Soterrado | 1.15 |
| Estación San Pablo hasta Estación Neptuno (Línea 7) | Túnel/Postación/Soterrado | 2.13 |
| Estación Neptuno hasta Estación Cal y Canto | L7 | 6.37 |
| Total | | 9.65 |

5.2.3 Conclusión de ruta

A simple vista y sin mayor análisis es posible observar, que para ambas opciones existen una diferencia sustancial en la distancia. Por lo cual a una mayor distancia se generarán más pérdidas eléctricas en el conductor como también así, se deberá asignar un calibre mayor a este para obtener los mismos beneficios que uno de la misma distancia. Por lo tanto, la ruta Neptuno – San pablo, línea 5 y luego línea 3 presenta mejores beneficios para ser analizada como ruta.

Otro punto importante a considerar, son las obras entre el tramo interestacion San Pablo y interestacion Neptuno (línea 7) (esto es por calle Neptuno). Las opciones que existen para proyectar el nuevo alimentador por esta ruta, son a través de un túnel, postación y soterrado las que considera una distancia de 2.13 km elevando aún más los costos de inversión.

Con los dos puntos mencionados anteriormente se hace inviable poder realizar cualquier realizar algún tipo de estudio para la segunda ruta, ya que es inviable tanto técnica como económicamente.

5.3 Análisis técnico y económico del tramo Neptuno - San Pablo

Debido a que la ruta propuesta contempla analizar la mejor alternativa se procede a analizar la seguridad y la inversión de esta.



Figura 5-4 Calle Neptuno (a 100 metros de la interestacion Neptuno)

En el siguiente ítem se analizará tres alternativas distintas para el tramo Neptuno – San Pablo ya que este se encuentra sin capacidad física para instalar escalerillas a través del túnel, que son los encargados de alojar y proteger los alimentadores.

En cuanto a las variables a analizar, se describen a continuación:

- **Seguridad del suministro eléctrico a corto plazo:** Es garantizar mediante un sistema energético que posibilite un servicio continuo, incluso ante situaciones climatológicas adversas; y que sea capaz de transportar y distribuir la energía hasta que pueda ser consumida. Por lo tanto, la seguridad a corto plazo está más asociada a la vulnerabilidad de un determinado sistema. Esto es: a la seguridad de las instalaciones, a la capacidad de soportar accidentes, indisponibilidades, fallos, atentados, etc. También aquí, es significativamente la distinción entre energías basadas en redes de transporte o no. Así, un sistema energético basado en red será tanto más robusto cuanto más red tenga, esto

es mayor sea su mallado. Y mayor sea la capacidad de sus interconexiones. Una breve aproximación a los riesgos en el suministro en el corto plazo se cita a continuación [10]:

- Fallos técnicos
 - Accidentes
 - Condiciones meteorológicas
 - Insuficientes mecánicos de flexibilidad
 - Situaciones políticas
 - Desastres naturales, ataques terroristas
 - Conflictos geopolíticos
 - Ausencia de una regulación adecuada
 - Roles y responsabilidad difusas
 - Ausencia de planes ante contingencia
- **Evaluación económica:** La evaluación económica del proyecto de alimentación eléctrica, tiene por objetivo identificar ventajas y desventajas asociadas a la inversión en un proyecto antes de la implementación del mismo.

La evaluación económica es un método de análisis útil para adoptar decisiones ante diferentes alternativas.

Es frecuente confundir la evaluación económica con el análisis económico o evaluación financiera. En este segundo caso se aconseja únicamente la vertiente monetaria de un proyecto con el objetivo de considerar su rentabilidad en términos de flujo de dinero. Mientras que la evaluación económica integra en su análisis tanto los costes monetarios como los beneficios expresados en otras unidades relacionadas con las mejoras en las condiciones de la vida de un grupo. Podemos hablar entonces de rentabilidad o beneficio de tipo social.

Para evaluar los riesgos de las diferentes alternativas de alimentación eléctrica. Será necesario utilizar un método de gestión de riesgo que unifique las tres alternativas, y poder establecer parámetros comparativos entre unos y otros. Será necesario considerar un análisis por medio de una matriz de riesgo, la que será definida a través de la “Seguridad del suministro eléctrico a corto plazo”. La finalidad de esta gestión, es poder cuantificar empíricamente cada uno de los factores de riesgo y determinar así, el que tenga menor riesgo de sufrir una interrupción del servicio.

Para el caso de la evaluación económica, se llevará a cabo analizando el coste de la inversión asociada al tramo Neptuno – San Pablo, para establecer diferencias monetarias entre una y otra opción.

5.3.1 Alternativa 1: Túnel

La ingeniería de túneles cuenta con diversos enfoques para su edificación de manera adecuada y con la menor cantidad de contratiempos.

Cuando la comparamos con otra técnica de construcciones más habituales, hacer túneles tiene sus pros, como, por ejemplo:

- En termino ecológico, reduce la contaminación sónica.
- Si la profundidad tiende a sobrepasar el límite, es más barato que el corte y cubierta
- Durante la construcción no hay interrupciones o afecciones de lo que sucede en la superficie.
- Este método garantiza un menor consumo de energía y una implementación más rápida.
- En condiciones de seguridad, terrorista o agentes externos es muy seguro ya que solo se dispone de una entrada y una salida, eliminando las cámaras de registro.
- En caso de mantenimiento o falla es más rápida la inspección del conductor

A pesar de contar con ciertos beneficios, la complejidad asociada con estas obras también incluye ciertos contras:

- Para este tipo de operaciones es importante contar con un equipo de ingenieros y diseñadores altamente experimentado y cualificado.
- A diferencia del túnel falso (cavar y cubrir), iniciar esta clase de estructuras tiene un coste más elevado
- Además de hormigoneras de alto desempeño, se requiere de maquina especializada para construirlos.
- Involucra una supervisión constante a lo largo de lo que dure el proyecto para garantizar la seguridad y el cumplimiento.

En la Figura 5-5, se muestra un túnel destinado para el transporte de alimentadores eléctricos, otro modelo de túnel de menor tamaño y que cumple las mismas exigencias, en la Figura 5-6 se muestra este.

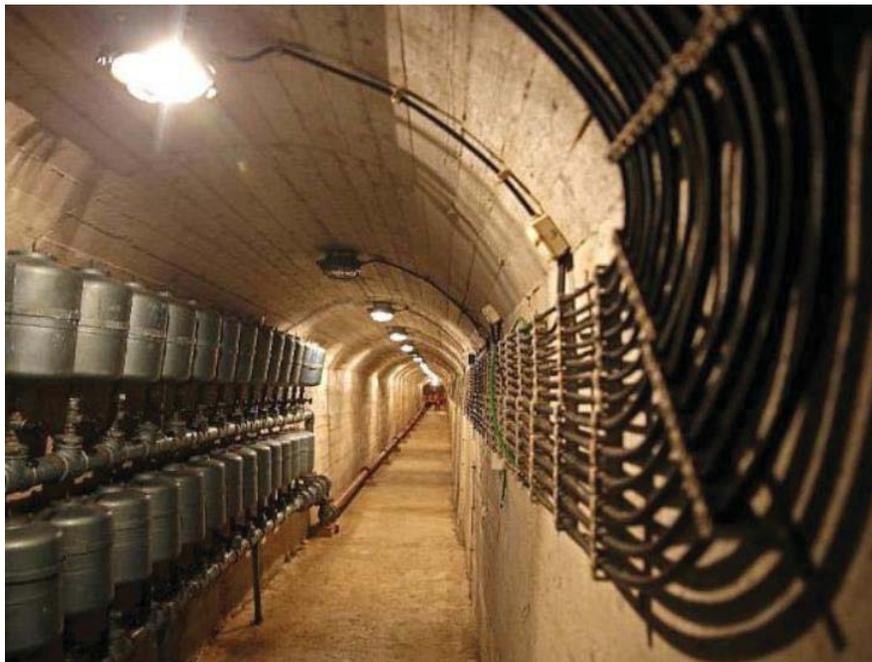


Figura 5-5 Túnel con alta tensión de corriente continua de 825 volts (Fuente: Túnel de metro; Metropolitano de Moscú)

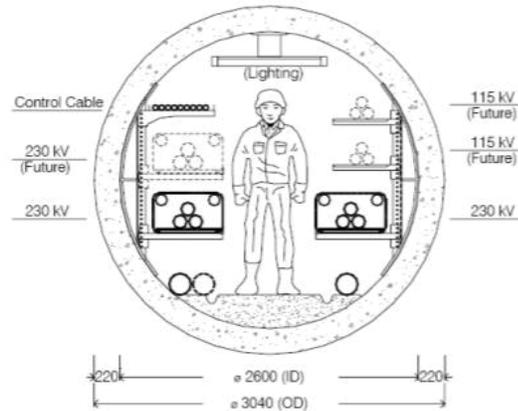


Figura 5-6 Sección transversal del túnel Lardprao-Vibhavadi, Bangkok. (Fuente: Informe final de líneas soterradas)

Una vez analizada las ventajas y desventajas de este sistema se procedieron a realizar una matriz de riesgo por medio de sus variables técnicas (este estudio se encuentra detallado en el apéndice D, sección D.1), el que demostró muy buenos resultados, ya que no existes variables externas que interfieran la operación continua de este.

Fuentes oficiales del metro de Santiago y a través del registro de obras realizadas con similares características, establece que el costo aproximado por metro lineal construido es de 240 UF, en una zona de alta complejidad (como lo es el centro de la ciudad). Considerando la extensión de 1150 metros se estima que el corte total sería de aproximadamente de 276.000 UF.

Un informe realizado por la empresa DEUMAN, establece que los costos de inversión para obras en túneles, han disminuido considerablemente, esto debido al aumento de la tecnología. Además, en la Tabla 1: Relaciones típicas de costos lineales soterradas v/s aéreas [11]. Establece que para redes de una tensión de 22 kV el coste es de 2 a 5 veces. Por lo tanto, es preciso indicar que este costo puede disminuir considerablemente al contemplar este informe.

5.3.2 Alternativa 2: Postación

Se llaman líneas aéreas la instalación cuya finalidad es la transmisión aérea de energía eléctrica, esto se realiza con elementos conductores y elementos de soporte.

Los soportes están formados por:

- Postes
- Fundaciones
- Puesta a tierra
- Conductores, que en la mayoría de los casos son desnudos
- Aisladores
- Accesorios de mampostería

En la Figura 5-6, se muestra un doble circuito aéreo (con este doble circuito se cumple el criterio de diseño N-1)



Figura 5-7 Poste urbano con doble circuito

Al igual que el caso anterior, se procedió a realizar una matriz de riesgo con las mismas variables analizadas anteriormente, con la finalidad de poder comparar ambos sistemas que cumplen la misma finalidad, pero de manera muy distinta (este estudio se encuentra anexado en el apéndice D, sección D.2), en cuanto a los resultados no fueron bastantes favorables como los anteriores, debido a que las condiciones climáticas, árboles y personas pueden verse involucrados en accidentes intencionales, como a su vez voluntarios. Esto debido a que el sistema se encuentra expuesto en la vía pública. Una posibilidad de reducir estos eventos es dividir ambos circuitos en dos líneas independientes, es decir considerar un circuito eléctrico por un sentido de la calzada y el otro circuito, por una distinta.

Para el presupuesto anexo en el apéndice D, sección D.2 de la Figura D-1, es necesario actualizar su valor por lo que utilizara el IPC entre los meses de enero 2017 a octubre 2018, donde la tasa corresponde al 5%. Al actualizar el valor se obtiene un total de \$15,554,619; para continuar con el análisis se utilizará UF (unidad de fomento), como unidad de reajuste, por lo cual, la valoración de este corresponde a 566 UF.

5.3.3 Alternativa 3: Soterrado

La gran mayoría de la red eléctrica en media o baja tensión, en las zonas metropolitana, edificaciones o parques vecinales se utiliza las redes soterradas. Esta ayuda a minimizar el riesgo eléctrico y controla la contaminación visual.

Este comprende el suministro transporte e instalaciones de los arreglos de bancos de ductos, de acuerdo al diámetro, la cantidad, el sitio de instalación de los mismos definidos en el diseño. Estas instalaciones comprenden una serie de requerimientos, como los que se consideran a continuación:

- Consultar a todos los servicios de la ciudad para realizar excavaciones (distribuidor de electricidad, agua potable, gas, telefonía, cable operador entre otros).
- Costear todos los movimientos de servicios externos
- Realizar excavaciones (esta comprende aproximadamente 1 metro de profundidad, las que dependerán del número de niveles de ductos).
- Realizar roturas de pavimentos, pisos, ciclovías o pequeñas áreas verdes.
- Considerar cámaras de registro y de paso, las que no deben superar entre los 75 a 90 metros

Se deben considerar mufas y conexiones sumergibles, en la Figura 5-6, es posible observar una cámara de paso la que presenta 3 niveles.



Figura 5-8 Detalle terminación de ductos con campanas, cámara de registro (Fuente: *Redes de media tensión Duván*)

Al analizar la matriz de riesgo asociada a esta alternativa (Estudio anexado en el apéndice D, sección D.3), fue posible comprobar el aumento del análisis de riesgo en comparación con la alternativa 1 (se comparará ya que ambas son subterráneas), estas se describen a continuación:

- Interrupción del servicio debido a falla humana: el aumento está relacionado a que este sistema debe contener cámaras de registro cada 75 a 90 metros, por lo que su acceso puede ser vulnerado provocando una falla en el sistema.
- Acceso de personal no autorizado: al igual que el caso anterior esta acción también se ve expuesta por el mismo principio
- Fallas técnicas: en caso de una falla técnica mayor (llámese está a reemplazar un conductor) el tiempo necesario para realizar el cambio de este conductor será mucho mayor que las otras dos opciones.
- El tendido de conductores es más complejo debido a la disponibilidad de espacio, por lo que se requiere más personal y tensores.
- Se requiere mufas que soporten inundaciones de conductores.

Para el caso del soterrado se consideró algún estudio compartido por el profesor Jorge Menares quien fue el encargado de desarrollar el curso “modelos para ingeniería conceptual en proyectos eléctricos” donde se trató el tema de redes soterradas.

Para evaluar económicamente esta opción, se puede observar las estimaciones anexadas en el apéndice D, sección D.3. Se determina que el coste por kilómetro lineal es de 6605 U, para el caso de la distancia establecida, se evalúa que el coste total es de 7,595.75 UF.

5.3.4 Conclusiones del análisis

Tras el análisis de las variables asignadas es posible concluir lo siguiente:

Tabla 5-3 Resumen de análisis de alternativa

| Alternativa | Matriz de riesgo | Coste económico |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| Alimentación a través de Túnel | Bajo | 276,000 UF |
| Alimentación a través de Postación | Alto | 566 UF |
| Alimentación a través de Soterrado | Medio | 7,595 UF |

En la Tabla 5-3, se resume las tres alternativas analizadas en las que existen diferencias sustanciales en cuanto al ámbito técnico, como coste económico.

Como se indicó anteriormente Metro de Santiago, cuenta con un túnel para alimentar eléctricamente una de sus líneas, para estos casos el costo económico pasa casi a segundo plano, al considerar la continuidad del servicio (con un sistema que ayude a evitar la casi nula probabilidad de falla) producto de agentes externos.

Además, con las últimas actualizaciones en materia de expansión y creación de nuevas líneas para el Metro de Santiago, las que fueron anunciadas por el presidente Sebastián Piñera en la Cuenta Pública implica la construcción de las líneas 8 y 9, además de la extensión de la línea 4.

Esto último reafirma la necesidad de poder contar con una alternativa que proporciones el menor riesgo posible, por lo tanto, se concluye que la mejor alternativa para cumplir con estos requerimientos es la construcción de un túnel.

5.4 Proyección de demanda energética y potencia a instalar

Metro de Santiago con más de 40 años de experiencia en el rubro, ha establecido que el factor de crecimiento que experimentan las nuevas líneas y expansiones a lo largo de los años, es del 2,746 % anual. Además, por simplicidad se establece que las estaciones combinación representan un consumo de aproximadamente 72,4 MWh (Mega Watt hora), las estaciones comunes, tendrán un consumo de 94,1 MWh y el consumo por tracción es de 113,3 MWh por kilómetro (*Fuente: Memoria anual 2017*).

