

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Dr. Luis A. Morán T.

Ingeniero Supervisor:

Sr. Ángel C. González F.

Unidad Ferroviaria Tte. 8

Codelco Chile – Div. Teniente

Informe de Memoria de Título

para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Análisis Técnico Económico del Diseño de los Bancos
Resistivos de las Locomotoras Schalke.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Luis A. Morán T.

Análisis Técnico Económico del Diseño de los Bancos Resistivos de las Locomotoras Schalke.



Pablo Esteban Astudillo Gatica

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Abril 2007

Resumen

El estudio de esta memoria de título, nace a partir de las fallas ocurridas en las resistencias de frenado de la locomotora de producción SCHALKE 130 Toneladas, del nivel ferroviario ferrocarril Tte. 8, que aparecen debido a las exigencias de frenado impuestas por el sistema de automatización del ferrocarril.

De esta forma este análisis da a conocer el diseño del banco resistivo y la capacidad de disipación de energía que posee la locomotora, con ello se muestra el problema ocasionado por el sistema de frenado del tren.

Se muestra la modificación efectuada al software de la locomotora, que contempló la mejora en la conversión de los datos para estimar la carga efectiva de las resistencias de frenado, contemplando además el aumento del freno de los carros en función a distintas opciones de operación del tren.

Finalmente se dan a conocer alternativas que pueden mejorar el sistema de freno del tren, reduciendo los costos producto del deterioro prematuro de los elementos que proveen el frenado de los convoyes.



A mis Padres, Hermanos y gente que me apoyó
en todo momento.

Tabla de Contenidos

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN MINERO.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Proceso de Extracción	2
1.1.1 Nivel de Hundimiento.....	2
1.1.2 Nivel de Producción.....	2
1.1.3 Nivel de Acarreo	2
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO FERROVIARIO DEL TENIENTE	3
2.1 Introducción	3
2.2 Infraestructura Eléctrica Ferroviaria.....	3
2.2.1 Subestaciones Rectificadoras.....	3
2.2.2 Potencias Nominales de las S.S.E.E.....	4
2.3 Locomotora de Producción SCHALKE 130 Ton.....	7
2.3.1 DC Link a bordo de la Locomotora	8
2.3.1.1 Inductor de Enlace.....	9
2.3.1.2 Condensador de Enlace	9
2.3.1.3 Chopper Reductor de Frenado.....	10
2.2.1.3.1 Análisis de los estados del chopper de frenado.....	10
2.3.1.4 Resistencias de Frenado.....	11
2.2.1.4.1 Potencia y energía de las Resistencias de Frenado	12
2.2.1.4.2 Grado de Sobrecarga de las Resistencias de Frenado.....	13
2.2.1.4.3 Tiempo de Disipación de sobrecarga.....	15
2.2.1.4.4 Principio del Modelo del Monitoreo Térmico de las Resistencias.....	16
2.2.1.4.5 Cálculo de la potencia de frenado.....	18
2.2.1.4.6 Calentamiento de las Resistencias.....	20
2.2.1.4.7 Enfriamiento de las Resistencias	20
2.2.1.4.8 Control de las Resistencias de Frenado	21
2.3.1.5 Banco de Resistencias de Frenado.....	23
2.3.2 Sistema de Frenado de la Locomotora	23
2.3.2.1 Frenado Electrodinámico.....	24
2.3.2.2 Frenado de Aire a Alta presión de la Locomotora.....	24
2.4 Carros de Producción Metaleros.....	25
2.4.1 Sistema de Freno del Carro Metalero.....	25
2.4.1.1 Frenado Mecánico de los Carros Metaleros	27
CAPÍTULO 3. TEORÍA DE LOS ACCIONAMIENTOS DE LA LOCOMOTORA	29
3.1 Introducción	29
3.2 Análisis teórico de los accionamientos de la Locomotora.....	29
3.2.1 Modelo del accionamiento de la locomotora	30
3.2.1.1 Modelo funcional del Inversor Fuente de Voltaje	30
3.2.1.2 Tipo de Modulación de los VSI.....	36
3.2.1.3 Modelo Fasorial del Accionamiento.....	38
3.2.1.3.1 Ecuaciones Eléctricas del Motor.....	39

3.2.1.3.2	Ecuaciones Mecánicas del Motor	40
3.2.1.3.3	Control por Campo Orientado del Motor de Inducción	40
3.2.2	Freno Regenerativo en Motores Asíncronos	43
3.2.3	Simulación del Inversor del Accionamiento	46
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE LOS DATOS DE LA LOCOMOTORA		48
4.1	Análisis Funcional de los diagramas de control	48
4.2	Análisis del Inversor	55
4.2.1	Análisis de los Datos extraídos desde la Locomotora	55
4.2.1.1	Registro de Datos en la Bajada desde la Mina a Colón.	59
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LA POTENCIA Y ENERGÍA DE LOS TRENES.....		63
5.1	Distancias de Frenado	63
5.1.1	Distancias Empíricas	63
5.1.2	Distancias Teóricas	64
5.1.3	Distancias Estipuladas por el Fabricante.....	65
5.2	Punto crítico de Frenado	66
5.3	Incorporación de Fluctuaciones al Modelo.....	67
5.2.1	Fluctuación Eléctrica.....	67
5.2.2	Fluctuaciones del carguío.....	68
5.2.3	Fluctuaciones de Energía	69
5.2.3.1	Energía Potencial.....	69
5.2.3.2	Energía Cinética	69
5.4	Margen de Dimensionamiento de las Resistencias	70
5.4.1	Energía de la Locomotora	70
5.4.2	Energía del Tren Completo y Cargado.....	71
5.5	Especificación de Potencia por Convertidor	72
5.6	Análisis de la Energía Total.....	74
5.6.1	Número de Resistencias de Frenado	74
5.6.2	Análisis Energético de la Flota de Trenes	75
5.7	Análisis del Porcentaje de Carga de cada tipo de Frenado	76
5.6.1	Parámetros de Cambios para el Tipo de Frenado.....	76
5.6.2	Modificaciones al software del PLC de la Locomotora	77
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....		78
6.1	Costos Asociados al Frenado de los Trenes	78
6.1.1	Costos Anuales del Sistema de Frenos.....	80
6.1.1.1	Costos Anuales Asociados a las Resistencias de las Locomotoras.....	80
6.1.1.2	Costos Anuales Asociados a las Zapatas de los Carros Metaleros	81
6.2	Disminución de Costos en el Mantenimiento.....	81
6.3	Alternativas de Disipación de Energía.....	82
6.3.1	Análisis de la Vialidad Económica de la Propuesta	83

