



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

***“SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA PARA LA
LÍNEA 1 DEL METRO DE SANTIAGO”***

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

GABRIEL ANDRÉS SOUBLETTE CASTRO

PROFESOR GUÍA:

SR. AUGUSTO LUCERO ALDAY

MIEMBROS COMISIÓN:

SR. ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA
SR. ALBERTO BOTTESELLE DOGGENWEILER

SANTIAGO DE CHILE
MARZO DE 2011

Agradezco a mi familia y amigos por su constante apoyo y comprensión. Han sido una parte fundamental durante mi carrera universitaria, en especial durante los últimos años.

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: GABRIEL SOUBLETTE CASTRO
FECHA: 14 DE MARZO DE 2011
PROF. GUÍA: AUGUSTO LUCERO ALDAY

“SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA PARA LA LÍNEA 1 DEL METRO DE SANTIAGO”

El objetivo general del presente trabajo de título es investigar sobre distintas opciones de sistemas de recuperación de energía, basados en diferentes tecnologías de acumuladores de energía, con el objetivo de mejorar el nivel de tensión en la Línea 1 del Metro de Santiago sin tener que recurrir a la instalación de nuevas subestaciones de rectificación. Se espera proveer de información suficiente para que al momento de la licitación, los encargados del proyecto en Metro tengan claridad de las alternativas existentes y del funcionamiento del sistema.

Metro de Santiago, en la búsqueda de mejorar su capacidad de transporte en la Línea 1, reemplazará su actual sistema de conducción automática SACEM (*Système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance*), el cual localiza los trenes mediante secciones discretas de las vías conocidas como circuitos de vía, por un sistema de control en el que los trenes están constantemente comunicando su posición, velocidad, aceleración y sentido, CBTC (*Communication Based Train Control*). Esto significa contar con un sistema que es capaz de determinar con mayor exactitud el posicionamiento de los trenes en la línea, con lo que se logra reducir la distancia mínima entre trenes, pudiendo circular más trenes en la línea.

Se determinaron factores relevantes que tienen incidencia en la capacidad de regeneración de energía de los trenes, también se estudiaron métodos para determinar la energía que puede regenerar un solo tren para, a partir de lo anterior, calcular el total de energía regenerada y por último determinar la cantidad de energía regenerada que es efectivamente reutilizada.

Se estudiaron distintas tecnologías de acumuladores de energía que son aplicables en un sistema de recuperación de energía, mostrando algunos resultados de su funcionamiento en otros metros. Para finalizar se muestra como implementar un modelo de simulación que incorpora el sistema de recuperación de energía, pudiendo de esta manera simular el efecto de su implementación.

Se concluye, a partir de la experiencia recabada en otros países, que es factible la instalación de sistemas de recuperación de energía, en substitución de construir nuevas subestaciones de rectificación, con el fin de dar solución a caídas de voltaje en la Línea 1 del Metro de Santiago. Por lo demás, mediante la solución se obtiene un ahorro energético gracias al almacenamiento de energía regenerada, haciendo un uso más eficiente de ésta.

Agradecimientos

Primero que todo quiero agradecer de manera muy especial a mi profesor guía Don Augusto Lucero Alday, quien fue el gestor de este tema de título, además por su constante orientación, apoyo y buena disposición que tuvo a lo largo del desarrollo de este trabajo de título.

También agradezco a Metro de Santiago por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo de título, en especial a todo el personal de la Subgerencia de Proyectos Tecnológicos, por haberme soportado durante cinco meses mientras realizaba mi memoria: Manuel, Juan Pablo, John, Raúl, Carlos, Valentina, Rodrigo, Natalia, Paola, Pancho, Claudio, Jaime, Felipe y en especial a Conrad Ziebold quien propuso el tema a mi profesor guía.

También agradezco el apoyo brindado desde otras Subgerencias entregando información que resulto útil para el desarrollo de este tema de título: Patricio Bobadilla, de la Subgerencia Ingeniería de Operaciones, quien ayudo con mediciones dentro de la Línea; Uranio Ruiz, de la Subgerencia de Ingeniería, quien ayudo a obtener información técnica de los trenes nuevos; y Carlos Fiedler, también de la Subgerencia de Ingeniería, quien ayudo a actualizar datos estadísticos de las Líneas del Metro de Santiago. Además agradecer a todos con los que compartí en mis visitas a Talleres Neptuno y Talleres Puente Alto.

Finalmente agradezco a todos mis amigos y compañeros, tanto de los primeros años como de los últimos años de carrera. Imposible olvidar esas largas jornadas de estudio, asados y celebraciones varias, sinceramente gracias por todos los buenos y gratos momentos que pase con ustedes a lo largo de la carrera.

Índice general

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Alcances	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivos generales	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Estructura del trabajo	2
Capítulo 2: Contextualización	4
2.1 Introducción	4
2.2 Metro de Santiago	5
2.2.1 Características Generales del Sistema Metro	5
2.2.2 Características de las Estaciones y Vías	5
2.2.3 Material Rodante	6
2.2.4 Plano de red	7
2.3 Maquina motriz	7
2.3.1 Motor serie de Corriente Continua	7
2.3.2 Motor de inducción trifásico, corriente alterna	9
2.4 Sistema de alimentación	11
2.4.1 SS/EE de Rectificación	12
2.4.2 Suministro de corriente	14
2.5 Conceptos básicos de operación	15
2.5.1 Frecuencia de paso	15
2.5.2 Intervalo de explotación	15
2.5.3 Capacidad de transporte	16
2.5.4 Factor de ocupación	16
2.5.5 Velocidad comercial	16
2.5.6 Tiempo de vuelta	16
2.5.7 Cantidad de trenes en la línea	16
2.5.8 Consumo específico	16
2.5.9 Porcentaje de Regeneración	16
2.5.10 Porcentaje de Recuperación	17
2.5.11 Receptividad de la Línea	17
2.6 Métodos para la ubicación de SER	17
2.6.1 Método clásico	17
2.6.2 Método simulación	21

2.7 CBTC	23
2.7.1 Características generales	23
2.7.2 Arquitectura	24
2.8 Acumuladores de energía	24
2.8.1 Condensadores de doble capa	24
2.8.2 Batería inercial	25
2.8.3 Baterías	25
2.8.4 Bobinas Superconductoras	26

Capítulo 3: Regeneración de energía en L1 **27**

3.1 Comportamiento trenes CAF NS 07	27
3.1.1 Comportamiento etapa de Tracción	28
3.1.2 Comportamiento etapa de Frenado	28
3.2 Curvas de comportamiento	29
3.2.1 Curvas de comportamiento etapa de tracción	29
3.2.2 Curvas de comportamiento etapa de frenado	31
3.3 Simulación trenes CAF NS07	33
3.3.1 Simulación de marcha	33
3.3.2 Simulación consumo de energía	33
3.4 Modelación del freno eléctrico regenerativo	34
3.4.1 Modelación dinámica	34
3.4.2 Modelación eléctrica	35
3.5 Factores incidentes en la regeneración de energía	37
3.5.1 Tasa de desaceleración del tren	37
3.5.2 Masa del tren	38
3.5.3 Resistencia al rodado	39
3.5.4 Perfil de la línea	39
3.5.5 Características propias del material rodante	39
3.5.6 Receptividad de la Línea	40
3.6 Utilización de acumuladores de energía	42
3.7 Calculo regeneración de energía	42
3.7.1 Energía Regenerada	42
3.7.2 Energía reutilizada	45

Capítulo 4: Sistema Recuperación de Energía **47**

4.1 Acumuladores de energía en sistemas de tracción	47
4.2 Control de carga y descarga	48
4.3 Aplicaciones existentes en otros países	50
4.3.1 Volantes de Inercia	51
4.3.2 Baterías	51
4.3.3 Condensadores de Doble Capa	52

4.4 Modelación y Simulación	53
4.4.1 Modelación de la red de suministro de energía, Metro de Shangai	54
4.4.2 Modelación de los Trenes del Metro de Shangai	55
4.4.3 Modelación del sistema de recuperación de energía	57
4.4.4 Resultados de la simulación	58
4.4.5 Aplicación a Metro de Santiago	60
Capítulo 5: Conclusiones	61
Bibliografía	63
Anexos	64
Anexo A : Línea 1	64
A.1 Estaciones de pasajeros	64
A.2 Subestaciones de rectificación	64
A.3 Velocidad máxima operación	65
A.4 Cota del riel	67
Anexo B : Trenes CAF NS 2007	68
B.1 Descripción	68
B.2 Datos básicos	69
B.3 Prestaciones de servicio:	70
B.4 Equipamiento:	70
Anexo C : Simulaciones previas	71
C.1 Intervalo de explotación: T=100s	71
C.2 Intervalo de explotación: T=85s	72
Anexo D : Mediciones estación San Alberto Hurtado	74
D.1 Mediciones	74
D.2 Comentarios a las mediciones	77

Índice de figuras

Capítulo 2: Contextualización **4**

Figura 2.1: Plano de la red Metro de Santiago.	7
Figura 2.2: Circuito equivalente del motor serie de corriente continua	8
Figura 2.3: Curva torque velocidad motor serie continuo	9
Figura 2.4: Circuito equivalente por fase, referido al estator (con carga representada)	9
Figura 2.5: Curva torque velocidad maquina de inducción	10
Figura 2.6: Esquema típico sistema alimentación metro	11
Figura 2.7: Esquema rectificador hexafásico	12
Figura 2.8: Esquema rectificador dodecafásico	12
Figura 2.9: Esquema rectificador bigrupo hexafásico	13
Figura 2.10: Tren rodado sobre neumáticos (Barras guías)	14
Figura 2.11: Tren rodado en acero (Tercer riel)	14
Figura 2.12: Tren rodado en acero (Catenaria)	15
Figura 2.13: Configuración típica SS/EE R	18
Figura 2.14: Característica bajo carga SS/EE R	19
Figura 2.15: Circuito ejemplo por resolver	22

Capítulo 3: Regeneración de energía en L1 **27**

Figura 3.1: Curvas etapa de potencia 3/4 capacidad	29
Figura 3.2: Curvas etapa de potencia 4/4 capacidad	30
Figura 3.3: Curvas etapa de frenado 3/4 capacidad	31
Figura 3.4: Curvas etapa de frenado 4/4 capacidad	32
Figura 3.5: Porcentaje de regeneración v/s Desaceleración del tren NS-93	38
Figura 3.6: Porcentaje de regeneración tren NS-93 para carga máxima(a) y carga nominal(b)	39
Figura 3.7 Porcentaje de Regeneración y Recuperación en función del intervalo de explotación	40
Figura 3.8: Configuración típica red ferrocarril metropolitano (metro)	42
Figura 3.9: Esquemático para medición en Subestaciones de Rectificación	45
Figura 3.10: Mediciones en Subestación Seolleun de la Línea 2 del Metro de Seúl	46

Capítulo 4: Sistema Recuperación de Energía **47**

Figura 4.1: Duración carga/descarga y funcionalidad	48
Figura 4.2: Circuito Chopper Buck-Boost para sistemas de almacenamiento de energía	49
Figura 4.3: Voltaje de alimentación y regulación de carga/descarga	50
Figura 4.4: Topología típica red de suministro de energía para red de tracción eléctrica	54

Figura 4.5 Modelo para Simulink/SimPowerSystem de rectificador Bi-Grupo Dodecafásico	55
Figura 4.6: Modelo dinámico de un tren	56
Figura 4.7: El modelo del modulo "Acceleration"	56
Figura 4.8: Modelo para el cálculo de la potencia	57
Figura 4.9: Sistema de recuperación de energía	57
Figura 4.10: Modelo de red de alimentación de metro en 1500V y vehículos	58
Figura 4.11: Resultados de simulación sin sistema de recuperación de energía	59
Figura 4.12: Resultados de simulación con sistema de recuperación de energía	60

Anexos	64
---------------	-----------

Figura A.1: Velocidad máxima línea 1, vía 1	65
Figura A.2: Velocidad máxima línea 1, vía 2	66
Figura A.3: Cota del Riel para la Línea 1 del Metro de Santiago	67
Figura B.1: Nuevos trenes línea 1 CAF NS-07	68
Figura C.1: Envolvente de tensión vía 1 línea 1, intervalo explotación T=100s	71
Figura C.2: Envolvente de tensión vía 2 línea 1, intervalo explotación T=100s	71
Figura C.3: Envolvente de tensión vía 1 línea 1, intervalo explotación T=85s	72
Figura C.4: Envolvente de tensión vía 2 línea 1, intervalo explotación T=85s	72
Figura D.1: Voltaje de Línea lunes 09/08/2010	74
Figura D.2: Voltaje de Línea lunes 09/08/2010, Hora Punta Mañana	74
Figura D.3: Voltaje de Línea jueves 12/08/2010	75
Figura D.4: Voltaje de Línea jueves 12/08/2010, Hora Punta Mañana	75
Figura D.5: Voltaje de Línea martes 17/08/2010	75
Figura D.6: Voltaje de Línea martes 17/08/2010, Hora Punta Mañana	76
Figura D.7: Voltaje de Línea miércoles 18/08/2010	76
Figura D.8: Voltaje de Línea miércoles 18/08/2010, Hora Punta Mañana	76

Índice de tablas

Capítulo 2: Contextualización	4
Tabla 2.1: Características generales del Sistema Metro	5
Tabla 2.2: Características de las estaciones y vías	5
Tabla 2.3: Características Material Rodante	6
Tabla 2.4: Cantidad Material Rodante	6
Tabla 2.5: Comparativa distintos tipos de acumuladores	25
Capítulo 3: Regeneración de energía en L1	27
Tabla 3.1: Comportamiento tren etapa de tracción	28
Tabla 3.2: Comportamiento tren etapa de frenado	28
Tabla 3.3: Resultados simulación de marcha trenes CAF NS-07	33
Tabla 3.4: Resultados simulación consumo de energía trenes CAF NS-07	34
Tabla 3.5: Regeneración de Energía 3/4 CCM, Intervalo de Explotación T=100s	43
Tabla 3.6: Regeneración de Energía 4/4 CCM, Intervalo de Explotación T=100s	43
Tabla 3.7: Comparación regeneración a distintos intervalos de explotación, 3/4 de capacidad	44
Tabla 3.8: Comparación regeneración a distintos intervalos de explotación, 4/4 de capacidad	44
Capítulo 4: Sistema Recuperación de Energía	47
Tabla 4.1: Acumuladores de energía en sistemas de tracción	47
Tabla 4.2: Especificaciones sistema acumulador de energía	52
Tabla 4.3: Equipamiento SISTRAS SES propuesto	53
Anexos	64
Tabla A.1: Estaciones de pasajeros, línea 1	64
Tabla A.2: Subestaciones de rectificación, línea 1	65
Tabla A.3: Velocidades máximas, línea 1 - Vía 1	65
Tabla A.4: Velocidades máximas, línea 1 - vía 2	66

Nomenclatura

ATC	:	(En.) Automatic Train Control Control automático de trenes
ATO	:	(En.) Automatic Train Operation Operación Automática del Tren
ATP	:	(En.) Automatic Train Protection Protección Automática de Trenes
CAF	:	Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles
CBTC	:	(En.) Communication Based Train Control Sistema de control de trenes basado en comunicaciones
CCM	:	Capacidad de Carga Máxima
CDV	:	Circuito de vía
CEI	:	Comisión Electrotécnica Internacional
KPVA	:	Control Puntal de Velocidad Autónomo
M	:	Coche motriz con cabina conducción
N	:	Coche motriz sin cabina conducción
PK	:	Punto Kilométrico
R	:	Coche remolque (sin motor)
RPS	:	Repetición Puntual de Señal
SRE	:	Sistema de Recuperación de Energía
SACEM	:	(Fr.) Système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance Sistema de Apoyo para la conducción, operación y mantenimiento
SER	:	Subestación de Rectificación
SS/EE	:	Subestaciones

Capítulo 1:

Introducción

1.1 Motivación

Dentro de los futuros proyectos que Metro S.A. tiene en carpeta para el 2012, está el cambio del sistema de conducción automática de trenes en la línea 1, SACEM (*Système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance*), a un control de trenes basado en las comunicaciones: CBTC (*Communication Based Train Control*). En la actualidad el sistema de control de trenes permite saber si existe un tren dentro de secciones discretas de la línea, conocidos como circuitos de vía (CDV), pero no es posible identificar en que parte del CDV se encuentra. Con CBTC, gracias a la comunicación continua de información entre los trenes y el puesto de control, será posible saber con mayor precisión la posición de los trenes en la línea, pudiendo circular los trenes a una distancia de seguridad menor a la actual disminuyendo así el intervalo de explotación.

Mediante la incorporación de CBTC, se busca reducir el intervalo de explotación a 85s en horario punta, con lo que será posible tener más trenes circulando en línea, aumentando de esta manera la capacidad de transporte en la Línea 1, Línea en donde se incorporara CBTC. Debido a la circulación de un mayor número de trenes se tiene un aumento en la caída de tensión, como también un aumento en la capacidad de regeneración de la línea debido a la mayor probabilidad de la presencia de tren frenando.

Debido a este proyecto, nace la necesidad de diseñar un sistema de recuperación de energía que, mediante el uso de acumuladores de energía, sea capaz de aumentar el nivel de tensión en la línea en casos que este sea bajo, gracias a la utilización eficiente de la energía regenerada acumulada del frenado de los trenes.

1.2 Alcances

Este trabajo de título tiene por alcance complementar las soluciones alternativas a los problemas de tensión en la Línea 1 ya propuestos por *POCH* y *PSI CONSULTORES* en el estudio “Mejoramiento del sistema de alimentación de tracción de Línea 1”. En dicho estudio se abarcan las siguientes soluciones para dar solución al bajo voltaje en la Línea: Incorporación de subestaciones de rectificación de refuerzo; Transformación a bigrupo de subestaciones de rectificación monogrupo; Refuerzo del sistema de distribución de 750[V_{cc}]; Y remplazo de los actuales rectificadores de diodos por rectificadores de diodos controlados.

Dentro del estudio también se hace mención a la posibilidad de incorporar soluciones con acumuladores de energía, solución que no es desarrollada en su totalidad y que, mediante el presente trabajo de título, se buscará completar su desarrollo con el fin de crear un complemento al estudio citado y que, Metro de Santiago, tenga una alternativa de solución a los problemas de tensión en el sistema de tracción de la línea 1 mediante acumuladores de energía lo más completa posible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo de título es investigar sobre la factibilidad de dar solución a caídas de voltaje en Línea 1 del Metro de Santiago debido al futuro aumento del número de trenes circulando en hora punta, mediante la utilización de Sistemas de Recuperación de Energía.

Esto contempla estudiar la capacidad de regeneración de la Línea 1 del Metro de Santiago, los factores que afectan la cantidad de energía regenerada y determinar cuanta de esta energía es efectivamente reutilizada.

1.3.2 Objetivos específicos

Con la finalidad de cumplir el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Investigar los parámetros y curvas relevantes que determinan el comportamiento de los recientes trenes adquiridos por Metro de Santiago: CAF NS-07
- Estudiar sobre la regeneración de energía en sistemas de tracción eléctrica, tanto la regeneración de un solo tren como para toda la flota en operación normal.
- Estimar la cantidad de energía regenerada que es efectivamente reutilizada.
- Investigar sobre las alternativas de sistemas de recuperación de energía.
- Proponer un modelo de simulación de la red, donde se contemple la modelación del Sistema de Recuperación de Energía.

1.4 Estructura del trabajo

Este trabajo de título consta de 5 capítulos, incluyendo el que corresponde a la introducción. A continuación se procede a explicar, a grandes rasgos, el contenido y la relevancia de cada capítulo, con la intención de entregar un resumen ordenado y lógico del trabajo desarrollado.

En el capítulo 2 se lleva a cabo la revisión bibliográfica relativa al tema de trabajo de título. Los principales tópicos tratados en este compendio son: Generalidades del Metro de Santiago; descripción del funcionamiento de un tren del metro (maquina motriz, sistema de alimentación); conceptos básicos relacionados con la operación de la red; entre otros temas relacionados con los sistemas de tracción eléctrica.

El capítulo 3 se centra en el cálculo de la regeneración de energía para la Línea 1. La división de este capítulo consiste en: El comportamiento y la simulación de los nuevos trenes comprados por Metro de Santiago CAF NS-07; el modelamiento del frenado regenerativo para determinar la energía regenerada para un tren; los factores que inciden en la regeneración de energía, el cálculo para determinar el total de energía que es posible regenerar y cuanta de esta energía es efectivamente reutilizada.

En el capítulo 4 se estudian los sistemas de recuperación de energía, abarcando temas como: estado actual de los distintas tecnologías de los acumuladores de energía; circuitos asociados para la conexión a la línea; aplicaciones en otros Metros del mundo; y un modelo de simulación, basado en la Línea 1 del Metro de Shanghai, que considera la utilización de Sistemas de Recuperación de Energía.

En el capítulo 5, se enuncian algunas conclusiones y se discute la factibilidad de la incorporación de esta tecnología para solucionar problemas de tensión en la Línea 1 del Metro de Santiago. Además se propone el trabajo futuro que debiese ejecutarse para complementar y mejorar el trabajo obtenido con esta memoria.

Capítulo 2:

Contextualización

En este capítulo se entrega una descripción general del ferrocarril metropolitano, Metro, de la ciudad de Santiago de Chile, explicando los proyectos en carpeta que están ligados a este tema de memoria. Se explican además conceptos que serán útiles para comprender el funcionamiento del metro, desde el concepto de la maquina motriz utilizada hasta métodos de ubicación de SER, para finalizar con algunas generalidades de los distintos tipos de acumuladores de energía utilizados en sistemas de recuperación de energía.

2.1 Introducción

El Metro de Santiago es el ferrocarril metropolitano que cruza gran parte de la ciudad de Santiago de Chile. Es considerado uno de los sistemas más modernos de Latinoamérica, además del segundo más largo tras el de Ciudad de México. Con la inauguración de la extensión a Maipú de la Línea 5, Metro de Santiago cuenta con cinco Líneas, 108 estaciones y una extensión total de la red de 103km.

Además de las 5 Líneas operativas, dos nuevas líneas están en preparación para iniciar su construcción y se estima que estén habilitadas hacia el año 2014: La Línea 6 que cruzará desde la comuna de Cerrillos hasta Las Condes, y la Línea 3 que unirá las comunas de Conchalí y La Reina.

Durante el año 2008, Metro de Santiago inició la ejecución del proyecto de CBTC, proyecto que trae consigo un cambio de filosofía en la operación de los trenes. CBTC es un sistema de control de trenes basado en comunicaciones, que se estima esté operativo en 2012 en Línea 1.

Mediante CBTC, se logra que la comunicación de los trenes se vuelva dinámica: un controlador de zona indica constantemente no sólo la posición sino que también la velocidad que lleva el tren, con lo cual genera un punto objetivo donde detenerse que no está asociado a tramos determinados de la vía.

Una serie de objetivos esperan conseguirse con este nuevo sistema. Entre ellos se cuenta el aumento de la capacidad de transporte, puesto que esta tecnología permite un menor intervalo de operación, una mayor velocidad comercial y menores tiempos de respuesta del sistema. Además, CBTC permitirá aumentar la flexibilidad operacional: al conocer el posicionamiento continuo de los trenes se puede obtener una mejor regulación y recuperación de los atrasos. Junto con ello, es posible realizar la

operación más eficiente gracias a estrategias de ahorro de energía y automatización, consistentes en retornos en terminales y entradas y salidas de cocheras sin conductor.

2.2 Metro de Santiago

A continuación se presentan algunas características generales del Metro de Santiago, como las características generales del Metro, características de las estaciones y vías [1], detalles del material rodante [2], etc.

2.2.1 Características Generales del Sistema Metro

Tabla 2.1: Características generales del Sistema Metro

	Líneas 1, 2 y 5	Línea 4 y 4A
Electrificación	750 Vcc, barras guías laterales	750 Vcc, tercer riel
Sistema de pasajes	Por boleto de codificación magnética con control en todas las estaciones y tarjeta sin contacto MIFARE de 1Kb	
Control de tráfico	Por sistema de Comando Centralizado (Automatizado)	
Conducción de trenes	Normalmente en forma automática y eventualmente en conducción manual controlado. Solo en caso extremo, conducción "a la vista"	
Composición de trenes	Entre 5 y 9 coches	3 o 6 coches
Velocidad Comercial	32km/hr	35m/hr
Circulación	Por pistas de rodado, barra guías laterales y rieles de seguridad.	Por rodado de acero, rieles UIC 60.
Sentido de circulación	A la derecha	A la derecha
Sistema de rodado	Neumático	Sobre acero
Tipo de Riel	40kg/m con uniones soldadas y eclisadas	60kg/m con uniones soldadas, largo riel soldado

La electrificación de las líneas del Metro de Santiago, como se especifica en la Tabla 2.1, se hace en 750 Vcc. Esta tensión continua se logra a través de subestaciones de rectificación que son alimentadas en 20kV_{AC} trifásicos. Las distintas configuraciones de subestaciones de rectificación se verán más adelante en el punto 2.4.1.

2.2.2 Características de las Estaciones y Vías

Luego de la inauguración de la segunda etapa de la extensión de la línea 5 del metro, este contará con 108 estaciones, logrando estar presentes en 20 comunas de la ciudad de Santiago, alcanzando una longitud total de la red de 103km. El desglose por cada línea se presenta en la Tabla 2.2 [3]:

Tabla 2.2: Características de las estaciones y vías

	Línea 1	Línea 2	Línea 4	Línea 4A	Línea 5
Nº Estaciones	27	22	23	6	29
Longitud Total (km)	18,9	20,6	24,7	7,7	29,5
Dista. Promedio estaciones	736,0 m	981,0 m	1.123 m	1.540 m	1.054 m
Mayor distancia estaciones	1.391 m	1.432 m	1.704 m	1.988 m	1.543 m
Menor distancia estaciones	458,0 m	692,0 m	715,0 m	856,0 m	502,0 m
Pendiente Máxima	4,8%	4,3%	3,5%	3,5%	3,5%
Radio mínimo de curvatura	280 m	205 m	248 m	450 m	100 m
Comunas beneficiadas	5	4	8	4	10

Dado que esta memoria de título está orientada hacia la línea 1 del Metro de Santiago, en el Anexo A es posible encontrar más detalles de esta línea, como ubicación de las estaciones y subestaciones de rectificación, velocidades máximas para cada vía, entre otros.

2.2.3 Material Rodante

Metro de Santiago, luego de la llegada del último tren fabricado por CAF, cuenta con un total de 967 coches que forman en total 187 trenes. En la Tabla 2.3 se muestran características generales de los distintos tipos de trenes que circulan por las líneas del Metro de Santiago.

Tabla 2.3: Características Material Rodante

	Año Construcción	Rodadura	Constructora	Procedencia	Líneas op.
NS 74	1973-1981	Neumática	Alstom	Francia	L2 L5
NS 88	1987	Neumática	Concarril	México	L2
NS 93	1996-2003	Neumática	Alstom	Francia	L1 L2 L5
AS 2002	2004-2010	Férrea	Alstom	Brasil	L4 L4A
NS 2004	2006-2007	Neumática	Alstom	Brasil	L1
NS 2007	2009-2010	Neumática	CAF	España	L1

Además, en la Tabla 2.4, se muestra un detalle según el modelo del tren, con la cantidad de trenes y cantidad de coches por tren utilizado en las distintas líneas del metro.

Tabla 2.4: Cantidad Material Rodante

	Configuraciones	Total Trenes	Total Coches
NS 74	L2: 23 trenes de 5 coches	49	245
	L5: 26 trenes de 5 coches		
NS 88	L2: 1 tren de 5 coches	1	5
NS 93	L1: 6 trenes de 7 coches	34	236
	L1: 10 trenes de 8 coches		
	L2: 6 trenes de 7 coches		
	L5: 12 trenes de 6 coches		
AS 2002	L4 y L4A: 72 trenes de 3 coches	72	216
NS 2004	L1: 8 trenes de 8 coches	11	85
	L1: 3 trenes de 7 coches		
NS 2007	L1: 20 trenes de 9 coches	20	180
TOTAL		187	967

En el Anexo B es posible encontrar más información de los trenes CAF NS2007, información que será útil para las simulaciones que se harán más adelante

2.2.4 Plano de red

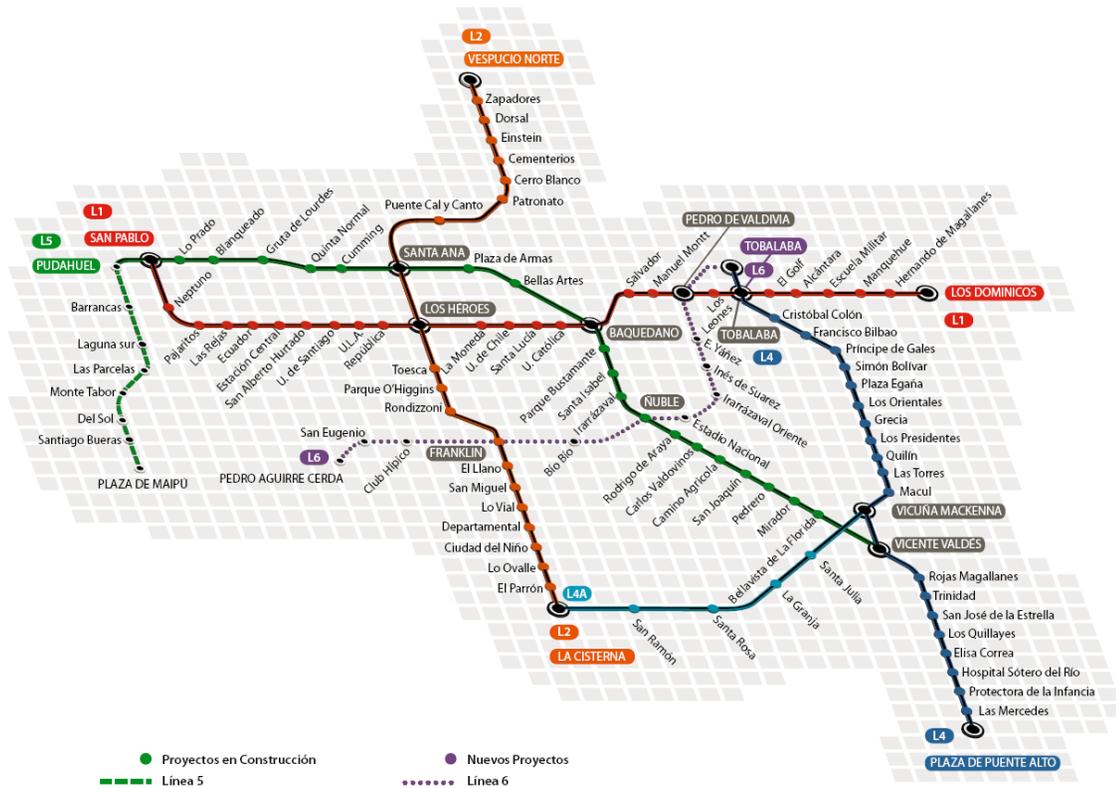


Figura 2.1: Plano de la red Metro de Santiago.