En la siguiente Tabla 5-3 se resumen la proyección para el primer mes de operación de la línea 7.

Tabla 5-4 Proyección Línea 7- Mes 1 (inicio de la operación).

| Descripción | Numero | Proyección en kWh | Proyección en % |
|----------------------------------|--------|-------------------|-----------------|
| Estación Común | 16 | 1.158.721,455 | - |
| Estación Combinación | 4 | 282.438,3548 | - |
| Consumo fuerza y alumbrado [kWh] | - | 1.585.275,791 | 34 % |
| Consumo tracción [kWh] | 25,1 | 3.125.264,577 | 66 % |
| Consumo total [kWh] | - | 4.710.540,368 | 100 % |

Se establecerá como mes uno, enero el inicio de la operación y se realizan las proyecciones respectivas conforme a la distribución anual (enero a diciembre) una vez determinado este se realiza un promedio de los consumos que son clasificados en dos grandes categorías, las que son: Consumo de energía en tracción y consumos energía de alumbrados, los que equivalen aproximadamente a un 34 % y 66 % respectivamente.

En la siguiente Tabla 5-4, es posible observar los resultados obtenidos del análisis que se encuentra en el apéndice B, sección B.3 “Figuras SAF, Cuadro de carga de estaciones en línea 6”, donde se proyectan los consumos a 15 y 20 años respectivamente.

Tabla 5-5 Proyección a 15 y 20 años del inicio de la operación.

| | Primer Año | 15 años | 20 años |
|---------------------------------|------------|-----------|-----------|
| Consumo Energía Tracción [kWh] | 3.032.034 | 4.552.258 | 5.212.642 |
| Consumo Energía Alumbrado [kWh] | 1.537.985 | 2.309.112 | 2.644.088 |
| Consumo Energía Total [kWh] | 4.570.019 | 6.861.370 | 7.856.730 |

Para establecer la potencia máxima de la red de tracción, se tomarán los datos obtenidos en el simulador, para la condición más estricta, que es de un intervalo de despacho 90 segundos, recordando que la simulación obtenida corresponde a un intervalo de 600 segundos de explotación ferroviaria.

El La Tabla 5-5, se observa las potencias obtenidas para cada una de las subestaciones de rectificación simuladas.

Tabla 5-6 Potencia determinada en 600 segundos simulación, 90 segundos de despacho.

| SER N° | PK | Configuración | Potencia [MW] |
|-----------------------|--------|---------------|---------------|
| 1° Salvador Gutiérrez | 12+345 | Bi-Grupo | 7,3 |
| 2° Walker Martínez | 17+975 | Bi-Grupo | 8.4 |
| 3° Baquedano | 23+515 | Bi-Grupo | 9 |
| 4° Américo Vespucio | 29+798 | Bi-Grupo | 9,6 |
| 5° Estoril | 35+523 | Bi-Grupo | 6 |

A través de los datos obtenidos es posible concluir, que la potencia necesaria para alimentar el sistema de tracción férrea en las más estrictas condiciones es de 40,3 MW, cabe destacar que esta cifra corresponde a una operación de 90 segundos de despacho a una carga de pasajeros de 6 personas por metro cuadrado, esta potencia corresponde

Para el caso de la alimentación eléctrica de las estaciones, a través de las SAF (subestaciones de alumbrado y fuerza), se realiza un estudio para determinar la potencia máxima establecida para cada estación del tipo común o combinación.

En la siguiente Tabla 5-6, se resume la información obtenida de las estaciones tipo las que se encuentra la información en el apéndice B, sección B.3 “Figuras SAF, Cuadro de carga de estaciones en línea 6”.

Tabla 5-7 Distribución de potencia, para estación común Línea 7.

| | Potencia Instalada [kW] | Porcentaje [%] |
|----------------------|-------------------------|----------------|
| Alumbrado | 69 | 19 |
| Fuerza y calefacción | 299 | 81 |
| Total, SAF | 368 | 100 |

En la Tabla 5-6, se establece que la potencia total instalada es de 368 [kW] a través del factor de demanda que es considerado en promedio 0.7 es posible determinar la potencia máxima a utilizar, por lo tanto, el resultado de la potencia en una estación común proyectada para línea 7 es de $P_{Total}=257.6$ kW.

En la Tabla 5-7 se establece la distribución de potencias para una estación tipo combinación, la cual es considerada de los datos adquiridos de la estación Ñuble, estos se encuentran en el apéndice B, sección B.3 “Figuras SAF, Cuadro de carga de estaciones en línea 6”.

Tabla 5-8 Distribución de potencia, para estación combinación Línea 7.

| | Potencia máxima [kW] | Porcentaje [%] |
|----------------------|----------------------|----------------|
| Alumbrado | 92 | 18 |
| Fuerza y calefacción | 423 | 82 |
| Total, SAF | 515 | 100 |

En la Tabla 5-6, se establece que la potencia total instalada es de 515 [kW] a través del factor de demanda que es considerado en promedio 0.7 es posible determinar la potencia máxima a utilizar, por lo tanto, el resultado de la potencia en una estación combinación proyectada para línea 7 es de $P_{Total} = 360.5$ kW.

Con los datos obtenidos es posible totalizar las potencias para determinar la potencia total del centro de distribución de carga el que se calcula en la siguiente Tabla 5-8.

Tabla 5-9 Cálculos para potencia máxima trazado Línea 7.

| | Factor [-] | Potencia [MW] |
|------------------------|------------|---------------|
| Estaciones Comunes | 16 | 4.12 |
| Estaciones Combinación | 4 | 1.08 |
| Tracción (Línea 7) | 5 SER | 40.3 |
| | | 52.43 |

Por lo tanto, la potencia total de la Línea 7 es de 52.43 MW. Como potencia máxima a alcanzar en plena operación y en horario punta (aproximadamente 15 a 20 años después de su inauguración).

5.5 Metodología de cálculo y estudio de alimentadores

Para el cálculo de conductores se considera, por separado, las siguientes tres condiciones:

- Dimensionamiento por capacidad de corriente: Corriente máxima que puede soportar el conductor en régimen permanente de operación nominal sin sufrir daños.
- Dimensionamiento por capacidad al cortocircuito: Corriente máxima de cortocircuito que puede soportar el conductor durante un tiempo determinado sin sufrir daño.
- Dimensionamiento por caída de tensión: caída de tensión máxima admisible en el conductor.

5.5.1 Dimensionamiento eléctrico

En este punto se analiza la máxima corriente que circula en los conductores, en condiciones nominales y en régimen permanente, la cual debe ser menor a la capacidad de corriente que pueden transportar los conductores bajo las condiciones en las que serán instalados.

La corriente máxima en régimen permanente a transportar por un conductor se calcula de acuerdo al procedimiento establecido en la NEC 2011, el cual se indica en la siguiente expresión:

$$I_{cap} = I_{cond} * F_2 * F_3 * F_4 \quad (5-1)$$

Donde:

I_{cap} : Capacidad de corriente del conductor bajo las condiciones de instalación en [A].

I_{cond} : Capacidad de corriente del conductor indicadas en tabla [A].

F_2 : Factor de corrección por cantidad de conductores en ducto.

- F_3 : Factor de corrección por variación de la temperatura ambiental.
 F_4 : Factor de corrección conductor en EPC.

Debido a que lugar de instalación es menor a los 3.000 metros sobre el nivel del mar, no se considera el factor por altitud indicado por la NEC 2011.

5.5.2 Corriente nominal y diseño

La corriente nominal para sistemas trifásicos se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_n = \frac{S}{\sqrt{3} * V} \quad (5-2)$$

Donde:

- I_n : Corriente Nominal en [A].
 S : Potencia aparente en [kVA]
 V : Voltaje entre líneas en [kV]

La corriente nominal para sistemas monofásicos se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_n = \frac{S}{V} \quad (5-3)$$

Donde:

- I_n : Corriente Nominal en [A].
 S : Potencia aparente en [kVA]
 V : Voltaje fase – neutro en [kV]

Por último, la corriente nominal para sistemas en corriente continua se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_n = \frac{P}{V} \quad (5-4)$$

Donde:

- I_n : Corriente Nominal en [A].
 S : Potencia activa en [kW]
 V : Voltaje en corriente continua en [kV]

La corriente de diseño es la corriente con la cual se determina la corriente que deberá transportar el conductor, y se obtiene de la siguiente expresión:

$$I_d = I_n * F_1 \quad (5-5)$$

Donde:

I_d : Corriente de diseño en [A].

I_n : Corriente nominal en [A].

F_1 : Factor de seguridad

5.5.3 Factor de seguridad (F_1)

De acuerdo a su funcionalidad se utilizarán los siguientes factores:

- Para conductores en media tensión: No se considera factor de seguridad para estos conductores ($F_1=1$).

5.5.4 Factor de corrección por cantidad de conductores en ductos (F_2)

Si el número de conductores activos colocados en un mismo ducto (cañería o tubería) excede de tres, se deberá disminuir la capacidad de transporte de cada uno de los conductores individuales de acuerdo al factor de corrección F_2 indicado en la tabla 310.15(B)(3)(a) de la NEC 2011, la que se muestra en la Tabla 5-7:

Tabla 5-10 Factor de corrección de capacidad de transporte de corriente por cantidad de conductores en tubería.

| Cantidad de Conductores* | F_2 |
|--------------------------|-------|
| Hasta 3 | 1 |
| 4 a 6 | 0.8 |
| 7 a 9 | 0.7 |
| 10 a 20 | 0.5 |
| 21 a 30 | 0.45 |
| 31 a 40 | 0.4 |
| Sobre 41 | 0.35 |

Para este caso de estudio los conductores de media tensión se considerará la instalación por medio de escalerillas, por lo tanto, el factor a utilizar será de $F_2=1$.

5.5.5 Factor de corrección por variación de la temperatura ambiente (F_3)

La capacidad de corriente de los conductores se deberá corregir de acuerdo a la variación de la temperatura ambiente del lugar de instalación, respecto a la temperatura ambiente utilizada en la capacidad de corriente de referencia del conductor (valor tabla). El factor de corrección de la capacidad de transporte de la corriente por variación de temperatura ambiente F_3 , indicado en la tabla 310.15(B)(2)(a) de la NEC 2011, se muestra en la Tabla 5-8.

Se considerará una temperatura ambiente [°C] como máximo de 40 grados en las instalaciones de circulación de túneles, al referirse a la Tabla 5-10, es posible determinar que el factor de corrección por variación de la temperatura ambiente (F_3) es de 0.91 [-].

Tabla 5-11 Factor de corrección de la capacidad de transporte de la corriente por variación de temperatura ambiental (Temperatura conductor 90°C).

| Factor de Corrección de la Capacidad de Transporte de Corriente por Variación de Temperatura Ambiente (Temperatura conductor 90°C). | |
|--|----------------------|
| Temperatura ambiente [°C] | Factor de corrección |
| Menor a 10 | 1.15 |
| 11 a 15 | 1.12 |
| 16 a 20 | 1.08 |
| 21 a 25 | 1.04 |
| 26 a 30 | 1.00 |
| 31 a 35 | 0.96 |
| 36 a 40 | 0.91 |
| 41 a 45 | 0.87 |
| 46 a 50 | 0.82 |
| 51 a 55 | 0.76 |
| 56 a 60 | 0.71 |
| 61 a 65 | 0.65 |
| 66 a 70 | 0.58 |
| 71 a 75 | 0.50 |
| 76 a 80 | 0.41 |
| 81 a 85 | 0.29 |

5.5.6 Factor de corrección conductor en EPC (F4)

Para el caso de utilizar monoconductores de 2000 V o superior en escalerillas porta conductores (EPC), el artículo 392 de la NEC 2011 indica lo siguiente:

- La capacidad de corriente para cables de calibre 1/0 AWG o superior instalados en escalerilla sin cubierta no podrán exceder el 75 % de la capacidad de corriente del conductor. Cuando la escalerilla está cubierta sin ventilación por más de 1,8 metros la capacidad de corriente no podrá exceder el 70% de la capacidad de corriente del conductor al aire
- Cuando los cables monoconductores son instalados en escalerillas sin cubierta en una disposición de una capa horizontal manteniendo un espacio entre ellos igual al diámetro de un conductor, la capacidad de corriente para conductores de calibre 1/0 AWG o superior no podrán exceder la capacidad del conductor al aire.
- Cuando los cables monoconductores son instalados en disposición de triángulo o cuadrado en escalerilla sin cubierta, con una separación de 2.15 veces el diámetro del cable de mayor sección, la capacidad de corriente de los cables de calibre 1/0 AWG o superior no podrán exceder la capacidad del conductor al aire.

Para nuestro caso, para los cables de media tensión se aplicará el caso a (F4=0.7).

5.5.7 Capacidad de corriente.

Se procede a verificar que la capacidad de corriente de los conductores corregida por los factores mencionados anteriormente sea mayor a la corriente de diseño. De no ocurrir esto, se procede a aumentar la sección del conductor, repetir el procedimiento de corrección y volver a verificar la condición mencionada.

Para comprobar la capacidad de corriente de los conductores se utilizó la tabla mostrada en el apéndice “Hoja de datos de conductores”, la que se compara con los resultados obtenidos a los cálculos realizados en este punto.

5.6 Dimensionamiento por capacidad al cortocircuito.

En este punto se determinará si la sección del conductor es mayor a la sección mínima calculada para resistir la corriente de cortocircuito a la que puede quedar sometido el conductor. La sección mínima se calculará utilizando la siguiente expresión.

$$\left(\frac{I_{cc}}{S_{min}}\right)^2 * t = K * \text{Log}\left(\frac{T_2 + T_c}{T_1 + T_c}\right) \quad (5-6)$$

Donde:

- I_{cc} : Corriente de cortocircuito en [A]
- S_{min} : Sección mínima requerida según cálculo de cortocircuito en [mm²]
- t : tiempo de despeje de la falla en [s]
- T_2 : Temperatura máxima de operación en cortocircuito del conductor (°C)
- T_1 : Temperatura máxima de operación normal del conductor (°C)
- K : Para cobre es igual a 115700, mientras que para aluminio es 48690
- T_c : Para cobre es igual a 234, mientras que para aluminio es 228

Para nuestro caso, se considera que la temperatura máxima de operación en régimen permanente T_1 : 90 °C, y la corriente máxima de operación en cortocircuito T_2 : 250°C.

Según la condición de $I = f(t)$, se calcula la sección mínima requerida para el nivel de cortocircuito predefinido, en función de los tiempos de despeje instantáneo y lento:

t : 0.02 seg. (2ciclos), despeje instantáneo

5.6.1 Corriente cortocircuito para dimensionamiento de cables.

La corriente de cortocircuito (I_{cc}) a considerar para el dimensionamiento de los conductores, se puede obtener de las siguientes 2 maneras:

- Corriente corto circuito aportada por el transformador

Cuando el sistema tiene como fuente de alimentación directa un transformador, se puede considerar que la condición más desfavorable es la corriente de cortocircuito a la salida de este. Dicha corriente se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3} * K * L * I}{S_{MCM} * 1000} \quad (5-7)$$

Donde:

- K*: 12.9 para cobre y 21.2 para aluminio.
L: Largo del conductor en metros (m)
I: Corriente en régimen permanente de la carga (A)
S_{MCM}: Sección del conductor en MCM

5.7 Resumen del calculo de conductores.

A modo de simplicidad se utilizará un factor de potencia igual a 0.97, por lo tanto, la potencia total requerida por el CDC será de 54 MVA, la cual nos ayudará a determinar la corriente nominal del alimentador por medio de la Ecuación 5-2, la que se establece en 1558.8 A, como se establece en el punto 5.5.3, la corriente nominal será igual a la de diseño. Para el caso de los factores de seguridad se resumirán estos en la siguiente Tabla 5-12, adjunta:

Tabla 5-12 Resumen de factores de seguridad considerados

| Factor | Valor |
|---------------|--------------|
| F1 | 1 |
| F2 | 1 |
| F3 | 0.91 |
| F4 | 0.7 |

Considerando los valores anteriormente mencionados y la Ecuación 5-1 se procede a la revisión del conductor por capacidad de corriente. El conductor seleccionado es AWG/kcmil 1000 cuya corriente es de 850 a 40°C, para este caso solo se procede a aplicar el factor F4, obteniéndose como resultado 595 A. Para cumplir con la corriente de diseño es necesario utilizar 3 conductores por fase, es decir, 9 conductores.