6.3.2	Alternativa de Regeneración.....	84
6.3.2.1	Análisis Económico de la Propuesta	87
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....		89
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....		91



Lista de Figuras

<i>Fig. N° 1-1: Ubicación del Yacimiento.</i>	1
<i>Fig. N° 1-2: Infraestructura de Extracción Minera.</i>	2
<i>Fig. N° 2-1: Esquema Topológico General de las Subestaciones.</i>	4
<i>Fig. N° 2-2: Esquema de la Subestación</i>	5
<i>Fig. N° 2-3: Diagrama Unilineal de las SSEE Rectificadoras.</i>	6
<i>Fig. N° 2-4: Esquema del Accionamiento.</i>	7
<i>Fig. N° 2-5: Locomotora de Producción SCHALKE 130 Ton.</i>	7
<i>Fig. N° 2-6: Esquema del interior de la locomotora</i>	8
<i>Fig. N° 2-7: Topología del Enlace DC</i>	8
<i>Fig. N° 2-8: Chopper de frenado del Convertidor</i>	10
<i>Fig. N° 2-9: Chopper de frenado</i>	10
<i>Fig. N° 2-10: Estado de Disipación</i>	11
<i>Fig. N° 2-11: Estado Transitorio</i>	11
<i>Fig. N° 2-12: Placa o Parrilla SG</i>	12
<i>Fig. N° 2-13: Resistencia de Frenado</i>	12
<i>Fig. N° 2-14: Factor de Sobrecarga de las Resistencias de Frenado.</i>	14
<i>Fig. N° 2-15: Porcentaje de carga de las Resistencias de Frenado.</i>	15
<i>Fig. N° 2-16: Especificación de las Constantes de Tiempo.</i>	16
<i>Fig. N° 2-17: Esquema eléctrico del control de las Resistencias</i>	17
<i>Fig. N° 2-18: Esquema térmico de las Resistencias</i>	17
<i>Fig. N° 2-19: Relación de calentamiento entre las resistencias</i>	17
<i>Fig. N° 2-20: Esquema de inyección de energía a las Resistencias</i>	19
<i>Fig. N° 2-21: Diagrama Lógico del Control de las Resistencias de Frenado.</i>	21
<i>Fig. N° 2-22: Dependencia del Umbral de Potencial de las resistencias.</i>	22
<i>Fig. N° 2-23: Banco Resistivos de la Locomotora por Convertidor</i>	23
<i>Fig. N° 2-24: Disposición de los Bancos Resistivos en el Techo de la Locomotora.</i>	23
<i>Fig. N° 2-25: Unidad de Mordazas del Freno Neumático de las Locomotoras</i>	25
<i>Fig. N° 2-26: Carro Metalero de 80 Toneladas</i>	25
<i>Fig. N° 2-27: Esquema Básico del Frenado de los Carros Metaleros</i>	26
<i>Fig. N° 2-28: Esquemas de Carga Efectiva.</i>	27
<i>Fig. N° 2-29: Zapata de Freno de los Carros Metaleros (CAMES)</i>	27
<i>Fig. N° 3-1: Esquema de conexiones del convertidor de la Locomotora.</i>	30
<i>Fig. N° 3-2: Topología del Inversor.</i>	30
<i>Fig. N° 3-3: Circuito Equivalente AC</i>	31
<i>Fig. N° 3-4: Circuito Equivalente DC</i>	31
<i>Fig. N° 3-5: Esquema de una fase del inversor</i>	35
<i>Fig. N° 3-6: Diagrama en Bloques del control FeedForward.</i>	42
<i>Fig. N° 3-7: Cuadrantes de Operación de un Motor Asíncronico</i>	43
<i>Fig. N° 3-8: Curva Característica Torque Velocidad de un motor asíncronico.</i>	43
<i>Fig. N° 3-9: Diagrama Torque Velocidad para operación en los cuatro Cuadrantes</i>	44
<i>Fig. N° 3-10: Esquema de una fase del motor</i>	45
<i>Fig. N° 3-11: Esquema de tracción.</i>	45
<i>Fig. N° 3-12: Esquema de frenado.</i>	45
<i>Fig. N° 3-13: Esquema de detención.</i>	45
<i>Fig. N° 3-14: Función de Switch de las moduladoras</i>	46