2.3 Maquina motriz

El movimiento del material rodante que circula diariamente por las distintas líneas del Metro de Santiago se debe a, en caso de los trenes antiguos, motores serie de corriente continua y a motores de inducción de corriente alterna para los demás trenes. A continuación se presentan las principales características de las maquinas motrices mencionados.

2.3.1 Motor serie de Corriente Continua

La máquina de corriente Continua (cc) [4] tiene múltiples aplicaciones, especialmente como motor, debido principalmente a:

- Amplio rango de velocidades, ajustables de modo continuo y controlables con alta precisión
- Característica de torque-velocidad variable
- Rápida aceleración, desaceleración y cambio de sentido de giro
- Posibilidad de frenado regenerativo

Para aplicaciones motrices, como es el caso de los trenes NS 73 del Metro de Santiago, la configuración más utilizada corresponde a la configuración serie y la principal razón de utilizar esta configuración es su característica de torque-velocidad. El circuito que representa la configuración serie de un motor de corriente continua se muestra en la Figura 2.2:

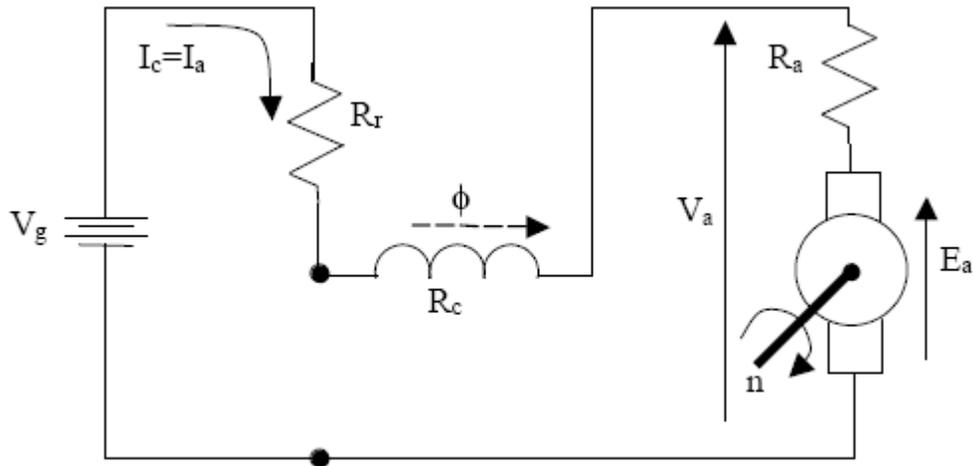


Figura 2.2: Circuito equivalente del motor serie de corriente continua

- Con: V_g : Fuente de alimentacion
 E_a : Voltaje generado en la armadura
 R_a : Resistencia de enrollado de armadura
 I_a : Corriente de armadura
 V_a : Voltaje de armadura
 R_c : Resistencia de enrollado de campo
 I_c : Corriente por el enrollado de campo
 ω_r : Velocidad del motor
 R_r : Resistencia variable (reostato), Contro la magnitud de I_c

Del circuito equivalente mostrado en la Figura 2.2, notando que $I_c = I_a = I$, se desprende que:

$$V_g = (R_r + R_c) \cdot I_c + R_a \cdot I_a + E_a \quad (2.1)$$

Adicionalmente se tiene que el voltaje generado en la armadura depende de la velocidad del rotor, de la corriente de campo y de la inductancia de rotación G , mediante la siguiente fórmula:

$$E_a = G \cdot \omega_r \cdot I_c \quad (2.2)$$

Por lo que el torque de la máquina de corriente continua, en conexión serie $T = E_a \cdot I_a / \omega_r = G I_a I_c$, queda representada por la siguiente ecuación:

$$T = \frac{G V_g^2}{(R_c + R_r + G \omega_s + R_a)^2} \quad (2.3)$$

Graficando la ecuación anterior en función de la velocidad del rotor de la maquina continua, ω_r , se obtiene la curva característica torque velocidad del motor serie continuo, que se muestra en la Figura 2.3:

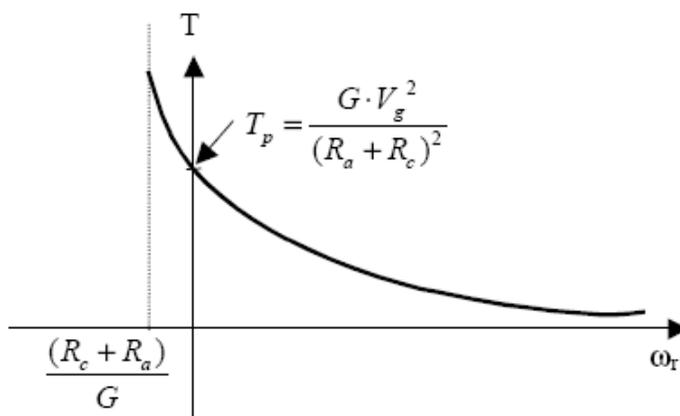


Figura 2.3: Curva torque velocidad motor serie continuo

2.3.2 Motor de inducción trifásico, corriente alterna

Desde hace un buen tiempo, los trenes del Metro de Santiago vienen con motores asíncronos en vez de motores series de corriente continua usados antiguamente, esto se debe a que con el avance de la electrónica de potencia, el control de la máquina de inducción, o asíncrono, se ha hecho cada vez más sofisticado y preciso, lo cual ha consolidado el uso de estas maquinas para aplicaciones industriales como correas transportadoras, ascensores, tracción eléctrica. Estas maquinas además se caracterizan por un bajo costo de fabricación y mantención, como su diseño es compacto, permite obtener máxima potencia por unidad de volumen.

Para operar la máquina de inducción como motor, es necesario alimentar el enrollado del estator desde una fuente trifásica para producir un campo magnético rotatorio. Este campo magnético gira a una velocidad síncrona (ω_s) de acuerdo a la frecuencia eléctrica de alimentación e induce corrientes en el rotor mediante el mismo efecto que el transformador (inducción). Gracias a las corrientes de estator y rotor es posible generar torque motriz en el eje de la máquina.

La máquina de inducción [5] queda representada como muestra la Figura 2.4, en donde se muestra el circuito equivalente de la maquina referido al estator, con su carga representada:

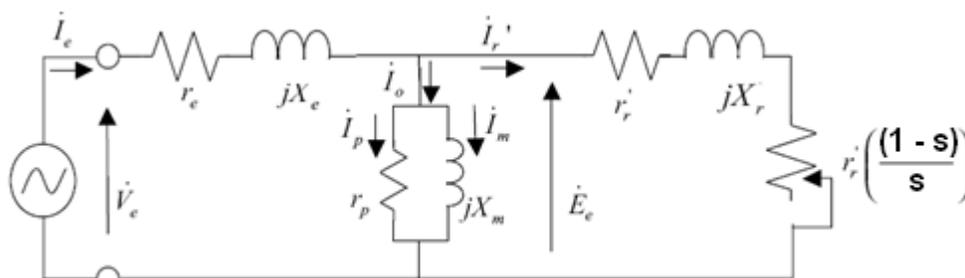


Figura 2.4: Circuito equivalente por fase, referido al estator (con carga representada)

- Con: r_e : Resistencia bobinado estator
- X_e : Reactancia bobinado estator
- r'_r : Resistencia bobinado rotor (referida al estator)
- X'_r : Reactancia bobinado rotor (referida al estator)
- r_p : Resistencia de pérdidas en el hierro
- X_m : Reactancia de magnetización

La potencia mecánica transferida al eje de la máquina de inducción es definida mediante la siguiente fórmula:

$$P_{mec} = r'_r \left(\frac{1-s}{s} \right) (I'_r)^2 \quad (2.4)$$

Con esto, el torque electromecánico de la máquina de inducción es:

$$T_{3\phi} = \frac{P_{mec_{3\phi}}}{\omega_m} = \frac{3 \cdot r'_r \left(\frac{1-s}{s} \right) (I'_r)^2}{(1-s)\omega_s} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{3 \cdot r'_r \cdot (I'_r)^2}{s} \right] \quad (2.5)$$

El valor de la corriente del rotor es posible determinarla a partir del circuito equivalente mostrado en la Figura 2.4, obteniéndose:

$$i'_r = \frac{\dot{V}_e}{\left(r_e + \frac{r'_r}{s} \right) + j(X_e + X'_r)} \quad (2.6)$$

Con lo que se obtiene finalmente la expresión para el torque de la máquina de inducción:

$$T = \frac{3 \cdot r'_r}{s \cdot \omega_s} \cdot \frac{V_e^2}{\left(r_e + \frac{r'_r}{s} \right)^2 + (X_e + X'_r)^2} \quad (2.7)$$

Manteniendo los parámetros de la maquina fijos y variando el valor de ω_s , se obtiene la curva torque velocidad de la maquina de induccion, mostrada en la Figura 2.5, en donde se observa que la maquina pueda funcionar como motor, como generador y como freno.

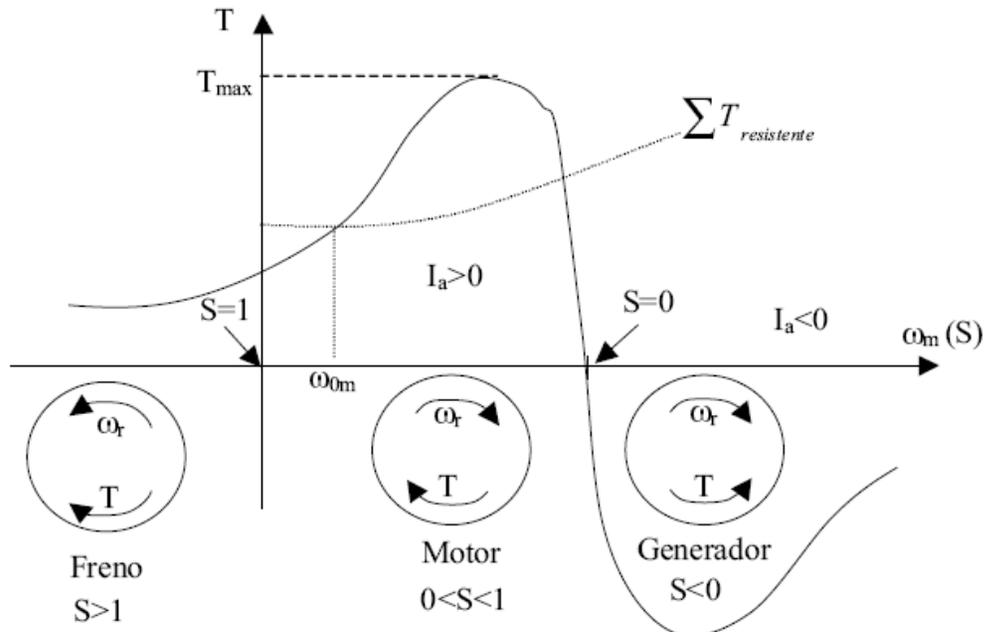


Figura 2.5: Curva torque velocidad maquina de inducción

2.4 Sistema de alimentación

A continuación se explicara de manera general el sistema de alimentación utilizado por Metro de Santiago para alimentar los motores de tracción eléctrica utilizados para mover los trenes.

El esquema simplificado del sistema de alimentación del Metro de Santiago se muestra en la Figura 2.6:

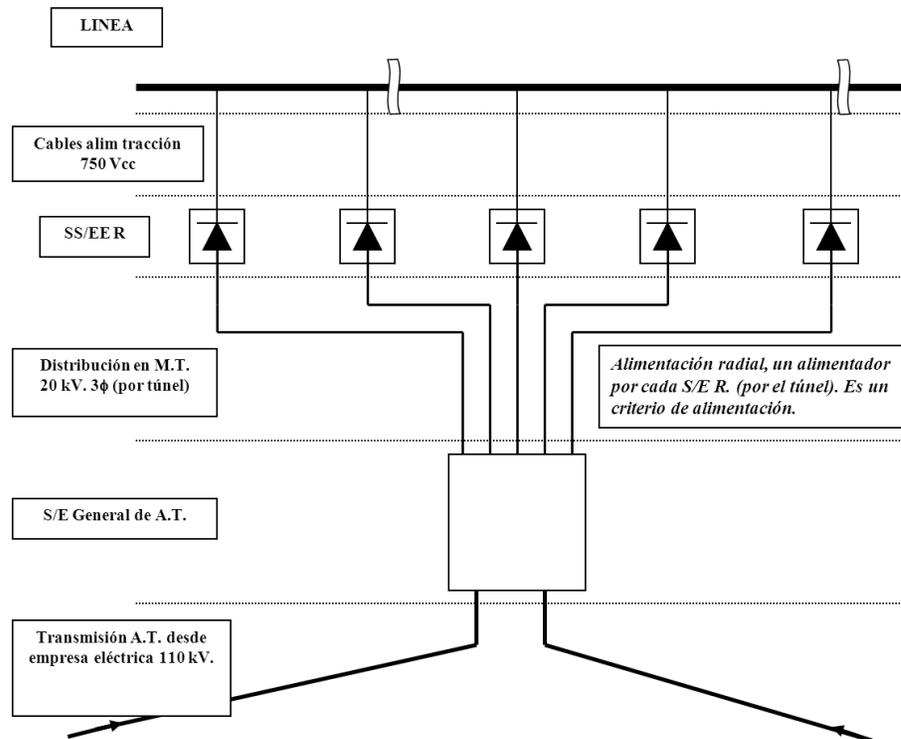


Figura 2.6: Esquema típico sistema alimentación metro

El sistema eléctrico del Metro de Santiago, parte con la compra de energía en 110kV¹, en subestaciones generales de alta tensión, en donde se transforma de 110kV a 20kV trifásicos. Luego esta se distribuye en media tensión, 20kV trifásicos, a cada una de las subestaciones de rectificación a través del túnel, utilizando uno o dos alimentadores por cada Subestación de rectificación, dependiendo si la subestación posee un grupo de rectificadores (monogrupo) o dos grupos de rectificadores (bigrupo). En las subestaciones de rectificación, primero se baja el nivel de tensión a niveles apropiados para los rectificadores, del orden de 600V_{CA}, y luego gracias a los rectificadores se logran los 750V_{CC} nominales que alimentarían la línea y los motores de tracción eléctrica que darán la fuerza motriz necesaria para movilizar el material rodante.

¹ También se realizan compras de energía en 20kV, la cual se distribuye a las subestaciones de rectificación directamente

2.4.1 SS/EE de Rectificación

Como ya se mencionó, las subestaciones de rectificación cumplen la función de bajar el nivel de tensión para luego rectificarla, de esta manera se logran los $750V_{CC}$ con lo que opera la red. A continuación se mostrarán las configuraciones utilizadas en las subestaciones de rectificación, según el tipo de rectificador utilizado [6].

2.4.1.1 Rectificador hexafásico

El esquema básico de una subestación de rectificación con un rectificador hexafásico, de 6 pulsos, se muestra en la Figura 2.7. Este tipo de subestación consta de un transformador trifásico Dy , en donde el lado de alta tensión se conecta a red de distribución en media tensión de 20kV y el lado de baja se conecta al puente rectificador, tal como muestra Figura 2.7.

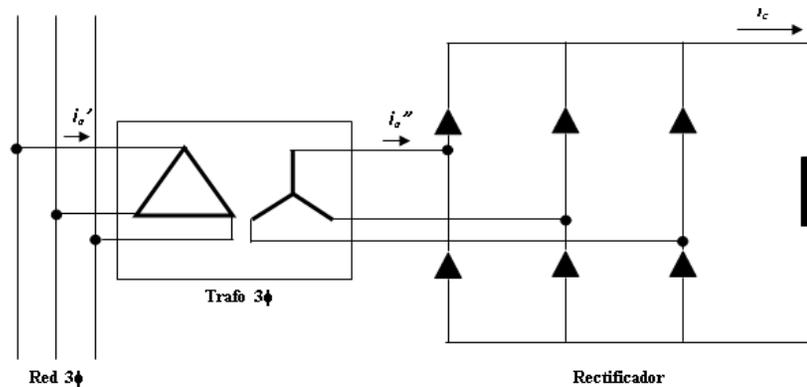


Figura 2.7: Esquema rectificador hexafásico

2.4.1.2 Rectificador dodecafásico

El esquema básico de una subestación de rectificación con un rectificador dodecafásico, de 12 pulsos, se muestra en la Figura 2.8. Este tipo de subestación consta de un transformador trifásico de 3 enrollados Yyd , en donde el lado de alta tensión se conecta a red de distribución en media tensión de 20kV y los otros dos enrollados se conectan a dos puentes rectificadores, tal como muestra Figura 2.8.

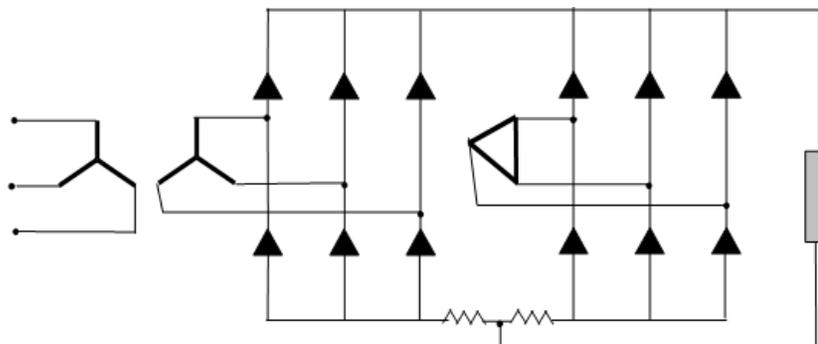


Figura 2.8: Esquema rectificador dodecafásico

2.4.1.3 Rectificador bigrupo hexafásico

El esquema básico de una subestación de rectificación con un rectificador bigrupo hexafásico, de 12 pulsos, se muestra en la Figura 2.9. Este tipo de subestación sería similar a colocar dos rectificadores hexafásicos en paralelo y desfasados en 30° . Consta de dos transformadores, uno en conexión Dy y el otro en conexión Dd , en donde los lados de alta tensión se conectan a red de distribución en media

tensión de 20kV y el lado de baja tensión se conectan a dos puentes rectificadores, tal como muestra Figura 2.9.

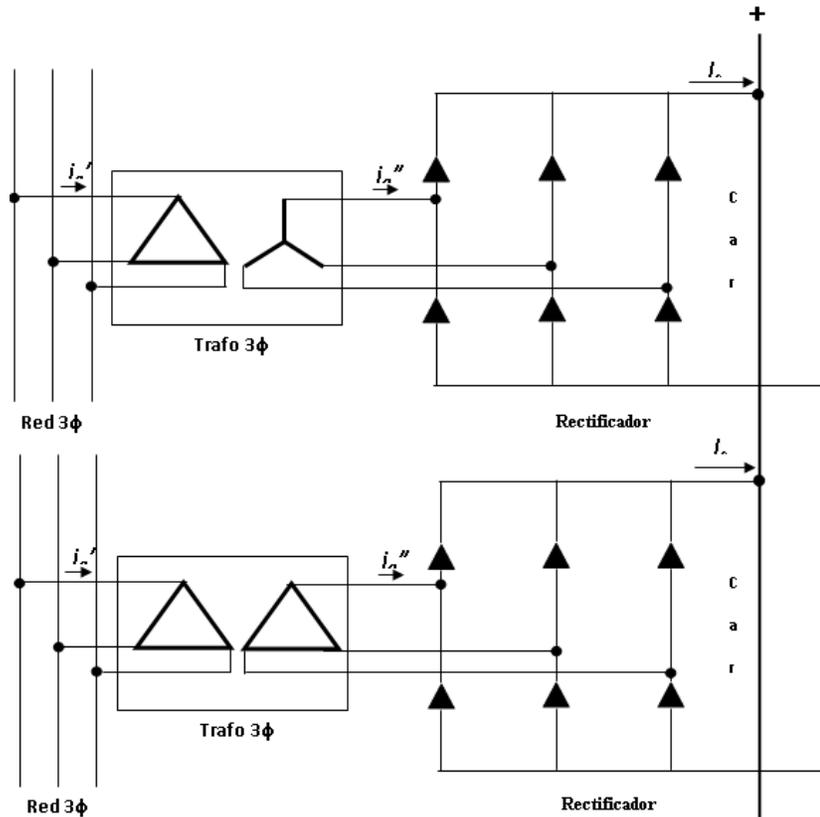


Figura 2.9: Esquema rectificador bigrupo hexafásico

2.4.1.4 Contaminación armónica

Dada la utilización de elementos de la electrónica de potencia en el proceso de rectificación, se generan voltajes y corrientes armónicos que se inyectan a la red, tanto de alterna como de continua, cuyo orden h depende de la cantidad de pulsos p del rectificador utilizado. De esta manera, un rectificador de p pulsos inyectará a la red de alterna armónicos de corriente de orden $h = k \cdot p \pm 1$ y a la red de continua armónicos de voltaje de orden $h = k \cdot p$.

De esta manera en caso de utilizar un rectificador de 6 pulsos, como el hexafásico, se contamina la red alterna trifásica con armónicos de corriente de orden $h = 5, 7, 11, 13$, etc. y en el lado de continua aparecen armónicos de voltaje de orden $h = 6, 12, 18$, etc.. En caso de utilizar un rectificador de 12 pulsos, como el rectificador dodecafásico o el rectificador bigrupo hexafásico, la red de alterna es contaminada con armónicos de corriente de orden mayor, $h = 11, 13, 23, 25$, etc., y al lado de continua aparecen armónicos de voltaje de orden $h = 12, 24$, etc..

El contenido armónico en la red puede ocasionar diversos problemas [7], siendo el más peligroso la resonancia paralela provocando una distorsión elevada en los voltajes y sobrecorrientes en los capacitores. Otros problemas que genera el contenido armónico en la red es el deterioro de las aislaciones, elevación de pérdidas Joule y magnéticas, falsa operación de protecciones, torques armónicos en máquinas rotatorias, etc., lo que a la larga implica una reducción de la vida útil de los

equipos. Es por esto que Metro de Santiago está realizando estudios sobre las armónicas que generan y los problemas que podrían generar, además de investigar de qué manera se puede mitigar sus efectos.

2.4.2 Suministro de corriente

Ya se vio las dos máquinas motrices utilizadas en aplicaciones de tracción eléctrica, además se vio el esquema eléctrico generalizado del Metro de Santiago. A continuación se explicará cómo es posible que las máquinas motrices obtengan la corriente necesaria para operar desde la subestación de rectificación.

Una vez rectificado el voltaje alterno, se conecta a la línea a través de cables de alimentación de tracción de 750Vcc. La forma de conectar desde la subestación de rectificación a la línea, dependerá si el tren es rodado sobre neumáticos o sobre acero [8].

2.4.2.1 Tren rodado sobre neumáticos

En caso que el tren es rodado sobre neumático, como es el caso de las Líneas 1,2 y 5 del Metro de Santiago, los coches motrices del tren utilizan unas barras guías como positivos y los rieles como negativos, tal como muestra la Figura 2.10.

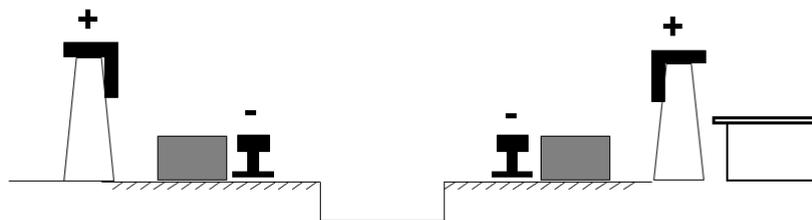


Figura 2.10: Tren rodado sobre neumáticos (Barras guías)

2.4.2.2 Tren rodado en acero

En caso que el tren sea rodado en acero, como ocurre en las Líneas 4 y 4A del Metro de Santiago, existen dos métodos para suministrar la corriente a los coches motrices: El primero de ellos, utilizado en estas líneas, corresponde a la utilización de un tercer riel, riel que es utilizado como positivo, para dejar los rieles como negativos, tal como muestra la Figura 2.11:

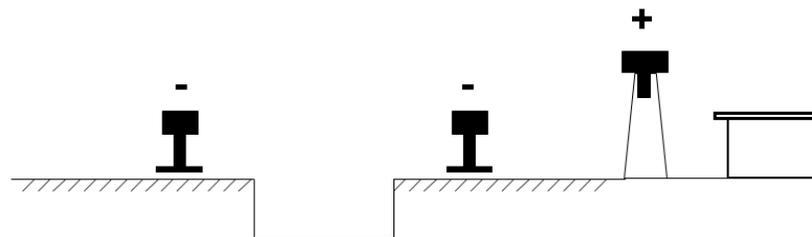


Figura 2.11: Tren rodado en acero (Tercer riel)

El segundo método corresponde a la utilización de una catenaria, la cual oficia de positivo, además de la utilización de los rieles como negativos, tal como muestra la Figura 2.12:

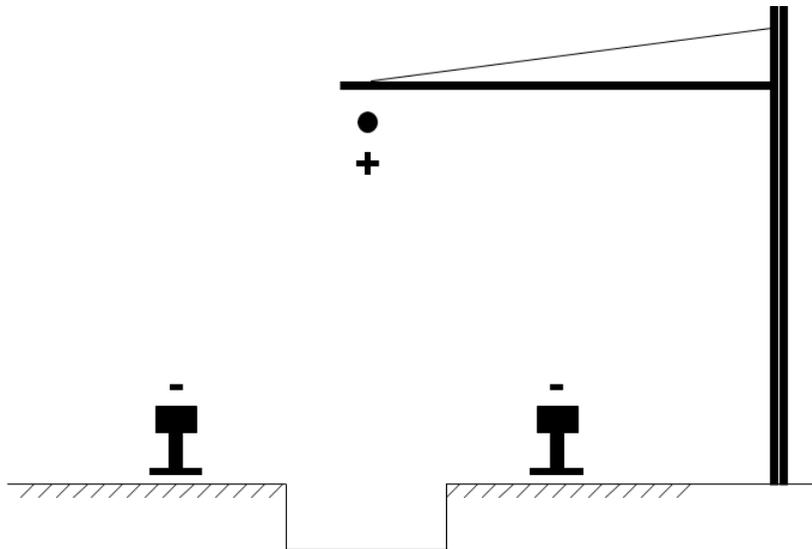


Figura 2.12: Tren rodado en acero (Catenaria)

2.5 Conceptos básicos de operación

A continuación se presentan conceptos básicos ligados a la operación del Metro de Santiago [8].

2.5.1 Frecuencia de paso

La frecuencia de paso se define como la cantidad de trenes mínimos que deben pasar en una hora para cubrir la demanda máxima del tramo más cargado de la línea. Sea $D(Pax/hr)$ la demanda en la hora punta del tramo mas cargado, $CC(Pax/Coche)$ la capacidad de pasajeros por coche y $N_C(Coches/Tren)$ el número de coches por tren, se define la frecuencia de paso mínima f_{paso} (en *Trenes/hr*) como muestra (2.8).

$$f_{paso} = \frac{D}{CC \cdot N_C} \quad (2.8)$$

2.5.2 Intervalo de explotación

El intervalo de explotación se define como el intervalo de tiempo que transcurre entre el paso de dos trenes consecutivos en un punto específico de la línea. El intervalo de explotación mínimo al cual se puede operar el sistema de manera tal que se satisfaga la demanda se define como T (en *s*) (2.9).

$$T = \frac{3600}{f_{paso}} \quad (2.9)$$

El intervalo de explotación es diferente para cada tramo horario, pues como se verá a continuación, gracias al intervalo de explotación es posible manejar la oferta de transporte, pudiendo así adaptarla a la demanda del tramo horario específico. Computadores, gracias a programas de control de tráfico, se encargan de mantener regulado el intervalo de explotación de acuerdo a lo programado para el sistema.