Discusión y conclusiones

En la siguiente discusión y conclusión, se analizarán los resultados obtenidos a partir de los datos preliminares; es decir de las ingenieras conceptuales. Por tanto, cada uno de estos estudios realizados deberán ser corroborados a través de una ingeniería básica, que será la encargada de analizar la disponibilidad de recintos, bandejas porta conductores, entre otros.

Se aborda dos grandes temas estudiados en detalle, como lo es el diseño de la alimentación de tracción, mediante los parámetros de la vía, como los del material rodante y la alimentación eléctrica del centro de distribución de carga (CDC) que es el encargado de alimentar cada una de las SER y a su vez las SAF.

Para el caso de las futuras estaciones y en vista que el estudio fue realizado en base a la funcionalidad de la estación (estación combinación o de pasada), no se consideró las dimensiones de estas, homologando el cálculo de potencia a estas categorías. En estudios posteriores se deberán considerar las futuras cargas corrigiendo estos eventuales valores

Al igual que el caso anterior, el consumo energético de tracción es obtenido a partir de las simulaciones de tracción eléctrica, la que presenta un alto consumo energético, debido a que las simulaciones son realizadas bajo estrictas condiciones de operabilidad, cabe destacar que estos valores deberán ser corroborados a través de una ingeniería conceptual

Es relevante destacar, el estudio y diseño de catenarias y circuito de retorno, ya que gracias a estos cálculos fue posible mejorar las tensiones y pérdidas del sistema, a lo largo de toda la red. La que fue comprobada a través de las constantes iteraciones realizadas.

A pesar de que en Chile no existe una normativa eléctrica ferroviaria, que ayude a evaluar la eficiencia y el correcto funcionamiento del material rodante, fue de gran ayuda considerar el “anexo del reglamento de la comisión, denominado “Especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema de energía del sistema ferroviario de la unión” (ETI), además esto ayudo a crear las herramientas necesarias, para rescatar nuevas variables relacionadas con la eficiencia de las zonas de diseño.

A partir de las diversas simulaciones y configuraciones realizadas fue posible concluir la mejor ubicación en base a la normativa europea recomendada en la ETI, además se pudo demostrar que a pesar del aumento de cargabilidad de pasajeros por metro cuadrado (considerando la curva de

la Figura 4-6), el sistema de vías responde cumpliendo con creces cada una de las normas mencionadas, donde se detalla este en el capítulo 4.4.

Al analizar las potencias de la línea 7 (datos adquiridos del simulador), se concluye que estos corresponden a los puntos más críticos, pudiendo establecer un número menor de alimentadores a medida que esta incremente su carga en pasajeros y su despacho con el correr de los años.

La ruta analizada solo comprende un estudio conceptual del recorrido, desconociendo la disponibilidad de espacio físico existente (esto debido a la falta de una visita técnica más detallada). Por lo que será necesario verificar en terreno estas variables. A la fecha es necesario contar con la infraestructura adecuada ya que se han anunciado la construcción de las líneas 8 y 9 respectivamente; las que serán necesario alimentar de manera segura y confiable. Esto hace que la idea de construir un alimentador dedicado para estas tres líneas sea más factible a la solución presentada a la fecha.

En conclusión, esta memoria de titulación ha podido identificar la importancia de constar con una alimentación e infraestructura adecuada para los futuros proyectos, como también así identificar de manera preliminar el número de subestaciones de rectificación eléctrica de tracción para el proyecto de la línea 7 del Metro de Santiago. Como valor agregado de esta memoria de titulación, se ha optimizado el procesamiento de las simulaciones, acotando los tiempos de trabajo y aumentando el número de casos a simular, cabe mencionar que existe aún áreas pendientes a mejorar, como lo es el caso de la incorporación de puentes (negativos, positivos) para mejor la recuperación del frenado regenerativo entre ambas vías aumentando la eficiencia de esta.

Bibliografía

- [1] Empresa de Transporte de Pasajero Metro S.A <https://www.contraloria.cl/web/cgr/empresa-de-transporte-de-pasajeros-metro-s.a.-metro-de-santiago>. [Último acceso: 19 12 2017].
- [2] Los sistemas de transportes público en Santiago, «Memoria Chilena» Biblioteca Nacional De Chile, Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3706.html#ui-accordion-tabs-header-1>. [Último acceso: 10 09 2017].
- [3] Metro de Santiago anuncia la construcción de 114 ascensores en 37 estaciones, «24horas,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.24horas.cl/nacional/metro-de-santiago-anuncia-la-construccion-de-114-ascensores-en-37-estaciones-2465971> [Último acceso: 28 Agosto 2017].
- [4] Pontificia Universidad Católica de Chile. «Criterio N-1 y automatismo de control en la expansión de los sistemas de transmisión,» Departamento de ingeniería eléctrica,[En línea]. Available: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno11/technical/def.html> [Último acceso: 1 Febrero 2018].
- [5] Kiessling/Puschmann/Schmieder/Vega, «Líneas de Contacto para Ferrocarriles electrificados,» Planificación, diseño, instalación y mantenimiento. Siemens, *ISBN 10:3895783226*, 2009.
- [6] Calculo Tensión Nominal Subestaciones de Rectificación,«El 6011 Tracción eléctrica»Universidad de Chile, Departamento de ingeniería eléctrica, Santiago, Chile, 2012.
- [7] Curso optativo Tracción Eléctrica U. de Chile, «Diseño de una subestacion de transformación para Tracción Eléctrica» [En línea] Available biblioteca.unirioja.es/tfe_e/R000001359.pdf [Último acceso: 2 Febrero 2018].

-
- [8] Anexo del Reglamento de la Comisión, "Sobre las especificaciones técnicas de interoperatividad del subsistema de energía del sistema ferroviario de la Unión" [En línea] Available
<http://register.consilium.europa.eu/doc/srv?l=ES&f=ST%2011932%202014%20ADD%201>
[Último acceso: 9 septiembre 2018].
- [9] Ingeniería básica proyectos línea 3 & línea 6, « Memoria de cálculo simulación dinámica de trenes L6» Documento PL3-0702-02-12 Metro de Santiago.
- [10] Boque temático: Alternativa Energeticas, «De la seguridad de suministro eléctrico... a la independencia energética. - Un mismo objetivo con soluciones divergentes»[En línea] Available
http://www.researchgate.net/publication/291972918_DE_LA_SEGURIDAD_DE_SUMINISTRO_ELECTRICO_A_LA_INDEPENDENCIA_ENERGETICA_-_UN_MISMO_OBJETIVO_CON_SOLUCIONES_DIVERGENTES
- [11] Informe Final «Costos y efectos ambientales de la utilización de líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje AC yHVDC soterradas, iguales y mayores a 66 kV», Deuman [En línea] Available
<http://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=1oQnOlxss1MoVnZ++QvAoQ==>

A Parametros y tensiones de la vía por simulaciones

En el siguiente apéndice se presenta información relevante que alude a cálculos realizado tanto para la configuración del sistema, como también los resultados obtenidos

A.1 Parametros de línea 7

La Tabla A-1 y A-2, muestra el resultado de las cotas a lo largo de toda la red, más la compensación dinámica calculada para cada curva, esto con la finalidad de obtener resultados congruentes a la futura realidad.

Tabla A-1 Pendientes del trazado más compensación de curvas.

| PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada | PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada | PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 10000 | -0.30% | 12170 | 0.63% | 15580 | 0.73% |
| 10139 | -0.41% | 12192 | 0.50% | 15705 | 0.76% |
| 10165 | -0.30% | 12258 | 0.30% | 15746 | 0.73% |
| 10446 | -0.50% | 12457 | 0.50% | 16848 | 0.30% |
| 10719 | 0.53% | 12666 | 0.79% | 17063 | -0.51% |
| 10764 | 0.82% | 13007 | 0.50% | 17433 | -0.56% |
| 10872 | 0.53% | 13315 | 0.30% | 17525 | -0.51% |
| 10954 | 0.30% | 13469 | 0.50% | 17791 | -0.64% |
| 11167 | -0.55% | 13649 | 0.53% | 17856 | -0.51% |
| 11240 | -0.75% | 13699 | 0.50% | 17911 | 0.30% |
| 11274 | -0.55% | 13959 | 0.54% | 18107 | 0.46% |
| 11540 | -0.71% | 14044 | 0.50% | 18207 | 2.43% |
| 11566 | -0.55% | 15022 | 0.77% | 18516 | 2.54% |
| 11774 | 0.50% | 15135 | 0.50% | 18569 | 2.43% |
| 11863 | 0.60% | 15283 | 0.77% | 19068 | 2.59% |
| 11905 | 0.50% | 15428 | 0.30% | 19120 | 2.43% |

Tabla A-2 Pendientes del trazado más compensación de curvas (continuación)

| PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada | PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada | PM Eje Túnel OO.CC. | Pendiente Compensada |
|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 19176 | 0.30% | 24252 | 0.93% | 28846 | 0.64% |
| 19368 | 1.32% | 24908 | 1.09% | 29044 | 0.96% |
| 19974 | 1.42% | 24932 | 0.93% | 29269 | 0.64% |
| 20008 | 1.32% | 25150 | 1.09% | 29723 | 0.30% |
| 20153 | 0.30% | 25204 | 0.93% | 29947 | 3.28% |
| 20313 | -0.50% | 25490 | 1.09% | 30215 | 3.55% |
| 20480 | -0.54% | 25635 | 0.93% | 30362 | 3.28% |
| 20506 | -0.50% | 25881 | 0.30% | 30902 | 0.30% |
| 21217 | 0.65% | 26080 | 0.80% | 31094 | 2.43% |
| 21348 | 0.92% | 26152 | 0.96% | 31518 | 2.70% |
| 21372 | 0.65% | 26199 | 0.80% | 31697 | 2.43% |
| 21655 | 0.80% | 26604 | 1.00% | 32012 | 2.72% |
| 21694 | 0.65% | 26628 | 0.80% | 32168 | 2.43% |
| 21731 | 0.30% | 26767 | 1.09% | 32495 | 0.30% |
| 21953 | 2.23% | 26939 | 0.80% | 32749 | 1.59% |
| 22248 | 2.43% | 27107 | 0.96% | 33922 | 0.30% |
| 22297 | 2.23% | 27145 | 0.80% | 34137 | 2.44% |
| 23247 | 2.43% | 27266 | 0.96% | 35096 | 2.57% |
| 23385 | 2.23% | 27303 | 0.80% | 35293 | 2.44% |
| 23437 | 0.30% | 27443 | 0.30% | 35357 | 0.30% |
| 23645 | 0.93% | 27670 | 3.00% | 35814 | 0.41% |
| 23772 | 1.22% | 27970 | 3.16% | 35855 | 0.30% |
| 23807 | 0.93% | 28138 | 3.00% | | |
| 24147 | 1.09% | 28643 | 0.30% | | |

A.2 Grafica de tensión en pantógrafo de trenes traccionando

En las siguientes figuras se muestra en los puntos de color azul la tensión registrada de los trenes traccionando en ambas vías (vía 1 y vía 2), desde el PK 10+000 hasta el 35+855. Además, se han incorporado dos líneas, una de color amarillo y otra violeta, las que muestran la tensión mínima de operación y la tensión media útil mínima de la zona.

Además, es posible observar los puntos de inyección de corriente los que se encuentran establecidos por medio de pequeños triángulos y a su vez etiquetados con su correspondiente intersección.

Tensión en Pantografo de Trenes Traccionando

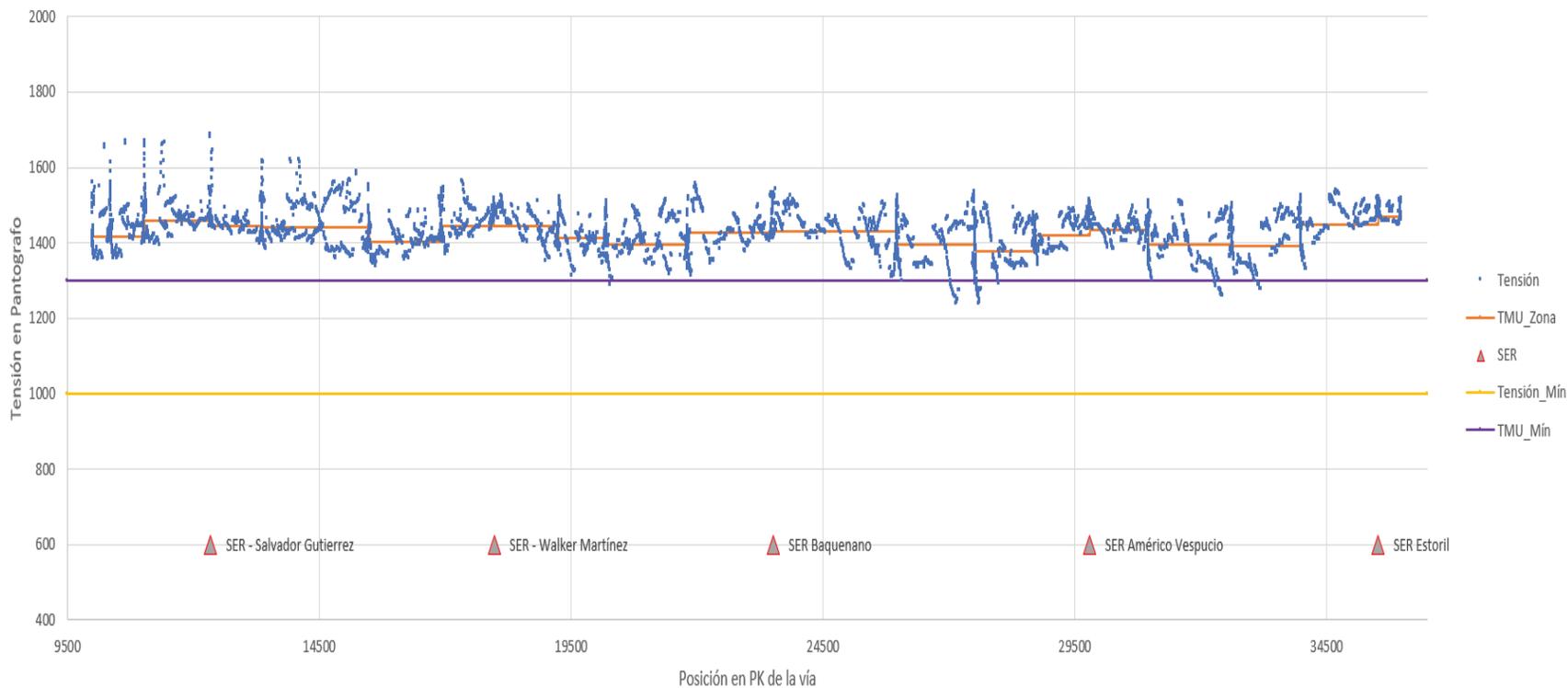


Figura A-1 Explotación del sistema 100% operativo (Críticidad N)