<i>Fig. N° 3-15: Salida en Corriente del Convertidor</i>	46
<i>Fig. N° 3-16: Voltaje en el DC Link</i>	47
<i>Fig. N° 3-17: Corriente de entrada al Convertidor</i>	47
<i>Fig. N° 3-18: Salida del Voltaje Fase Neutro del VSI</i>	47
<i>Fig. N° 3-19: Salida del Voltaje Entre Línea del VSI</i>	47
<i>Fig. N° 4-1: Diagrama de Control General del Accionamiento</i>	48
<i>Fig. N° 4-2: Bloque Generador de los Set-Point</i>	49
<i>Fig. N° 4-3: Bloque Generador de la Función Rampa.</i>	50
<i>Fig. N° 4-4: Bloque Limitador de los Set-Point.</i>	51
<i>Fig. N° 4-5: Bloque del Controlador de Velocidad.</i>	52
<i>Fig. N° 4-6: Limitador de Torque, Inversor de Accionamiento</i>	53
<i>Fig. N° 4-7: Lazo Cerrado del Control del Motor</i>	54
<i>Fig. N° 4-8: Topología General del Ondulador de potencia de la locomotora</i>	55
<i>Fig. N° 4-9: Esquema de toma de datos.</i>	55
<i>Fig. N° 4-10: Registros de Velocidad.</i>	56
<i>Fig. N° 4-11: Velocidad de la Locomotora.</i>	57
<i>Fig. N° 4-12: Consumo de corriente del Trolley.</i>	57
<i>Fig. N° 4-13: Nivel de Voltaje DC del Trolley.</i>	58
<i>Fig. N° 4-14: Corriente de alimentación a los Motores</i>	58
<i>Fig. N° 4-15: Registros de Velocidad, Ciclo Promedio</i>	59
<i>Fig. N° 4-16: Registro de Corriente, Ciclo Promedio</i>	59
<i>Fig. N° 4-17: Registro de Voltaje, Ciclo Promedio</i>	60
<i>Fig. N° 4-18: Registro de Corriente AC</i>	60
<i>Fig. N° 4-19: Activación Freno Electrodinámico</i>	61
<i>Fig. N° 4-20: Activación freno de los Carros.</i>	61
<i>Fig. N° 4-21: Registro de Potencia, Ciclo Promedio</i>	62
<i>Fig. N° 4-22: Registros de Energía, Ciclo Promedio</i>	62
<i>Fig. N° 5-1: Curva Velocidad Teórica</i>	64
<i>Fig. N° 5-2: layout de mayor restricción de Velocidad</i>	66
<i>Fig. N° 5-3: Control de Peso del Tren</i>	68
<i>Fig. N° 5-4: Utilización del Banco</i>	71
<i>Fig. N° 5-5: Energía del Banco y Locomotora</i>	71
<i>Fig. N° 5-6: % de Sobre Utilización del Banco</i>	71
<i>Fig. N° 5-7: Cantidad de Energía del Tren</i>	71
<i>Fig. N° 5-8: Consumo de Corriente por Convertidor</i>	72
<i>Fig. N° 5-9: Nivel de Voltaje por Convertidor</i>	72
<i>Fig. N° 5-10: Potencia Eléctrica por Convertidor</i>	73
<i>Fig. N° 5-11: % de Temperatura de un grupo Resistivo</i>	73
<i>Fig. N° 5-12: Potencia Total de los 4 Convertidores</i>	73
<i>Fig. N° 5-13: Energía del Recorrido del Tren</i>	73
<i>Fig. N° 5-14: Porcentaje de Utilización de las Resistencias de Frenado</i>	75
<i>Fig. No 5-15: Promedios en las 5 Vueltas de un Tren</i>	76
<i>Fig. N° 5-16: Promedios en las 4 Vueltas de un Tren</i>	76
<i>Fig. No 5-17: Diagrama de Flujo del Frenado Utilizado en la Actualidad.</i>	77
<i>Fig. N° 6-1: Numero de fallas anuales en cada subsistema</i>	78
<i>Fig. N° 6-2: Costos de los principales elementos del Frenado de los Trenes.</i>	78
<i>Fig. N° 6-3: Costos asociados a los elementos del frenado</i>	79
<i>Fig. N° 6-4: Costo anual de las resistencias de frenado.</i>	80

<i>Fig. N° 6-5: Costo anual de las zapatas de freno.</i>	81
<i>Fig. N° 6-6: Costo Total de Mantenimiento referido al año.</i>	82
<i>Fig. N° 6-7: Principio de Operación del TCI Sistras.....</i>	84
<i>Fig. N° 6-8: Diagrama Esquemático TCI integrado en una SSEE.</i>	85
<i>Fig. N° 6-9: Margen de Regeneración de Energía en el tiempo</i>	86
<i>Fig. N° 6-10: Equipo Regenerativo TCI.....</i>	86
<i>Fig. N° 6-11: Flujo de Caja Final.....</i>	88



Nomenclatura

Matrices

A	: matriz de parámetros de dimensión $n \cdot n$.
B	: matriz de parámetros de dimensión $n \cdot p$.
C	: matriz de parámetros de dimensión $q \cdot n$.
D	: matriz de parámetros de dimensión $q \cdot p$.
E	: matriz de parámetros de dimensión $n \cdot m$.
F	: matriz de parámetros de dimensión $q \cdot m$.
T_{abc-dq0}	: matriz de transformación de ejes abc a $dq0$, dimensión $3 \cdot 3$.
T_{dq0-abc}	: matriz de transformación de ejes $dq0$ a abc , dimensión $3 \cdot 3$.
\vec{X}	: matriz compuesta por elementos $\vec{x}_{i,j}$ que son fasores.