2.5.3 Capacidad de transporte

La capacidad de transporte se define como la cantidad de pasajeros que es posible transportar durante una hora. Si se considera por razones de operación un intervalo de explotación de T segundos, la capacidad de transporte será CT (en Pax/hr) (2.10).

$$CT = N_c \cdot CC \cdot \frac{3600}{T} \quad (2.10)$$

2.5.4 Factor de ocupación

El factor de ocupación corresponde a la relación entre la oferta y la demanda de transporte y se puede interpretar como una medición del confort. Se define como F_{ocup} (2.11).

$$F_{ocup} = \frac{CT}{D} \quad (2.11)$$

El factor de ocupación además tiene directa relación con la cantidad de pasajeros por metro cuadrado.

2.5.5 Velocidad comercial

La velocidad comercial v_c corresponde la velocidad promedio del tren., incluyendo los tiempos de parada de los trenes en las distintas estaciones.

2.5.6 Tiempo de vuelta

El tiempo de vuelta corresponde al tiempo que demora un tren en dar una vuelta completa a todo el circuito de la línea. Es posible calcularlo conociendo el largo de la línea L y la velocidad comercial v_c , mediante la formula (2.12).

$$T_v = \frac{2L}{v_c} \quad (2.12)$$

2.5.7 Cantidad de trenes en la línea

La cantidad de trenes en la línea N_{TL} corresponde al numero de trenes mínimos necesarios para operar según lo programado, de manera tal de cubrir toda la línea con el intervalo de explotación presupuestado. Se calcula mediante la fórmula (2.13):

$$N_{TL} = \frac{T_v}{T} \quad (2.13)$$

2.5.8 Consumo específico

El consumo específico C de un coche, corresponde a la energía necesaria para que un coche avance una distancia de 1km.

2.5.9 Porcentaje de Regeneración

Se define como la razón entre la energía regenerada en la etapa de frenado del tren y la energía que este consume en la etapa de tracción.

2.5.10 Porcentaje de Recuperación

Se define como la razón entre la parte de la energía regenerada que es efectivamente utilizada por otro consumo de la red y la energía consumida en tracción

2.5.11 Receptividad de la Línea

Se refiere a la capacidad que posee la Línea de alimentación de tracción para absorber la energía que regenera algún tren durante el frenado en cualquier punto de la Línea.

2.6 Métodos para la ubicación de SER

A continuación, se explicaran los dos métodos comúnmente utilizados para la ubicación de las subestaciones de rectificación para una red de ferrocarriles metropolitanos.

2.6.1 Método clásico

El método clásico para la ubicación de subestaciones de rectificación se basa en la minimización de costos, tomando como restricciones el cumplimiento de la norma CEI 146, además que la tensión en cualquier punto de la red este por sobre el mínimo.

2.6.1.1 Norma CEI 146

La publicación Nº 146 de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) 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 $P_a/1,5$. Así, en caso de falla, es posible operar durante la hora punta sin que se degrade el sistema.

2.6.1.2 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 (2.14).

$$P_0(l) = 4 \cdot U_0 \cdot i(0) \quad (2.14)$$

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 (2.15).

$$\frac{U_0 T}{3.600 \cdot C \cdot N_C \cdot 10^3} e^{-\frac{r_x T}{7.200 \cdot C \cdot N_C \cdot 10^3} \cdot i(0)^2} \int_0^{i(0)} e^{-\frac{r_x T}{7.200 \cdot C \cdot N_C \cdot 10^3} \cdot i^2} di = \frac{l}{2} \quad (2.15)$$

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 $l/2$ 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 $l/2$ y por el otro lado un sector de línea de largo $3l/2$.

La potencia que consume la porción de línea de largo $l/2$ es la mitad de la potencia normalmente consumida: $P_0(l)/2$. En cambio la potencia consumida en la porción de largo $3l/2$ es la mitad de la potencia consumida cuando la distancia que separa las SS/EE R es $3l$: $P_0(3l)/2$. De esta manera, se define la potencia de auxilio P_a como (2.16).

$$P_a = \frac{1}{2} \cdot P_0(l) + \frac{1}{2} \cdot P_0(3l) \quad (2.16)$$

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 (2.17).

$$P_{nom} \geq \frac{P_a}{1,5} = \frac{1}{3} P_0(l) + \frac{1}{3} P_0(3l) \quad (2.17)$$

Considerando esta condición de diseño de la línea, se asegura que cada una de las subestación de rectificación estará en condiciones de suministrar, durante un periodo de 2 horas, la potencia necesaria en caso de falla de la SS/EE R 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.

2.6.1.3 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 decaer por bajo de la tensión mínima para la operación de los trenes. Por lo tanto se debe cumplir la condición (2.18).

$$U_0 - \Delta U \geq U_{min} \quad (2.18)$$

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 2.13

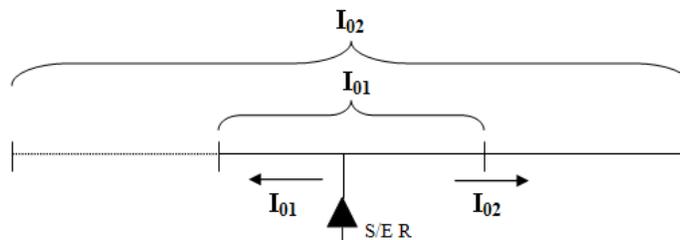


Figura 2.13: Configuración típica SS/EE R

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

2.6.1.3.1 Caída de tensión interna de la SS/EE R

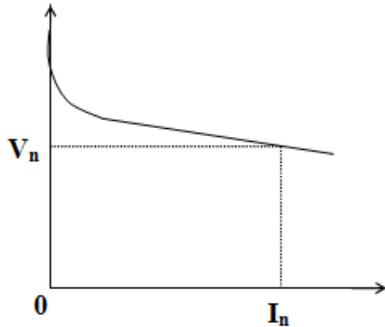


Figura 2.14: Característica bajo carga SS/EE R

Como muestra la Figura 2.14, la característica bajo carga de una SS/EE R es lineal en una amplia zona de funcionamiento, en donde:

$$V_{CC} = V_V - R_i \cdot I_{CC}$$

Con: V_V : Tensión de salida rectificador en vacío (en V)

R_i : Resistencia interna o de conmutación (en Ω)

I_{CC} : Corriente salida SS/EE R

$$I_{CC} = 2 \cdot (I_{01} + I_{02})$$

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:

$$V_V = \sqrt{2} \cdot V_{ff} \cdot \frac{\sin(\pi/p)}{\pi/p} \quad (2.19)$$

Con: p : N° de pulsos del rectificador

V_{ff} : Tensión efectiva entre fases del secundario del trafo SS/EE R

2.6.1.3.2 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 lado mayor, de esta manera la caída de tensión es definida como (2.20).

$$\Delta U_L = r_x \cdot \frac{l_{02}}{2} \cdot I_{02} \quad (2.20)$$

En 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)

2.6.1.3.3 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 (2.21).

$$\Delta U_P = r_x \cdot I_P \cdot L_{02} \quad (2.21)$$

Con: I_P : Corriente de partida de un tren

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

2.6.1.3.4 Caída de tensión en los cables de alimentación de tracción:

Los cables de alimentación de tracción van desde la SS/EE R hasta la vía, a través de una galería o multiducto o directamente si la SS/EE R 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 fórmula (2.22).

$$\Delta U_C = \frac{2 \cdot R_C \cdot L_G \cdot (I_{01} + I_{02}) \cdot 2}{N_c} \quad (2.22)$$

En donde: R_C : Resistencia por km de cada cable de tracción (en Ω/km)

L_G : Longitud entre la SS/EE R 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 (2.23):

$$\Delta U = \sqrt{2} \cdot V_{ff} \cdot \frac{\sin(\pi/p)}{\pi/p} + r_x \cdot \frac{l_{02}}{2} \cdot I_{02} + r_x \cdot I_P \cdot L_{02} + \frac{2 \cdot R_C \cdot L_G \cdot (I_{01} + I_{02}) \cdot 2}{N_c} \quad (2.23)$$

2.6.1.4 Cálculos económicos para determinar potencia nominal óptima.

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 obtiene el número N de subestaciones mínimas a instalar de potencia nominal P_N y las respectivas pérdidas joule P_j . Además se debe tener en consideración los costos de inversión C_I , 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 (2.24).

$$F_{costos} = C_I + \sum_{k=1}^n \frac{C_{M_k} + C_{perd_k}}{(1+i)^k} \quad (2.24)$$

Este costo se evalúa para las distintas opciones de diseño según el P_{nom} de la SS/EE R escogido, escogiendo aquella alternativa que implique un menor costo.

2.6.2 Método simulación

El método de ubicación y dimensionamiento de subestación de rectificación a partir de simulación se basa en la ejecución secuencial de los siguientes 3 módulos:

2.6.2.1 Simulación de marcha:

La simulación de marcha tiene por objeto estudiar el comportamiento de un vehículo a lo largo de la línea a partir de los parámetros de explotación que se hayan definido, obteniéndose de ella resultados de tiempos de recorrido, aceleraciones, velocidades, ubicación del tren, potencia y energía consumida, etc.

La simulación de la marcha de un tren está basada en la ecuación de la dinámica (2.25).

$$F_m - F_r = M \cdot a \quad (2.25)$$

Con F_m la fuerza motriz del tren, F_r la fuerza de resistencia al rodado, M la masa del tren corregida por efectos inerciales y a la aceleración del tren.

Esta ecuación por lo general se resuelve discretizada, por lo que se hace necesario calcular en cada intervalo de simulación Δt la aceleración a_i , la velocidad v_i , y la distancia s_i acumulada. Estas se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$a_i = \frac{F_{m_i} - F_{r_i}}{M} \quad (2.26)$$

$$v_i = v_{i-1} + a_i \Delta t \quad (2.27)$$

$$s_i = s_{i-1} + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a_i \Delta t^2 \quad (2.28)$$

2.6.2.2 Simulación de flota:

Mediante la simulación de flota se obtiene la cantidad de trenes necesarios de acuerdo a los criterios de explotación.

La simulación de flota se hace una vez terminada la simulación de marcha, pues se debe efectuar la simulación del movimiento de los trenes a través de la rotación de todos los trenes en línea, esto por lo general se hace cada 1 segundo, durante un periodo de tiempo de 10 veces el intervalo de explotación T y repitiendo la simulación 4 veces: dos trenes partiendo al mismo tiempo en ambos extremos de la línea; además de los casos en que partan desfasados en un 25%, 50% y 75%¹. De esta manera es posible obtener “instantáneas” de la red cada un segundo, obteniéndose finalmente $40 \cdot T$ instantáneas en la línea.

¹ La partida desfasada de los trenes generalmente en las simulaciones aparece como delay y se expresa en porcentaje debido a que se hace partir en una fracción del intervalo de explotación.

2.6.2.3 Simulación eléctrica:

Mediante la simulación eléctrica, se generan las distintas mallas eléctricas y se resuelven. De esta simulación es posible obtener caídas de tensión y corrientes máximas, datos que servirán para determinar la cantidad de subestaciones de rectificación a instalar.

Para determinar la cantidad de subestación de cierta potencia a instalar, se deben generar y resolver todas las redes eléctricas formadas por la línea, los trenes y las subestaciones de tracción para cada una de las T instantáneas generadas.

Una vez simuladas y resueltas todas las situaciones de interés, se procede a elaborar un perfil de voltajes mínimos para la línea que consiste en la envolvente inferior de la superposición de todos los perfiles instantáneos obtenidos.

En base a este perfil de tensión obtenido y las corrientes medias por las subestaciones de rectificación, se procede a reubicar las SS/EE R de tracción de manera de obtener las mejores condiciones de regulación de tensión y repartición de carga. Todo esto considerando siempre una SS/EE de tres en falla.

Para ejemplificar como resolver, la Figura 2.15 representa a la red para un segundo dado, pasado otro segundo existe otro circuito, y de esta manera se obtienen T circuitos a resolver para los T segundos en que se hizo la simulación.

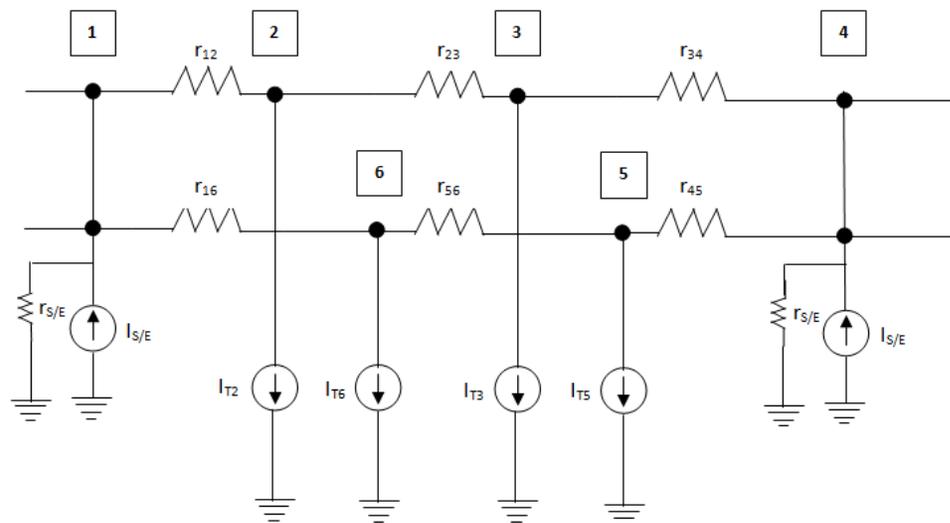


Figura 2.15: Circuito ejemplo por resolver

Por cada uno de estos T circuitos, se debe resolver la ecuación matricial $[G] \cdot [V] = [I]$, en donde $[G]$ corresponde a la matriz de conductancia, $[V]$ corresponde al vector de voltaje en los nodos e $[I]$ es el vector de las corrientes, tanto de los trenes como de las subestaciones.

Para el ejemplo de la figura, la ecuación matricial queda:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{16}} & -\frac{1}{r_{12}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{16}} \\ -\frac{1}{r_{12}} & \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{23}} & -\frac{1}{r_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{r_{23}} & \frac{1}{r_{23}} + \frac{1}{r_{34}} & -\frac{1}{r_{34}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{r_{34}} & \frac{1}{r_{34}} + \frac{1}{r_{45}} & -\frac{1}{r_{45}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{45}} & \frac{1}{r_{45}} + \frac{1}{r_{56}} & -\frac{1}{r_{56}} \\ -\frac{1}{r_{16}} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{r_{56}} & \frac{1}{r_{16}} + \frac{1}{r_{56}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{SS/EE} \\ I_{r2} \\ I_{r3} \\ -I_{SS/EE} \\ I_{r5} \\ I_{r6} \end{bmatrix}$$

2.7 CBTC

2.7.1 Características generales

El sistema de control de trenes basado en las comunicaciones (CBTC, del inglés *Communication Based Train Control*) es un sistema de control automatizado para ferrocarriles, que garantiza el funcionamiento seguro de los trenes utilizando la comunicación de datos entre los equipos de control que componen el sistema.

Los sistemas tradicionales de control se han basado históricamente en la detección de la presencia de un tren en una sección discreta de la vía (denominada circuito de vía). Cada cantón es protegido por señales que impiden la entrada de otros trenes cuando el cantón se encuentra "ocupado" por otro tren.

En los sistemas CBTC, por el contrario, son los trenes circulantes los que comunican a los equipos de vía su estado (posición, velocidad, sentido de marcha, distancia de frenado, etc.), lo que permite calcular la zona potencialmente ocupada por el tren durante su marcha. Con esta información, los equipos de vía pueden calcular los puntos que no deben ser sobrepasados por otros trenes que circulen por la misma vía y se los transmite para que ajusten su velocidad y circulen con total seguridad. Con un símil automovilístico, los trenes reciben constantemente información de su distancia respecto al tren precedente y pueden ajustar su distancia de seguridad en consecuencia.

Por sus características, los sistemas CBTC permiten optimizar el uso de la infraestructura ferroviaria, alcanzando la máxima capacidad de transporte y el mínimo intervalo posible entre trenes, compatible con una operación segura. Metro de Santiago, con la implementación de CBTC en la línea 1, busca reducir la distancia entre trenes sin perder en seguridad, de esta manera aumentar su capacidad de transporte en la congestionada línea.

2.7.2 Arquitectura

Siendo un sistema basado en la comunicación bidireccional de datos entre los trenes y los equipos de vía, los sistemas CBTC integran normalmente una red de radio digital mediante antenas o cable radiante, siendo habitual el uso de la banda libre de 2,4 GHz (la misma empleada por los sistemas WiFi).

La arquitectura típica incluye los siguientes componentes fundamentales:

2.7.2.1 Sistema ATP embarcado:

Es el encargado de controlar en todo momento la velocidad del tren para mantenerla dentro de un perfil de seguridad, forzando la aplicación del freno en caso necesario. En los sistemas CBTC se encarga también de la comunicación con el sistema ATP de campo para la transmisión de los datos del tren (velocidad, distancia de frenado, etc.) y recibir los puntos de parada calculados por la infraestructura.

2.7.2.2 Sistema ATO embarcado:

Se encarga de controlar automáticamente la petición del esfuerzo de tracción o frenado del tren con objeto de regular su velocidad por debajo del límite fijado por el ATP. Su cometido fundamental es facilitar la tarea del conductor (o incluso para operar sin conductor). En muchos sistemas permite además escoger diferentes estrategias de marcha para, por ejemplo, reducir al mínimo el tiempo de trayecto o bien reducir el consumo de energía.

2.7.2.3 Sistema ATP de suelo:

Este sistema gestiona las comunicaciones con todos los trenes en su área de influencia y calcula los puntos de parada que no debe sobrepasar cada tren que circula por dicha área. Su cometido es fundamental para garantizar la seguridad de la circulación.

2.7.2.4 Sistema ATO de suelo:

Es el encargado de controlar el destino y la regulación de la operación de los trenes. Indica a cada tren su próximo destino o estación, le informa de la duración de la parada y proporciona otras funciones auxiliares (no relacionadas con la seguridad), como órdenes de parada o salto de estación, alarmas, eventos, etc.

2.8 Acumuladores de energía

Los acumuladores de energía son equipos capaces de almacenar energía cuando ella es excedente en la red de tracción, es decir cuando uno o más trenes están frenando en modo regenerativo sin que se reutilice toda esa energía y de devolverla cuando se requiera. En esta sección se repasaran algunos tipos de acumuladores de energía.

2.8.1 Condensadores de doble capa

Los condensadores de doble capa, también conocidos como supercondensadores, son condensadores electroquímicos que tienen una capacidad de acumulación de energía alta en comparación con los condensadores comunes, del orden de miles de veces mayores que un condensador electrolítico de alta capacidad.

Se caracterizan por almacenar energía rápidamente, lo que los hace una alternativa viable en aplicaciones de tracción, en donde se busca un sistema de acumuladores de energía que sea capaz de almacenar y descargar su energía acumulada rápidamente.

2.8.2 Batería inercial

Las baterías inerciales, conocidas también como volantes de inercia, son acumuladores eléctricos que almacenan energía en forma de energía cinética, utilizando para ello un volante de inercia o disco rotatorio. A base de este principio se ha diseñado un sistema tal que:

- Almacena mucha energía utilizando un disco con mucha masa, de gran diámetro o que gira a gran velocidad.
- No pierden su energía acumulada con facilidad.

Los últimos desarrollos en baterías inerciales, han logrado desarrollar el disco rotatorio en base de fibra de carbono, lo que da mayor resistividad al disco. Además, el disco se mantiene mediante levitación magnética, logrando que este gire a mayor velocidad sin perder energía por rozamientos, pudiendo llegar a velocidades cercanas a las 100.000 rpm.

Las baterías inerciales se caracterizan por suministrar una gran cantidad de energía, o absorber, de forma casi instantánea, solo basta que un sistema eléctrico acelere o desacelere el disco rotatorio para cargar o descargar la batería. Dada esta característica ya se ha aplicado esta tecnología en sistemas de tracción eléctrica.

2.8.3 Baterías

Las baterías son dispositivos que almacenan energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

En la Tabla 2.5 se muestra una tabla comparativa sobre las características de las baterías según su naturaleza interna.

Tabla 2.5: Comparativa distintos tipos de acumuladores

Tipo	Energía / Peso [W/Kg]	Tensión por elemento [V]	Duración Nº de recargas	Tiempo de carga [Hrs]	Auto-descarga por mes [%]
Plomo	30-50	2,00	1.000	8-16	5
Ni-Cd	48-80	1,25	500	10-14	30
Ni-Mh	60-120	1,25	1.000	2-4	20
Li-ion	110-160	3,16	4.000	2-4	25
Li-Po	100-130	3,70	5.000	1-1,5	10

Dado el alto número de cargas y descargas que sufrirá el sistema de acumuladores de energía en una aplicación de tracción, el uso de baterías no parece el más indicado, debido al alto tiempo que se necesita para la carga y el limitado número de recargas que soportan.

2.8.4 Bobinas Superconductoras

El almacenamiento de energía magnética por superconducción o bobinas superconductoras (en inglés Superconducting Magnetic Energy Storage o SMES) es un sistema de almacenamiento de energía bajo la forma de un campo electromagnético creado por la circulación de una corriente continua en un anillo superconductor que está refrigerado a una temperatura por debajo de la temperatura crítica de superconductividad, lo cual implica un alto costo para mantener almacenada energía por un periodo largo de tiempo.

Los superconductores son materias que pueden conducir corriente eléctrica sin resistencia y pérdida de energía en ciertas condiciones. Este fenómeno se debe a que la resistividad eléctrica de un conductor metálico disminuye gradualmente a medida que la temperatura se reduce, pudiendo bajar bruscamente a cero cuando la temperatura del superconductor se enfría por debajo de su temperatura crítica. De esta manera, bajo superconductividad una corriente eléctrica que fluye en una espiral de cable superconductor puede persistir indefinidamente sin fuente de alimentación.

El fenómeno de la superconductividad ocurre en una gran variedad de materiales, incluyendo elementos simples como el estaño y el aluminio, diversas aleaciones metálicas y algunos semiconductores fuertemente dopados. La superconductividad no ocurre en metales nobles como el oro y la plata, ni en la mayoría de los metales ferromagnéticos.

Las bobinas superconductoras como medio de almacenamiento son ideales para aplicaciones donde se requiera una rápida descarga de energía, descargas menores de un segundo. Cuando se trata de descargar la bobina en un mayor tiempo, la bobina se apaga debido que para tiempos prolongados este sale de su estado de superconducción.

Capítulo 3:

Regeneración de energía en L1

En el presente capítulo, se busca calcular la cantidad de energía que se regenera en la línea 1, a partir del frenado de los trenes CAF NS-07. Para esto será necesario obtener tanto las curvas de comportamiento de los trenes como el consumo energético de estos; estudiar métodos que ayuden a determinar cuanta energía es capaz de regenerar un solo tren y factores que inciden en la regeneración, la cantidad de energía que es posible regenerar a lo largo del día y cuanta de esta energía es efectivamente utilizada.

3.1 Comportamiento trenes CAF NS 07

El fabricante de trenes español CAF entregó a Metro de Santiago los resultados de las simulaciones [9] en donde se obtiene el comportamiento en su etapa de tracción de los trenes adquiridos por el Metro de Santiago.

Las condiciones utilizadas por la empresa española CAF para obtener las curvas de tracción y frenado se detallan a continuación:

Configuración tren	: 6M3R (M – R – N – N – P – N – N – R – M)
Masa bruta del tren	: 217,813 Ton/tren (Tara ¹) 294,540 Ton/tren (3/4 CCM) 325,347 Ton/tren (4/4 CCM)
Voltaje de línea	: 750 Vcc para etapa de potencia 850 Vcc para etapa de frenado
Velocidad máxima	: 80 km/h
Diámetro rueda	: <ul style="list-style-type: none">• Para cálculos de velocidad 983 mm• Para cálculos de torque 920 mm (Tara) 896 mm (3/4 CCM) 888 mm (4/4 CCM)

¹ La Tara se refiere al peso total del tren sin pasajeros a bordo.

Relación transmisión	: 9,11
Aceleración	: 1,35 m/s ²
Desaceleración	: 1,20 m/s ²
Resistencia al rodado del tren	: $R_a = 0.0010752688V^2 + 9.2296 \text{ daN/ton}^1$
Resistencia partida	: 113.68 N/ton
Masa inercial	: 13% de la masa tara
Eficiencia transmisión	: 95% constante

3.1.1 Comportamiento etapa de Tracción

La Tabla 3.1, proporcionada por el fabricante, muestra el esfuerzo de tracción en la partida del tren, la corriente necesaria por cada motor para acelerar y el coeficiente de adherencia. La aceleración considerada es de 1,35 m/seg².

Tabla 3.1: Comportamiento tren etapa de tracción

Condición carga	Esfuerzo tracción [kN/motor]	Corriente aceleración [A/motor]	Coefficiente adherencia [%]
4/4 CCM	21,44	296	23,5
3/4 CCM	19,56	281	23,6
Tara	14,88	242	24,6

3.1.2 Comportamiento etapa de Frenado

La Tabla 3.2 muestra el comportamiento de los trenes en la etapa de frenado de este. Se proporciona el esfuerzo de frenado, la corriente que circula por cada motor del tren en esta y el coeficiente de adherencia, considerando una desaceleración de 1,2 m/seg².

Tabla 3.2: Comportamiento tren etapa de frenado

Condición carga	Esfuerzo frenado [kN/motor]	Corriente frenado [A/motor]	Coefficiente adherencia [%]
4/4 CCM	21,44	296	23,5
3/4 CCM	19,56	281	23,6
Tara	14,88	242	24,6

¹ 1daN = 1N (DecaNewton)

3.2 Curvas de comportamiento

3.2.1 Curvas de comportamiento etapa de tracción

La curva adjunta en la Figura 3.1 muestra las curvas dadas por el fabricante para el comportamiento de los trenes en la etapa de tracción, considerando una configuración de 9 coches (6M3R) y con carga 3/4 CCM [10].

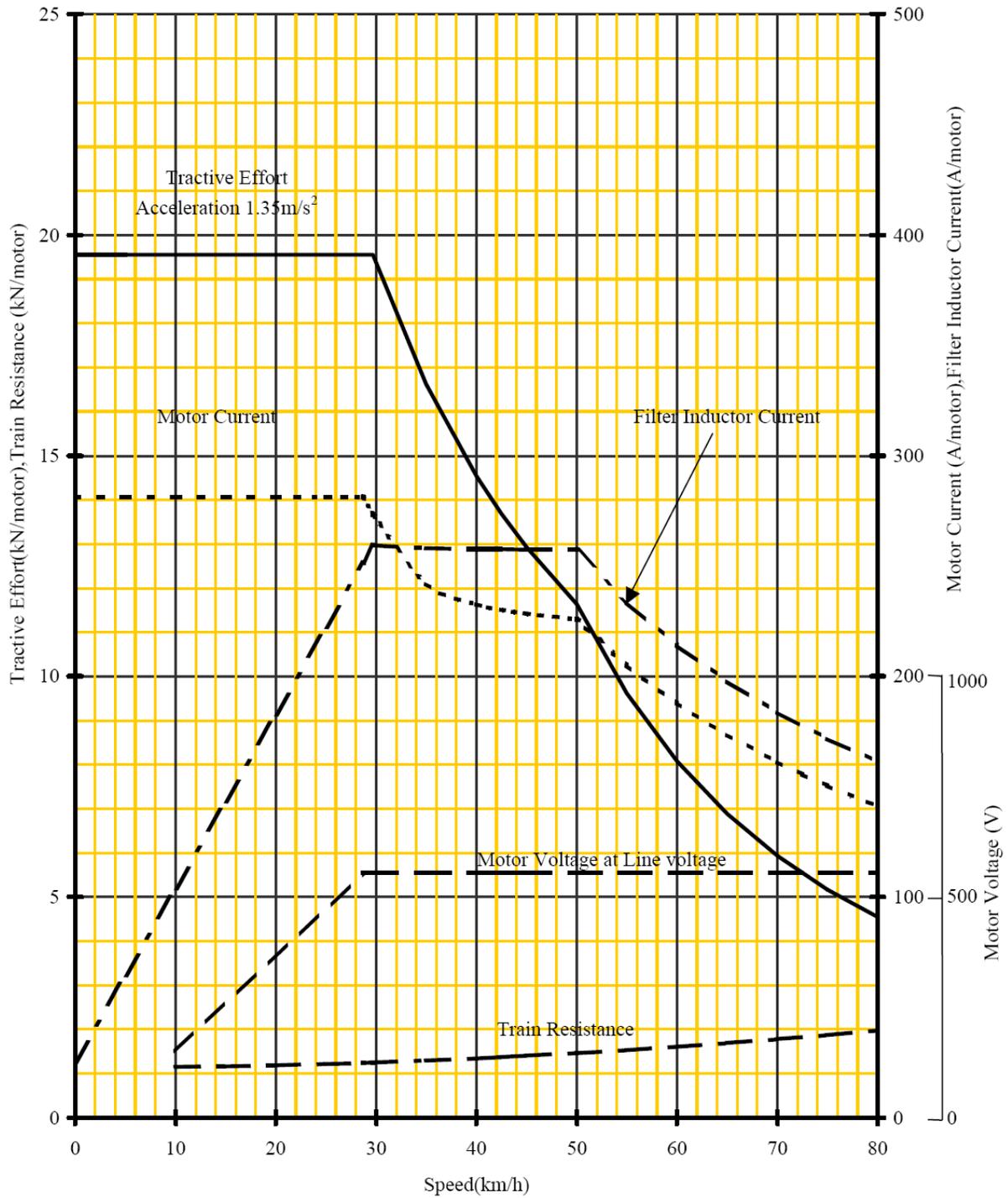


Figura 3.1: Curvas etapa de potencia 3/4 capacidad

Además se incluyen las curvas simuladas por el fabricante de los trenes, bajo las mismas condiciones anteriores, salvo que se considera el tren con carga 4/4 CCM. Estas curvas se adjuntan en la Figura 3.2 [10].