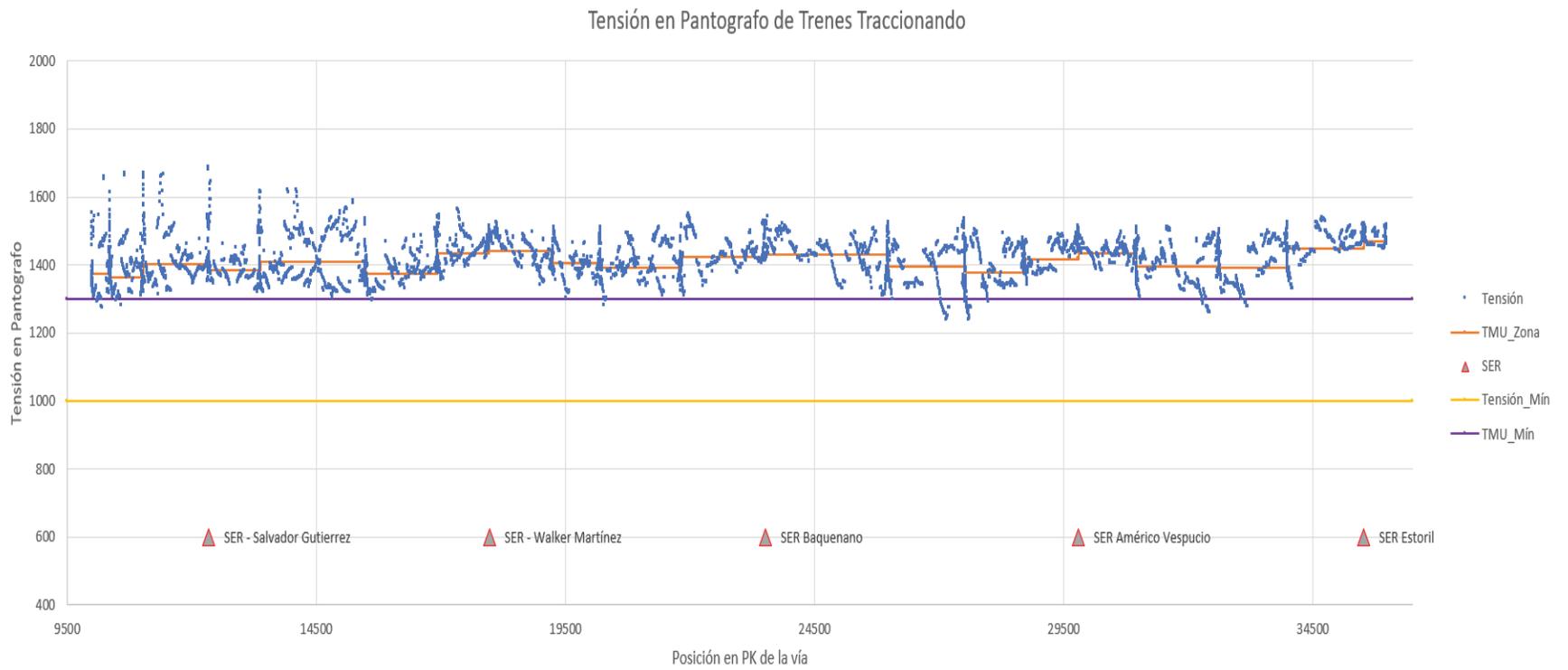


Figura A-2 Explotación del sistema con SER Salvador G. al 50% operatividad (Críticidad N-1)

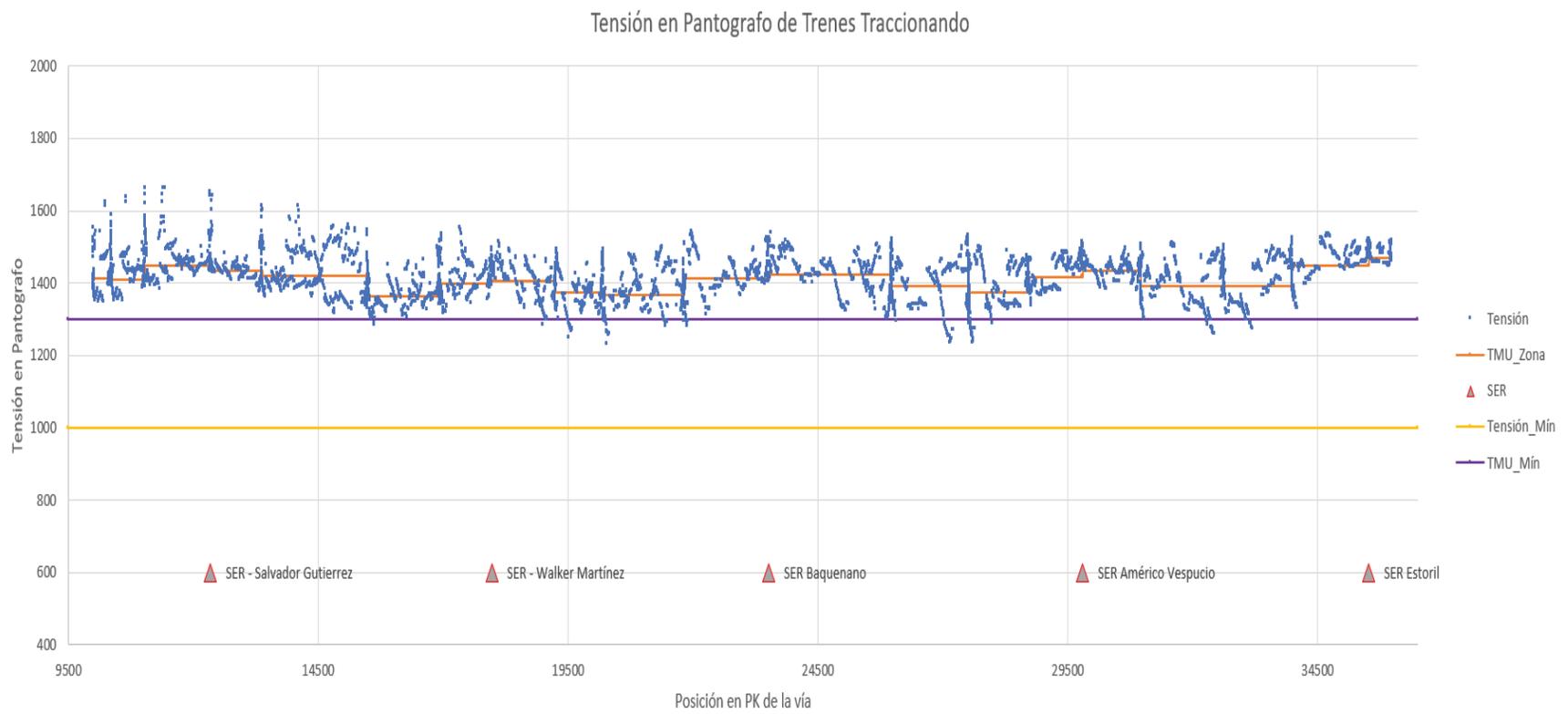


Figura A-3 Explotación del sistema con SER Walker Martínez al 50% operatividad (Críticidad N-1)

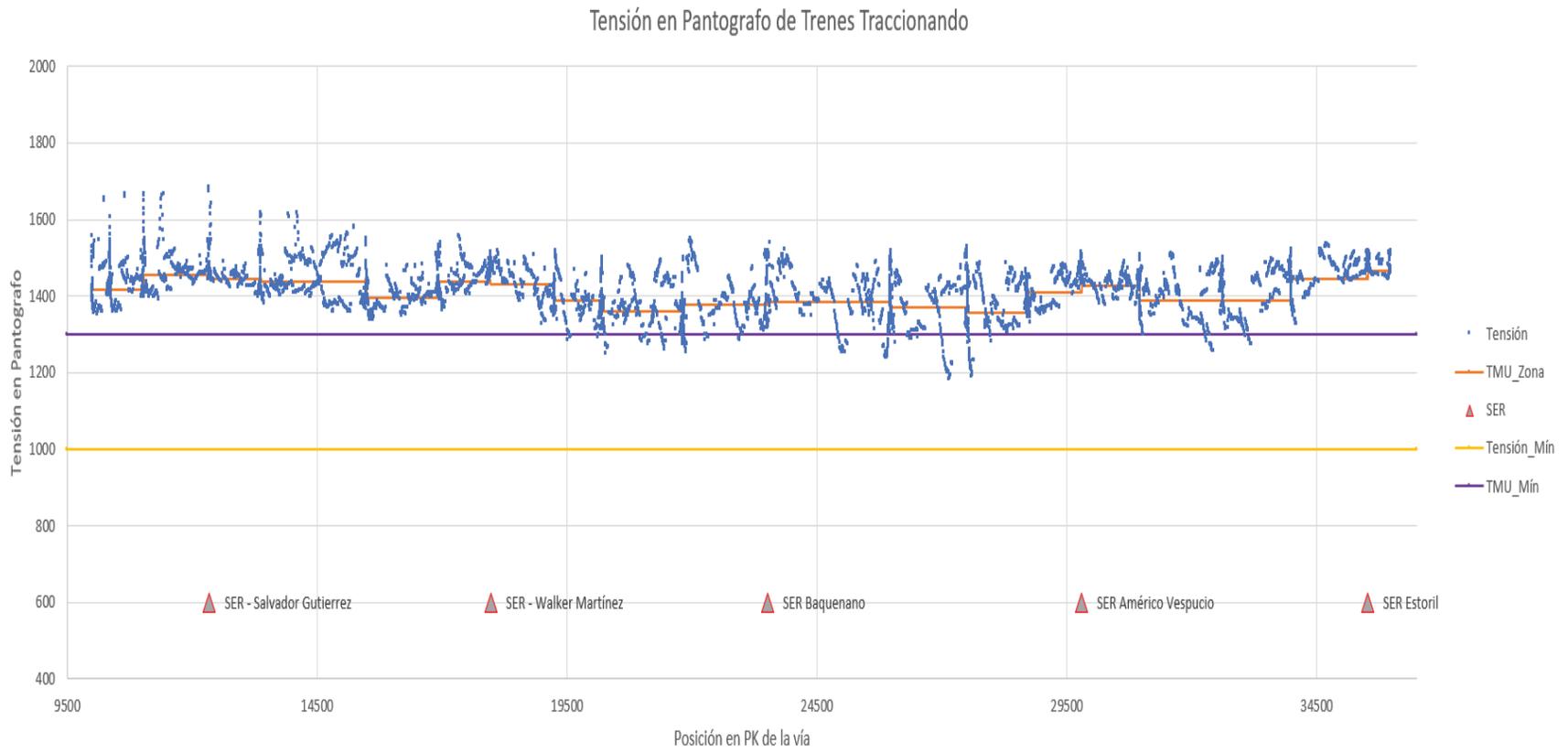


Figura A-4 Explotación del sistema con SER Baquedano al 50% operatividad (Críticidad N-1)

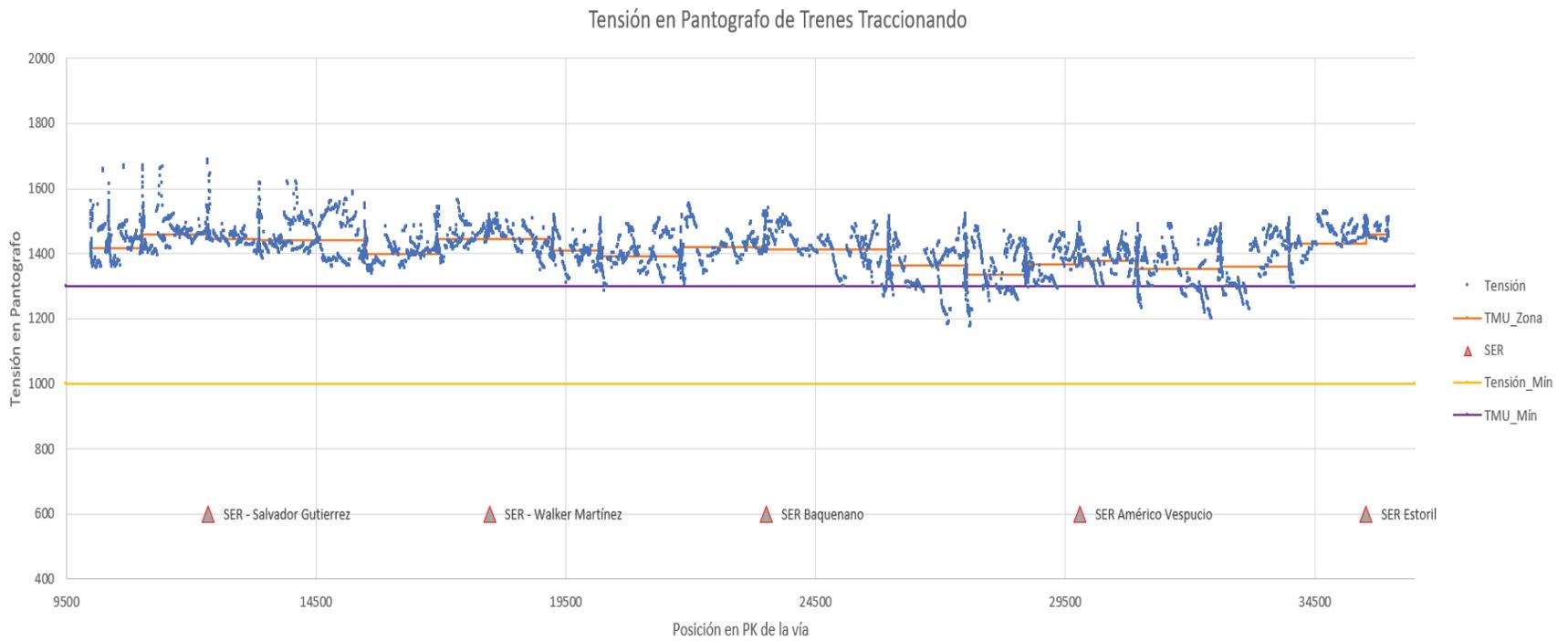


Figura A-5 Explotación del sistema con SER Américo Vespucio al 50% operatividad (Críticidad N-1)

Tensión en Pantografo de Trenes Traccionando

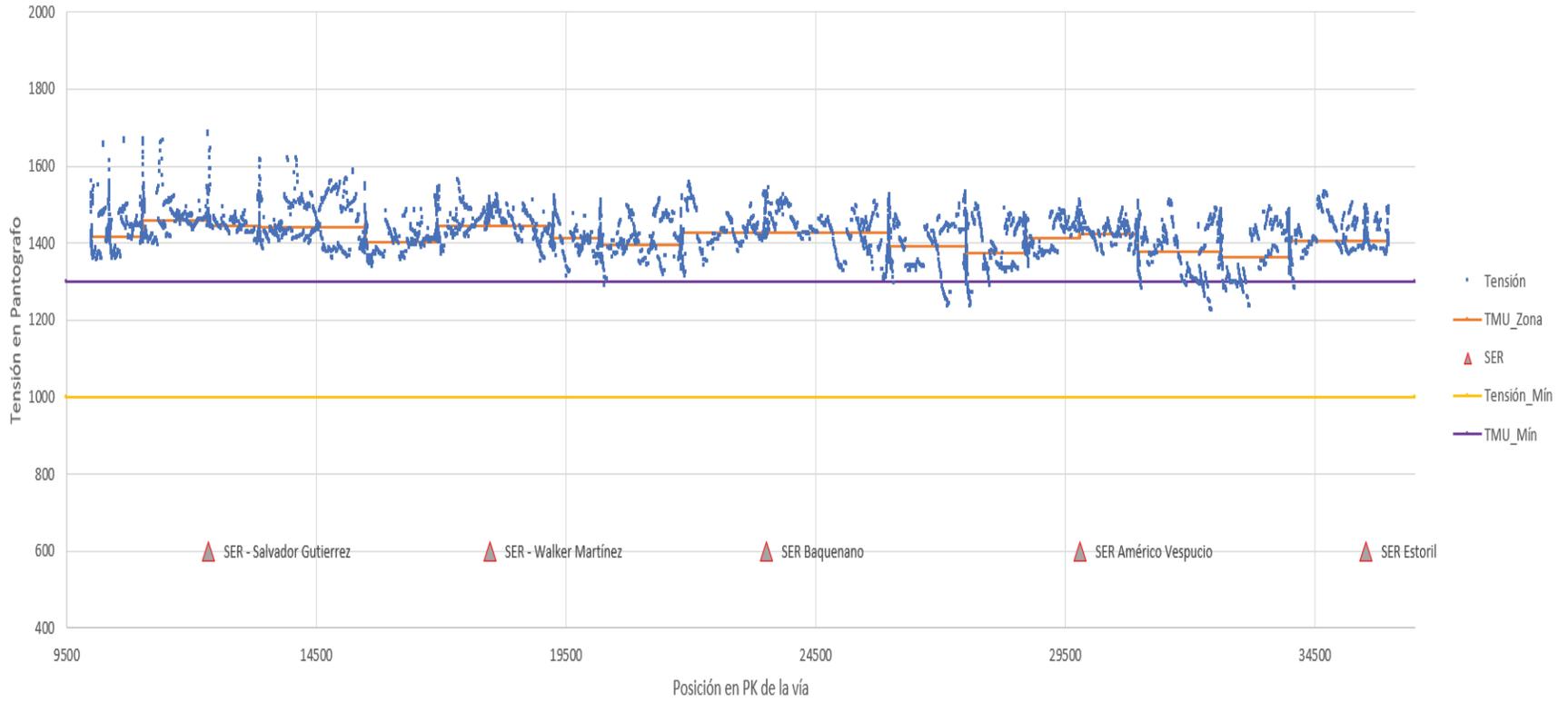


Figura A-6 Explotación del sistema con SER Estoril al 50% operatividad (Críticidad N-1)