Vectores

x	: vector de n variables de estados, $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$
u	: vector de p variables de entrada, $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]^T$
y	: vector de q variables de salida, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_q]^T$
p	: vector de m perturbaciones, $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$
\mathbf{x}^{abc}	: vector de tres variables de estados, $\mathbf{x}^{abc} = [x^a \ x^b \ x^c]^T$ (ejes estac. abc).
\mathbf{x}^{dq0}	: vector de tres variables de estados, $\mathbf{x}^{dq0} = [x^d \ x^q \ x^0]^T$ (ejes rotatorios $dq0$).
\mathbf{x}_0	: condición inicial del vector de estados, $\mathbf{x}_0 = [x_{10} \ x_{20} \ \dots \ x_{n0}]^T$
\mathbf{x}_o	: vector de estados en el punto de operación, $\mathbf{x}_o = [x_{1o} \ x_{2o} \ \dots \ x_{no}]^T$
\mathbf{u}_o	: vector de entradas en el punto de operación, $\mathbf{u}_o = [u_{1o} \ u_{2o} \ \dots \ u_{po}]^T$
\mathbf{y}_o	: vector de salidas en el punto de operación, $\mathbf{y}_o = [y_{1o} \ y_{2o} \ \dots \ y_{qo}]^T$
\mathbf{y}_d	: vector deseado (referencia) de q variables de salida, $\mathbf{y}_d = [y_{1d} \ y_{2d} \ \dots \ y_{qd}]^T$
\mathbf{p}_o	: vector de perturbaciones en el punto de operación, $\mathbf{p}_o = [p_{1o} \ p_{2o} \ \dots \ p_{qo}]^T$
$\Delta \mathbf{x}$: variación del vector de estados \mathbf{x} en torno a \mathbf{x}_o , $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x_1 \ \dots \ \Delta x_n]^T$
$\Delta \mathbf{u}$: variación del vector de entradas \mathbf{u} en torno a \mathbf{u}_o , $\Delta \mathbf{u} = [\Delta u_1 \ \dots \ \Delta u_p]^T$
$\Delta \mathbf{y}$: variación del vector de salidas \mathbf{y} en torno a \mathbf{y}_o , $\Delta \mathbf{y} = [\Delta y_1 \ \dots \ \Delta y_q]^T$
$\Delta \mathbf{p}$: variación del vector de perturbaciones \mathbf{p} en torno a \mathbf{p}_o , $\Delta \mathbf{p} = [\Delta p_1 \ \dots \ \Delta p_m]^T$
$\mathbf{x}(s)$: Laplace de \mathbf{x} , $\mathbf{x}(s) = [x_1(s) \ x_2(s) \ \dots \ x_n(s)]^T$
\mathbf{b}_k	: k -ésima columna de la matriz B .
$\nabla V(\mathbf{x})$: gradiente de la función $V(\mathbf{x})$. $\nabla V(\mathbf{x}) = \partial V(\mathbf{x}) / \partial \mathbf{x}$.
\vec{x}	: vector de fasores, $\vec{x} = [\vec{x}_1 \ \vec{x}_2 \ \dots \ \vec{x}_n]^T$.

Escalares

x_k	: k -ésima variable de estado.
$dx_k/dt = \dot{x}_k$: derivada de la k -ésima variable de estado.
$u(t)$: entrada escalón.
$r(t)$: entrada rampa.
$\ e\ $: norma del elemento e .
$f(t)$: función en el tiempo continuo.

Abreviaciones

Mayúsculas

PDT	: Plan Desarrollo Teniente
ACT	: Aumento de la Capacidad del Transporte
TPD	: Toneladas Productivas Diarias
ATP	: Automatic Train Protection
ATO	: Automatic Train Operation
ATTM	: Automatic Traffic and Transport Management
TIC	: Train Integrate Control
FFCC	: Ferrocarril
SSEE	: Subestación
CAMES	: Carros Metaleros
AAR	: Association of American Railroad
OLF	: Factor de sobrecarga
DCF	: Factor de ciclo completo
VSI	: Inversor Fuente de Voltaje
SPWM	: Modulación Sinusoidal por Ancho de Pulso
SVM	: Modulación Mediante Vectores Espaciales
IGBT	: Transistor Bipolar de Puerta Aislada
RFG	: Función Generadora de Rampa
RMS	: Valor Efectivo de la Señal
MC	: Maquina de Cambio
PLC	: Controlador Lógico Programable



Capítulo 1. Descripción del Proceso de Extracción Minero

1.1 Introducción

El Teniente es hasta la fecha la mina de cobre subterránea más grande del mundo, se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas $34^{\circ}05'$ latitud Sur y $70^{\circ}27'$ longitud Oeste, a 50 kilómetros al Noreste de Rancagua, como se muestra en la *Fig. N° 1-1*, enclavada en la Cordillera de los Andes, a 2.100 metros en promedio de altura sobre el nivel del mar. Sus dimensiones fluctúan entre los 2.800 metros de largo por 1.900 metros de ancho, a una cota inferior actual (Teniente 8) de 1.983 metros y cota superior aproximada de 2.900 metros (Teniente 1).

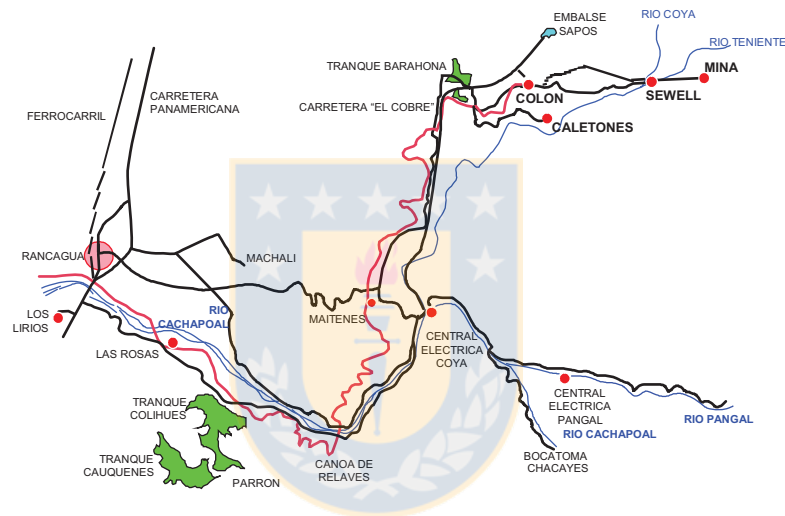


Fig. N° 1-1: Ubicación del Yacimiento.

Este yacimiento presenta una forma aproximadamente triangular en planta, alargada hacia el norte, donde está centrada en el pórfido Teniente y se extiende hacia el sureste dentro de la Diorita Sewell, su parte central corresponde a una zona de baja ley relacionada con la chimenea Braden.

El yacimiento está formado por dos zonas mineralizadas bien definidas, la primera de ellas la zona superior denominada roca de tipo secundaria, cercana a la superficie y de una alta ley de cobre donde la roca es relativamente blanda y de fácil fracturación. La otra zona inmediatamente por debajo de la superior se le conoce como roca primaria, la cual es una roca dura que se quiebra en grandes colpas, de menor ley que la secundaria y es la que actualmente se está explotando en la división.