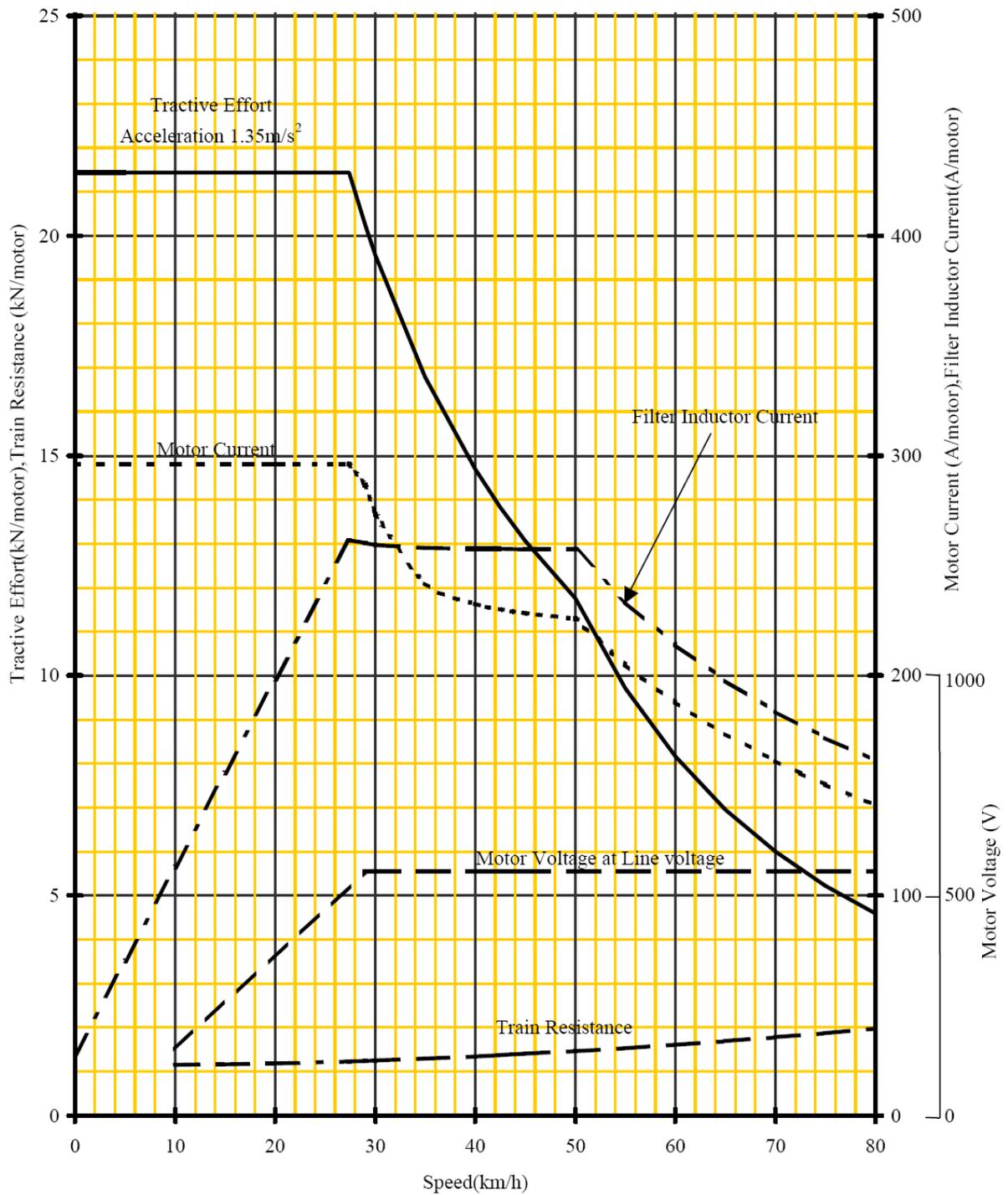


Figura 3.2: Curvas etapa de potencia 4/4 capacidad

3.2.2 Curvas de comportamiento etapa de frenado

En la Figura 3.3 se adjuntan las curvas dadas por el fabricante para el comportamiento de los trenes en la etapa de frenado, considerando una configuración de 9 coches (6M3R) y con una carga de 3/4 CCM [10]:

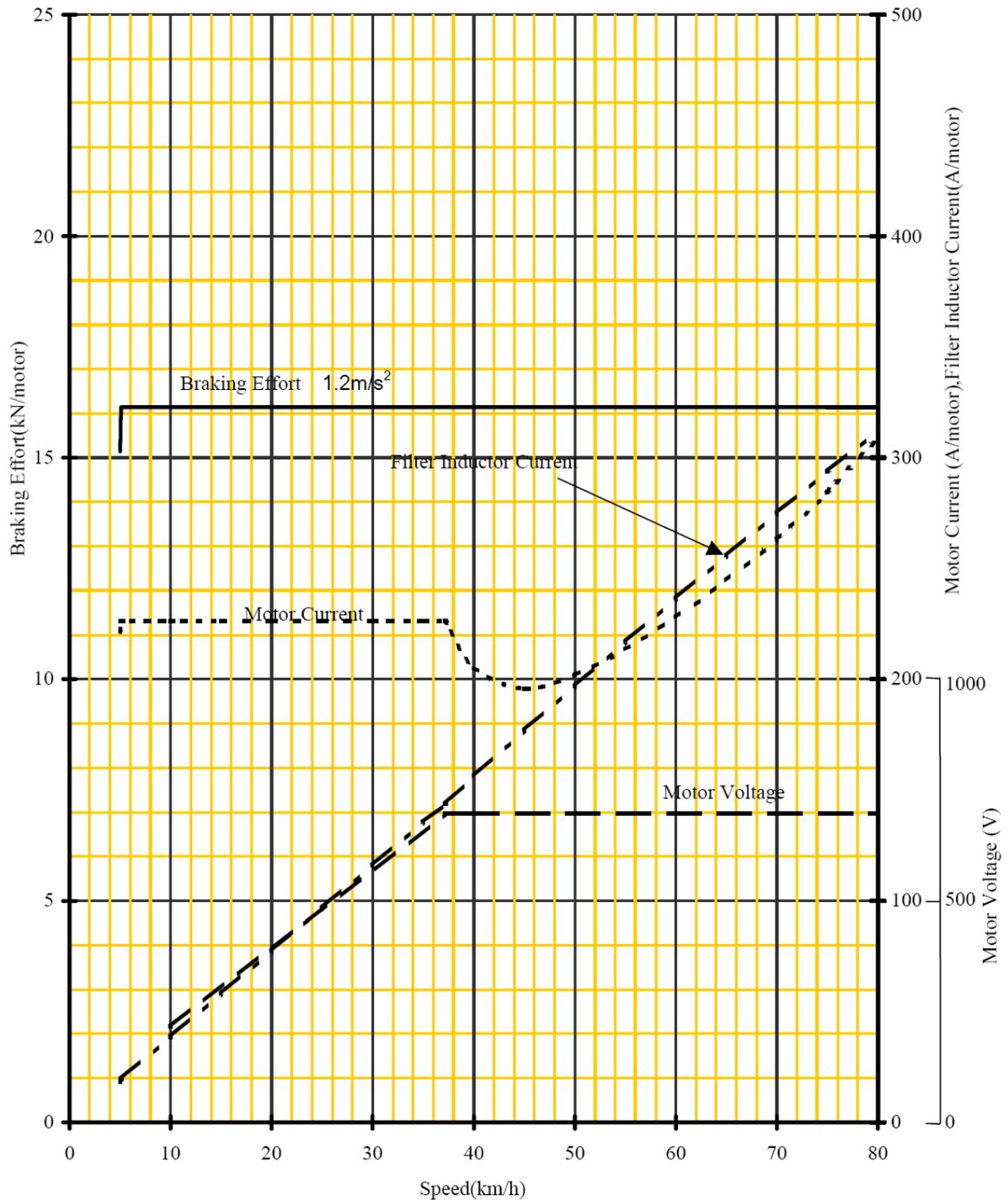


Figura 3.3: Curvas etapa de frenado 3/4 capacidad

Se adjunta además, en la Figura 3.4, las curvas simuladas por CAF para el comportamiento de los trenes NS07 en su etapa de frenado considerando una carga de 4/4 CCM [10]:

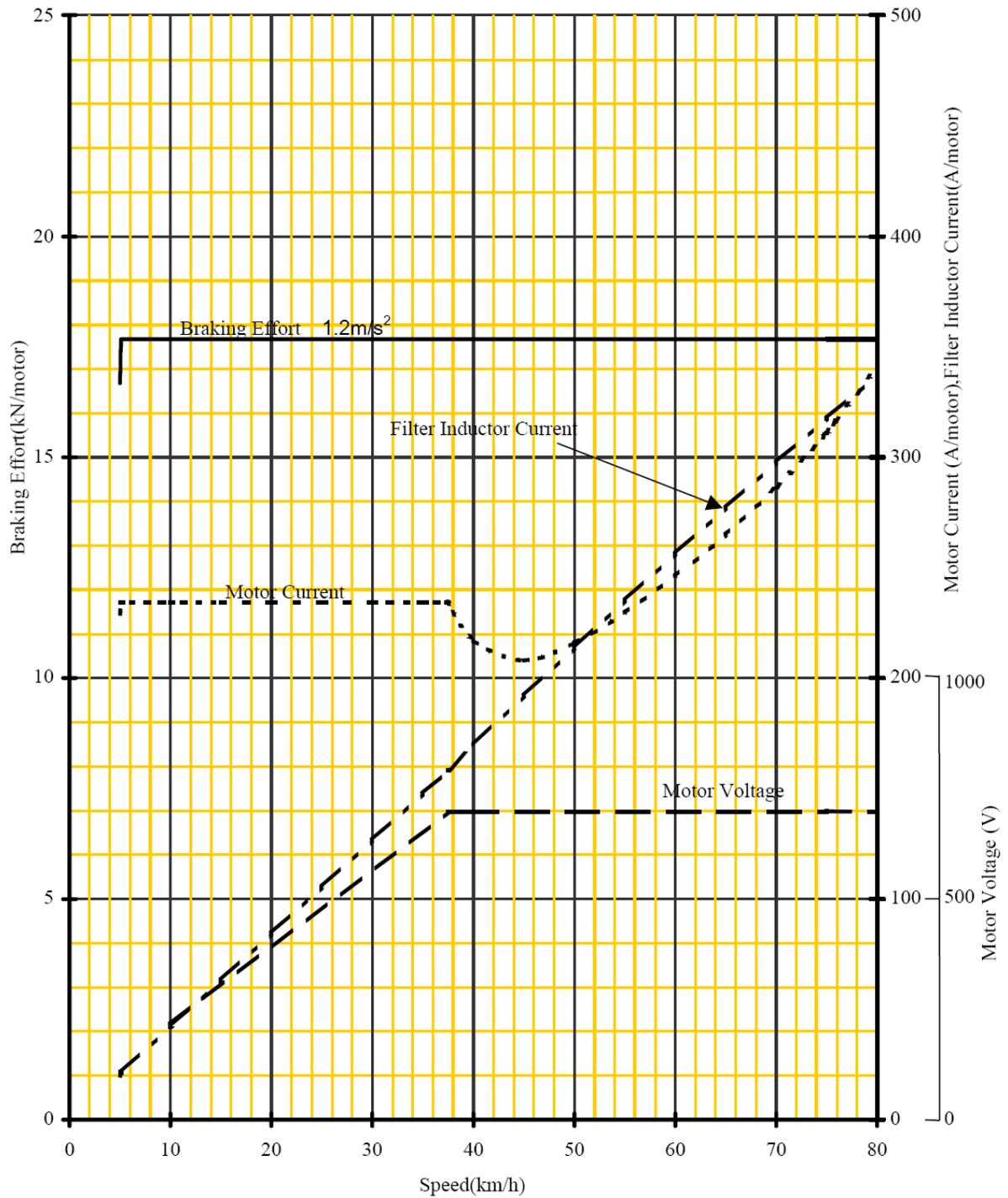


Figura 3.4: Curvas etapa de frenado 4/4 capacidad

3.3 Simulación trenes CAF NS07

3.3.1 Simulación de marcha

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones del rendimiento de los trenes CAF NS07, considerando la configuración de 9 coches (6M3R). Además de las condiciones para el cálculo ya mencionadas en 3.1, se considera para la simulación:

Ruta simulada (Ida y vuelta)	: San Pablo – Escuela Militar
Modo de funcionamiento	: Programación tiempo de ejecución
Velocidad máxima	: 80 Km/hr
Condición de peso	: CCM 3/4 peso y CCM 4/4 peso
Tasa aceleración inicial	: 1,35 m/seg ²
Tasa desaceleración	: 1,20 m/seg ²
Tiempo parada estación	: 20 segundos por estación
Tiempo parada terminal	: 180 segundos en cada estación terminal
Limite aumento de Tº	: 180 ºC

Los resultados de la simulación se muestran en Tabla 3.3 [10]:

Tabla 3.3: Resultados simulación de marcha trenes CAF NS-07

Carga	Ruta operación	Tiempo [s]		Veloc. tren [Km/h]	Corriente RMS [A/motor]	Corriente RMS filtro [A]	Máximo aumento Tº [ºK]
		Marcha	Total				
6M3R a 3/4 CCM	San Pablo → Esc. Militar	1188	1628	33,7	352	321	96
	Esc. Militar → San Pablo	1190	1630	33,7	318	267	94
	Total ida y vuelta	3618		30,3			
	Promedio				335	294	
6M3R a 4/4 CCM	San Pablo → Esc. Militar	1202	1642	33,4	368	335	104
	Esc. Militar → San Pablo	1196	1636	33,5	334	282	102
	Total ida y vuelta	3638		30,2			
	Promedio				351	309	

3.3.2 Simulación consumo de energía

A continuación se presentan los resultados de los cálculos, a partir de la simulación, del consumo de energía de los trenes CAF NS07 en su configuración de 9 coches (6M3R) del Metro de Santiago. Además de las condiciones para el cálculo ya mencionadas en 3.1, se considera para la simulación:

Ruta simulada	: San Pablo – Escuela Militar (15,24km)
Modo de funcionamiento	: Programación tiempo de ejecución
Condiciones viaje	: Ida y vuelta con temperatura motor saturada
Tiempo parada estación	: 20 segundos por estación
Tiempo parada terminal	: 180 segundos en cada estación terminal
Receptividad de la Línea	: 100%

Los resultados de la simulación se muestran en Tabla 3.4 [11]:

Tabla 3.4: Resultados simulación consumo de energía trenes CAF NS-07

Condición Carga	Estación		Distancia [Km]	Tiempo [s]		Energía Promedio ¹ [kWh/tren]		
	Inicio	Fin		Marcha	Parada	Consumo	Regenera	TOTAL
3/4 CCM	Línea 1		15,24	2.378	1.240	1.243	-563	680
	Esc. Militar ↔ San Pablo			TOTAL: 3.618				
4/4 CCM	Línea 1		15,24	2.398	1.240	1.342	-602	740
	Esc. Militar ↔ San Pablo			TOTAL: 3.638				

3.4 Modelación del freno eléctrico regenerativo

Los equipos de control de frenado de un tren que posee freno regenerativo debe cumplir las siguientes dos condiciones generales [12]:

- Se debe elevar la tensión por sobre la de la línea para permitir la regeneración
- El esfuerzo de frenado debe seguir una referencia dada por la estrategia de control a través de los pasos de frenado seleccionados por el operador del vehículo.

3.4.1 Modelación dinámica

El sistema de control de frenado del tren debe elaborar una referencia de torque que debe aplicarse en los ejes de los motores que trabajan como generadores durante el frenado eléctrico. Esta referencia se traduce en el esfuerzo que debe aplicar el tren para detenerse con una desaceleración preestablecida.

La ecuación (3.1) establece el comportamiento dinámico general del tren:

$$F - F_R = M \cdot a \quad (3.1)$$

Donde: F : Fuerza en llanta
 F_R : Esfuerzo resistente
 a : Aceleración
 M : Masa del tren

La fuerza en llanta (F) corresponde al esfuerzo impreso por la cadena de tracción del tren en las llantas, pudiendo favorecer o desfavorecer el movimiento del tren. El esfuerzo resistente (F_R) corresponde a la fuerza que se opone al movimiento del vehículo. Debido al efecto inercial de las masas giratorias, la masa del tren (M), correspondiente a la masa del tren más la masa de los pasajeros transportados, se debe corregir ponderando la masa total por un coeficiente α entregado por el fabricante, luego:

$$M_c = M \cdot \alpha \quad (3.2)$$

Mientras el tren frena, la fuerza en llanta se opone al movimiento del tren, al igual que el esfuerzo resistente, además en esta situación la aceleración se considera negativa. Así, la composición de fuerzas queda expresada mediante (3.3).

¹ Considerando ruta de ida y vuelta

$$F + F_R = -a \cdot M_C \quad (3.3)$$

Luego, para que el tren se detenga siguiendo una desaceleración ($A = -a$) predeterminada, este debera aplicar un esfuerzo de frenado dado por:

$$F = A \cdot M_C - F_R \quad (3.4)$$

Un tren se compone de coches motrices y coches remolques, los cuales se combinan de acuerdo a formaciones preestablecidas por el fabricante del material rodante según la cantidad de coches que se deseen utilizar para conformar el tren.

Sean: m : N° de coches remolque del tren
 n : N° de coches motrices del tren
 F_N : Esfuerzo de frenado en llanta por coche motriz

Luego:

$$F_N = \frac{M_C \cdot A - F_R}{n} \quad (3.5)$$

La ecuación anterior corresponde al esfuerzo de frenado en llanta debido a la utilización de freno eléctrico en donde solo participan los coches motrices en el frenado. En caso que se frene con todos los coches, utilizando una combinación de freno eléctrico y mecánico, en dicho caso el esfuerzo de frenado queda determinado por:

$$F_N = \frac{M_C \cdot A - F_R}{n + m} \quad (3.6)$$

La ecuación anterior corresponde a una ecuación diferencial de primer orden cuya resolución permite establecer la característica cinemática del tren durante la etapa de frenado.

Los supuestos considerados para esta modelación fueron:

- Se considero que la masa total del tren se distribuye de forma uniforme, es decir, los coches motrices y remolques poseen igual masa, pudiendo transportar la misma cantidad de pasajeros
- El sistema de freno de todos los coches motrices presenta el mismo comportamiento, repartiéndose equitativamente entre ellos el esfuerzo de frenado requerido por el tren.
- El esfuerzo resistente se reparte uniformemente por todos los coches del tren.
- Las gradientes del trazado de la línea se consideran rectas.

3.4.2 Modelación eléctrica

La modelación del frenado eléctrico por recuperación permite establecer la cantidad de energía que el tren es capaz de retornar a la red de alimentación en tensión continua durante el frenado de este. La cantidad de energía eléctrica regenerada dependerá, entre otros factores, del esfuerzo requerido para detener el tren y de la tecnología de los equipos de control de freno que posea el material rodante.

3.4.2.1 Esfuerzo de frenado NS-07

Considerando que el tren utiliza el freno eléctrico en su etapa de frenado, i.e. solo utiliza los carros motrices en la etapa de frenado, la fuerza en llantas para detener el tren con una desaceleración constante queda determinada por:

$$F_N = \frac{M_C \cdot A - F_R}{n} \quad (3.7)$$

Según las especificaciones técnicas entregadas por el fabricante, la resistencia que oponen los trenes CAF NS07 al movimiento, considerando la configuración de 9 coches (6M3R) usada en la Línea 1 queda determinada por:

$$r_a = 92,296 + \frac{v^2}{93} \quad (3.8)$$

En donde r_a (en N/ton) es la resistencia que oponen los trenes al movimiento y v (en km/hr) corresponde a la velocidad del tren.

Si se consideran los efectos del radio de curvatura y el gradiente de la línea, la fuerza resistente (F_R) queda determinada por:

$$F_R = \left(92,296 + \frac{v^2}{93}\right) \cdot M + \left(g + 500 \cdot \frac{T_R}{R}\right) \cdot P \quad (3.9)$$

- Con: v : Velocidad del tren (en Km/h)
 M : Masa total del tren (en Ton)
 g : Pendiente (en o/oo)
 T_R : Trocha [m] ($T_R = 1,435$ m para Línea 1)
 R : Radio de curvatura (en m)
 P : Peso total del tren (en N)

La Figura 3.3 y Figura 3.4 muestra el esfuerzo de frenado que debe ejercer cada motor de los trenes de manera de obtener una desaceleración de $1,2\text{m/s}^2$ en caso que los trenes estén a 3/4 y 4/4 de capacidad respectivamente

3.4.2.2 Determinación de la corriente regenerada

Cuando se aplica frenado eléctrico para detener el tren, es posible encontrar dos posibles casos:

- $F_N \leq F_F$: El esfuerzo requerido por la maquina motriz para detener el tren con desaceleración A es menor o igual que el esfuerzo capaz de entregar la cadena de tracción. Luego, el equipo de recuperación sigue la referencia dada por F_N .
- $F_N > F_F$: En este caso, el esfuerzo proporcionado por el equipo de freno es F_F , mientras que el resto de la fuerza requerida la entrega el sistema de freno mecánico conjugada al freno eléctrico.

Mediante la siguiente ecuación, se relaciona la potencia eléctrica regenerada (P_E) con el esfuerzo de frenado (F_N o F_F)

$$P_E = F \cdot v \cdot \eta \quad (3.10)$$

Donde: P_E : Potencia eléctrica regenerada (en W)
 F : Esfuerzo de frenado eléctrico (en N)
 v : Velocidad del tren (en m/s)
 η : Rendimiento de la cadena de tracción

Luego, si se conoce la tensión de la línea V_L , la cual varía constantemente a lo largo de la línea, es posible determinar la corriente regenerada mediante la siguiente relación:

$$I = \frac{P_E}{V_L} \quad (3.11)$$

3.4.2.3 Supuestos considerados

- Los bogies de los coches motrices poseen parámetros eléctricos y mecánicos análogos.
- La resistencia eléctrica interna del conjunto motores – sistema control de freno (R_T) permanece constante durante el frenado eléctrico.
- El rendimiento del motor y del mecanismo de transmisión se considera constante e independiente de la velocidad del tren
- El frenado en recuperación permite proporcionar la totalidad del esfuerzo requerido por los coches motrices para detener el tren
- Por especificaciones del fabricante, se supone que el freno eléctrico es efectivo hasta, aproximadamente, la detención del tren
- La desaceleración de frenado se considera constante

3.5 Factores incidentes en la regeneración de energía

A continuación se presenta los resultados de un trabajo previo [12], en donde se estudiaron distintos factores que influyen en la regeneración de energía para los trenes NS-74 y NS-93 que en ese entonces circulaban por la línea 1 del metro. Estos factores influirán en la cantidad de energía a regenerar durante la etapa de freno regenerativo, sin embargo, algunos de estos factores también influirán en el gasto energético durante la etapa de tracción. Es por esta razón que el autor utiliza la variable porcentaje de recuperación para medir la variación de la regeneración en función de los distintos factores.

3.5.1 Tasa de desaceleración del tren

De acuerdo a las ecuaciones (3.7) y (3.13), el esfuerzo requerido durante el frenado del tren, y por lo tanto, el nivel de la corriente regenerada dependen directamente de la desaceleración programada por el operador. Luego, ante una mayor tasa de desaceleración, se tendrá un mayor nivel de potencia eléctrica requerida para el frenado; sin embargo, esto significará una menor duración de esta. En el caso de los trenes NS-93 de las Líneas 1, 2 y 5, el porcentaje de regeneración aumenta en forma leve hasta alcanzar una desaceleración de $1,0(m/s^2)$. Para valores superiores a esta, la regeneración decae considerablemente, esto debido a que para desaceleraciones altas el esfuerzo de frenado necesario es superior al que es capaz de entregar el tren; luego el esfuerzo complementario es proporcionado por el freno mecánico lo que disminuye el porcentaje de regeneración.

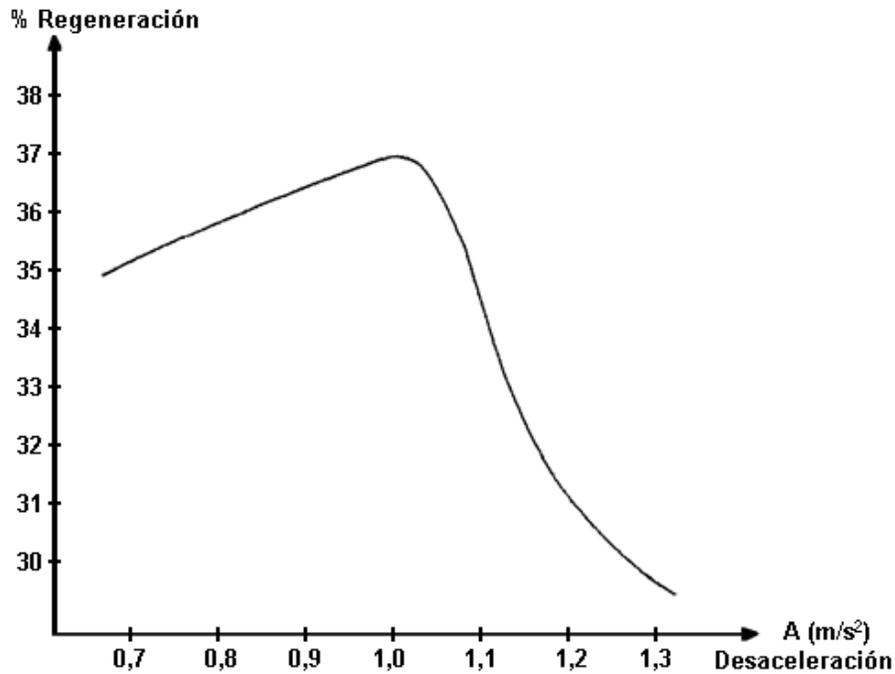


Figura 3.5: Porcentaje de regeneración v/s Desaceleración del tren NS-93

3.5.2 Masa del tren

La masa del tren tiene injerencia tanto en la etapa de tracción como en la etapa de frenado, existiendo entre ambos un efecto compensatorio. Si se aumenta la carga del tren, este consume más energía en la etapa de tracción. Sin embargo, el nivel de regeneración será mayor (ver ecuación (3.7)) debido al mayor esfuerzo requerido en esta etapa.

Es posible apreciar el efecto de la masa del tren en los resultados de la simulación del consumo de energía de los trenes CAF NS-07, mostrados en la Tabla 3.4: Tanto la energía que se consume como la energía que es regenerada presentan un leve incremento comparando las simulaciones con el tren a 3/4 de capacidad y 4/4 de capacidad. Comparando el porcentaje de regeneración en ambos casos, demuestra que el incremento del consumo de energía en la etapa de tracción y aumento en la energía regenerada en la etapa de frenado no aumentan de igual manera: El porcentaje de regeneración con el tren a 3/4 de capacidad es de un 45,29%, en cambio cuando el tren esta a plena carga es porcentaje de regeneración es levemente inferior, reduciendo su valor a 44,86%.

La Figura 3.6 muestra la variación del porcentaje de regeneración al variar la desaceleración de los trenes NS-93 considerando carga máxima (a) y carga nominal (b). Se aprecia que el porcentaje de regeneración es mayor bajo carga nominal que a carga máxima, la explicación se debe a que a mayor peso, mayor esfuerzo de frenado, por lo que es más probable que el freno mecánico entre a operar.

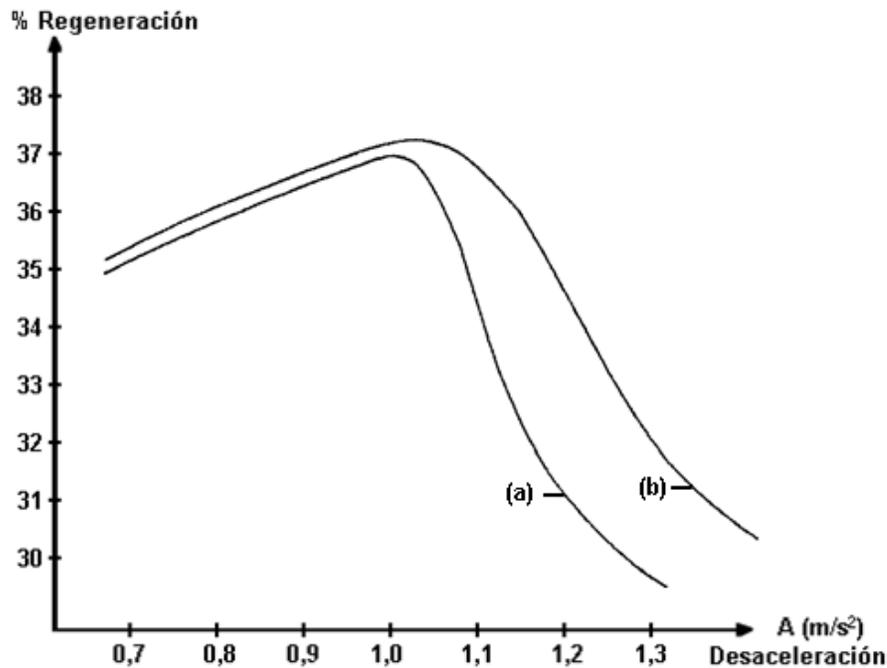


Figura 3.6: Porcentaje de regeneración tren NS-93 para carga máxima(a) y carga nominal(b)

3.5.3 Resistencia al rodado

Este parámetro depende de las características constructivas de rodado y de los propios trenes que circulan por ella. La incidencia de este factor depende del diseño de los trenes, por lo que la etapa de diseño es de vital importancia para disminuir el nivel de pérdidas por roce durante el movimiento de los trenes y un mejor perfil aerodinámico de estos.