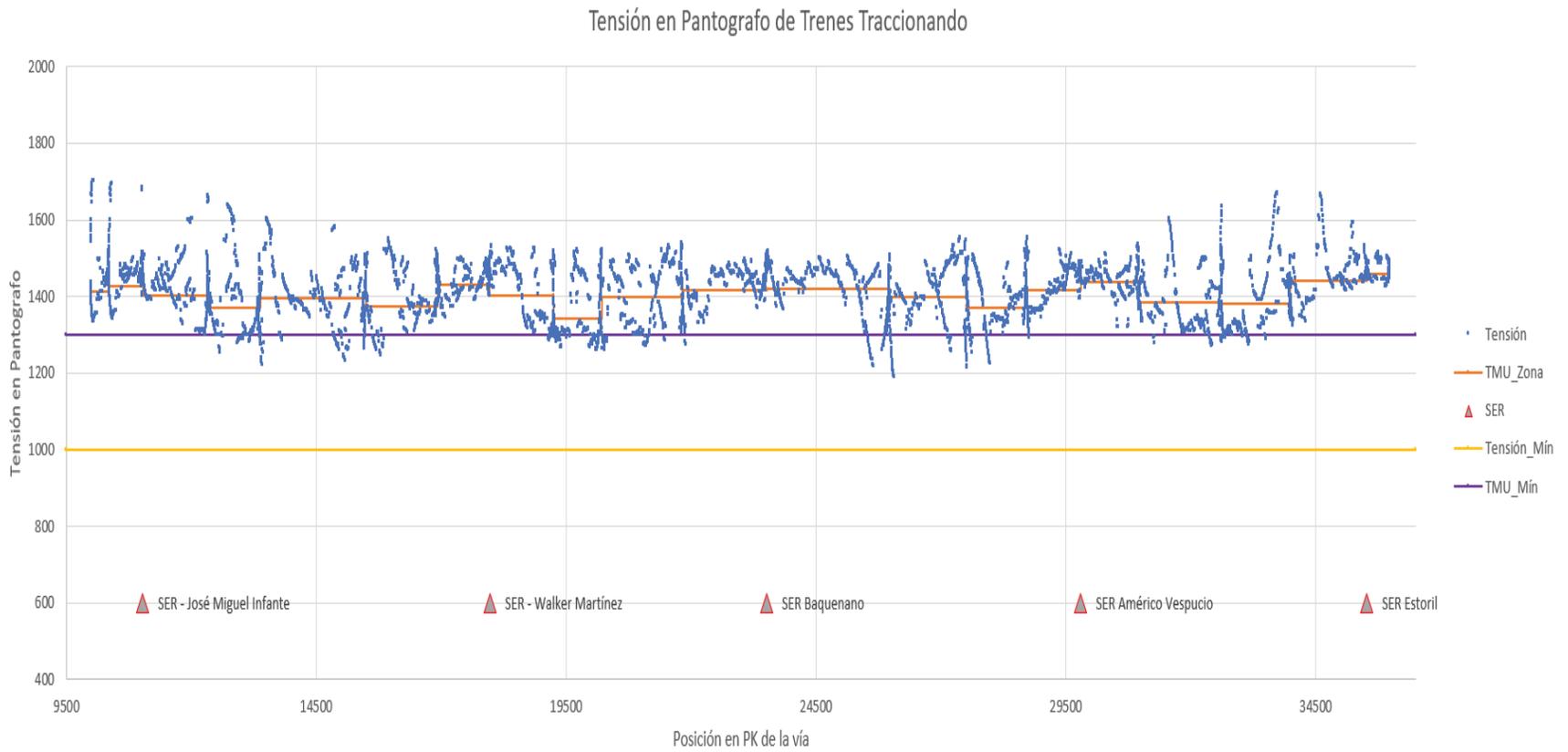


Figura A-7 Explotación del sistema 100% operativo (Críticidad N)

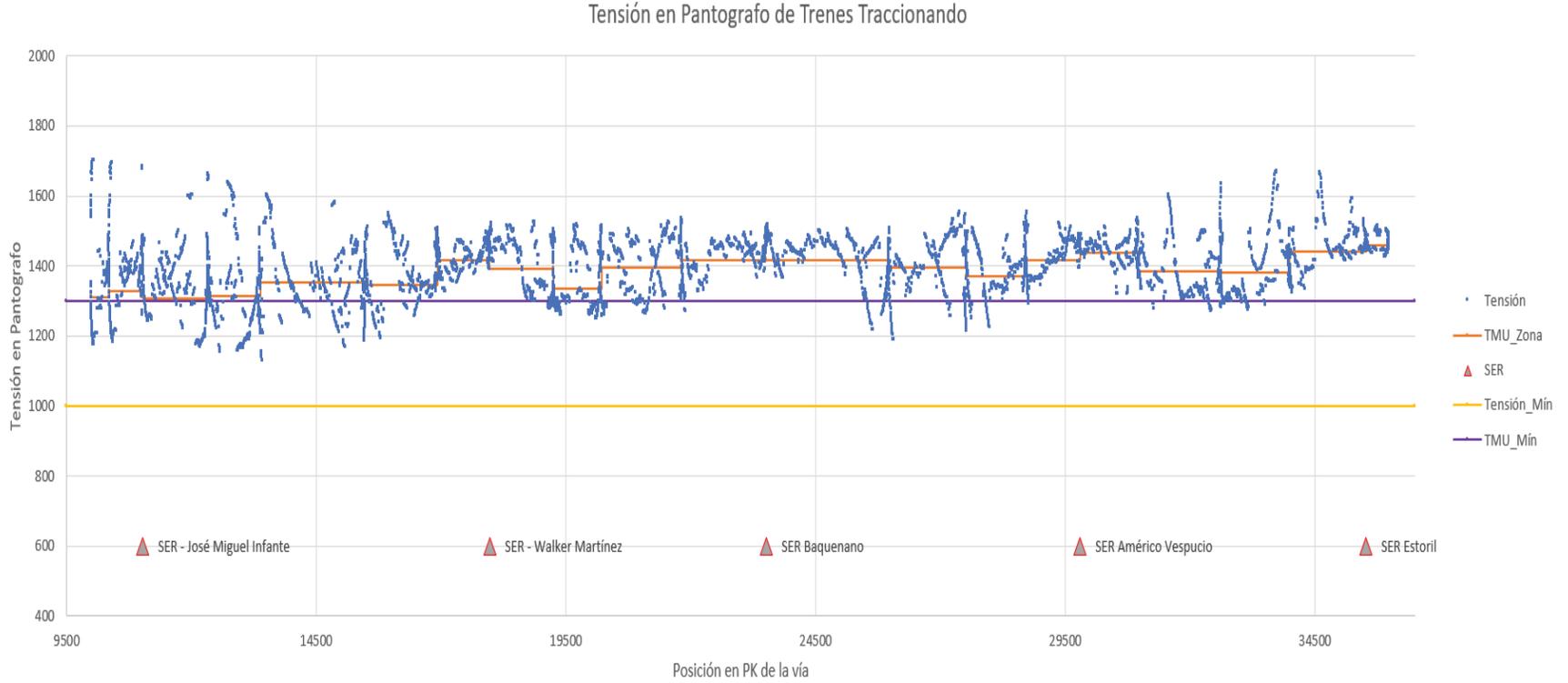


Figura A-8 Explotación del sistema con SER Salvador Gutiérrez al 50% operatividad (Críticidad N-1)

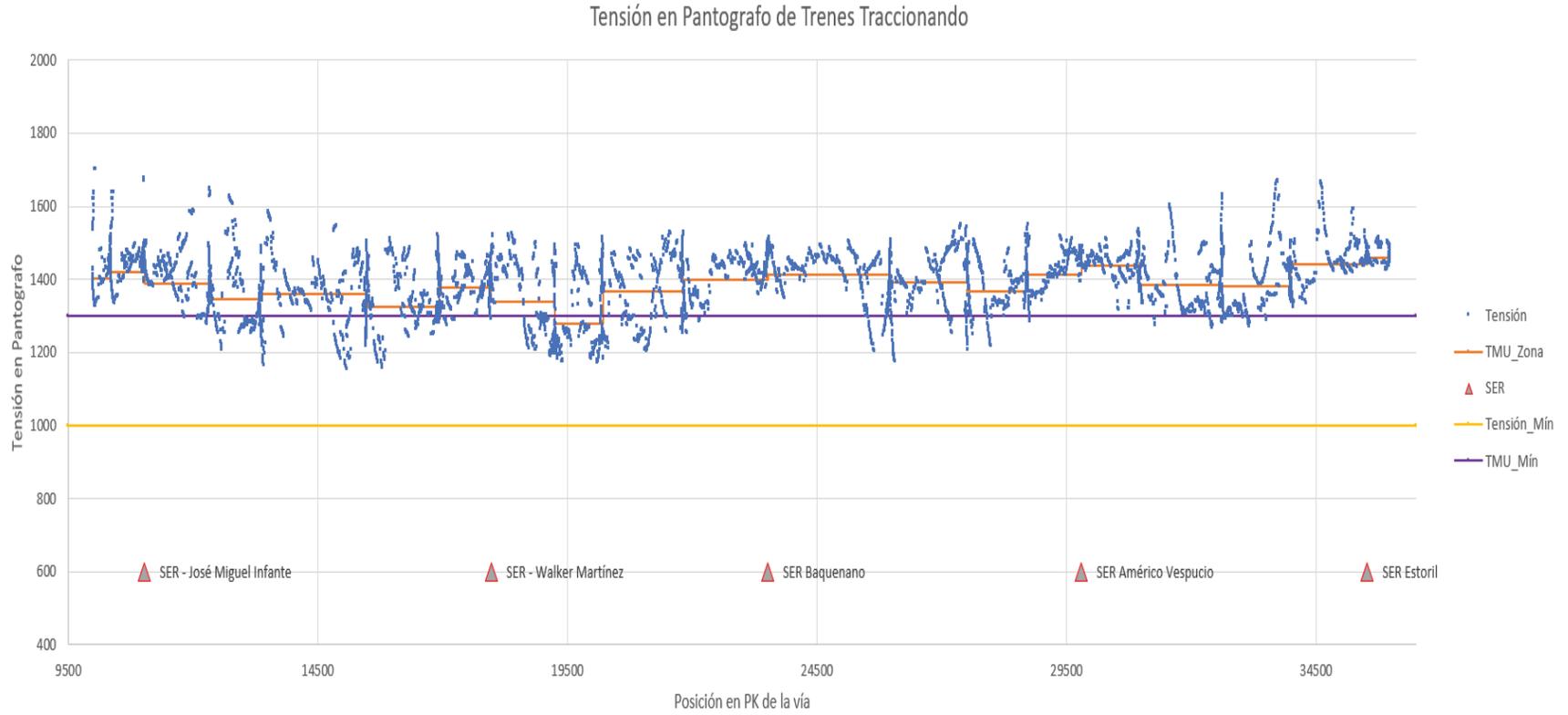


Figura A-9 Explotación del sistema con SER Walker Martínez al 50% operatividad (Críticidad N-1)

Tensión en Pantografo de Trenes Traccionando

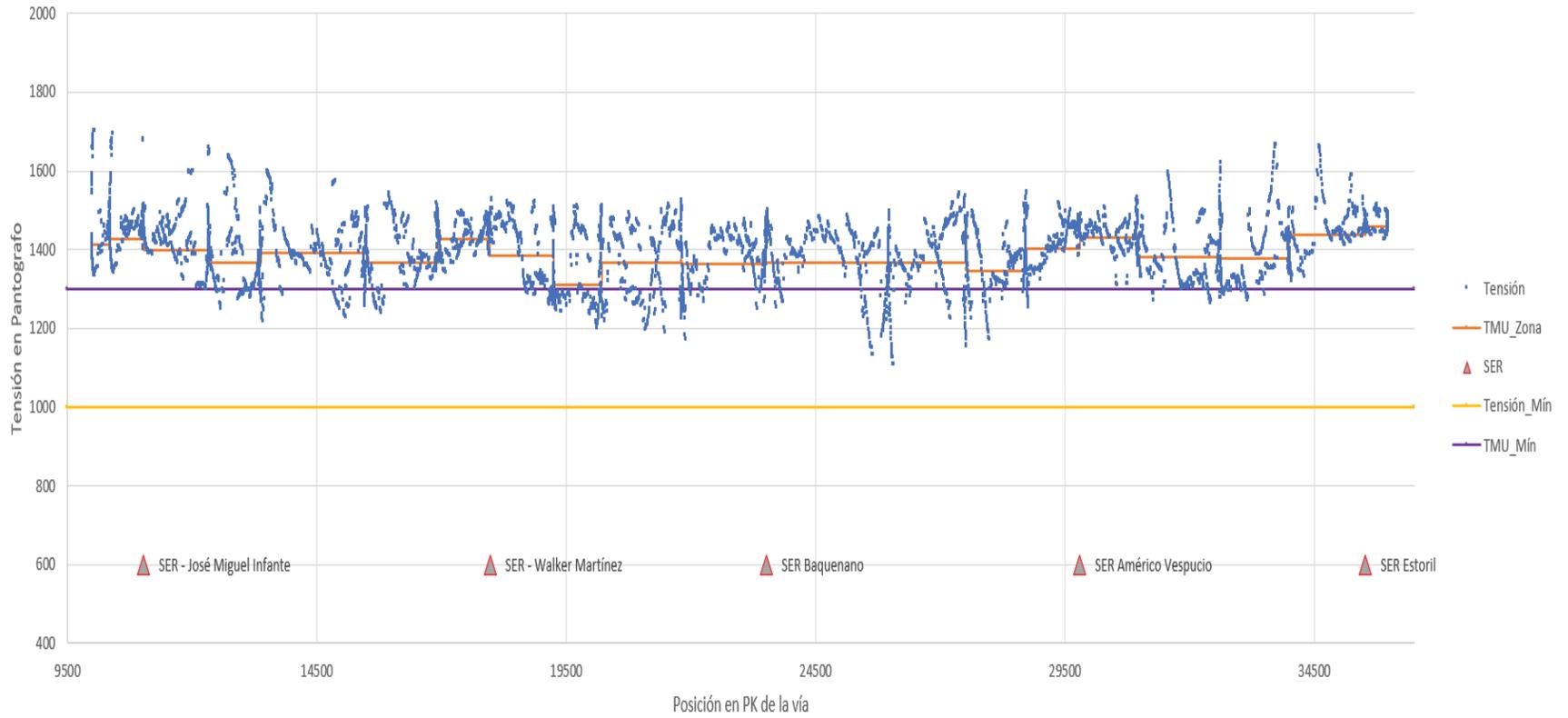


Figura A-10 Explotación del sistema con SER Baquedano al 50% operatividad (Críticidad N-1)