Luego de la década del ochenta, se inicia la explotación de mineral primario, el cual obligó a modificar el método de explotación principalmente en el diseño del nivel de producción y traspaso, derivando en lo que actualmente se denomina *panel caving*

Este sistema de explotación implementa el hundimiento continuo de paneles con traspaso de mineral mecanizado. De esta forma la infraestructura minera cuenta con niveles de hundimiento, producción, acarreo y ventilación.

1.2 Proceso de Extracción

Se describe el proceso productivo al interior de la mina, para el cual existen los siguientes niveles productivos, como se muestra en la *Fig. No 1-2*.

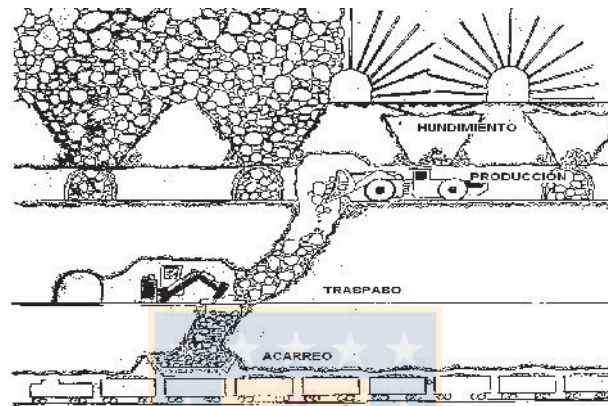


Fig. N° 1-2: Infraestructura de Extracción Minera.

1.1.1 Nivel de Hundimiento

Este nivel corresponde a aquel en que se produce la socavación y fracturación de la columna de mineral, lo que se logra mediante tronadura de las perforaciones de levante que se disponen en forma de abanico.

1.1.2 Nivel de Producción

Se sitúa aproximadamente por debajo de los 12 metros del nivel anterior, con el cual esta comunicado mediante piques que captan el mineral en forma de embudos proveniente del nivel de hundimiento. Entre el nivel de producción y de acarreo existen equipos que reducen el mineral cuando este es de sobre tamaño en lo que se puede denominar nivel de traspaso.

1.1.3 Nivel de Acarreo

En este nivel circula el ferrocarril, en cuyos carros se carga el mineral proveniente de los buzones de carguío, para ser transportado. Este yacimiento está compuesto de múltiples áreas de producción que tienen sus propios sistemas de acarreo, y que aportan finalmente al ferrocarril Teniente 8 que descarga su mineral en las plantas de chancado de Colón Alto.

Capítulo 2. Descripción del Equipo Ferroviario del Teniente

2.1 Introducción

El parque ferroviario del FFCC nivel Teniente 8 está compuesto por una serie de equipos con diferentes datas de tiempo. El actual equipo ferroviario del Teniente está constituido por trenes automatizados de alta tecnología, que están a cargo de la Unidad de Mantenimiento Ferroviario Teniente 8. Se compone entre otros de ocho locomotoras de producción de fabricación Alemana marca *SCHALKER EISENHÜTTE* fabricadas a partir del año 2000, en conjunto con una decenas de carros metaleros marca *CMS*.

Estos nuevos equipos llegaron con el plan de expansión de Teniente denominado *PDT* especificado en la gerencia mina a través del *ACT*, con ello se autoriza entre otros la compra de los equipos para aumentar la producción de *76.000 TPD* a *131.000 TPD*

La función del equipo ferroviario del nivel Teniente 8, es transportar el mineral desde el interior de la mina hasta los chancadores de mineral ubicados en Colón Alto, para ello cuenta con siete trenes equipados cada uno con una locomotora y dieciocho carros, los que acarrear el mineral a través de un único túnel que permite el ingreso y la salida de los trenes desde y hacia el interior de la mina.

2.2 Infraestructura Eléctrica Ferroviaria

La infraestructura eléctrica en corriente continua, suministra la energía necesaria para accionar los equipos ferroviarios del nivel Tte. 8. Esta se compone de subestaciones rectificadoras, de la catenaria del trolley, máquinas de cambio, señalización y de un riel conectado a tierra.

2.2.1 Subestaciones Rectificadoras

Las *SSEE* que proveen de energía continua al nivel son unidireccionales, es decir, sólo pueden transmitir la potencia en un solo sentido, desde el lado alterno al continuo, debido al puente de diodos que rectifica la señal alterna y produce una forma continua pulsatoria. De esta forma no es posible regenerar la energía en exceso hacia el sistema de media tensión de las subestaciones alimentadoras, ni tampoco controlar el nivel de voltaje de cada subestación. Es por ello que las locomotoras de producción *SCHALKE*, deben disipar la energía en exceso producto del frenado electrodinámico de los trenes.

La topología, generalizada mostrada en la *Fig. No 2-1*, esquematiza las subestaciones rectificadoras que alimentan de energía continua, a la catenaria del hilo del trolley para el consumo de energía de las locomotoras y equipos de servicio del nivel Tte. 8.

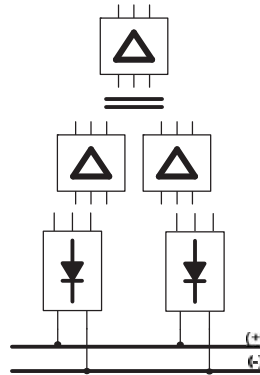


Fig. N° 2-1: Esquema Topológico General de las Subestaciones.

Cada subestación se compone de dos rectificadoras de 6 pulsos cada una conectada en paralelo, las que se alimentan de un primario en $13,8\text{ kV} - 50\text{Hz}$, el cual es posible conmutar entre las subestaciones alimentadoras “Cordillera” y “Reservas Norte”, energizando las siete rectificadoras del nivel, las cuales se ubican en Colón Alto e interior mina respectivamente.

2.2.2 Potencias Nominales de las S.S.E.E.

El esquema de las subestaciones se muestra en la *Fig. No 2-1*. En esta figura se aprecian los secundarios del transformador principal conectados ambos en delta a cada uno de las dos rectificadoras de 6 pulsos que componen una subestación, en donde cada pierna conectada respectivamente a las fases *R*, *S* y *T*, integra a 5 diodos de fase positiva y 5 diodos de fase negativa. De esta forma la barra positiva va conectada directamente a la catenaria del trolley, y la barra negativa de la rectificadora va conectada directamente al riel de la vía.