3.5.4 Perfil de la línea

La línea 1 del Metro de Santiago presenta una característica ascendente en vía 1 (sentido este-oeste). Luego los trenes que viajan en este sentido deben consumir, en la etapa de tracción, energía para mover el tren y vencer la pendiente, aumentando la energía potencial producto del ascenso. Durante la etapa de frenado, parte de la energía cinética es transformada en energía eléctrica por medio de la regeneración y el resto es transformado en energía potencial. Debido a este hecho en la vía 1 de la línea 1 del Metro se tienen altos consumos en tracción y bajo nivel de recuperación, es decir, un bajo porcentaje de regeneración. En vía 2 ocurre lo contrario, la energía potencial se transforma en cinética lo que permite disminuir el gasto en tracción y aumentar la regeneración, obteniéndose porcentajes de recuperación mayores.

3.5.5 Características propias del material rodante

Dentro de las características propias del material rodante que inciden en el porcentaje de regeneración de energía se consideran las pérdidas internas de la cadena de tracción y freno, pérdidas propias de los motores y equipos de control, y por último las pérdidas mecánicas por roce de las partes en movimiento.

Los equipos asociados al frenado presentan un límite de potencia eléctrica que es capaz de entregar a la línea durante el freno. Mientras mayor sea este, existe más probabilidad de proporcionar la totalidad del esfuerzo requerido por el tren.

3.5.6 Receptividad de la Línea

Debido a las características de la Línea y a la filosofía de explotación del Metro de Santiago, durante el diario funcionamiento de este se presentan condiciones de receptividad variables. Cuando esta es inferior a máximo, la línea no puede aceptar toda la energía regenerada por el tren, luego este debe disiparla mediante el freno mecánico, produciéndose porcentajes de regeneración menores.

Mediante la incorporación de acumuladores de energía en la Línea, será posible acumular la energía que la Línea no puede aceptar debido a la baja receptividad de esta, evitándose el uso del freno mecánico. La receptividad depende principalmente de tres factores:

3.5.6.1 Intervalo de explotación

La receptividad varía con el intervalo de explotación de acuerdo a lo expuesto en la Figura 3.7. Se observa una tendencia decreciente del porcentaje de regeneración a medida que disminuye la frecuencia entre trenes. Esto se debe a que mientras más alejados en el tiempo se encuentren los vehículos, también estarán más distanciados físicamente, luego el tren que frena deberá elevar más la tensión para vencer una resistencia eléctrica mayor de línea y así poder retornar la energía que será aprovechada por otros trenes en la etapa de tracción. Mientras menor sea el intervalo de explotación menor será la resistencia de la línea debido a la cercanía entre trenes; además, recordando que la duración de la etapa de tracción es mayor que la etapa de frenado, existe una mayor probabilidad que exista en la cercanía un tren en la etapa que se encuentre en su etapa de tracción que pueda consumir la energía regenerada.

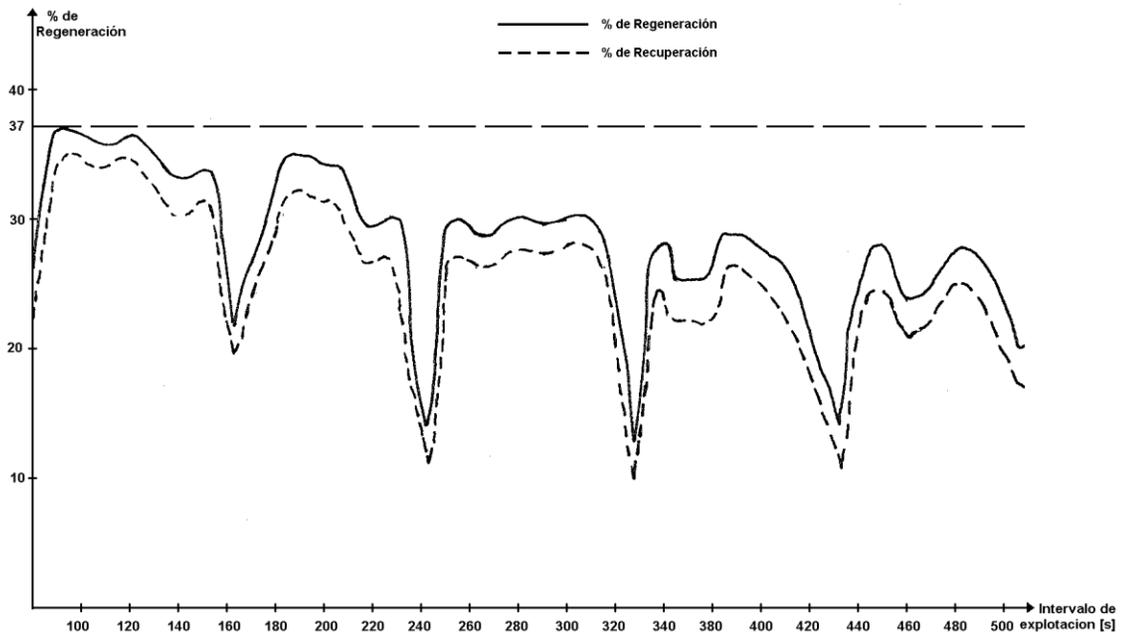


Figura 3.7 Porcentaje de Regeneración y Recuperación en función del intervalo de explotación

Se aprecia en la Figura 3.7 peaks de baja receptividad que se hacen presentes en múltiplos de aproximadamente cada 80s. Estos peaks de baja receptividad se explican a que el intervalo de explotación coincide al tiempo promedio que demora un tren en recorrer una interceptación incluyendo el tiempo de detención. Existen tres situaciones extremas:

- La mayoría de los trenes que se encuentran circulando en la línea están fraccionando, luego los puestos de rectificación verán incrementada, durante este periodo, la demanda de potencia por sobre los requerimientos normales.
- Un mayor número de trenes se encuentra en etapa de marcha inercial, existiendo bajas exigencias de tracción y pocos trenes frenando.
- Gran cantidad de los trenes presentes en la Línea se encuentren en etapa de frenado.

En caso que los trenes se encuentren en la etapa de frenado y, eventualmente en la etapa de marcha inercial, enfrentan una baja receptividad de la línea debido a la menor cantidad de trenes que se encuentran en su etapa de tracción, por lo que el freno mecánico es requerido para completar el esfuerzo de frenado; de aquí la notoria disminución de la receptividad bajo las frecuencias citadas. Para el resto de las frecuencias se tiene, en general, mayor cantidad de trenes fraccionando sobre un número menor de trenes frenando en cada momento del recorrido de la línea.

3.5.6.2 Resistencia de la Línea

La resistencia de la línea define el porcentaje de recuperación a través de las pérdidas Joule, esto mientras circule corriente desde las subestaciones rectificadoras o trenes en regeneración hacia los trenes en tracción. Aparte de limitar la corriente regenerada, la resistencia de línea obliga al sistema de control de frenado del tren a elevar la tensión de línea para que algún tren en tracción pueda captar la energía reinyectada a la red. Mientras menor sea la resistencia de la línea, la energía regenerada puede ser consumida por trenes cada vez más distantes, sin que se sobrepase el límite máximo de tensión en la línea. Un trabajo anterior realizado para Metro de Santiago [12] concluyó que ante reducciones de un 10% en la resistencia de la línea se obtiene que el porcentaje de regeneración aumente en un 1% al igual que el porcentaje de recuperación, dado que las pérdidas se mantienen prácticamente constantes.

3.5.6.3 Tensión máxima de la Línea

Los valores de tensión admisibles para el funcionamiento de los equipos de tracción y freno eléctrico, según la norma IEC-349, se ubican en el rango de un +20% y un -33% de la tensión nominal de la línea. Luego, para el Metro de Santiago, dado que la tensión nominal es de 750Vcc la tensión máxima corresponde a 900Vcc y la mínima a 500Vcc.

El valor máximo de tensión es posible obtenerlo cuando un tren esta regenerando energía durante su etapa de frenado y el consumidor directo de esta se encuentra muy alejado. Sin embargo la capacidad de regeneración de los trenes disminuye a medida que la tensión se acerca al valor máximo debido a la pérdida de estabilidad de los equipos de control de frenado eléctrico ante variaciones bruscas de la tensión de línea.

La tensión en la línea en un punto determinado de ella es un parámetro que, generalmente, establece fielmente el estado de la receptividad en dicho punto: un voltaje en la línea inferior a la tensión en vacío de las subestaciones rectificadoras establece que en la proximidad existe un tren fraccionando; mientras menor sea la tensión mayor es la receptividad. En caso contrario, cuando el voltaje en la línea es superior al voltaje en vacío de las SS/EE R, acusa la presencia de trenes en etapa de frenado, disminuyendo la receptividad de la línea a medida que aumenta la tensión.

En donde T_0 es el tiempo que opera la red, k el número de estaciones en el tramo l y E_1 corresponde a la energía que regenera un solo tren. Parte de la energía regenerada es reutilizada debido a, por ejemplo, partida de otros trenes dentro del tramo la cual se denominara E_t , y la otra parte, la cual denominaremos E_r , es la que hace que aumente la tensión en la catenaria o simplemente se disipa mediante resistencias de frenado.

Considerando las condiciones de operación del Metro de Santiago para la hora punta mañana, desde las 7:00 a.m. hasta las 9:00 a.m., con una velocidad comercial para la Línea 1 de $26\text{Km}/\text{Hr}$; y que, según la Tabla 3.4, un tren CAF NS-07 es capaz de regenerar en promedio 563Wh si va a $3/4$ de carga y 602Wh si va a plena carga, entonces la cantidad de energía regenerada en hora punta que podría volver a las subestaciones de rectificación, considerando un intervalo de explotación actual ($T = 100\text{s}$) se muestran en la Tabla 3.5 y Tabla 3.6.

Tabla 3.5: Regeneración de Energía 3/4 CCM, Intervalo de Explotación T=100s

	Pk_{inicio}^1	Pk_{final}	Largo L [Km]	Nº Est k	Nº Trenes N	En. Regen. E_g [Wh]
SER Neptuno	-1.211,0	685,0	1,90	2	3	67,56
SER Las Rejas	685,0	2.850,0	2,17	3	3	135,12
SER Estación Central	2.850,0	5.277,5	2,43	4	3	202,68
SER La Moneda	5.277,5	7.412,5	2,14	5	3	270,24
SER Universidad Católica	7.412,5	9.145,0	1,73	3	2	90,08
SER Huelen	9.145,0	10.630,0	1,49	2	2	45,04
SER Pedro de Valdivia	10.630,0	12.180,0	1,55	2	2	45,04
SER El Golf	12.180,0	13.485,0	1,31	2	2	45,04
SER Escuela Militar	13.485,0	15.355,5	1,87	2	3	67,56
SER Hernando de Magallanes	15.355,5	18.119,0	2,76	3	4	180,16

Tabla 3.6: Regeneración de Energía 4/4 CCM, Intervalo de Explotación T=100s

	Pk_{inicio}	Pk_{final}	Largo L [Km]	Nº Est k	Nº Trenes N	En. Regen. E_g [Wh]
SER Neptuno	-1.211,0	685,0	1,90	2	3	72,24
SER Las Rejas	685,0	2.850,0	2,17	3	3	144,48
SER Estación Central	2.850,0	5.277,5	2,43	4	3	216,72
SER La Moneda	5.277,5	7.412,5	2,14	5	3	288,96
SER Universidad Católica	7.412,5	9.145,0	1,73	3	2	96,32
SER Huelen	9.145,0	10.630,0	1,49	2	2	48,16
SER Pedro de Valdivia	10.630,0	12.180,0	1,55	2	2	48,16
SER El Golf	12.180,0	13.485,0	1,31	2	2	48,16
SER Escuela Militar	13.485,0	15.355,5	1,87	2	3	72,24
SER Hernando de Magallanes	15.355,5	18.119,0	2,76	3	4	192,64

Se aprecia una leve aumento en la energía regenerada cuando el tren esta a plena carga. Esto se debe a que, como se explicara mas adelante con mayor detalle, el esfuerzo en llanta necesario para frenar el tren a una tasa de desaceleración constante aumenta a medida que el tren va más cargado.

¹ Pk_{inicio} y Pk_{final} hacen referencia a los puntos más alejados que la SS/EE R tiene que alimentar. Corresponden a los extremos de la línea y al punto medio entre dos subestaciones.

Como el esfuerzo en llanta es mayor a medida que la masa del tren aumenta, la energía regenerada también aumenta.

Con la incorporación de CBTC, se busca reducir el intervalo de explotación en hora punta a $T = 85s$ con el fin de aumentar la oferta de transporte en dicho tramo horario, debido a la mayor circulación de trenes dentro de la Línea. Considerando el futuro escenario de operación de los trenes en horario punta, la Tabla 3.7 compara la energía regenerada en ambos escenarios de operación considerando el tren a 3/4 de capacidad y la Tabla 3.8 para cuando el tren esta a plena carga.

Tabla 3.7: Comparación regeneración a distintos intervalos de explotación, 3/4 de capacidad

	Int. explotación T=100s		Int. explotación T=85s		Incremento
	Nº Trenes	En. Regen.	Nº Trenes	En. Regen.	
	N	E_g [Wh]	N	E_g [Wh]	
SER Neptuno	3	67,56	3	79,48	17,6%
SER Las Rejas	3	135,12	4	211,95	56,9%
SER Estación Central	3	202,68	4	317,93	56,9%
SER La Moneda	3	270,24	3	317,93	17,6%
SER Universidad Católica	2	90,08	3	158,96	76,5%
SER Huelen	2	45,04	2	52,99	17,6%
SER Pedro de Valdivia	2	45,04	3	79,48	76,5%
SER El Golf	2	45,04	2	52,99	17,6%
SER Escuela Militar	3	67,56	3	79,48	17,6%
SER Hernando de Magallanes	4	180,16	5	264,94	47,1%

Tabla 3.8: Comparación regeneración a distintos intervalos de explotación, 4/4 de capacidad

	Int. explotación T=100s		Int. explotación T=85s		Incremento
	Nº Trenes	En. Regen.	Nº Trenes	En. Regen.	
	N	E_g [Wh]	N	E_g [Wh]	
SER Neptuno	3	72,24	3	84,99	17,6%
SER Las Rejas	3	144,48	4	226,64	56,9%
SER Estación Central	3	216,72	4	339,95	56,9%
SER La Moneda	3	288,96	3	339,95	17,6%
SER Universidad Católica	2	96,32	3	169,98	76,5%
SER Huelen	2	48,16	2	56,66	17,6%
SER Pedro de Valdivia	2	48,16	3	84,99	76,5%
SER El Golf	2	48,16	2	56,66	17,6%
SER Escuela Militar	3	72,24	3	84,99	17,6%
SER Hernando de Magallanes	4	192,64	5	283,29	47,1%

Como ya se menciona, y así lo muestra la ecuación (3.13), parte de la energía regenerada es utilizada por la partida de un tren en la cercanía, y el resto se pierde, aumentando la tensión en la línea, o disipándose en forma de calor mediante resistencias de frenado. Falta por dilucidar si el incremento en la energía regenerada, debido a la disminución en el intervalo de explotación, implica un aumento en la energía reutilizada por otros trenes y/o en la energía que se pierde.

3.7.2 Energía reutilizada

A continuación se explicará el método mediante el cual se calculó la energía reutilizada para dos subestaciones de rectificación ubicadas en la Línea 2 del Metro de Seúl y en la Línea 1 del Metro de Gwangju [13], en Corea del Sur.

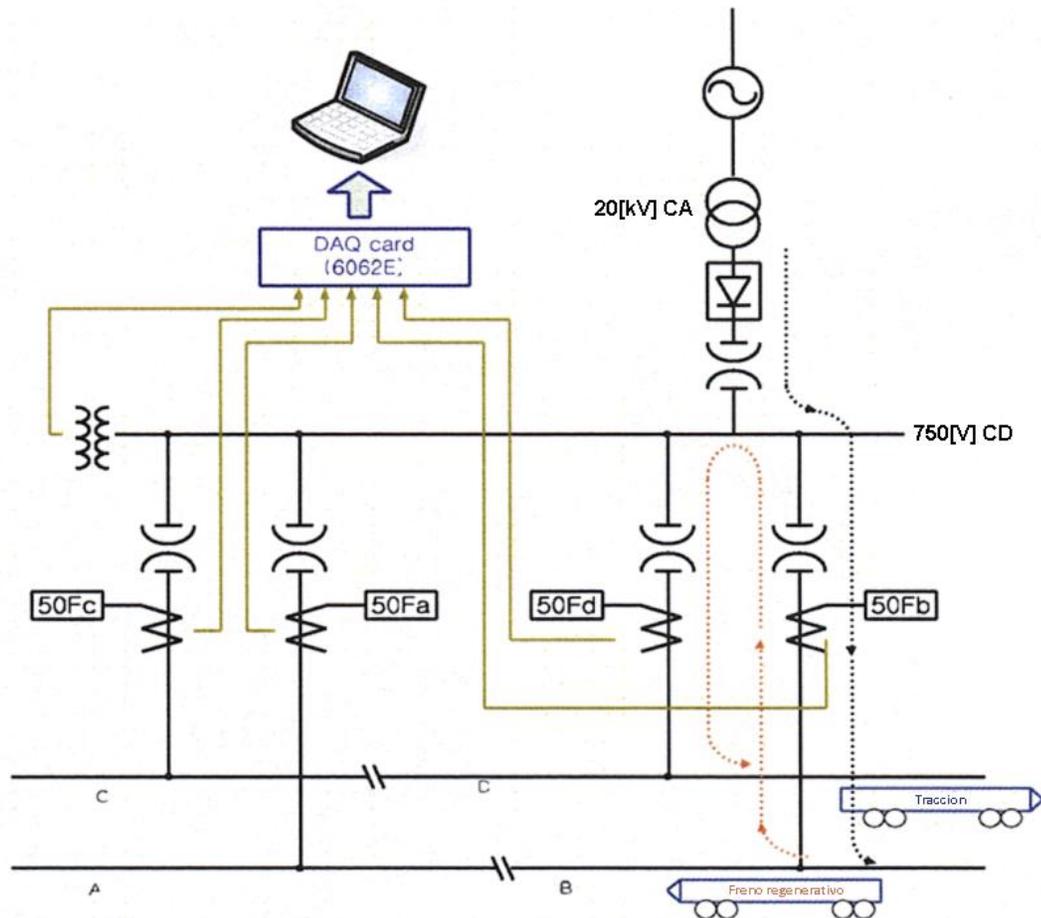


Figura 3.9: Esquemático para medición en Subestaciones de Rectificación

La Figura 3.9 muestra el esquema utilizado para realizar las mediciones que ayudaron a determinar la energía regenerada en las subestaciones Seolleun de la Línea 2 del Metro de Seúl y Yangdong de la Línea 1 del Metro de Gwangju. Desde las subestaciones de rectificación salen los alimentadores hacia la Línea, en donde se instalaron instrumentos de medición para medir el consumo a lo largo del día. La Figura 3.10 muestra un extracto de las mediciones de la subestación de rectificación Seolleun, en donde se muestra la potencia total demanda hacia la subestación, el voltaje de línea y las mediciones de potencia de los cuatro alimentadores de la subestación.

Las mediciones mostradas en la Figura 3.10 hacen notar que los peaks de potencia total demandada en la subestación de rectificación coinciden con los momentos en que la tensión es baja, además que los peaks de voltaje en la línea coinciden con los instantes en que la potencia medida en los alimentadores es baja, logrando que la potencia medida en la subestación sea prácticamente nula. Esto da muestra de la directa relación entre el voltaje de la Línea y la receptividad de esta.

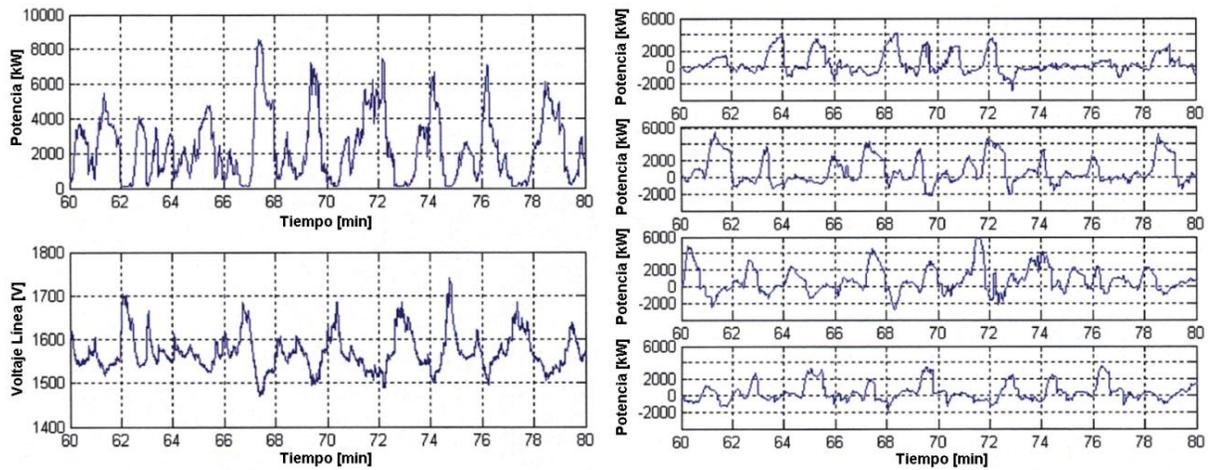


Figura 3.10: Mediciones en Subestación Seolleun de la Línea 2 del Metro de Seúl

Con las mediciones de potencia en los alimentadores de la subestación de rectificación a lo largo de un día, es posible determinar cuanta energía de tracción y regenerada se consume en los alimentadores. Por lo que si se suma la energía regenerada medida en cada alimentador se obtiene el total de energía que es reutilizada durante el día.

Finalmente, como se tiene la energía regenerada por el frenado de los trenes durante su operación diaria, calculada mediante la fórmula (3.13), y la medición de la energía regenerada que es reutilizada por otros trenes, la energía que se pierde aumentando el nivel de tensión en la línea o mediante resistencias de frenado corresponde a la resta de ambas.

Metro de Santiago instaló equipos de medición en la estación de pasajeros San Alberto Hurtado, ubicada aproximadamente en el punto medio entre la SER Las Rejas y SER Estación Central, subestaciones cuyo distanciamiento es de las más amplias de la Línea 1. Las mediciones solo contemplaron medición del voltaje en un punto específico de la Línea, por lo que no fue posible determinar la cantidad de energía regenerada que es reutilizada por otros trenes. Las mediciones realizadas en el Metro de Santiago se anexan en el Anexo D.

Capítulo 4:

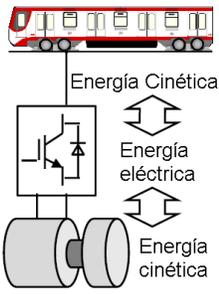
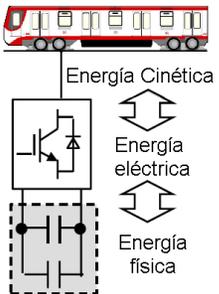
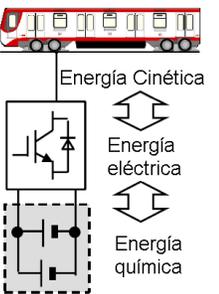
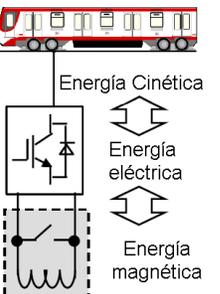
Sistema Recuperación de Energía

En el presente capítulo se presentan aplicaciones en sistemas de tracción de acumuladores de energía con el fin de almacenar la energía regenerada, además de un método de simulación de la Línea 1 del Metro de Shanghai, con el fin de verificar si los acumuladores de energía cumplen con el objetivo buscado.

4.1 Acumuladores de energía en sistemas de tracción

Como ya se ha mencionado, la utilización de acumuladores de energía dentro de la Línea 1 del Metro de Santiago tiene como objetivo reducir las caídas de tensión en la línea y absorber la energía regenerada del frenado de los trenes que no es reutilizada. La Tabla 4.1 compara los 4 tipos de acumuladores de energía utilizados en sistemas de tracción eléctrica.

Tabla 4.1: Acumuladores de energía en sistemas de tracción

Sistema almacenamiento	Volantes de Inercia	Condensador doble capa	Baterías	Superconductor magnético
Constitución				
Tipo de energía	Energía Cinética	Energía Física	Energía Química	Energía Magnética
Capacidad	Pequeña	Pequeña	Mediana	Grande
Densidad de energía	Alta	Mediana	Alta	Pequeña
Estado del arte	Uso práctico	Uso práctico	Uso práctico	Investigación

La utilización de acumuladores de energía en sistemas de tracción eléctrica por lo general implica el uso de convertidores de energía: Equipos inversores; convertidores; o chopper. Esto se debe a que, habitualmente, al circuito de alimentación de tracción no es posible conectarle directamente un banco de acumuladores de energía. Aquí se hace fundamental el control de carga y descarga del convertidor o chopper para la operación eficiente del sistema de recuperación de energía.

Para aplicaciones de electrificación en corriente continua de sistemas de tracción eléctrica, en general, se requiere que la duración del ciclo de carga/descarga del sistema de almacenamiento de energía esté entre 10 segundos a 1 minuto [14]. Además, para poder soportar las fluctuaciones de voltaje frecuentes y empinadas, es más importante que el sistema de acumuladores de energía tenga una característica de carga/descarga rápida por sobre una densidad de energía alta. La Figura 4.1 muestra la duración de carga/descarga para los distintos sistemas de almacenamiento de energía ya mencionados, además de la funcionalidad que tiene dependiendo de la duración de la carga/descarga.

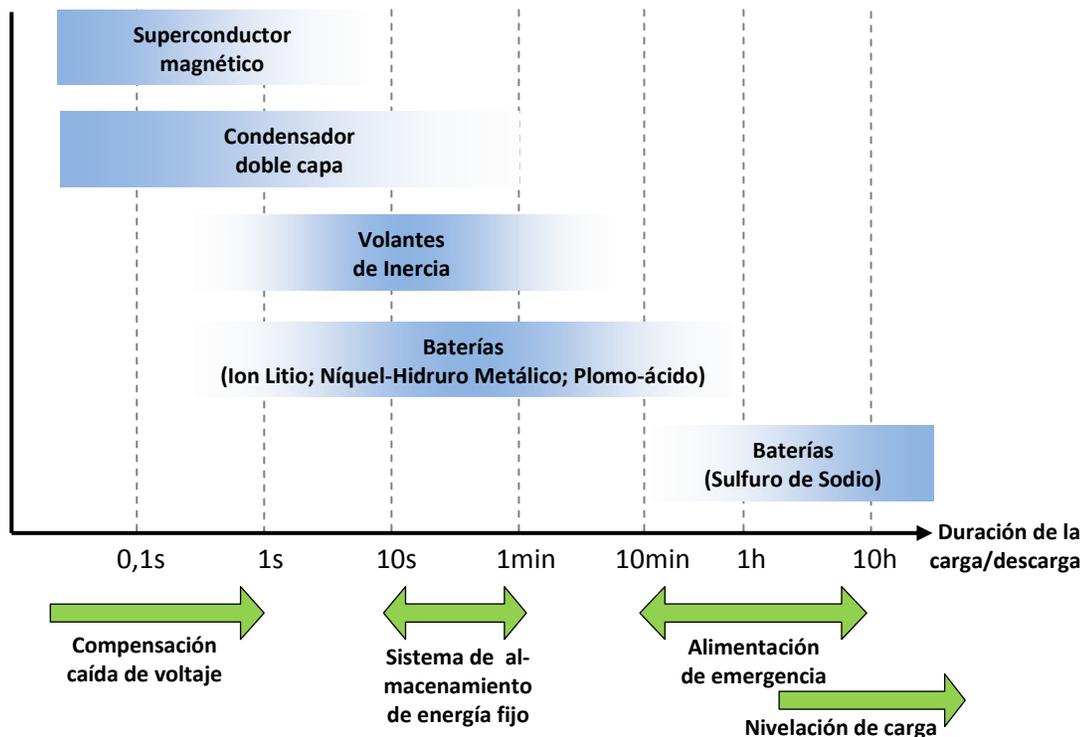


Figura 4.1: Duración carga/descarga y funcionalidad

4.2 Control de carga y descarga

Gran parte de los sistemas fijos de almacenamiento de energía utilizados en distintos sistemas de tracción eléctrica en el mundo han tenido que adoptar un sistema Chopper Buck-Boost, con el fin de regular la carga y descarga del sistema de almacenamiento [14]. La configuración del circuito que comúnmente se utiliza con el fin de regular la carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía es similar al mostrado en la Figura 4.2.