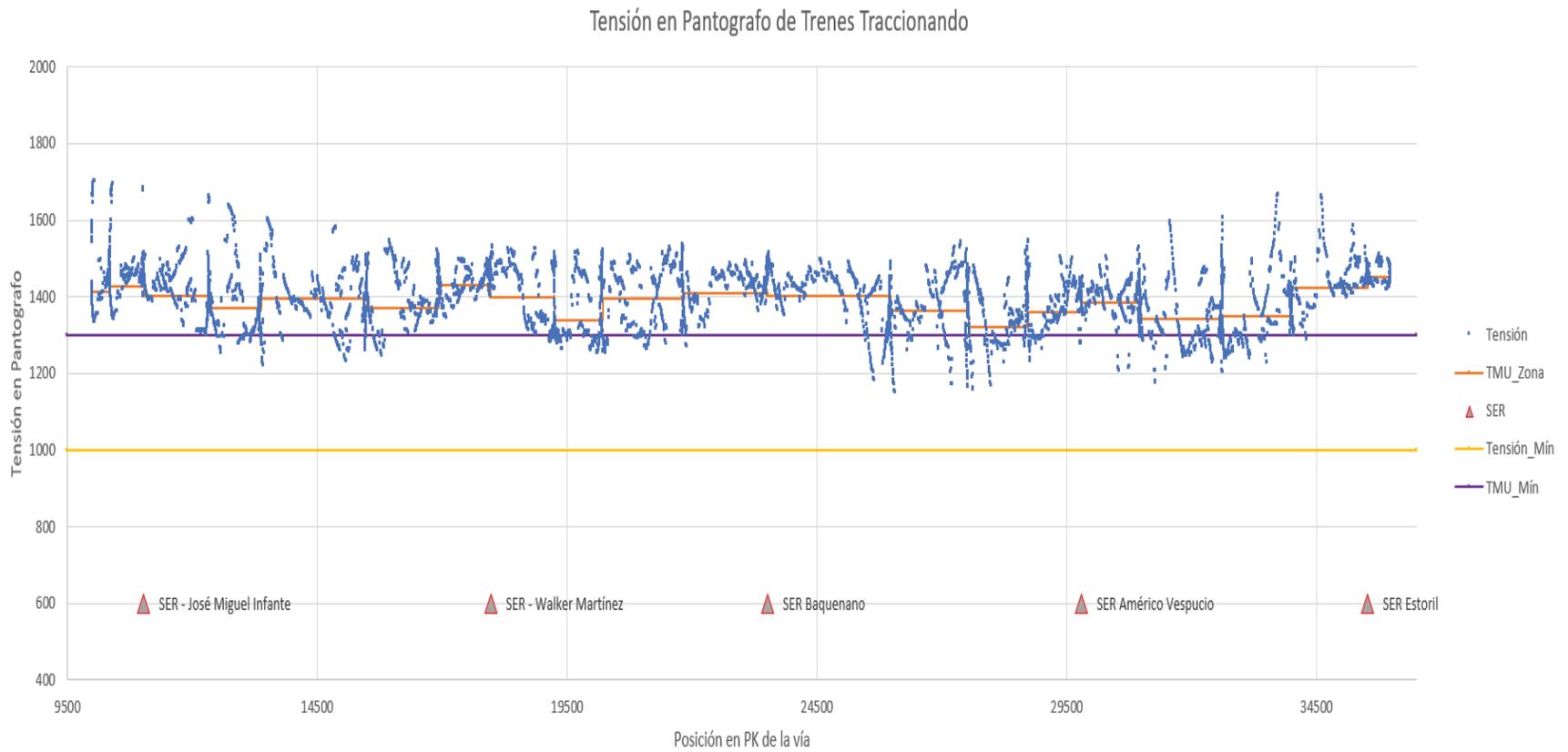


Figura A-11 Explotación del sistema con SER Américo Vespucio al 50% operatividad (Críticidad N-1)

Tensión en Pantografo de Trenes Traccionando

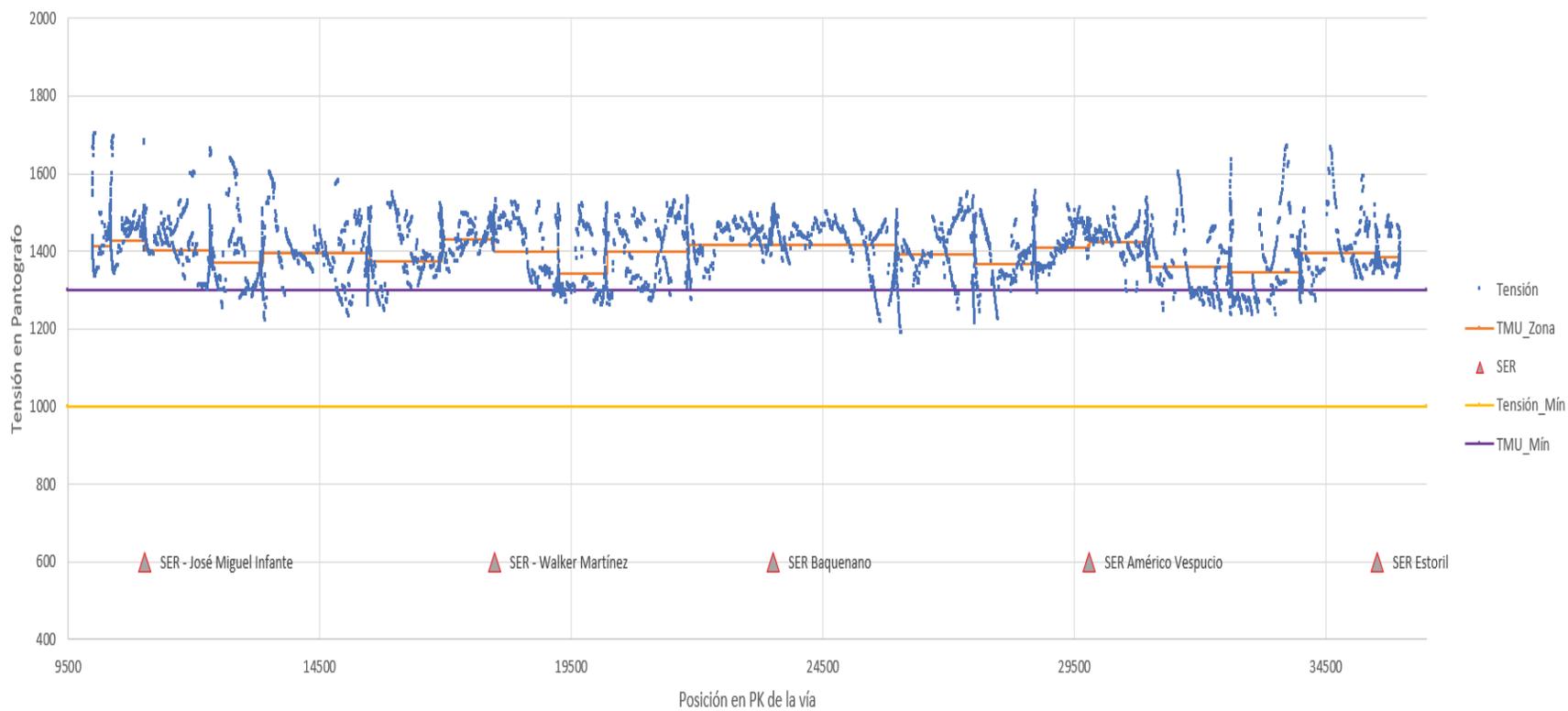


Figura A-12 Explotación del sistema con SER Estoril al 50% operatividad (Críticidad N-1)

B Potencia de SER por simulación y potencia de SAF proyectada

Este apéndice se registra figuras que respaldan los cálculos obtenidos para determinar las distintas potencias.

B.1 Figuras SER, simulación 90 segundos de despacho (Curva de carga AW Figura 4-6)

A continuación, se grafican la energía registrada en cada una de las SER's en un intervalo de 600 segundos, donde se alcanza una totalidad de 59 trenes circulando en diferentes puntos de la vía férrea, (Datos obtenidos de las simulaciones realizadas en SimMetro 2011).

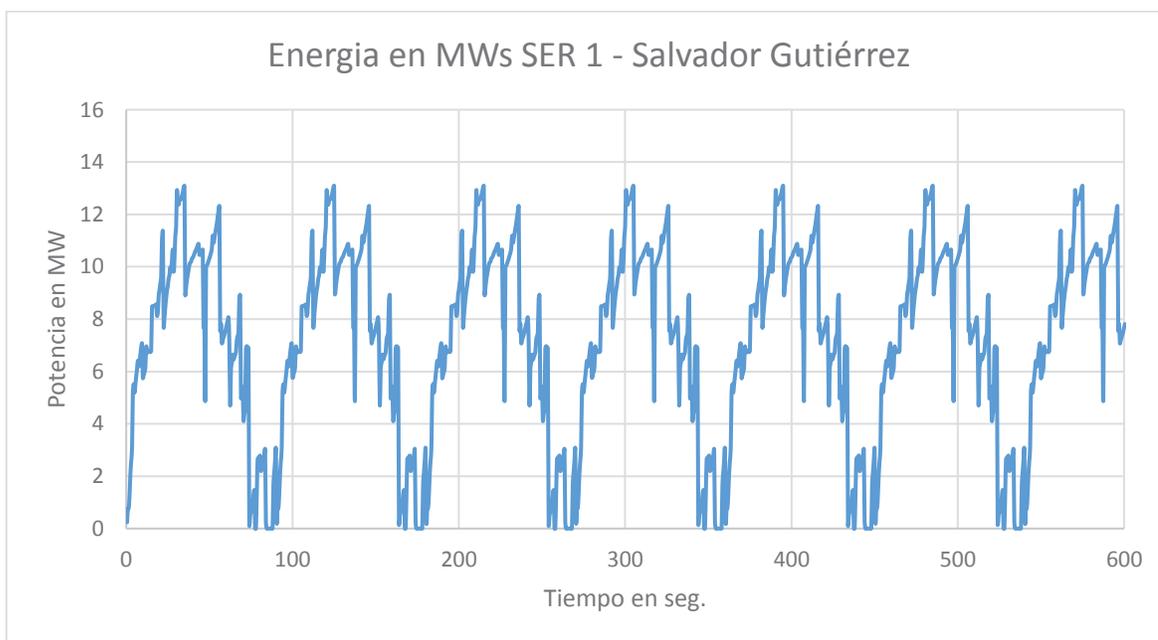


Figura B-1 Energía registrada en SER bigrupo Salvador Gutiérrez

En la Figura B-1, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 7,3 [MW].

En la Figura B-2, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 8,4 [MW].

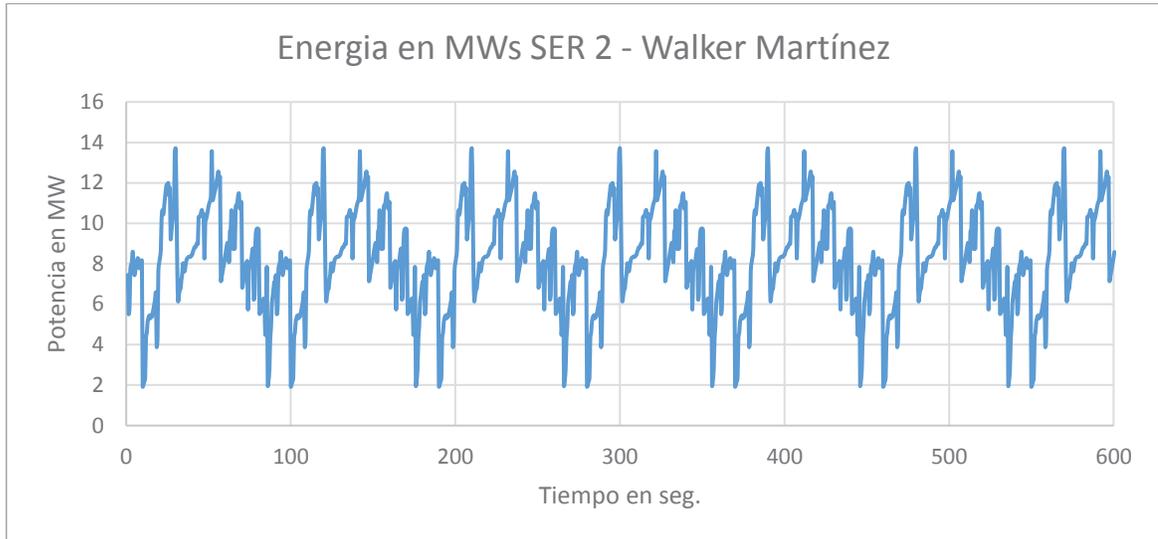


Figura B-2 Energía registrada en SER bigrupo Walker Martínez

En la Figura B-3, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9 [MW].

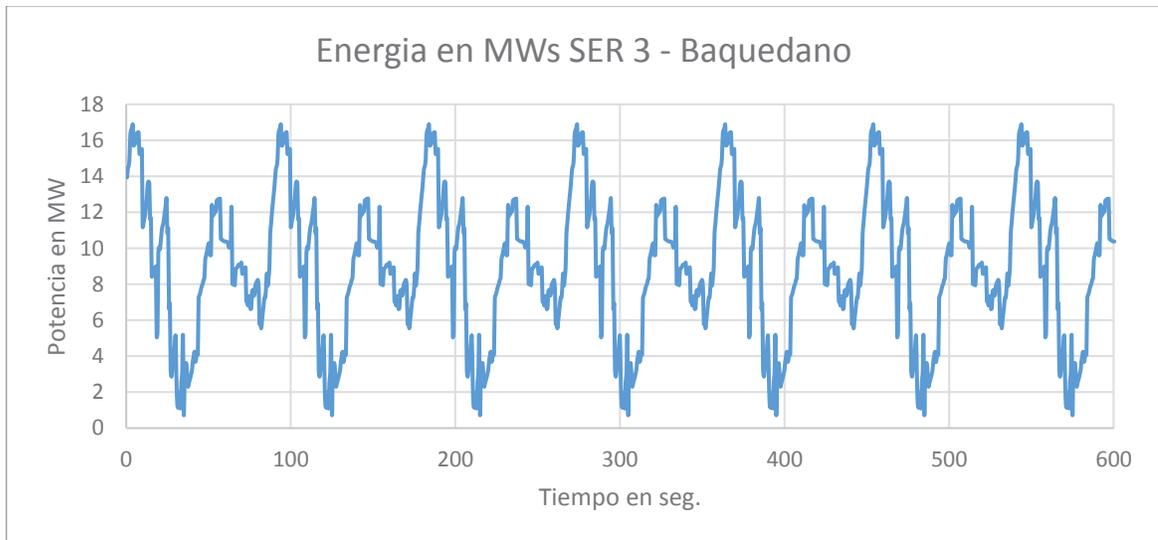


Figura B-3 Energía registrada en SER bigrupo Baquedano

En la Figura B-2, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9,6 [MW].

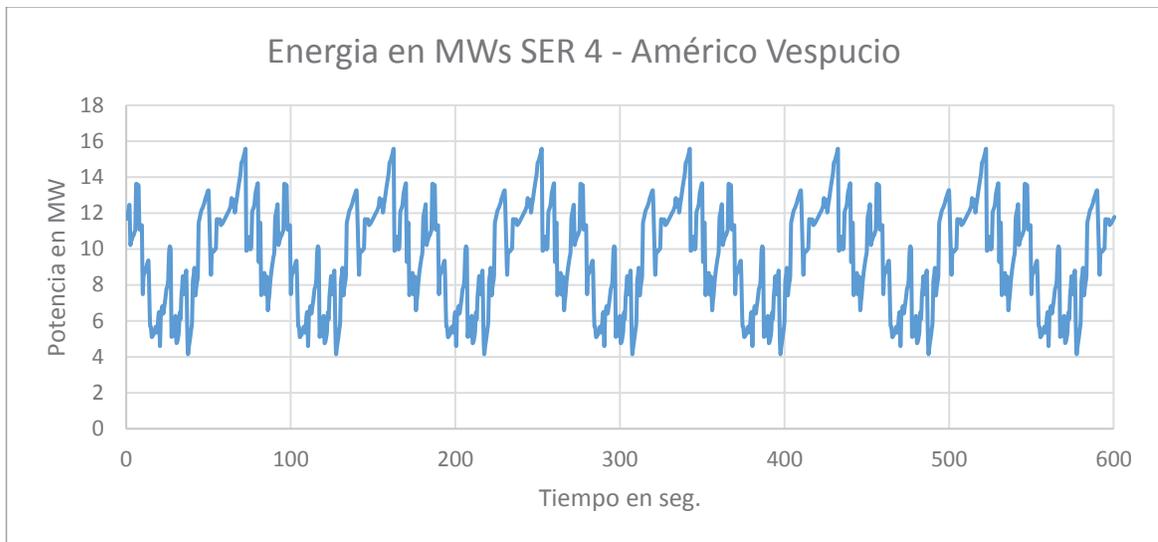


Figura B-4 Energía registrada en SER bigruppo Américo Vespucio

En la Figura B-5, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 6 [MW].