Existen diferencias entre ambas subestaciones, las que se identifican entre las potencias nominales de cada una. Así la *SSEE T8B* posee una potencia nominal de 4MW , proporcionada por cada rectificadora de 6 pulsos de 2MW cada una, entregando una corriente nominal de 6kA . De igual forma la *SSEE T8E*, posee una potencia nominal de 3MW , provista desde cada ramal de $1,5\text{MW}$ cada una, entregando una corriente nominal de 5kA . Ambas subestaciones entregan un voltaje nominal de 650 V_{DC} .

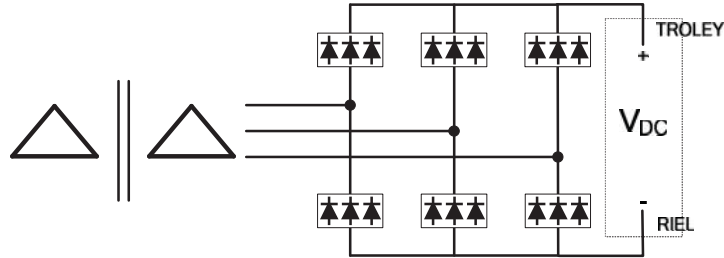


Fig. N° 2-2: Esquema de la Subestación

El esquema de la *Fig. No 2-2*, se repite en cada una de las subestaciones, diferenciándose únicamente en la potencia nominal de cada una de ellas. En la *Fig. N° 2-3* se presenta el sistema que alimenta de energía continua al nivel ferroviario Tte. 8.

Existen 7 Subestaciones Rectificadoras que alimentan de Potencia Continua al trolley de la vía férrea, respectivamente en dirección a la mina, se ubican como sigue:

- SSEE Rectificadora *T8C*, de *3.000 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8B*, de *4.000 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8E*, de *3.000 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8A*, de *3.000 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8D*, de *3.000 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8I*, de *1.500 KW*. de Potencia Nominal.
- SSEE Rectificadora *T8H1* y *T8H2*, de *1.000 KW*. de Potencia Nominal c/u.

Estas siete subestaciones aportan al sistema de continua una capacidad total de *18.5 MW* nominales para la vía férrea del FFCC Tte. 8

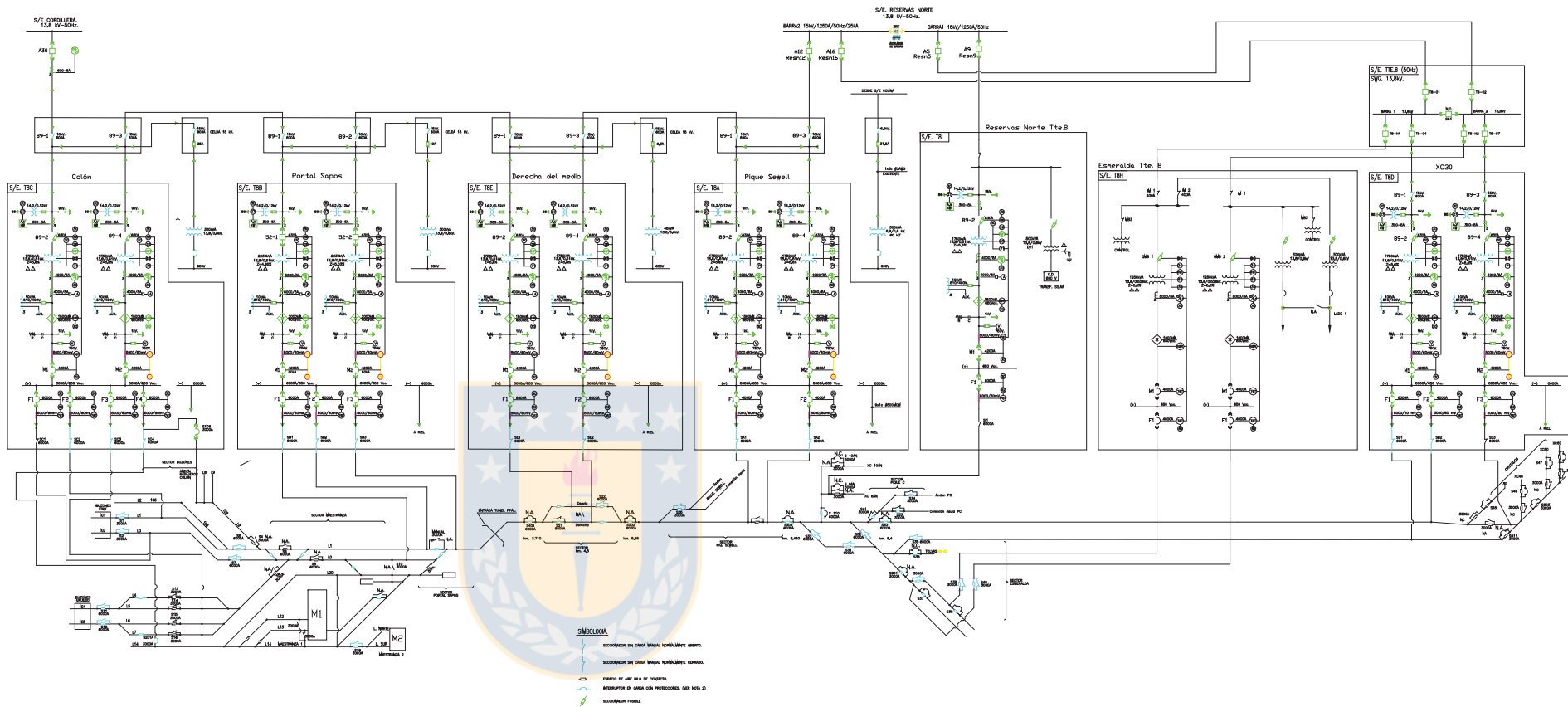


Fig. N° 2-3: Diagrama Unilineal de las SSEE Rectificadoras.