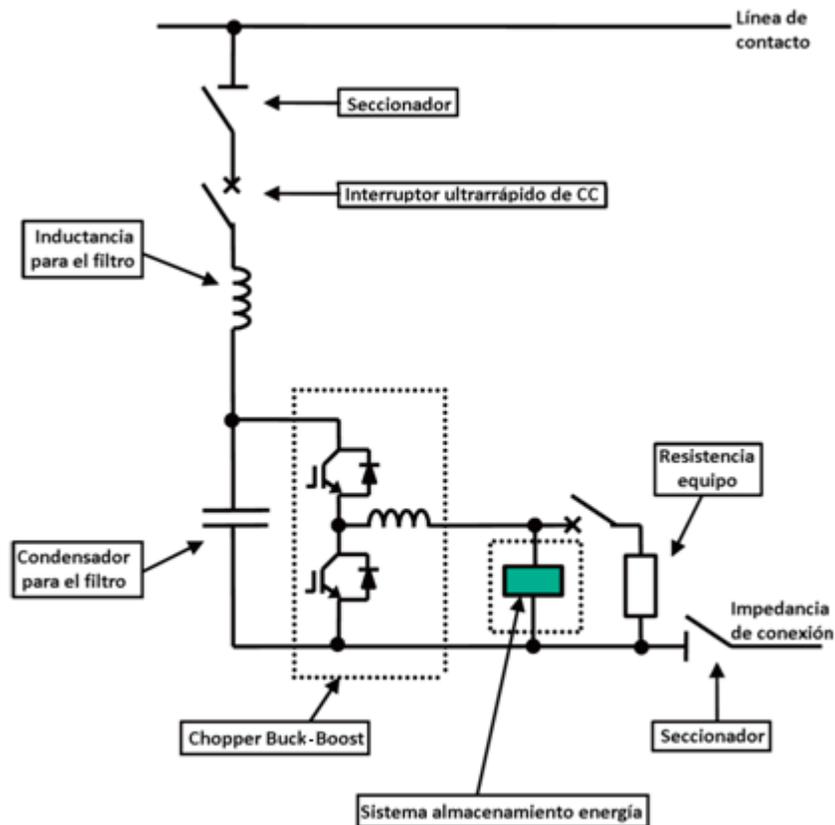


Figura 4.2: Circuito Chopper Buck-Boost para sistemas de almacenamiento de energía

Considerando la velocidad de conmutación de los dispositivos de electrónica de potencia, además de las intensidades involucradas en el circuito, lo más lógico, y lo que se ha utilizado para la implementación del circuito *Chopper Buck-Boost* son transistores IGBT. La utilización del *Chopper* tiene una doble funcionalidad: en modo *buck*, trabaja con el fin de disminuir el voltaje cuando se cargan los acumuladores de energía; y en modo *boost* cumple la función de aumentar el voltaje cuando se descargan los acumuladores hacia la línea de alimentación de tracción. El interruptor de corriente de alta velocidad dispuesto en el circuito busca prevenir la descarga de los acumuladores de energía hacia la línea de alimentación en caso de una caída del sistema de alimentación eléctrica, y un filtro LC para eliminar la componente de conmutación del chopper. La frecuencia de conmutación comúnmente es fijada entre los 600Hz y 4.000Hz.

La Figura 4.3 muestra la relación existente entre el voltaje de alimentación y la regulación de carga/descarga del equipo acumulador de energía. El principio básico consiste en que el acumulador de energía se carga cuando la tensión de línea es mayor a la tensión de carga, y se descarga cuando la tensión de línea es menor a la tensión de descarga. La Figura 4.3(a) muestra el caso en que el sistema de almacenamiento de energía puede cargarse/descargarse a corriente máxima; la Figura 4.3(b) muestra el caso en que la corriente de carga/descarga se regula con el fin de suprimir la fluctuación del estado de carga/descarga en torno al voltaje de carga/descarga; y la Figura 4.3(c) muestra el caso en que la corriente en modo *standby* y la corriente máxima de descarga se puede variar. Mediante este último es fácil ajustar el estado de carga del sistema de acumuladores en modo *standby* y descarga.

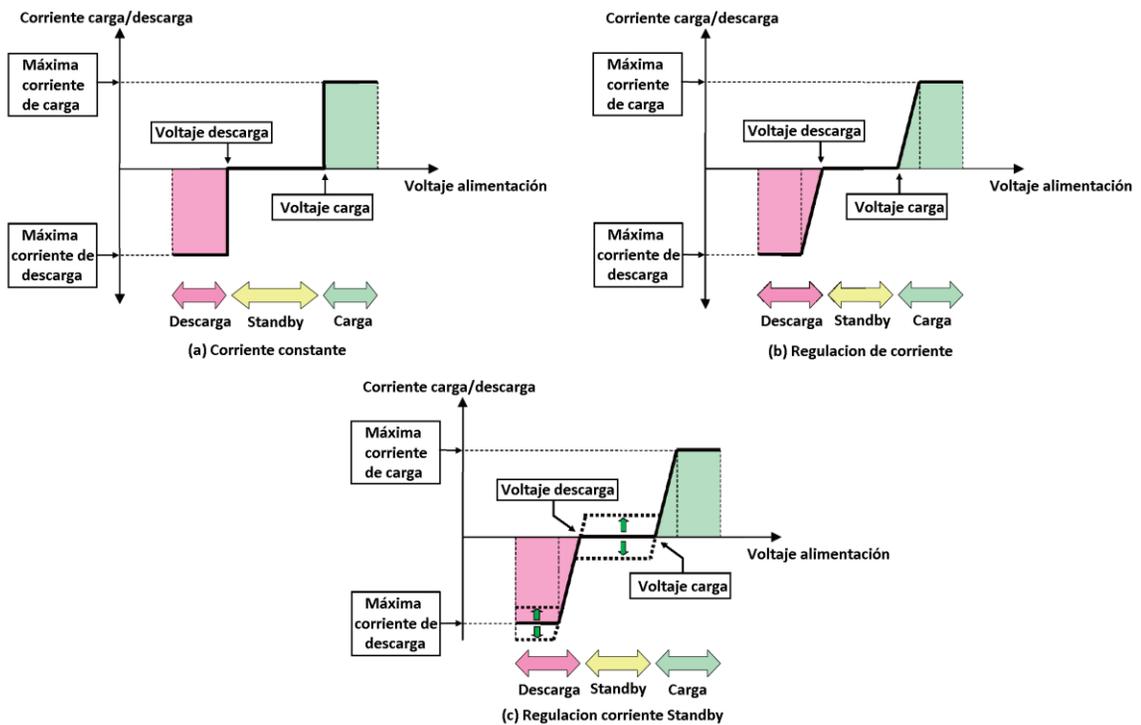


Figura 4.3: Voltaje de alimentación y regulación de carga/descarga

Mediante el voltaje de línea es posible reflejar en cierta medida si los trenes se encuentran en la etapa de potencia o frenado regenerativo, pero no es del todo fiable. Aquí se abre una ventana para discutir cómo mejorar el método de control, lo que se complementa con un nuevo método que ayude en la regulación de carga y descarga de los acumuladores de energía.

4.3 Aplicaciones existentes en otros países

Aplicaciones de sistemas de almacenamiento de energía en sistemas de tracción eléctrica se vienen aplicando desde hace ya varios años, por ejemplo, la aplicación más antigua existente en Japón data de 1988 [14], aplicación que se detallará más adelante. La experiencia ha llevado a concluir que la utilización de baterías es útil en caso de requerir gran cantidad de energía, en cambio si se necesita una gran cantidad de potencia la utilización de baterías inerciales o condensadores de doble capa pareciera ser lo indicado.

Las razones del por qué se han implementando sistemas de recuperación de energía principalmente son dos: para compensar las caídas de voltaje en la línea, y para absorber la energía regenerada que no es reutilizada. La compensación de las caídas de tensión es efectiva en casos que dos subestaciones de rectificación se encuentren distantes. En cambio, la absorción de la energía regenerada es efectiva para los casos en que el número de trenes es reducido y existe una pendiente pronunciada.

A continuación se presentan generalidades de distintas aplicaciones de acumuladores de energía que se han implementado en Japón.

4.3.1 Volantes de Inercia

4.3.1.1 Tren eléctrico expreso Keihin

El tren eléctrico expreso de *Keihin* es un ferrocarril privado que conecta Tokio con Kawasaki, Yokohama, Yokosuka y otros puntos de la península de Miura, en la prefectura de Kanagawa.

Se detectó que bajo ciertos escenarios de operación del tren, no existían trenes consumiendo energía en las cercanías de un tren que regeneraba, por lo que la energía regenerada no era utilizada eficientemente. Como solución se instalaron baterías inerciales en la estación *Shin-Zushi* de potencia nominal 2.000kW, con la capacidad de entregar una potencia extra de 25kW durante una hora o el equivalente¹. El equipo consta principalmente de un volante de inercia, un motor generador de intercambio y un convertidor. La construcción de dicho equipo data de 1988 y gracias a él se ha conseguido un ahorro de energía del 12%.

4.3.2 Baterías

4.3.2.1 Compañía de Ferrocarriles del Oeste de Japón

La compañía de ferrocarriles del Oeste de Japón es la compañía de ferrocarriles que opera al oeste de *Honshū*, principal isla de Japón. La red de la compañía, que cuenta con líneas de ferrocarril; metro; y trenes de alta velocidad, abarca una distancia total de 5.012,7km cubriendo en total 18 prefecturas de la isla [15].

En la estación de pasajeros Shin-Hikida de la red se instaló durante otoño de 2006 un sistema de baterías de iones de litio de potencia nominal 1050kW, con la capacidad de entregar una potencia adicional de 140kW durante una hora, con el fin de compensar las caídas de voltaje de corta duración, además de estabilizar el voltaje de la línea mediante la absorción de energía regenerada.

4.3.2.2 Metro Municipal de Kobe

El metro Municipal de *Kobe* es la red de ferrocarril metropolitano de la ciudad de Kobe, capital de la prefectura de Hyōgo, localizada en la isla de Honshu. La red de metro de la ciudad de Kobe cuenta con dos líneas, alcanzando una longitud total de 30,6km.

Se probó en la subestación Myodani de la línea Seishin-Yamate, almacenar energía mediante baterías de iones de litio en mayo del 2005, con una potencia nominal de 1.000kW capaces de entregar una potencia extra de 37,4kW durante una hora. El tramo se caracteriza por tener una pendiente constante de 2,9‰ en el tramo de aproximadamente 4km. Mediante las pruebas realizadas se concluyó que las baterías instaladas tenían el mismo efecto que un equipo inversor, lo que implica que la energía regenerada del frenado de los trenes es aprovechada en su totalidad. Finalmente se instaló en febrero de 2007, en la subestación *Itayado* un banco de baterías de iones de litio, cuya capacidad nominal es del doble del instalado para las pruebas, lográndose un ahorro de energía de más de 300MWh por año.

¹ El equivalente se refiere a que el equipo de recuperación de energía es capaz de entregar una potencia extra P durante un periodo de tiempo h , cumpliendo la siguiente relacion: $P \cdot h = 25[kWh]$.

4.3.2.3 Oficina de Transporte de la ciudad de Kagoshima

La oficina de transporte de la ciudad de Kagoshima es la encargada de administrar, entre otros medios de transporte, la red de tranvías de la ciudad, ubicada al suroeste de Japón. El tranvía de la ciudad cuenta con cuatro líneas, alcanzando una longitud de 13,1km.

La incorporación de nuevos tranvías para mejorar la capacidad de transporte de la red, sumado al uso de aire acondicionado en la temporada de verano, causaba una caída de tensión no despreciable en el horario de verano. Para compensar el voltaje en la línea se instalaron durante marzo del 2007 dos bancos de baterías en las estaciones Sakurajima sanbashi dori y Nakasudori, cada uno de una potencia nominal de 250kW, capaces de entregar una potencia adicional de 18,1kW durante una hora.

4.3.2.4 Oficina Municipal de Transporte de Osaka

La oficina municipal de transporte de Osaka es la encargada de administrar el metro, los autobuses urbanos y el tranvía de la ciudad de Osaka, ubicada en la isla principal de Honshu. Se instaló en la subestación Komagawa de la línea Tinimachi un banco de baterías níquel e hidruro metálico, de una potencia nominal de 5.600kW, con la capacidad de entregar una potencia adicional de 576kW durante una hora. Este sistema de acumuladores de energía está en fase de pruebas y se espera que mediante el se pueda reducir el consumo de energía primaria en la subestación. A diferencia de la gran mayoría, este sistema de acumuladores se conectó directamente a la línea, por lo que no fue necesario el equipo chopper que regula la carga y descarga del equipo.

4.3.3 Condensadores de Doble Capa

4.3.3.1 Compañía Ferroviaria de Seibu

La compañía ferroviaria de Seibu es la encargada de administrar los ferrocarriles en el noreste de Tokio y la prefectura de Saitama, Japón.

En las subestaciones Agano y Shoumaro, distanciadas en 7,146km con pendiente aproximada de 2,5%, en diciembre de 2007 se instalaron dos sistemas de almacenamiento de energía basados en condensadores de doble capa. Cada banco de condensadores está formado por grupos de 8 condensadores conectados en serie que se conectan en paralelo 36 veces, logrando un sistema de acumuladores de energía de potencia nominal de 2.560kW capaces de entregar 6.875kWh. Las especificaciones técnicas de los condensadores de doble capa se muestran en la Tabla 4.2

Tabla 4.2: Especificaciones sistema acumulador de energía

Medio	Tecnología	:	Condensador doble capa
	Voltaje	:	512 ~ 1.280 V
	Corriente máxima	:	2.000 A
	Capacidad	:	20,25 F
Sistema de conversión	Tipo conversión	:	Chopper DC Buck/Boost
	Voltaje carga	:	1690 V
	Voltaje descarga	:	1600 V
	Capacidad carga	:	20,75 MW·s
	Inductancia	:	2,66 mH
Filtro	Inductancia	:	1 mH
	Capacitancia	:	11,5 mF
Resistencia equipo	Resistencia	:	1 Ω

Ambos sistemas de acumuladores de energía han logrado cargar 7,7kWh y descargar 5,9kWh. Por lo que cerca del 77% de la energía regenerada fue utilizada eficazmente, lo que ayudó a reducir de manera positiva la energía demandada en las subestaciones de rectificación en donde fue instalada esta tecnología.

4.3.3.2 Estudio para Metro de Santiago

En Febrero de 2006, Siemens culminó el desarrollo un estudio para Metro de Santiago en donde se propone un sistema de recuperación de energía basado en condensadores de doble capa para la Línea 1 del Metro, considerando trenes de 8 coches, con un intervalo de explotación de 90s y circulando entre San Pablo y Escuela Militar.

En dicho estudio se propone a Metro de Santiago la instalación del equipo denominado SISTRAS SES, cuya especificación técnica se detalla en la Tabla 4.3

Tabla 4.3: Equipamiento SISTRAS SES propuesto

Capacidad de energía	:	2 – 2,5 kWh
Potencia máxima	:	1 MW
Umbral de carga	:	650 V
Umbral de descarga ¹	:	600 V
Corriente máxima	:	1.400 A
Resistencia interna	:	15 mΩ
Rendimiento	:	0,95 %

Equipos SISTRAS SES ya se han instalado en diversas redes de transporte del mundo: en Beijing el año 2006; en Colonia el año 2003 y 2006; en Dresden el año 2003 y 2004; en Bochum el año 2004; en Madrid el año 2003; y en Portland el 2003.

4.4 Modelación y Simulación

A continuación se presenta una modelación de una red de suministro de metro, los vehículos de tracción utilizados y de un sistema de recuperación de energía basados en Simulink/SimPowerSystem [16].

El modelo que se presenta a continuación corresponde al modelo de simulación empleado para la Línea 1 del Metro de Shanghái. La línea tiene una longitud de 38,1km, cuenta con 28 estaciones de pasajeros, velocidad máxima de 80km/hr, y su electrificación es mediante catenaria rígida en 1500V_{CC}. Metro de Santiago en cambio, se electrifica

¹ Los umbrales de carga y descarga se pueden ajustar según los requerimientos del sistema

4.4.1 Modelación de la red de suministro de energía, Metro de Shanghai

La Figura 4.4 muestra una topología de la alimentación eléctrica para la Línea 1 del Metro de Shanghai.

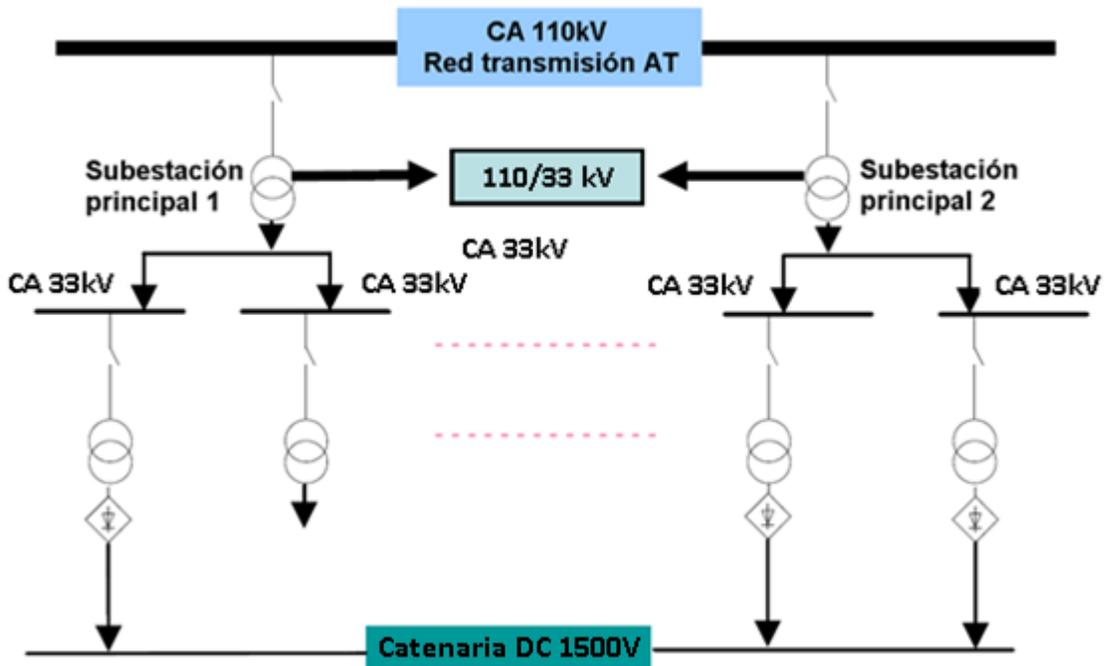


Figura 4.4: Topología típica red de suministro de energía para red de tracción eléctrica

La alimentación eléctrica parte con la compra de energía desde la red de transmisión eléctrica en 110kV_{CA} , para luego mediante subestaciones generales de alta tensión se transforma de 110kV_{CA} a 33kV_{CA} trifásicos. Se distribuye en media tensión, 33kV_{CA} trifásicos, a cada una de las subestaciones de rectificación y subestaciones de alumbrado y fuerza, utilizando uno o dos alimentadores por cada Subestación, dependiendo si la subestación posee un grupo de rectificadores (monogrupa) o dos grupos de rectificadores (bigrupa). En las subestaciones de rectificación, primero se baja el nivel de tensión a niveles apropiados para los rectificadores, y luego gracias a los rectificadores se logran los 1500kV_{CC} que alimentarán la línea y los motores de tracción eléctrica que darán la fuerza necesaria para movilizar el material rodante, y mediante las subestaciones de alumbrado y fuerza se da la energía necesaria para alimentar otros consumos de la red como: sistemas de control; alumbrado de estaciones; consumos en BT; etc..

Con el fin de realizar una simulación más eficiente, es posible simplificar el modelo de la red de suministro de energía obviando las subestaciones principales, de esta manera se simula sola la subestación de rectificación que es alimentada desde una fuente trifásica de 33kV_{AC} . A modo de ejemplo la Figura 4.5 muestra la modelación en Simulink/SimPowerSystem de una subestación de rectificación bigrupa dodecafásico, compuesta por dos rectificadores de 12 pulsos y dos transformadores de tracción. Si la fase de un transformador es $+15^\circ$ y la fase del otro transformador es -15° , formando en conjunto un desfase de 30° , el modelo se comportara como un rectificador de 24 pulsos.

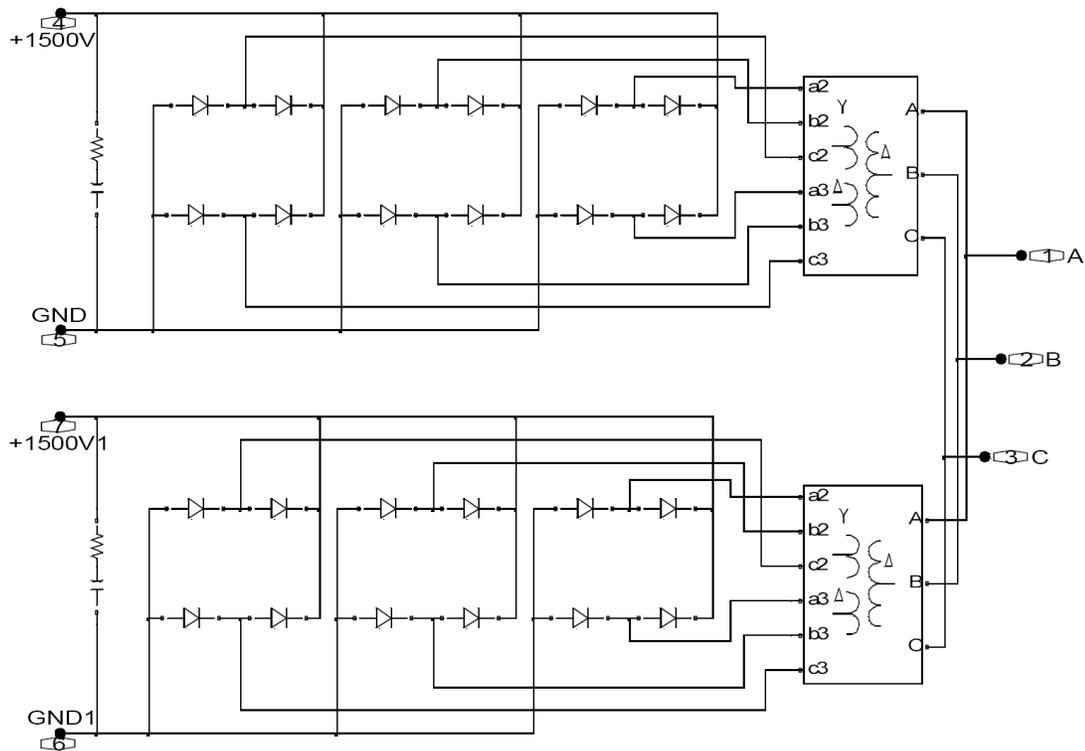


Figura 4.5 Modelo para Simulink/SimPowerSystem de rectificador Bi-Grupo Dodecafásico

4.4.2 Modelación de los Trenes del Metro de Shanghai

Una de las características que diferencian a los vehículos usados en un sistema de tracción eléctrica como Metro es que las cargas no son estacionarias. Esto debido a que los trenes están en constante movimiento a lo largo de ambas vías, por lo que su ubicación y la configuración resultante de la red eléctrica están cambiando todo el tiempo. Además se tiene que la demanda de alimentación en corriente continua de los trenes del Metro puede tener cambios drásticos en cuestión de segundos.

A pesar que los primeros trenes utilizados en las redes de Metro del mundo fueron diseñados con motores de corriente continua, y desde un buen tiempo éstos son fabricados con motores de corriente alterna, la dinámica de los trenes de una red de Metro puede ser descrita con exactitud mediante las siguientes ecuaciones básicas:

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4.1)$$

$$M_E \frac{dv}{dt} = TE - T_{RR}(v) - T_{RA}(v) - G(x) - C(x) = TE - T_R(v) - T_R(x) \quad (4.2)$$

Donde, x : Posición del tren; v : Velocidad del tren; M_E : Masa equivalente del tren; TE : Fuerza de tracción; $T_{RR}(v)$: Fuerza de fricción y rodadura; $T_{RA}(v)$: Resistencia aerodinámica del tren; $G(x)$: Fuerza del gradiente; $C(x)$: Resistencia al rodado en curvas; $T_R(v) = T_{RR}(v) + T_{RA}(v)$ y $T_R(x) = G(x) + C(x)$.

La resolución de la ecuación (4.2) no es simple. Primero, la fuerza de tracción máxima que el tren puede generar puede ser afectada tanto por la velocidad del tren, como por la tensión de línea. Para incluir este efecto en la fuerza de tracción será necesario acoplar el modelo de la simulación del rendimiento del tren con la red de suministro de energía. Este acoplamiento es posible de resolver

mediante Simulink/SimPowerSystem, en donde es posible modelar la dinámica de un solo tren tal como muestra la Figura 4.6.

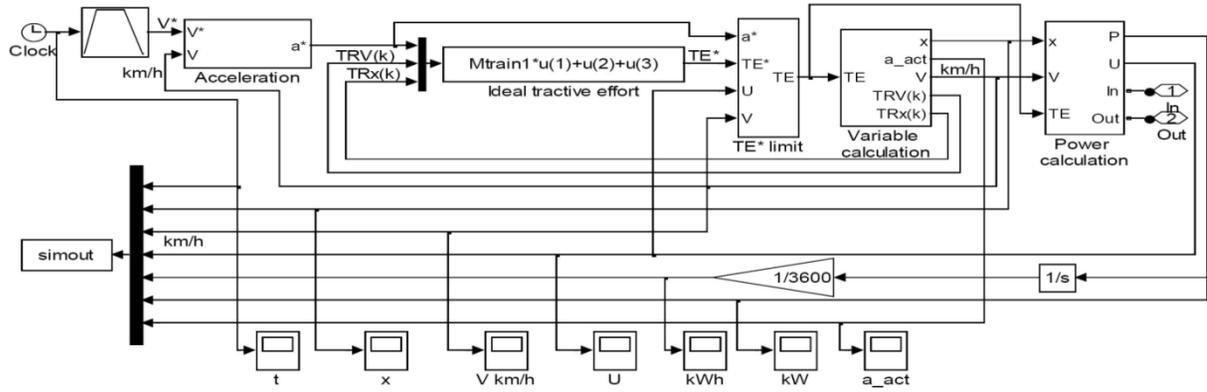


Figura 4.6: Modelo dinámico de un tren

Utilizando la velocidad deseada v^* y la velocidad “real” del tren v , el módulo “Acceleration” calculará la aceleración deseada a^* . El detalle del módulo se muestra en la Figura 4.7

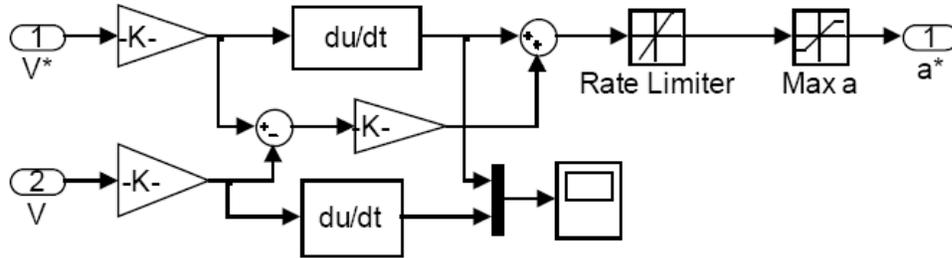


Figura 4.7: El modelo del módulo “Acceleration”

De acuerdo con la aceleración deseada a^* y las características de propulsión del sistema, la cual tiene relación con la velocidad del tren v y la tensión de la red U , la fuerza de tracción TE será calculada. Además, utilizando las ecuaciones (4.2), (4.3) y (4.4) es posible determinar las variables en tiempo real posición x , velocidad V , aceleración actual a_{act} , $T_R(x)$ y $T_R(v)$.

$$T_R(x) = 9,8 \cdot \sin(\theta) \cdot M_E \quad (4.3)$$

$$T_R(v) = \left\{ 2,27 + 0,00156 \cdot \left(\frac{3600 \cdot v}{1000} \right)^2 \right\} \cdot 9,81 \cdot \frac{M_E}{1000} \quad (4.4)$$

Obtenidas las variables en tiempo real fuerza de tracción TE y la velocidad V , se puede determinar la potencia P que el tren necesita utilizando la ecuación (4.5):

$$P = \mu \cdot TE \cdot V \quad (4.5)$$

Donde μ corresponde a la eficiencia de tracción que es dada por el fabricante del tren. Con el fin de simular una fuente de potencia variable, se construye una fuente de corriente controlada para simular la caída de tensión en la línea. Dado que la posición del tren x va variando en el tiempo, la caída de voltaje de la línea va cambiando con la resistencia de la línea y la corriente de tracción variable.

Para simular la fuente de potencia variable, construimos una fuente de corriente controlada con una retroalimentación de voltaje como la fuente de energía, y utilizar una fuente de tensión controlada para simular la caída de tensión de línea. Debido a que la x es el cambio, la caída de voltaje de la línea está cambiando con la resistencia de la línea variable y variable de tracción de corriente. La Figura 4.8 muestra la implementación del modelo para el cálculo de la potencia del tren.