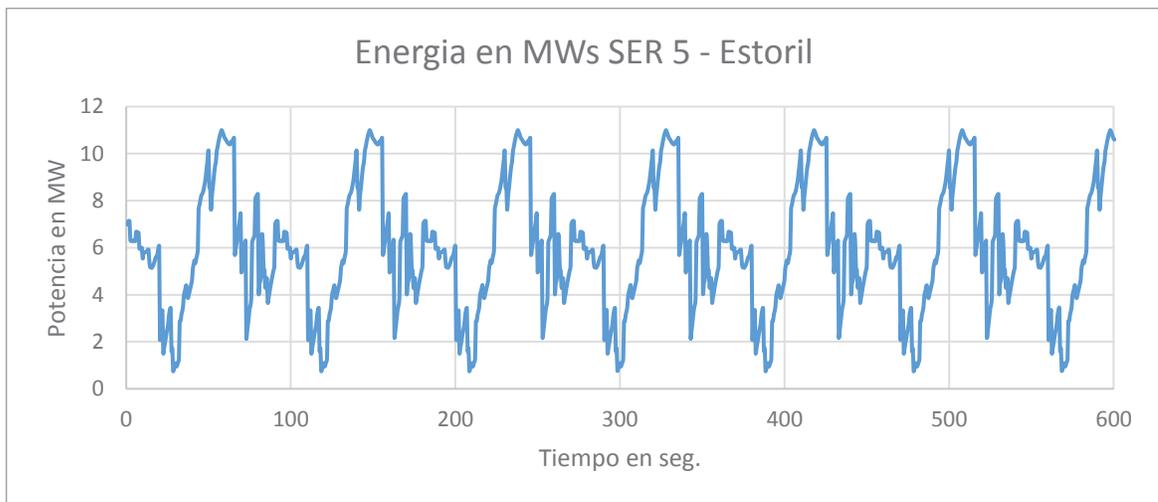


Figura B-5 Energía registrada en SER bigruppo Estoril

B.2 Figuras SER, simulación 90 segundos de despacho (Curva de carga AW al 100% de exigencia)

En la Figura B-6, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9,9 [MW].

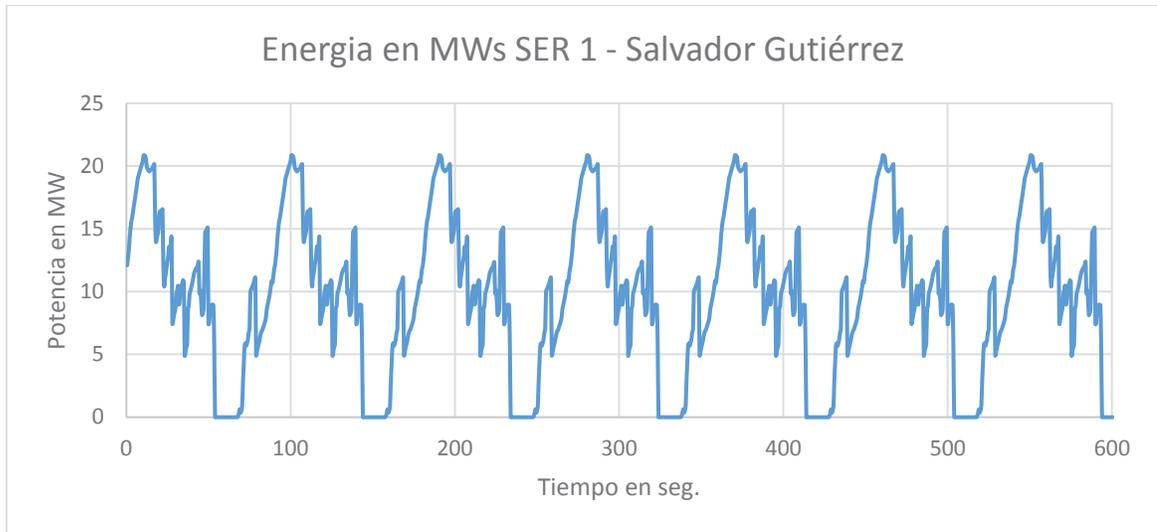


Figura B-6 Energía registrada en SER bigrupo Salvador Gutiérrez

En la Figura B-7, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9 [MW].

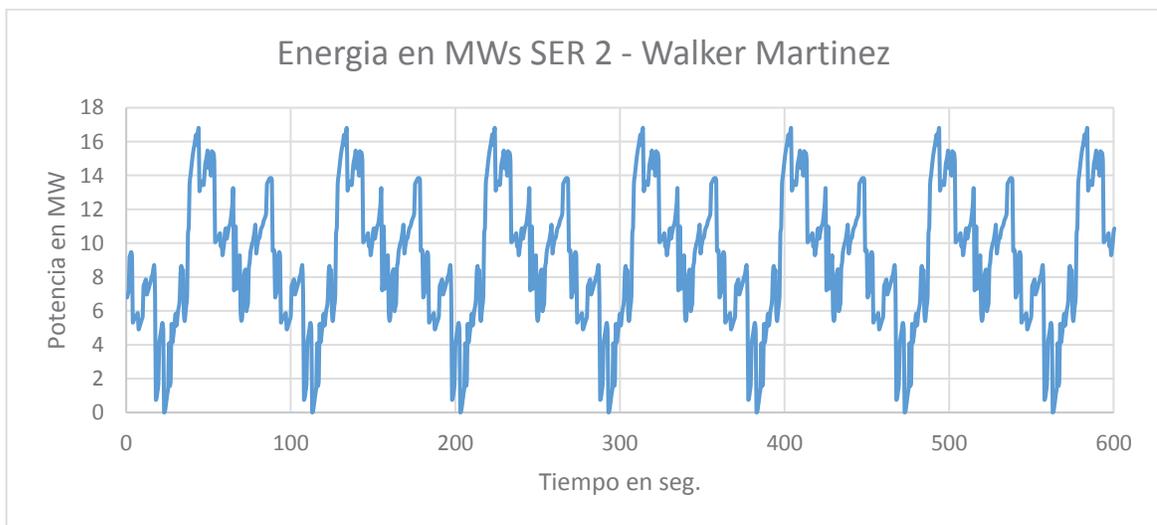


Figura B-7 Energía registrada en SER bigrupo Walker Martínez

En la Figura B-8, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9 [MW].

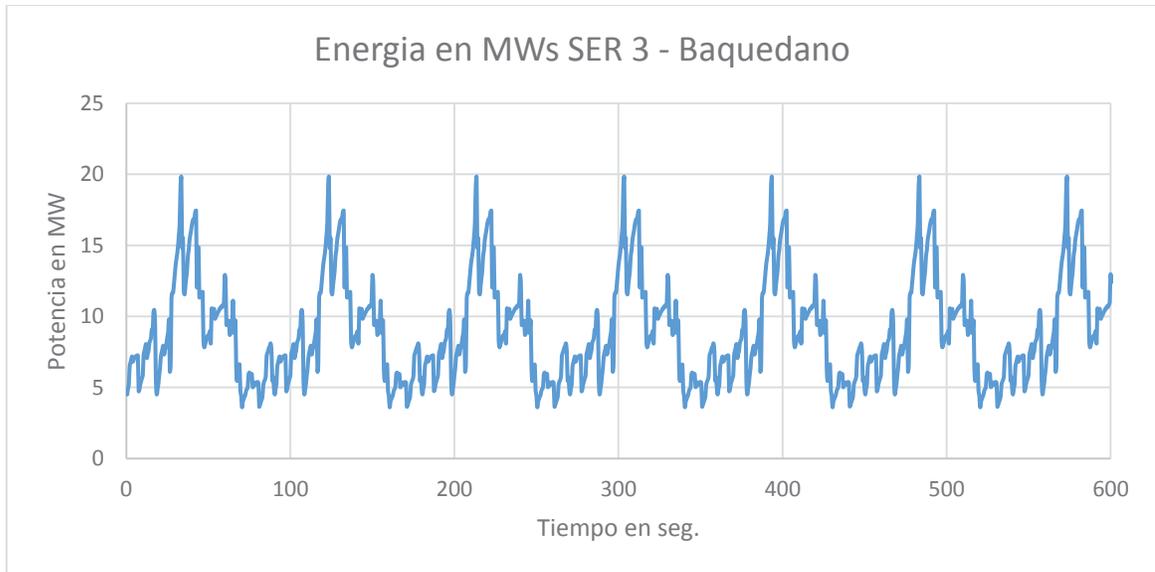


Figura B-8 Energía registrada en SER bigrupo Baquedano

En la Figura B-9, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 9,4 [MW].

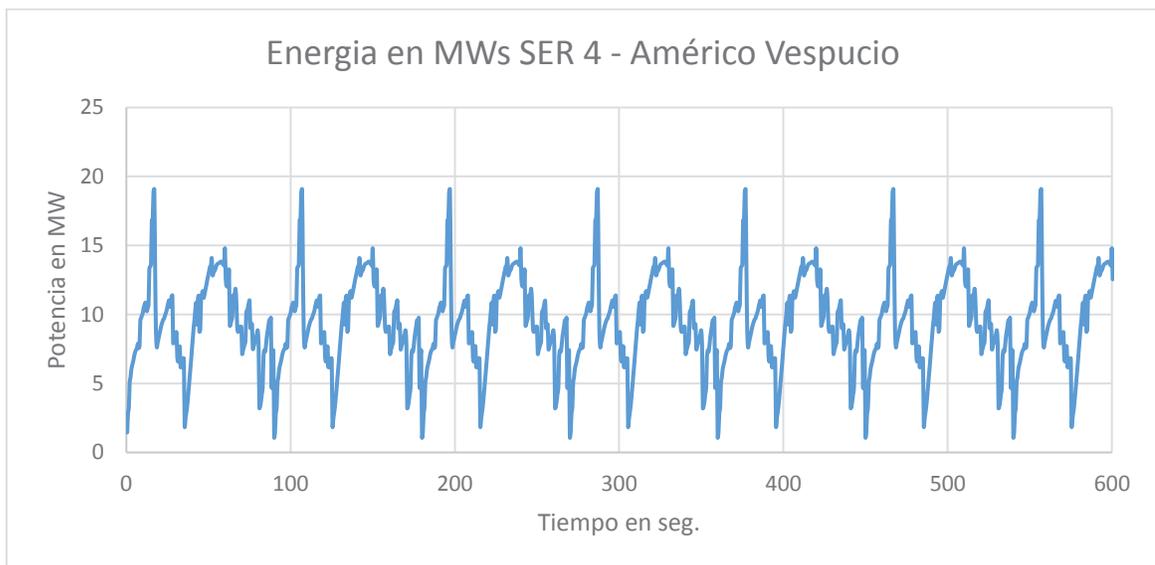


Figura B-9 Energía registrada en SER bigrupo Américo Vespucio

En la Figura B-10, se registra la potencia instantánea durante un intervalo de tiempo de 600 segundos, al calcular la potencia promedio se obtiene 6,6 [MW].

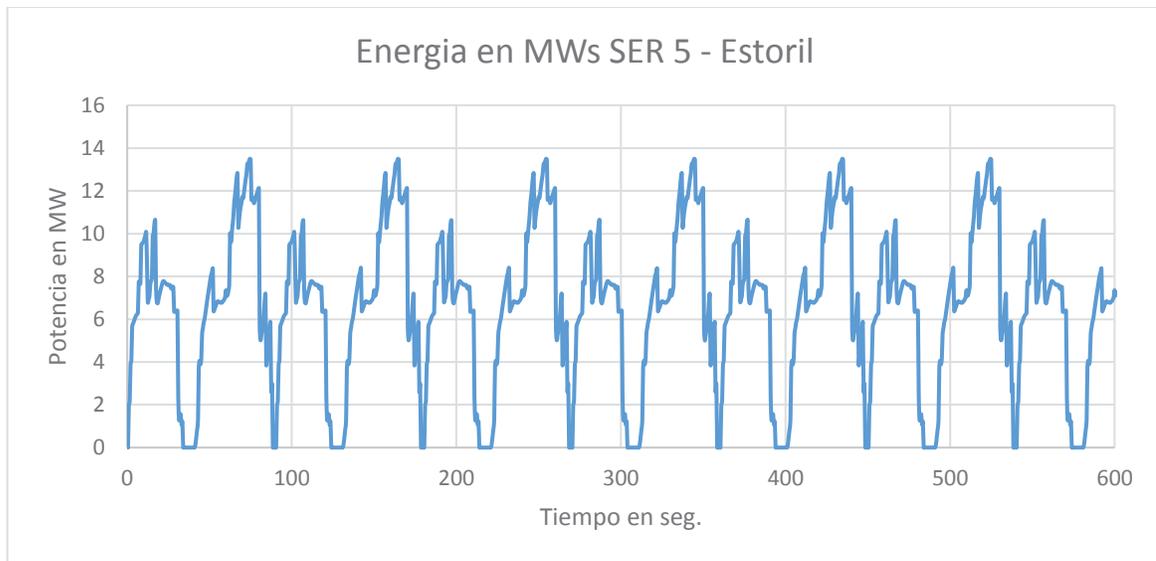


Figura B-10 Energía registrada en SER bigrupo Estoril

B.3 Figuras SAF, Cuadro de carga de estaciones en línea 6

Para establecer las potencias de las futuras estaciones de la línea 7, se utilizará dos estaciones tipos de la actual línea 6, que se encuentra operativa, a continuación, se adjunta el resumen en dos áreas, cuadro de carga de alumbrado y cuadro de carga de fuerza y calefacción.

- **Estación común Cerrillos:**

En las siguientes Tabla B-1 y Tabla B-2, se adjunta el resumen de los cuadros de carga de la estación cerrillos (*Fuente: Planos - PL6-ID-0111-PLA-702-IE-00302-R01/PL6-ID-0111-PLA-702-IE-00303-R01/ PL6-ID-0921-PLA-702-IE-00300-RA0/ PL6-ID-0921-PLA-702-IE-00301-RA0*).

Tabla B-1 Cuadro de carga de alumbrado – estación común Cerrillos.

| Cuadro de carga Alumbrado | Potencia Total [kW] |
|---|---------------------|
| 702-TDA "E" Alumbrado General Vía 2 | 23 |
| TDA "C" Alumbrado Básico Vía 2 | 10 |
| TDAE "D2" Alumbrado De Emergencia Vía 2 | 3 |
| 702-TDA "A" Alumbrado General Vía 1 | 21 |
| 702-TDA "B" Alumbrado Básico Vía 1 | 10 |
| TDAE "D1" Alumbrado De Emergencia Vía 1 | 2 |
| | 69 |

En la Tabla B-1, es posible obtener la potencia total de alumbrado que es de 69 kW, el que será considerado para las estaciones comunes en la Línea 7.

Tabla B-2 Cuadro de carga de fuerza y calefacción – estación común Cerrillos.

| Cuadro de carga Fuerza y Calefacción | Potencia Total [kW] |
|--|----------------------------|
| 702-TDF "2" Fuerza y Enchufes Vía 2 | 69 |
| TDF y C "2" Fuerza y Calefacción Servicios Vía 2 | 85 |
| 702-TDF "1" Fuerza y Enchufes Vía 1 | 74 |
| TDF y C "2" Fuerza y Calefacción Servicios Vía 1 | 71 |
| | 299 |

En la Tabla B-2, es posible obtener la potencia total de fuerza y calefacción que es de 299 kW, el que será considerado para las estaciones comunes de la línea 7.