El convertidor estático que acciona la locomotora, individualizado de forma genérica, para cada uno de los cuatro convertidores a bordo de la locomotora se muestra en la *Fig. N° 2-4*.

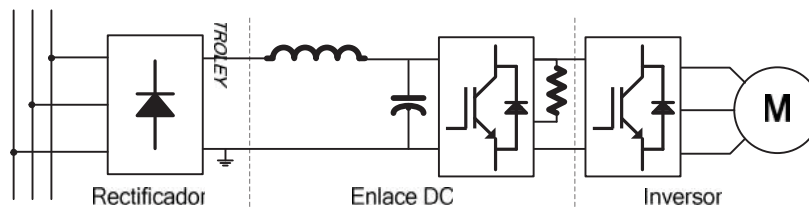


Fig. N° 2-4: Esquema del Accionamiento.

2.3 Locomotora de Producción SCHALKE 130 Ton.

La locomotora de producción SCHALKE del ferrocarril nivel Teniente 8, se utiliza para acarrear los carros metaleros que transportan el mineral. Esta puede efectuar su recorrido de forma autónoma, sin necesidad de pilotos que la comanden. Se compone de dos boogies en el cual cada uno posee dos paradas de ruedas, en cuya parada de rueda coexisten dos motores de tracción de 200 kW de potencia nominal, en una denominación del tipo B₀-B₀*. Esto genera una potencia nominal 1,6 MW para la tracción del tren completo y cargado.



Fig. N° 2-5: Locomotora de Producción SCHALKE 130 Ton.

De esta forma cada parada de rueda posee un accionamiento compuesto por dos inversores y dos chopper reductores

En la locomotora existen cuatro convertidores que alimentan a 8 motores de tracción, cada convertidor está conectado a un grupo de ocho resistencias de frenado por convertidor, las que finalmente forman un banco resistivo de 32 resistencias de frenado en la locomotora.

La locomotora posee en su interior un inductor que distribuye la corriente a cada uno de los convertidores, en los cuales existen condensadores de alta capacitancia que conforman el enlace DC de cada inversor, mostrado en la *Fig. N° 2-7*.

* Dos Boogies con dos ejes, motorizados cada uno.

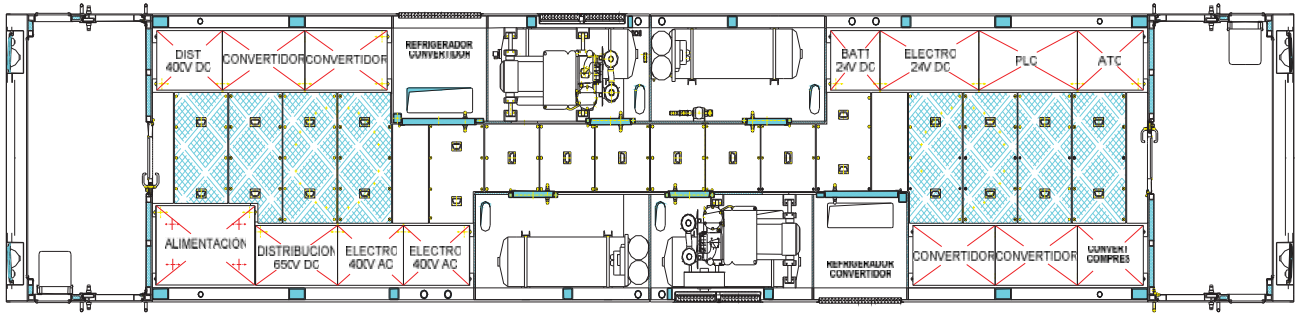


Fig. N° 2-6: Esquema del interior de la locomotora.

En la locomotora existen también otros componentes que están compuestos por los sistemas de alimentación y distribución, electrónica de potencia, control y comando, sistema neumático, sistema boogie, sistema de refrigeración y finalmente superestructura, como se puede apreciar en la *Fig. No 2-6*.

2.3.1 DC Link a bordo de la Locomotora

La *Fig. N° 2-7* muestra el circuito del enlace DC del accionamiento, que para el caso de las locomotoras está compuesto por un inductor y un condensador más un chopper reductor que es parte del inversor. El objetivo de este chopper de frenado es proteger al convertidor de alzas en el voltaje DC que haría sobre modular el inversor provocando la pérdida del control del accionamiento.

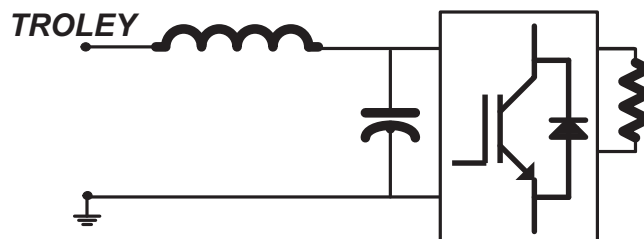


Fig. N° 2-7: Topología del Enlace DC

Este enlace es en definitiva el elemento que almacena e inyecta la energía que hace fluir la potencia, tanto para traccionar como para frenar el accionamiento según los requerimientos de carga y velocidad que requieren las locomotoras de producción SCHALKE. Los elementos que componen el enlace DC se describen a continuación.

2.3.1.1 Inductor de Enlace

El inductor limita las variaciones bruscas de corriente que para el caso de las locomotoras, se produce con la conexión o desconexión del pantógrafo con el hilo del trolley. En la locomotora existe un inductor de $2.2mH$, con una capacidad de almacenamiento de energía como fuente de corriente, y tiempo de descarga dada por:

$$E_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad \text{ec. 2-1}$$

$$\tau_L = \frac{R_{Loco}}{L} \quad \text{ec. 2-2}$$

De esta forma asumiendo un consumo de corriente DC cercano a los 1000 Amperes desde el trolley, la energía almacenada en la reactancia de la locomotora alcanza a los 1100 Ws ($0,31$ Wh). Las resistencias de frenado en conjunto para la locomotora, asumen tienen un valor de $0,2 \Omega$; por lo que el tiempo que demora el inductor en descargarse es de $90,9$ segundos.