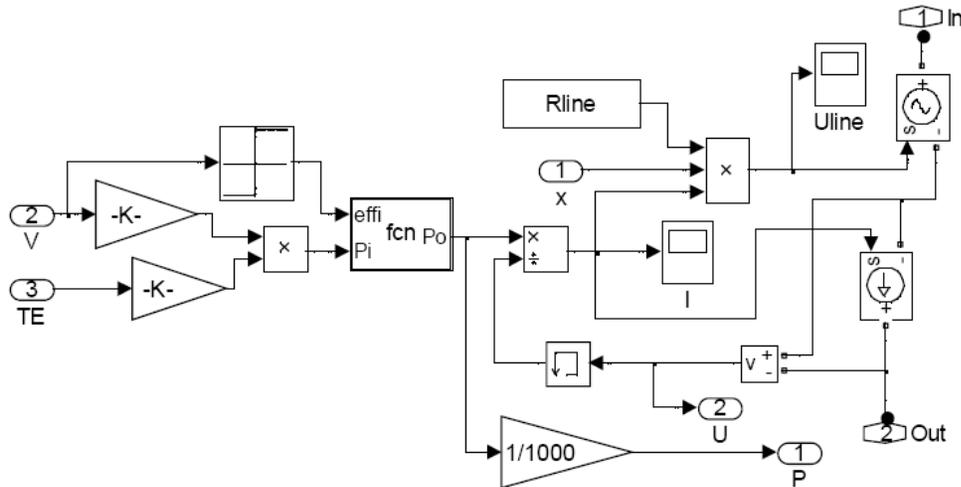


Figura 4.8: Modelo para el cálculo de la potencia

4.4.3 Modelación del sistema de recuperación de energía

Como ya se mencionó en 4.2, es necesario, para la gran mayoría de los sistemas de recuperación de energía, la incorporación de un sistema de control de carga y descarga, siendo el más utilizado un circuito chopper Buck-Boost, tal como se muestra en la Figura 4.9. Cuando el equipo se descarga y devuelve energía a la red, el chopper opera en modo Boost con IGBT conduciendo e IGBT1 en corte. En cambio, cuando el equipo se carga capturando energía regenerada desde la red, el chopper opera en modo Buck con IGBT1 conduciendo e IGBT en corte.

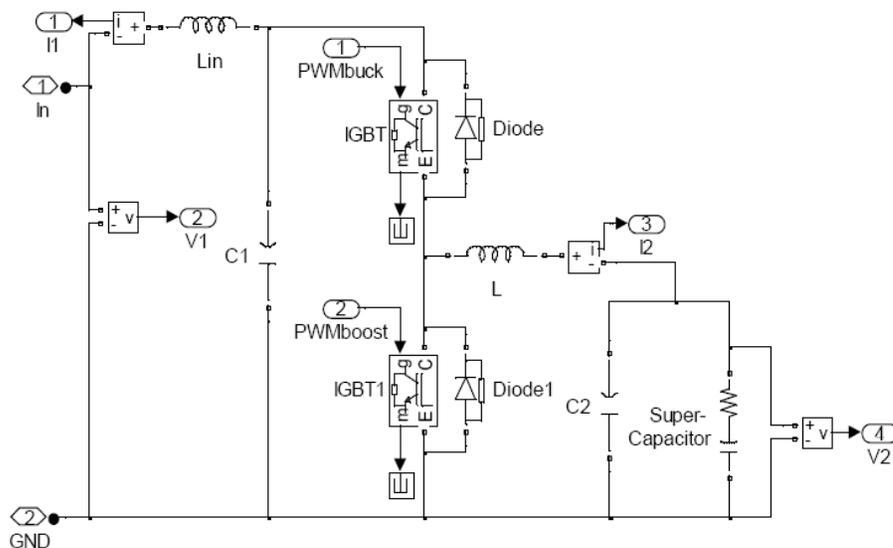


Figura 4.9: Sistema de recuperación de energía

Nótese que el lado izquierdo del circuito de la Figura 4.9 es el de alta tensión, conectado a la línea de alimentación del tren, y el lado derecho es el lado de baja tensión en donde se conecta el banco de acumuladores de energía.

Un problema importante que se debe tener en consideración es que ante una caída de voltaje en la línea de alimentación, gran parte de la energía regenerada acumulada se perderá al ser devuelta a la red. De esta manera será necesario un equipo de protección rápida para aislar la corriente de falla.

4.4.4 Resultados de la simulación

Implementando los módulos para Simulink/SimPowerSystem mencionados en 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3, el modelo para simulación de la red de suministro eléctrico de una red metropolitana de transporte con sus respectivos vehículos y un sistema de recuperación de energía se puede construir tal como muestra la Figura 4.10.

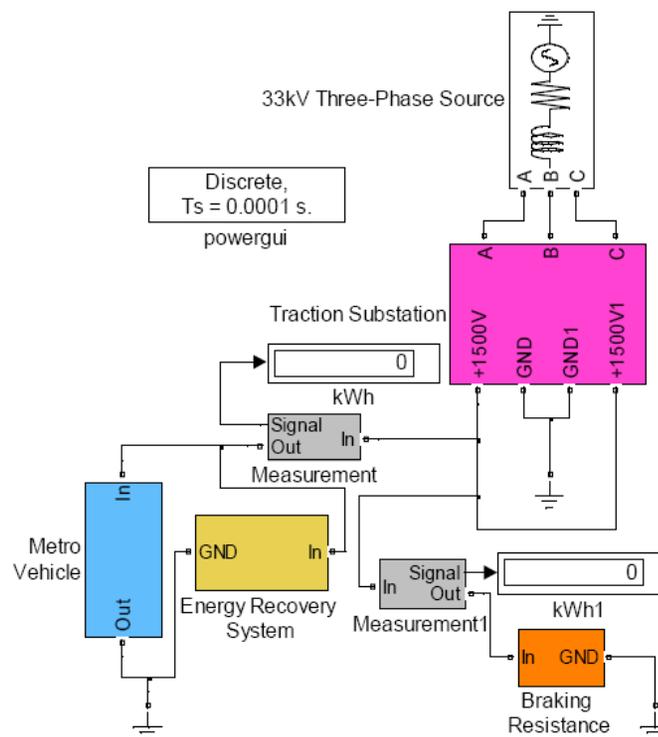


Figura 4.10: Modelo de red de alimentación de metro en 1500V y vehículos

Entregando la curva de velocidad deseada, es posible determinar, mediante la simulación, el desempeño de los vehículos del metro. La Figura 4.11 muestra el desempeño de los trenes sin considerar un sistema de recuperación de energía [16].

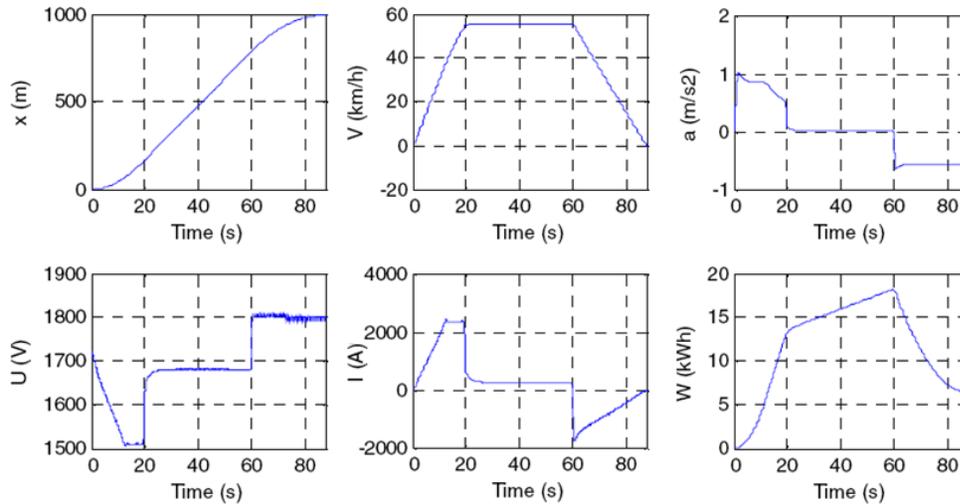


Figura 4.11: Resultados de simulación sin sistema de recuperación de energía

La Figura 4.11 muestra que el tren acelera hasta los 20s, luego mantiene la velocidad en 55Km/h desde los 20s hasta 60s para luego frenar desde los 60s hasta los 88s. Cuando el tren parte se puede notar que la tensión decae a un valor cercano a los 1500V y además que el voltaje de la línea aumenta cuando el tren empieza su etapa de frenado. La tensión máxima es limitada, con el fin de no dañar equipos, en 1800V gracias a las resistencias de frenado.

Para no desperdiciar energía disipada mediante la resistencia de frenado, es que se está utilizando sistemas de recuperación de energía con el fin de almacenar la energía regenerada del frenado de los trenes. La lógica de carga/descarga del sistema de recuperación de energía se explica a continuación:

- Cuando el tren parte ($U < 1600V$), el sistema de recuperación de energía se descarga devolviendo la energía almacenada a la red de suministro del metro.
- Cuando el vehículo frena ($U > 1750V$), el sistema de recuperación de energía se carga absorbiendo y almacenando la energía regenerada desde la red de suministro
- Cuando se produce una falla de corto circuito ($U < 1200V$), el sistema de recuperación de energía se desconectará de inmediato y no trabajará hasta despejar la falla.
- Para efectos de la simulación, se considerará que el sistema de recuperación de energía se encuentra a media carga. La razón es que no es trivial determinar si primero se cargará o descargará.

Teniendo en consideración las reglas básicas de control de carga/descarga, se incorpora a la simulación de la red de tracción del metro un sistema de recuperación de energía, cuyos resultados se muestran en la Figura 4.12 [16].

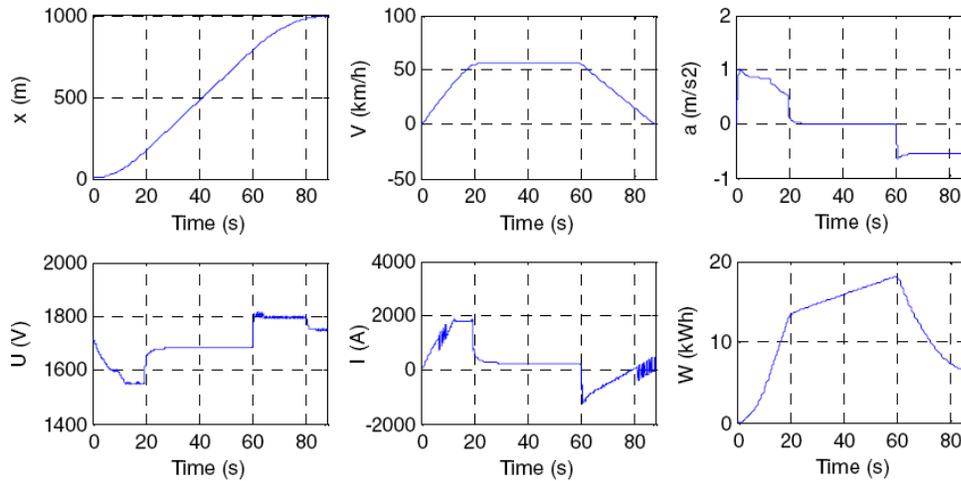


Figura 4.12: Resultados de simulación con sistema de recuperación de energía

Comparando el resultado de las simulaciones es posible concluir que el peak de tensión de una red de metro es menor cuando se cuenta con un sistema de recuperación de energía. Además la corriente entregada por las subestaciones de rectificación se reduce sin afectar en rendimiento de los trenes.

Finalmente, cabe mencionar que la cantidad de energía que se puede recuperar depende directamente de la capacidad del sistema de recuperación de energía. Además, dependiendo de la estrategia de control de carga/descarga, es posible recuperar hasta la mitad de la energía disipada mediante la resistencia de frenado, logrando que el sistema de recuperación de energía trabaje a plena carga y con una alta eficiencia de conversión.

4.4.5 Aplicación a Metro de Santiago

En el Metro de Santiago, a diferencia del Metro de Shanghai, la electrificación se hace a través de barras guías en $750V_{CC}$, además que las subestaciones de tracción son alimentadas en $20kV_{CA}$. Por lo tanto, la aplicación de este modelo al Metro de Santiago implica ajustar parámetros como voltajes, resistencia de línea, parámetros de los trenes, entre otros.

Dado que no se conocen los parámetros que se utilizaron en el modelo de simulación de la Línea 1 del Metro de Shanghai, la adaptación de este modelo al Metro de Santiago se deja abierta para un futuro trabajo de título.

Capítulo 5:

Conclusiones

El trabajo realizado a lo largo de esta memoria tuvo dos grandes temas a investigar. Por una parte, estudiar sobre la regeneración de energía en la Línea 1 del Metro de Santiago: como determinar cuanta energía regenera cada tren, factores que influyen en la regeneración de energía, total de energía regenerada y que parte de esta energía es reutilizada; y por otro lado, estudiar sobre los sistemas de recuperación de energía: Acumuladores de energía utilizados, circuitos asociados para la conexión a la red, recopilación de experiencias y entregar la base de un modelo de simulación que sirva para un trabajo futuro.

En base a los objetivos planteados para ambos temas de investigación, se puede señalar que los resultados fueron exitosos, lográndose la mayoría de las metas impuestas en un principio. Se falló en la realización de mediciones en la Línea: a pesar que se realizaron mediciones del voltaje en un punto específico, faltaron medir otras variables para determinar la cantidad de energía regenerada que es reutilizada; y realizar nuevas mediciones implicaba pedir permisos y conseguir gente capacitada para trabajo nocturno de instalación de equipos de medición en la vía, permiso y personal que no fue posible conseguir en condición de estudiante memorista.

Fue posible obtener parámetros con los cuales es posible modelar los nuevos trenes que ya circulan por la Línea 1 del Metro de Santiago, con esto se podrán realizar futuras simulaciones con la información correspondiente a los trenes más modernos de la red. Además se obtienen las curvas de tracción y frenado de los trenes, de donde se obtiene información adicional para simulaciones y estudios futuros.

Se encontraron distintos métodos mediante los cuales es posible obtener, a partir de los valores característicos de los trenes, la cantidad de energía que es capaz de regenerar cada tren en la etapa de frenado; a partir de lo anterior la cantidad de energía diaria total que es regenerada gracias al frenado de los trenes; y un método que, a partir de mediciones, ayuda a determinar que parte de la energía regenerada a partir del frenado de los trenes es efectivamente reutilizada por la partida de otros trenes en la Línea. Además fue posible encontrar factores que afectan la cantidad de energía que se regenera.

Se abordaron los tipos de acumuladores de energía que se utilizan en los sistemas de recuperación de energía, tanto los que están en operación como los que se sigue investigando, además del circuito asociado para el control de carga y descarga del sistema, en donde mediante IGBTs se construye un Chopper Buck-Boost entre el equipo y la Línea, que asume la labor de controlar el proceso. Se encontraron diversas aplicaciones de sistemas de recuperación de energía en donde todas cumplían con el objetivo que se buscaba: compensar las caídas de voltajes y reducir la energía demandada a las subestaciones de rectificación.

Se propuso un modelo de simulación, basado en el Metro de Shanghai, el cual puede utilizarse como base para desarrollar un modelo de simulación en Matlab para el Metro de Santiago. Lo interesante del modelo propuesto es la consideración de un sistema de recuperación de energía, y del resultado de las simulaciones se comprueba que gracias a la utilización de sistemas de recuperación de energía en el Metro de Shanghai se logra compensar la caída de voltaje sin la necesidad de instalar subestaciones de rectificación nuevas y sin afectar la dinámica del movimiento del tren: La posición, la velocidad y la aceleración del tren no se altera al simular con un sistema de recuperación de energía en la Línea.

Se concluye que la utilización de sistemas de recuperación de energía es una solución viable para mejorar el sistema de alimentación de tracción de la Línea 1 del Metro de Santiago: pues se ha demostrado en varias aplicaciones existentes su correcto funcionamiento para la compensación de voltaje, fin que es buscado por Metro de Santiago. El dimensionamiento del sistema dependerá directamente de cuanta energía regenerada se pierde, que según estadísticas de otros metros es cercana a la mitad de la energía regenerada. El tipo de acumulador de energía a utilizar dependerá si se requiere de una gran cantidad de energía, en donde se ha demostrado que es mejor la utilización de baterías, o una potencia instalada alta en donde los condensadores de doble capa son mejores para estas aplicaciones. De todas formas se ha demostrado que con cualquiera de los tres tipos de acumuladores comúnmente utilizados ha dado buenos resultados.

Queda fuera del alcance de esta memoria de título el estudio económico de la utilización de sistemas de recuperación de energía. Las razones del porqué se excluyó el tema económico es la nula respuesta de proveedores de estas tecnologías sobre precio de los acumuladores de energía

Como trabajo futuro, incluso como posible tema de memoria, se propone la implementación del modelo de simulación utilizado para el Metro de Shanghai, adaptando los parámetros del modelo para que sea válido para el Metro de Santiago: cambiar sistema de alimentación de catenaria rígida a barras guías; distribución en media tensión de 33kV_{AC} a 20kV_{AC} ; voltaje en barras guías de 1500V_{DC} a 750V_{DC} ; parámetros que modelan comportamiento de los trenes; etc. Dentro del tiempo que se trabajó dentro del Metro de Santiago, no fue posible conseguir los últimos modelos de simulación que consideran los cambios instaurados en los últimos años dentro de las Líneas, por lo que se deja para un posible trabajo de título futuro la incorporación de sistemas de recuperación de energía al modelo de simulación.

Bibliografía

- [1] Gerencia comercial y servicio al cliente Metro de Santiago. 2009. *“Memoria Anual Metro S.A. 2009”*.
- [2] http://es.wikipedia.org/wiki/Metro_de_Santiago#Material_rodante
- [3] Gerencia comercial y servicio al cliente Metro de Santiago. 2007. *“Anexos estadísticos Metro S.A. 2007”*.
- [4] Vargas Díaz, Luis. Sem. Otoño 2006. *“Maquinas de corriente continua”*. Apuntes EL42C – Conversión electromecánica de la energía, Universidad de Chile
- [5] Vargas Díaz, Luis. Sem. Otoño 2006. *“Maquinas de inducción”*. Apuntes EL42C – Conversión electromecánica de la energía, Universidad de Chile
- [6] Lucero Alday, Augusto. Sem. Otoño 2010. *“Resumen rectificadores de potencia”*. Apuntes EL603 – Tracción Eléctrica, Universidad de Chile.
- [7] Lucero Alday, Augusto. Sem. Otoño 2010. *“Contaminación de armónicas en sistemas de tracción”*. Apuntes EL603 – Tracción Eléctrica, Universidad de Chile.
- [8] Lucero Alday, Augusto. Sem. Otoño 2010. *“Conceptos básicos operación Metro”*. Apuntes EL603 – Tracción Eléctrica, Universidad de Chile.
- [9] Kanei, N.. 2008. *“Train Performance of “6M3R”, Santiago de Chile Project”*. Traction Systems Department, Itami Works, Mitsubishi Electric Corporation.
- [10] Kanei, N.. 2008. *“Run Curve Simulation of “6M3R”, Santiago de Chile Project”*. Traction Systems Department, Itami Works, Mitsubishi Electric Corporation.
- [11] Kanei, N.. 2008. *“Calculation of Energy Consumption of “6M3R”, Santiago de Chile Project”*. Traction Systems Department, Itami Works, Mitsubishi Electric Corporation.
- [12] Quiroga Restovic, Myrko A. *“Estudio de la regeneración de energía en el metro de Santiago”*. Santiago de Chile 1994
- [13] Chang-han, Bae; Dong-uk, Jang; Yong-gi, Kim; Se-ky, Chang; Jai-kyun, Mok. 2007. *“Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations”*.
- [14] Okui, A; Hase, S; Shigeeda, H; Konishi, T; Yoshi, T. 2010. *“Application of Energy Storage System for Railway Transportation in Japan”*. The 2010 International Power Electronics Conference
- [15] Compañía de Ferrocarriles del Oeste de Japón. 2010. *“Annual Report 2010”*
- [16] Zhang, Yi-cheng; Wu, Lu-lu; Wang, Bo, Liang, Hai-quan. 2008. *“Modeling and Simulation of the 1500V Metro Supply Network and Vehicles”*. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), September 3-5, 2008
- [17] POCH; PSI Consultores. 2010. *“Simulaciones estudio de mejoramiento del sistema de alimentación de tracción de línea 1 del Metro de Santiago”*.

Anexos

Anexo A: Línea 1

Dado que este trabajo de título se centra en la línea 1, se abordarán con más profundidad datos relevantes de esta línea, datos que luego podrán ser usados para modelar la línea en caso de simulación. Cabe destacar que esta línea es la principal, dada que es la que transporta más pasajeros de toda la red.

A.1 Estaciones de pasajeros

En la Tabla A.1, se muestran las estaciones de pasajeros de la línea 1 del metro. Cabe mencionar que su ubicación se referencia según su punto kilométrico (Pk), que corresponde a la distancia que se encuentra a cierto punto de la línea. En caso de la línea 1, Pk 0 corresponde a un punto cercano al Taller Neptuno.

Tabla A.1: Estaciones de pasajeros, línea 1

Nombre	Pk[m]	Nombre	Pk[m]
Inicio túnel	-1.211	Universidad Católica	8.137
San Pablo	-1.018	Baquedano	8.715
Neptuno	-335	Salvador	9.614
Pajaritos	763	Manuel Montt	10.355
Las Rejas	1.557	Pedro de Valdivia	11.051
Ecuador	2.264	Los Leones	11.686
Padre Alberto Hurtado	2.985	Tobalaba	12.346
Universidad de Santiago	3.574	El Golf	12.972
Estación Central	4.291	Alcántara	13.596
Unión Latino Americana	4.797	Escuela Militar	14.223
República	5.470	Manquehue	15.614
Los Héroes	6.015	Hernando de Magallanes	16.868
La Moneda	6.558	Los Dominicos	17.915
Universidad de Chile	7.016	Final túnel	18.119
Santa Lucia	7.548		

A.2 Subestaciones de rectificación

En la Tabla A.2 se muestran las subestaciones de rectificación que se encargan de entregar la tensión continua a la línea 1 del metro. Además del punto kilométrico donde se encuentran, se indica el voltaje en vacío y la resistencia interna de la SS/EE R.

Tabla A.2: Subestaciones de rectificación, línea 1

Nombre	PK [m]	V _{Vacío} [V]	R _{interna} [mΩ]	Tipo
Neptuno	-260	820	6,13	Bigrupo
Las Rejas	1.630	820	5,78	Bigrupo
Estación Central	4.070	820	5,32	Bigrupo
La Moneda	6.485	820	4,85	Bigrupo
Universidad Católica	8.340	820	5,2	Bigrupo
Huelen	9.950	820	11,07	Monogrupo
Pedro de Valdivia	11.310	820	11,75	Monogrupo
El Golf	13.050	820	12,25	Monogrupo
Escuela Militar	13.920	820	6,29	Bigrupo
Hernando de Magallanes	16.791	820	6,85	Bigrupo

A.3 Velocidad máxima operación

A.3.1 Vía 1

La velocidad máxima con la que puede operar la Vía 1, desde San Pablo a Los Dominicos, de la Línea 1 del Metro de Santiago está limitada a 80km/hr menos en los puntos que se detallan en la Tabla A.3:

Tabla A.3: Velocidades máximas, línea 1 - Vía 1

Extremos		Tramo[m]		Velocidad
		Pkinicio	→ Pkfin	[km/hr]
Inicio túnel	→ San Pablo	-1211	→ -1028	40
Interestación	→ Neptuno	-723	→ -355	60
República	→ Los Héroes	5470	→ 6015	60
Interestación	→ Manuel Montt	10053	→ 10355	65
Interestación	→ Escuela Militar	14019	→ 14223	60
Interestación	→ Los Dominicos	17825	→ 17915	45

La Figura A.1 muestra gráficamente el límite de velocidad máxima para la vía 1 de la Línea 1 del metro de Santiago para todo el largo de la línea, en función del punto kilométrico.

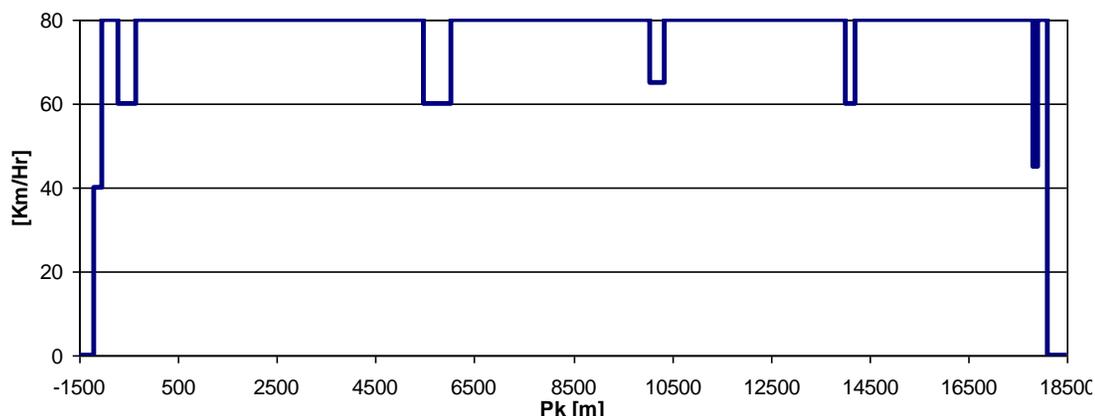


Figura A.1: Velocidad máxima línea 1, vía 1

A.3.2 Vía 2

La velocidad máxima con la que puede operar la Vía 2, desde San Pablo a Los Dominicos, de la Línea 1 del Metro de Santiago está limitada a 80km/hr menos en los puntos que se detallan en la Tabla A.4:

Tabla A.4: Velocidades máximas, línea 1 - vía 2

Extremos	Tramo[m]		Velocidad [km/hr]
	Pkinicio	Pkfin	
Inicio túnel → Los Dominicos	18119	17915	40
Interceptación → Manquehue	15820	15614	65
Escuela Militar → El Golf	14223	12972	60
Tobalaba → Pedro de Valdivia	12345	11051	60
Interestación → Manuel Montt	10699	10355	65
Interestación → Salvador	9946	9614	65
Interestación → Las Rejas	1803	1557	60
Interestación → San Pablo	-744	-1018	40

La Figura A.2 muestra gráficamente el límite de velocidad máxima para la vía 1 de la Línea 1 del metro de Santiago para todo el largo de la línea, en función del punto kilométrico.

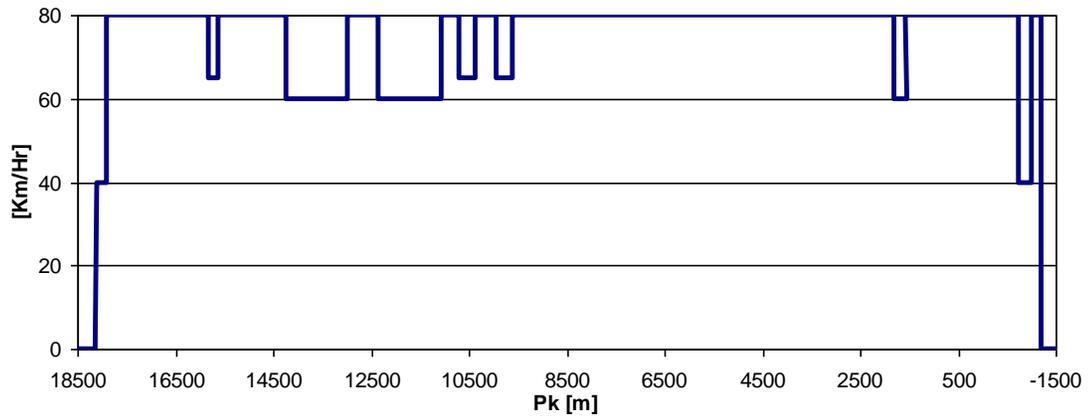


Figura A.2: Velocidad máxima línea 1, vía 2

A.4 Cota del riel

La Figura A.3 muestra la cota del riel para la Línea 1 del Metro de Santiago y corresponde a cuanto altura sobre el nivel del mar se encuentra cada punto de la línea, puntos que se expresan en función del punto kilométrico.