- **Estación combinación Ñuble:**

En las siguientes Tabla B-3 y Tabla B-4, se adjunta el resumen de los cuadros de carga de la estación Los Leones (*Fuente: Planos PL6-ID-0111-PLA-712-IE-00300-R1/ PL6-ID-0111-PLA-712-IE-00301-R1/ PL6-ID-0111-PLA-712-IE-00302-R1/ PL6-ID-0111-PLA-712-IE-00303-R1/ PL6-ID-0111-PLA-713-IE-00300-R1*).

Tabla B-3 Cuadro de cargas alumbrado – estación combinación Nuble.

| Cuadro de carga Alumbrado | Potencia Total [kW] |
|---|----------------------------|
| 707-TDA "A" Alumbrado General Vía 1 | 23 |
| TDA "B" Alumbrado Básico Vía 1 | 19 |
| TDAE "D1" Alumbrado De Emergencia Vía 1 | 5 |
| TDA "E" Alumbrado General Vía 2 | 23 |
| TDA "C" Alumbrado Básico Vía 2 | 17 |
| TDAE "D2" Alumbrado De Emergencia Vía 2 | 5 |
| | 92 |

En la Tabla B-3, es posible obtener la potencia total de alumbrado que es de 92 kW, el que será considerado para las estaciones combinación en la Línea 7.

Tabla B-4 Cuadro de cargas fuerza y calefacción – estación combinación Ñuble.

| Cuadro de carga Fuerza y Calefacción | Potencia Total [kW] |
|--|----------------------------|
| 707-TDF "1" Fuerza y Enchufes Vía 1 | 90 |
| 707-TDF y C "1" Fuerza y Calefacción Servicios Vía 1 | 173 |
| TDF "2" Fuerza y Enchufes Vía 2 | 89 |
| TDF y C "2" Fuerza y Calefacción Servicios Vía 1 | 71 |
| | 423 |

En la Tabla B-4, es posible obtener la potencia total de fuerza y calefacción que es de 423 kW, el que será considerado para las estaciones combinación de la línea 7.

C Riesgos de operación y evaluación económica

En el siguiente apéndice se respalda cada una de las alternativas analizadas en esta memoria de titulación. A continuación, se establece los índices de impacto a evaluar en las secciones C.1; C.2 y C.3.

Los valores de frecuencia de riesgo analizados en la Tabla C-1, corresponden a índices de ocurrencia en las vías urbanas de Santiago (como, por ejemplo: En Santiago ocurren un mínimo de 6 choques a postes en el día, esta cifra se ve aumentada en un 30% durante el periodo de fiestas patrias. Fuente: indica el Gerente general de Chilectra, Andreas Gebhardt/15 de septiembre 2015).

Tabla C-1 Valores de frecuencia de riesgo.

| Valores | Probabilidad | Descripción |
|---------|--------------|-----------------------|
| 1 | Bajo | Más de 1 año |
| 2 | Medio | Entre 2 meses y 1 año |
| 3 | Alto | Menor a 2 meses |

El impacto está directamente relacionado con el tiempo de inoperatividad del sistema, por falta de suministro eléctrico, este índice es de suma relevancia debido a la importancia de mantener el servicio plenamente operativo ya que actualmente Metro de Santiago, es considerado la columna vertebral del sistema de transporte metropolitano.

Se determinará un valor alto, medio o bajo, según la severidad del impacto. Donde bajo significa que el impacto mínimo, significa que el sistema puede seguir operando con normalidad, aunque el riesgo se materializase. Medio significa que algún impacto es que el retrasar las funciones normales de la empresa. Y finalmente Alto significa que el impacto sustancial significa que las operaciones se afectan severamente, impactando las operaciones internas de las empresas y causando afectación a sus clientes.

Tabla C-2 Valores de impacto de riesgo.

| Consecuencia | Valores | Descripción |
|--------------|---------|--|
| Bajo | 1 | Impacto mínimo sobre costo, tiempo o técnico. |
| Medio | 2 | Algún impacto sobre costo, tiempo o técnico. |
| Alto | 3 | Impacto sustancial sobre costo, tiempo o técnico |

Para determinar la dominancia del riesgo, se suma los elementos de las tablas de cada uno de los riesgos (Probabilidad + Impacto). A partir de los resultados, los riesgos se categorizan en alto, medio o bajo, según la suma anterior, esta se encuentra normada en la siguiente Tabla C-3.

Tabla C-3 Impacto de ocurrencia por riesgos

| Nivel de riesgo | Valores |
|-----------------|---------|
| Bajo | 1 – 2 |
| Medio | 3 – 4 |
| Alto | 5 - 6 |

En la Tabla C-4, se describen las actividades a analizar, junto con una breve descripción del peligro y el riesgo asociado.

Tabla C-4 Impacto de ocurrencia por riesgos

| Área | Actividad | Peligro | Riesgo |
|---------|---|---|--|
| | Interrupción del servicio debido falla humana | Choque a poste | Interrupción del servicio eléctrico parcial o total Electrocución a terceras personas, operación de protecciones, interrupción del servicio eléctrico |
| | Acceso de personal no autorizado | Manipulación indebida | |
| Técnica | Fallas técnicas | Sobrecarga de alimentadores, problemas de aislación | Incendio en conductores, fuga a tierra, interrupción del servicio |
| | Falta de mantenimiento | Problemas de aislación | Operación de protecciones |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | Caída de un árbol, fatiga del material producto de las condiciones climáticas | Corte de alimentadores, interrupción del servicio inoperatividad por un tiempo prolongado |

C.1 Túnel

En la Tabla C-5, se exponen los análisis de los distintos riesgos asociados a esta ruta de transporte considerando los índices geopolíticos de Santiago de Chile.

Tabla C-5 Identificación de peligro para redes subterráneas

| Área | Actividad | Probabilidad | | | Impacto | | |
|---------|---|--------------|-------|------|---------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido falla humana | | | 1 | 3 | | |
| | Acceso de personal no autorizado | | | 1 | | 2 | |
| | Fallas técnicas | | | 1 | | | 1 |
| | Mantenimiento | | | 1 | | | 1 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | | 1 | | 2 | |

En la siguiente Tabla C-6, se registra la suma de ambas variables como lo son la frecuencia y el impacto obteniéndose así el análisis de riesgo asociado a la posible alternativa.

Tabla C-6 Identificación de peligro para redes subterráneas

| Área | Actividad | Análisis de Riesgo | | |
|---------|---|--------------------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido falla humana | | 4 | |
| | Acceso de personal no autorizado | | | 3 |
| | Fallas técnicas | | | 2 |
| | Falta de mantenimiento | | | 2 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | | 3 |

C.2 Postacion

En la Tabla C-7, se exponen los análisis de los distintos riesgos asociados a esta ruta de transporte considerando los índices geopolíticos de Santiago de Chile.

Tabla C-7 Identificación de peligro para redes aéreas

| Área | Actividad | Probabilidad | | | Impacto | | |
|---------|---|--------------|-------|------|---------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido a falla humana | 3 | | | 3 | | |
| | Acceso de personal no autorizado | | 2 | | | 2 | |
| | Fallas técnicas | | | 1 | | | 1 |
| | Falta de mantenimiento | | | 1 | | | 1 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | 2 | | | 2 | |

En la siguiente Tabla C-8, se registra la suma de ambas variables como lo son la frecuencia y el impacto obteniéndose así el análisis de riesgo asociado a la posible alternativa.

Tabla C-8 Identificación de peligro para redes aéreas

| Área | Actividad | Análisis de Riesgo | | |
|---------|---|--------------------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido a falla humana | 6 | | |
| | Acceso de personal no autorizado | | 4 | |
| | Fallas técnicas | | | 2 |
| | Falta de mantenimiento | | | 2 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | 4 | |

A continuación, se realiza un presupuesto considerando las obras para el tramo intersección Neptuno – San Pablo (este presupuesto considera solo obras, por lo tanto, no se considerará los conductores a utilizar).

Postación Eléctrica

| Descripción | Unidad | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|---------------------------|--------|----------|-----------------|--------------|
| Poste de hormigón Vibrado | Uní | 25.0 | \$ 392,700 | \$ 9,817,500 |
| Herrajes | Gal | 25.0 | \$ 19,500 | \$ 487,500 |
| Camión Pluma 3 TON | Hor | 20.0 | \$ 25,600 | \$ 512,000 |
| Ferretería y otros | % | 3.0 | 0 | \$ 294,525 |
| Jornalero | Dia | 3.0 | \$ 12,000 | \$ 36,000 |
| Jornalero | Dia | 4.0 | \$ 12,000 | \$ 48,000 |
| Jornalero | Dia | 4.0 | \$ 12,000 | \$ 48,000 |
| Supervisor | Dia | 4.0 | \$ 22,000 | \$ 88,000 |
| Leyes sociales (O.E) | % | 29.0 | 0 | \$ 63,800 |
| Rentabilidad del proyecto | % | 30.0 | 0 | \$ 3,418,597 |

Sub-Total \$ 11,395,325

Total \$ 14,813,923

Figura C-1 Presupuesto, postación eléctrica/enero, 2017 (Fuente: Portal Ondac Construcción Web: <https://portal.ondac.com/601/w3-article-92563.html>)

C.3 Soterrado

En la Tabla C-9, se exponen los análisis de los distintos riesgos asociados a esta ruta de transporte considerando los índices geopolíticos de Santiago de Chile.

Tabla C-9 Identificación de peligro para redes subterráneas

| Área | Actividad | Probabilidad | | | Impacto | | |
|---------|---|--------------|-------|------|---------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido falla humana | | 2 | | | 2 | |
| | Acceso de personal no autorizado | | 2 | | | 2 | |
| | Fallas técnicas | | | 1 | 3 | | |
| | Falta de mantenimiento | | | 1 | | | 1 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | | 1 | | 2 | |

En la siguiente Tabla C-6, se registra la suma de ambas variables como lo son la frecuencia y el impacto obteniéndose así el análisis de riesgo asociado a la posible alternativa.

Tabla C-10 Identificación de peligro para redes aéreas

| Área | Actividad | Análisis de Riesgo | | |
|---------|---|--------------------|-------|------|
| | | Alto | Medio | Bajo |
| Técnica | Interrupción del servicio debido falla humana | | 4 | |
| | Acceso de personal no autorizado | | 4 | |
| | Fallas técnicas | | 4 | |
| | Falta de mantenimiento | | | 2 |
| | Desastres naturales, ataques terroristas | | | 2 |

En la Figura C-2, se establece la siguiente estimación en base a fuentes personales.

Estimaciones Soterrado Media Tensión

| Detalles | Valor UF | En un 1 km | UF/km |
|--|----------|------------|--------|
| Rotura y reposición de calzada /M2 | 4 | 300 | 1200 |
| Rotura y reposición de vereda /M2 | 3 | 600 | 1800 |
| Retiro de excedentes /M3 | 0.66 | 600 | 396 |
| Corte de pavimento /M | 0.42 | 1000 | 420 |
| Rellenos /M3 | 0.85 | 340 | 289 |
| Zanja /m2 | 0.6 | 1000 | 600 |
| Cámara de Calzada | 171.3 | 3 | 513.9 |
| Cámara de Vereda | 116.86 | 6 | 701.16 |
| Ducto de 4 Niveles PVC Schedule 40 4' /mts | 0.68 | 1000 | 680 |
| Apoyo cable en cámara | 0.6 | 9 | 5.4 |

Total 6605.46

Figura C-2 Estimaciones soterrado media tensión

D Conductores

En el siguiente apéndice se anexan las de los conductores a utilizar, el que ayudara a determinar el número de conductores por alimentador.

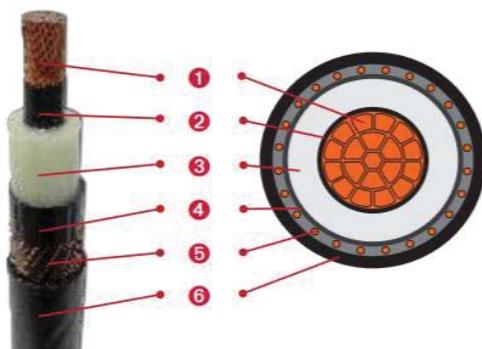
D.1 Características y ficha técnica monoconductor 22 kv al 133% de aislación

En la Figura D-1, se menciona las características del conductor a utilizar (*Fuente: General cables Cocesa*)

Media Tensión
XAT® MONOCONDUCTOR
EAT® MONOCONDUCTOR
Monoconductores de cobre, aislación XLPE-TR en los XAT y EPR en los EAT. Cubierta de PVC. Versiones en 5 kV, 8 kV, 15 kV, 25 kV y 35 kV



LIBRE DE PLOMO RESISTENTE AL AGUA RESISTENCIA A LA INTemperIE RESISTENCIA A IMPACTOS RETARDANTE A LA LLAMA



- 1 CONDUCTOR de cobre compactado de acuerdo a las normas ASTM B496 ó ASTM B835.
- 2 PANTALLA SEMICONDUCTORA INTERNA extruida sobre el conductor.
- 3 AISLACIÓN: polietileno reticulado retardante a la arborescencia (XLPE-TR) para los XAT. Etileno Propileno (EPR) para los EAT. Ambos compuestos son de color natural y son aplicados mediante proceso de triple extrusión verdadera. El nivel de aislación puede ser de 100% o del 133%.
- 4 PANTALLA SEMICONDUCTORA EXTERNA extruida, con adecuada adhesión al aislamiento que la hace fácil de pelar.
- 5 PANTALLA METÁLICA. Puede estar formada por una cinta de cobre o por hebras de cobre, ambas aplicadas helicoidalmente.
- 6 CUBIERTA EXTERIOR de PVC de color negro. Otros colores y compuestos disponibles a pedido.

Figura D-1 Conductor de media tensión XLPE-TR.

XAT MONOCONDUCTOR 25 kV 133% DE NIVEL DE AISLACIÓN

| Calibre conductor AWG/kcmil | Sección nominal mm ² | Diámetro del conductor aprox. mm | Espesor aislación nominal mm | Diámetro total aprox. mm | Peso total aprox. kg/km | Resistencia máx. a 20 °C CC Ω/km | Capacidad μF/km | Capacidad de corriente A | | |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|--------------------|--|---|---|
| | | | | | | | | Ducto enterrado 3 conductores temp. amb. 20 °C | Directamente enterrado 3 conductores temp. amb. 20 °C | Aire libre 3 cond. triplexados a temp. amb. 40 °C |
| 1 | 42,4 | 7,7 | 8,13 | 32,6 | 1.377 | 0,423 | 0,12 | 175 | 240 | 195 |
| 1/0 | 53,5 | 8,7 | 8,13 | 33,6 | 1.519 | 0,335 | 0,13 | 200 | 275 | 225 |
| 2/0 | 67,4 | 9,7 | 8,13 | 34,6 | 1.686 | 0,266 | 0,14 | 230 | 310 | 260 |
| 3/0 | 85 | 10,9 | 8,13 | 36,0 | 1.905 | 0,211 | 0,15 | 260 | 355 | 300 |
| 4/0 | 107 | 12,2 | 8,13 | 37,5 | 2.160 | 0,167 | 0,16 | 295 | 405 | 345 |
| 250 | 127 | 13,2 | 8,13 | 38,4 | 2.374 | 0,141 | 0,17 | 325 | 440 | 380 |
| 350 | 177 | 15,5 | 8,13 | 40,8 | 2.923 | 0,101 | 0,18 | 390 | 535 | 470 |
| 500 | 253 | 18,6 | 8,13 | 45,9 | 3.945 | 0,0708 | 0,21 | 465 | 650 | 580 |
| 750 | 380 | 23,0 | 8,13 | 50,8 | 5.336 | 0,0472 | 0,24 | 565 | 805 | 730 |
| 1000 | 507 | 27,0 | 8,13 | 54,9 | 6.667 | 0,0354 | 0,27 | 640 | 930 | 850 |

Figura D-2 Monoconductor 25 kV 133% nivel de aislación XLPE-TR.