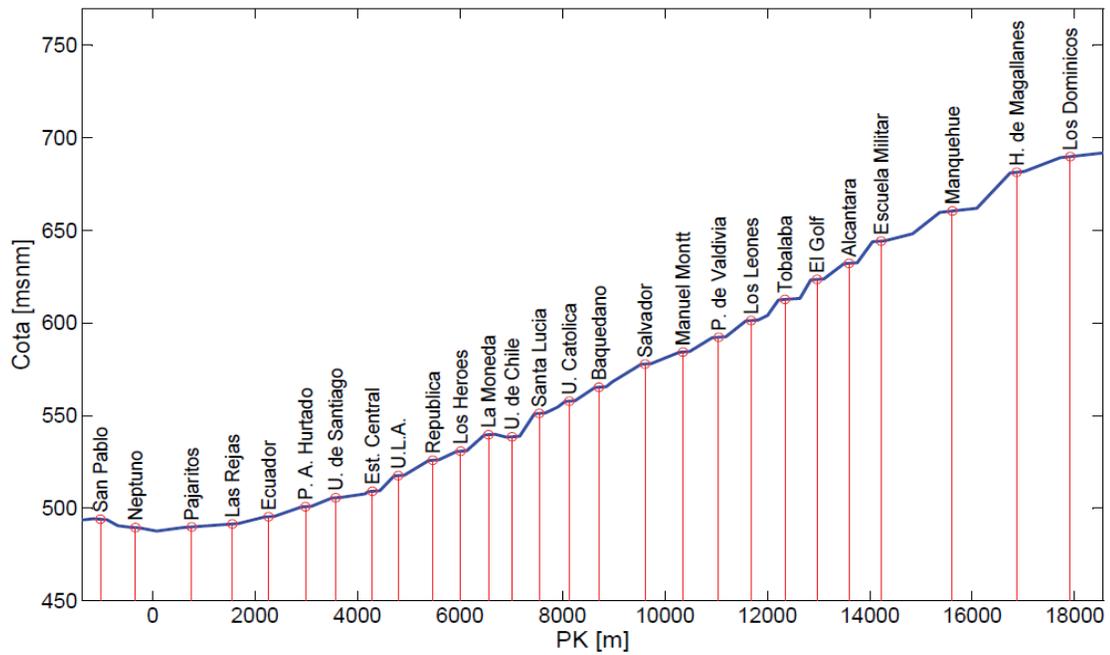


Figura A.3: Cota del Riel para la Línea 1 del Metro de Santiago

Anexo B: Trenes CAF NS 2007

B.1 Descripción



Figura B.1: Nuevos trenes línea 1 CAF NS-07

Los 20 nuevos trenes, NS-07, adquiridos a la empresa española “Compañía y Auxiliar de Ferrocarriles”, CAF S.A., corresponden a 20 unidades de tren eléctrico de 9 coches, unidades que pueden ser utilizadas también de 8, 7 y hasta 6 coches. La configuración de las unidades, coche motor con cabina (M), coche motor intermedio (N) y coche remolque (R), dependiendo se muestra a continuación:

- 9 Coches : M-R2-N1-N2-R1-N1-N1-R1-M
- 8 Coches : M-R2-N1-N2-R1-N1-R1-M
- 7 Coches : M-R2-N2-R1-N1-R1-M
- 6 Coches : M-R2-N2-N1-R1-M

La estructura autoportante (caja) de los coches es de aluminio, construida a base de perfiles extruidos. Los revestimientos interiores laterales son de poliéster reforzado con fibra de vidrio, los techos centrales de aluminio, trampillas de techos laterales de vidrio y los asientos de pasajeros de poliéster.

Los bogies de los trenes NS-07 poseen ruedas portantes neumáticas y ruedas auxiliares de seguridad de acero. Además lateralmente se implementa las ruedas guías neumáticas.

Todos los bogies de los coches M y N están equipados con motores. El motor, a través del acoplamiento, acciona el puente diferencial, y éste a su vez controla el giro de las ruedas portadoras.

La suspensión primaria es mediante elementos elásticos de caucho. La suspensión secundaria es neumática formada por dos resortes, uno por costado, y sobre los que apoya la traviesa bailadora. La unión caja-bogie se efectúa mediante una corona de orientación.

El equipo de freno es de zapata, una por cada rueda auxiliar de seguridad. Una zapata por cada bogie es accionada a través de un cilindro que incorpora freno de estacionamiento.

La toma de corriente, desde las barras guías, se realiza a través de frotadores en los bogies motores. El retorno de la corriente de tracción, a través de patines que permanecen en contacto con los rieles metálicos.

B.2 Datos básicos

Alimentación (Vcc)	: 750
Altura de piso (mm)	: 2.100
Altura del piso en plataforma (mm)	: 1.130
Altura máxima, sobre pista de rodadura (mm)	: 3.620
Anchura exterior (mm)	: 2.600
Distancia entre centro de bogie (mm)	: 10.000
Longitud de la caja (mm)	Coche M: 15.830 Coche N: 14.880 Coche R: 14.880
Longitud total tren (mm)	: 135.820
Paso libre puertas (mm)	: 1.650 x 1.900
Peso total (toneladas)	Coches M: 27,835 Coches N: 26,880 Coches R: 21,420 Total: 227,450
Puertas por costado y coche	: 6 puertas de doble hoja deslizante (3 por lado)

B.3 Prestaciones de servicio:

Aceleración servicio (m/seg ²)	: 1,35
Deceleración emergencia (m/ seg ²)	: 2,5
Deceleración servicio (m/ seg ²)	: 1,8
Plazas de pie por coche (6p/ m ²)	Coches M: 138 Coches N: 142 Coches R: 142 Total pie: 1.270
Plazas sentadas por coche	Coches M: 21 Coches N: 26 Coches R: 26 Total sentados: 224
Total plazas	: 1.494

B.4 Equipamiento:

- Baterías: Tres convertidores auxiliares de 52,5 kVA por tren, uno en cada coche R (40 kVA a 380 Vca / 50 Hz + 12,5 kW a 72 Vcc). Asimismo, se dispone de tres baterías por tren, una por cada coche R, del tipo MRX 230 con 55 elementos que proporcionan 230 Ah.
- Equipamiento de seguridad: Preinstalación capaz de absorber equipamiento ATC y RPS.
- Equipo neumático: Tres compresores de pistón por tren, uno en cada coche R, de 920 l/min a 10 bar.
- Hombre muerto
- Información a viajeros, acústica y visual
- Información de destino
- Intercomunicación viajero conductor
- Megafonía y sistema de comunicaciones
- Radio: Preinstalación capaz de absorber equipamiento de radiotelefonía TF para comunicación con PCC.
- Registrador de eventos (OTMR)
- Sistema de calefacción/ventilación en coches: Un equipo de ventilación por cada cabina de conducción, con tres posiciones de calefacción. En salón de pasajeros, un equipo de ventilación que recircula 8500 m³/h.
- Sistema de protección y conducción automática ATP-ATO: Sistema de control de tren y diagnóstico mediante lógica programada.

Anexo C: Simulaciones previas

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas por POCH y PSI Consultores [17] las cuales se muestran en perfiles de tensión que resumen la tensión máxima y mínima para todos los puntos de la red

C.1 Intervalo de explotación: T=100s

Para condiciones normales de operación, es decir todas las subestaciones de rectificación operando con normalidad, las tensiones máximas y mínimas obtenidas mediante simulación para la línea 1 en vía 1 y vía 2, considerando un intervalo de explotación T=100[s], se muestran en la Figura C.1 y Figura C.2 respectivamente.

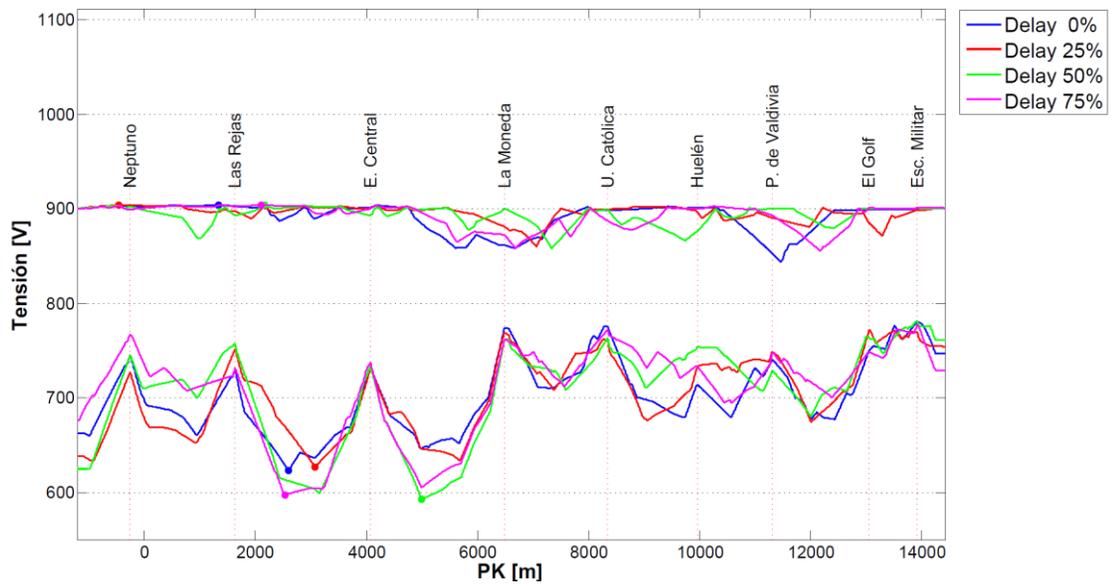


Figura C.1: Envoltura de tensión vía 1 línea 1, intervalo explotación T=100s

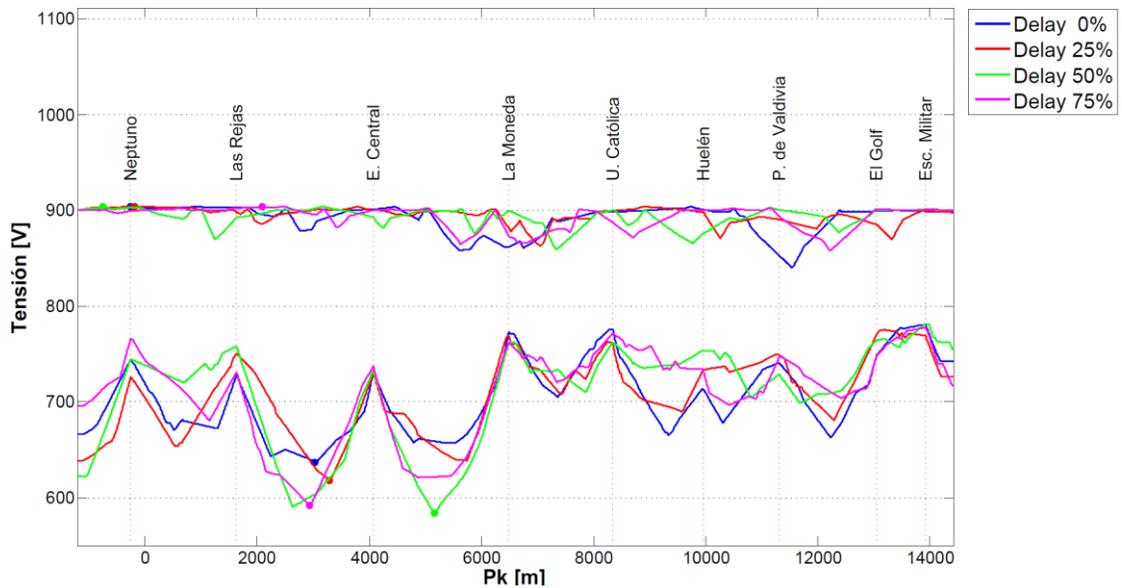


Figura C.2: Envoltura de tensión vía 2 línea 1, intervalo explotación T=100s

C.2 Intervalo de explotación: T=85s

En la Figura C.3 y Figura C.4 se muestran la tensión máxima y mínima simuladas para las vías 1 y 2 respectivamente de la línea 1 del metro, considerando un intervalo de explotación de T=85s, que corresponde al intervalo de explotación que se pretende lograr en hora punta una vez que entre en operación CBTC.

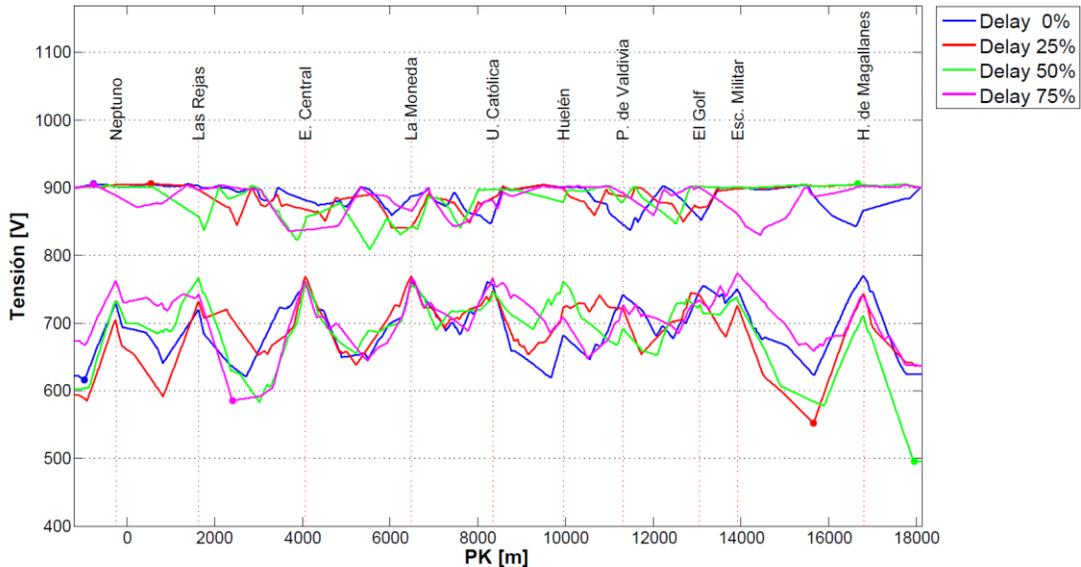


Figura C.3: Envolvente de tensión vía 1 línea 1, intervalo explotación T=85s

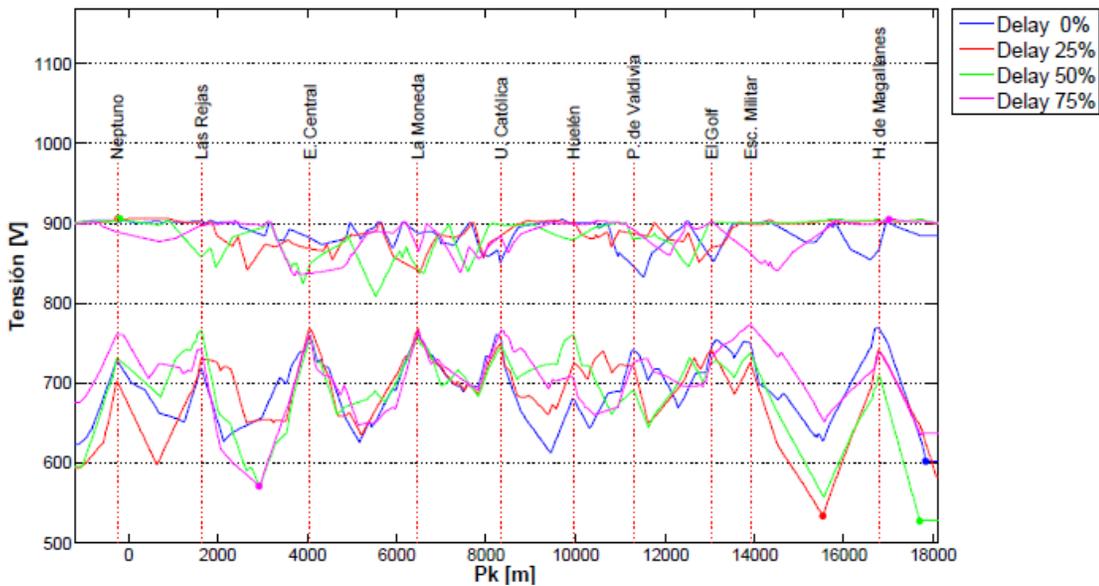


Figura C.4: Envolvente de tensión vía 2 línea 1, intervalo explotación T=85s

Del resultado de las simulaciones, comparando el escenario actual con el escenario luego de la puesta en marcha de CBTC, para la vía 1 (Figura C.1 y Figura C.3 respectivamente), se puede observar que en ciertos puntos de la red la regeneración debido al frenado de trenes aumenta, como por ejemplo en el tramo entre la S/ER La moneda y S/ER U. Católica, lo que se traduce en un aumento en el nivel mínimo de tensión. En otros sectores de la línea, el nivel de tensión disminuye, llegando a ser

preocupante el nivel alcanzado en el punto entre la S/ER Neptuno – S/ER Las Rejas y S/ER Las Rejas – Estación Central, en donde la tensión mínima está por debajo los $550V_{cc}$.

Realizando la misma comparación con el resultado de las simulaciones antes y después de la incorporación de CBTC para la vía 2, Figura C.2 y Figura C.4 respectivamente, al igual que antes existen puntos en donde la tensión mínima se ve favorecida bajo el nuevo escenario. Pero también, existen puntos en donde la tensión mínima es menor, preocupando aquellos casos en donde el nivel de tensión mínimo es cercano a las $550 V_{cc}$.

Anexo D: Mediciones estación San Alberto Hurtado

Durante el mes de agosto, se realizaron mediciones del voltaje de Línea en el PK 2.820, correspondiente al punto medio entre la SER Las Rejas y SER Estación Central, correspondientes a las segundas subestaciones de rectificación más distantes de la Línea 1. A continuación se muestra el voltaje medido en distintos días, entre las 7:00 hasta las 23:00

D.1 Mediciones

D.1.1 Lunes 9 de Agosto del 2010

La Figura D.1 muestra el voltaje de Línea registrado durante la operación del Metro de Santiago para el lunes 8 de agosto.

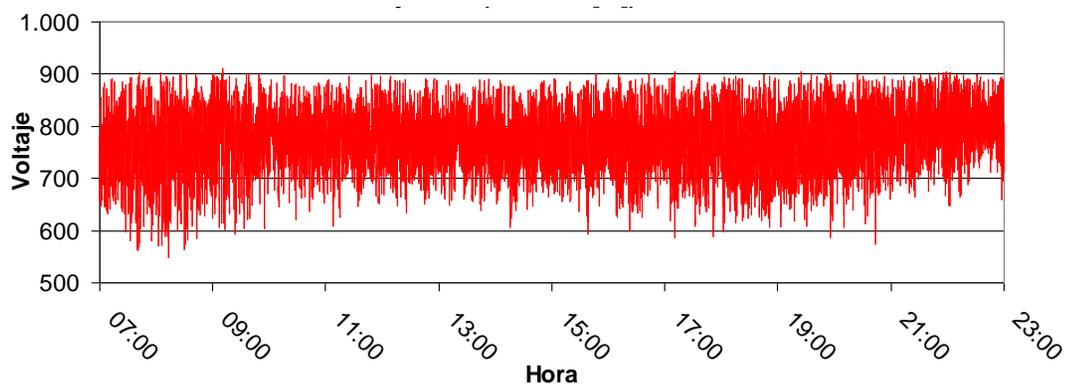


Figura D.1: Voltaje de Línea Lunes 09/08/2010

Además, la Figura D.2 muestra el voltaje de Línea para el mismo día, considerando la hora punta mañana

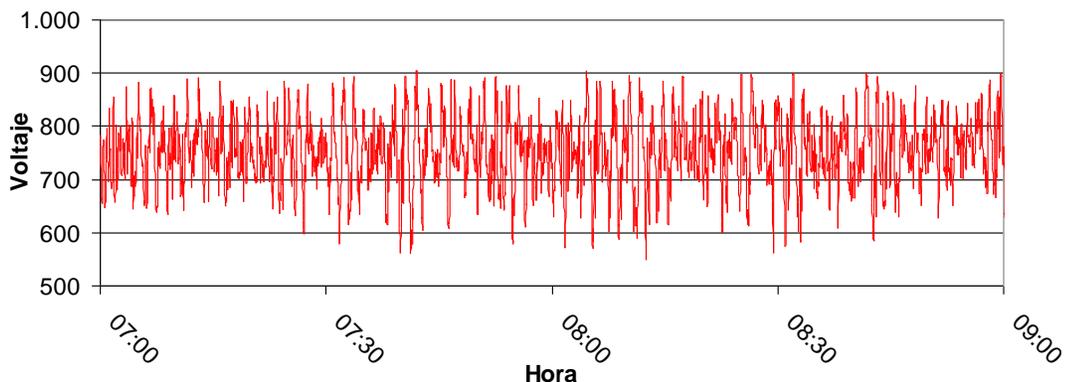


Figura D.2: Voltaje de Línea Lunes 09/08/2010, Hora Punta Mañana

D.1.2 Jueves 12 de Agosto del 2010

La Figura D.3 muestra el voltaje de Línea registrado durante la operación del Metro de Santiago para el lunes 8 de agosto.

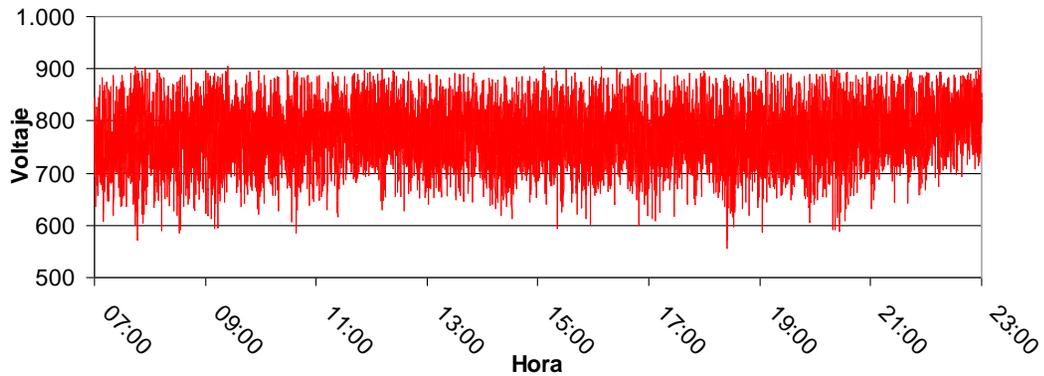


Figura D.3: Voltaje de Línea jueves 12/08/2010

Además, la Figura D.4 muestra el voltaje de Línea para el mismo día, en la hora punta.

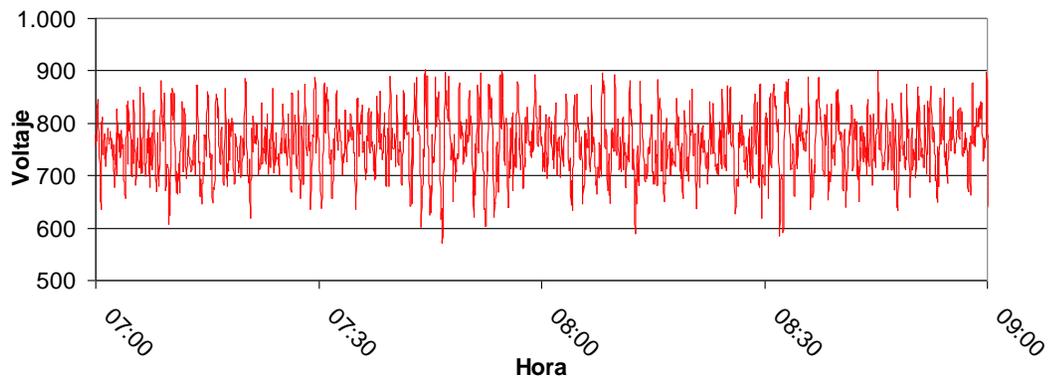


Figura D.4: Voltaje de Línea jueves 12/08/2010, Hora Punta Mañana

D.1.3 Martes 17 de Agosto del 2010

La Figura D.5 muestra el voltaje de Línea registrado durante la operación del Metro de Santiago para el lunes 8 de agosto.

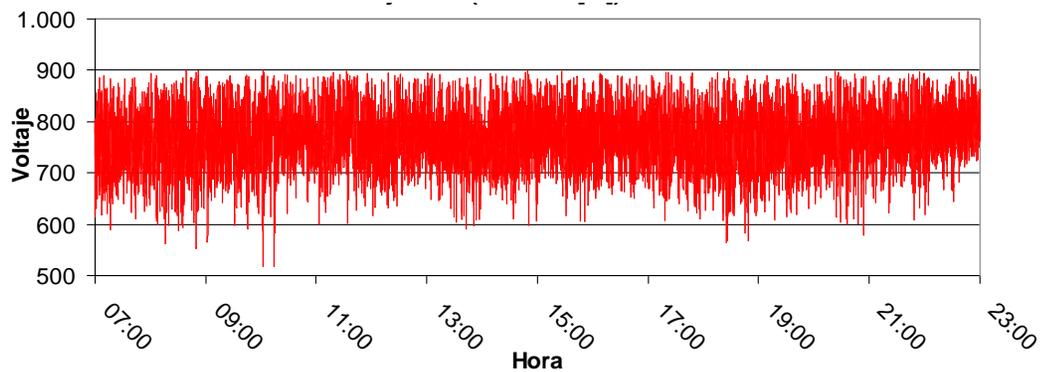


Figura D.5: Voltaje de Línea martes 17/08/2010

Además, la Figura D.6 muestra el voltaje de Línea para el mismo día, considerando la hora punta mañana

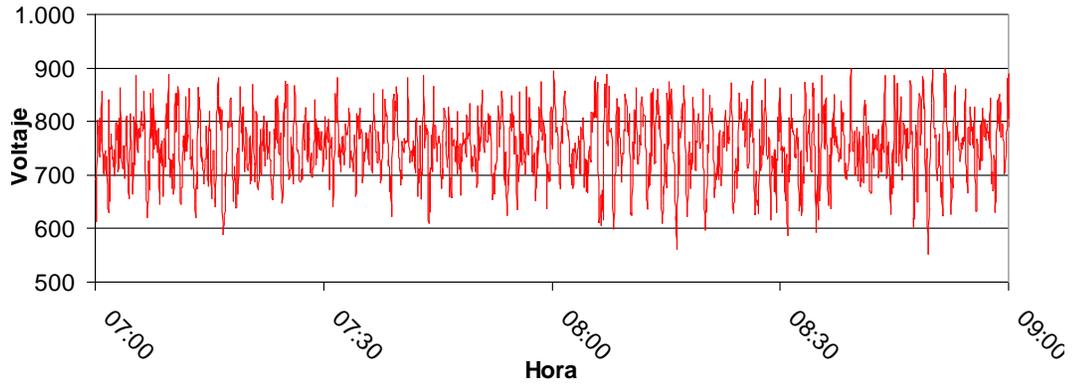


Figura D.6: Voltaje de Línea martes 17/08/2010, Hora Punta Mañana

D.1.4 Miércoles 18 de Agosto del 2010

La Figura D.7 muestra el voltaje de Línea registrado durante la operación del Metro de Santiago para el lunes 8 de agosto.

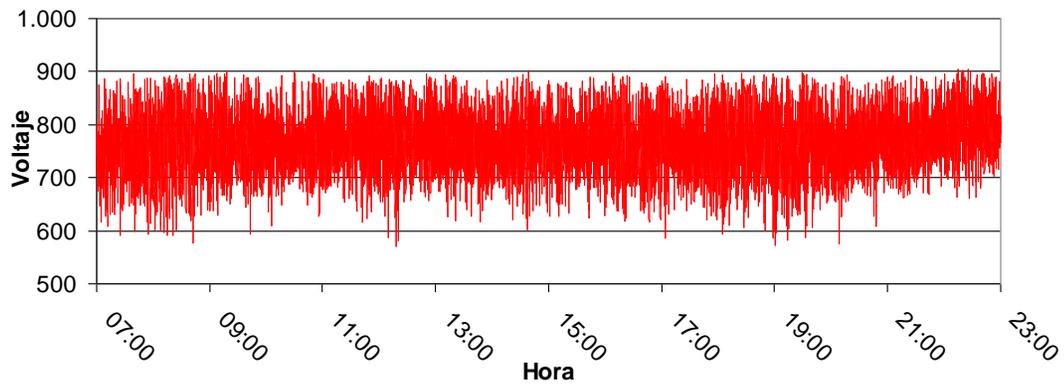


Figura D.7: Voltaje de Línea miércoles 18/08/2010

Además, la Figura D.8 muestra el voltaje de Línea para el mismo día, en la hora punta.

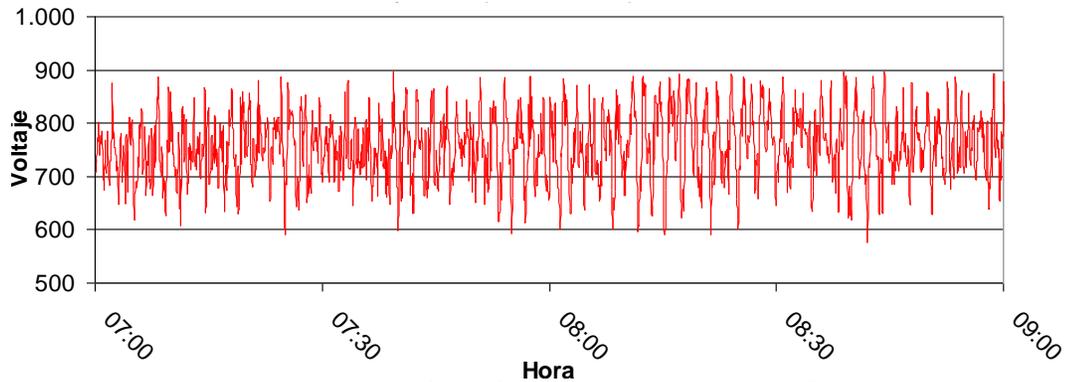


Figura D.8: Voltaje de Línea miércoles 18/08/2010, Hora Punta Mañana

D.2 Comentarios a las mediciones

Las mediciones del voltaje de línea a la altura de la estación San Alberto Hurtado muestran que a lo largo del día que el voltaje se mantiene dentro de rangos esperables, salvo algunas excepciones que el voltaje se mueve en ambos extremos. Además se puede ver que las fluctuaciones de voltaje son más amplias dentro del horario punta de funcionamiento.

La razón del porqué la variación del voltaje en horario punta es mayor que en horario valle puede deberse a que en horario punta hay un mayor número de trenes circulando por la red, lo que implica una mayor demanda de energía y caída de tensión mayores al haber más trenes traccionando en la línea; pero por otro lado la cantidad de energía regenerada del frenado de los trenes que es reinyectada a la red es mayor, y a pesar de existir una mayor probabilidad que otro tren utilice la energía regenerada debido a la presencia de mas trenes en la Línea, el excedente que no es utilizado se pierde elevando la tensión en ciertos instantes.