2.3.1.2 Condensador de Enlace

El condensador limita las variaciones bruscas de voltaje que se producen por el cambio entre subestaciones rectificadoras, o en la regeneración durante el frenado. En el convertidor existen cuatro condensadores de $2.400 \mu F$ conectados en paralelo, lo que se traduce en $9.600 \mu F$ por cada uno de los cuatro convertidores presentes en la locomotora.

Así la capacidad de almacenamiento como fuente de voltaje, y su tiempo de descarga viene dado por:

$$E_C = \frac{1}{2} C \cdot V^2 \quad \text{Ec. 2-3}$$

$$\tau_C = R_{Conv} \cdot C \quad \text{Ec. 2-4}$$

De esta forma asumiendo un voltaje DC de 790 $Volt$ desde el trolley, la energía almacenada en los condensadores de un convertidor alcanza a los $2995,7$ Ws ($8,32$ Wh). Las resistencias de frenado en conjunto para un convertidor, tienen una impedancia de $0,8 \Omega$; por lo que el tiempo de descarga de los condensadores es de 7.68 milisegundos.

Donde para ambos elementos, se tiene

- C Es la capacitancia de los condensadores en Faradios
 L Es la Inductancia del Reactor en Henrios
 V Es el Voltaje entre los terminales de los condensadores en Volt
 I Es la corriente que circula por la inductancia en Amperes
 R_{Loco} Es la resistencia del banco resistivo de la Locomotora en Ohms
 R_{Conv} Es la resistencia del banco resistivo de un Convertidor en Ohms

2.3.1.3 Chopper Reductor de Frenado

Finalmente el chopper de frenado permite mantener un umbral apropiado para la correcta operación de los convertidores, y actúa en forma independiente del modo de operación del inversor. Activa la disipación de la energía en las resistencias de frenado según el parámetro $D0017$ que mide el voltaje del enlace DC, haciendo que la potencia excedida del enlace, fluya en forma de corriente hacia las resistencias de frenado generando con ello una reducción del nivel de tensión del enlace

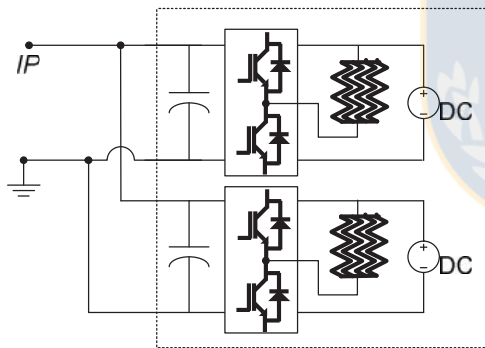


Fig. N° 2-8: Chopper de frenado del Convertidor
(combinado con Bloque IGBT)

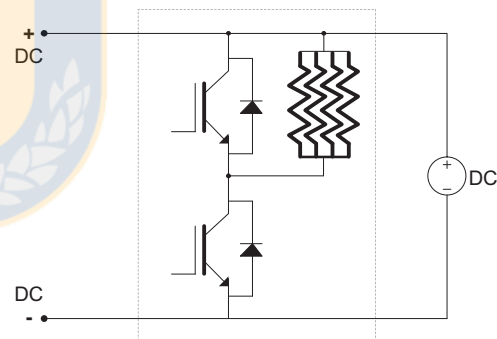


Fig. N° 2-9: Chopper de frenado
(Análisis de un sólo grupo de Resistencias)

2.2.1.3.1 Análisis de los estados del chopper de frenado

La operación del chopper reductor de frenado sigue la principal restricción del inversor fuente de voltaje integrado en el convertidor *RefuDrive* de las locomotoras, que no permite cortocircuitar el enlace DC, impidiendo que ambos switch de una misma pierna se encuentren cerrados en un mismo instante. La interacción del chopper con el accionamiento en el circuito intermedio se muestra en las *Fig. No 2-10* y *Fig. No 2-11*, donde se esquematizan los posibles estados en que puede operar este chopper.

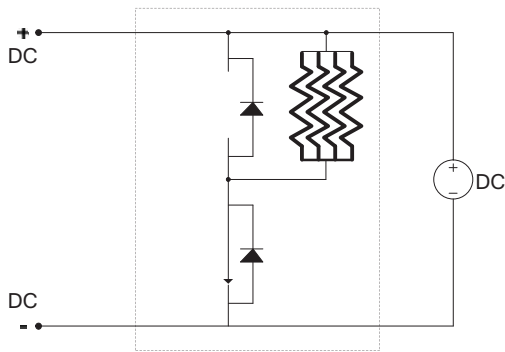


Fig. N° 2-10: Estado de Disipación

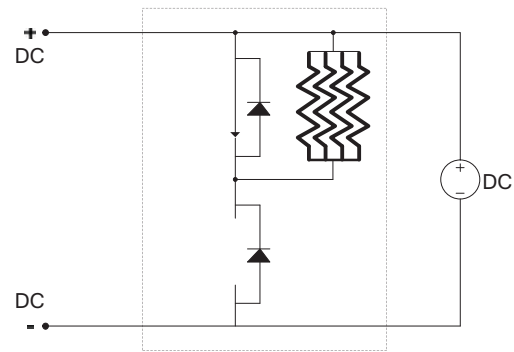


Fig. N° 2-11: Estado Transitorio

El estado mostrado en la figura *Fig. No 2-10*, muestra el estado válido para la inyección de la potencia a las resistencias de frenado, para ser disipada en el tiempo estimado en el control del chopper y quemar la potencia excedida en el circuito intermedio provocada por la regeneración de energía desde los motores. El estado mostrado en la figura *Fig. No 2-11*, en tanto muestra el estado en el cual el chopper no inyecta energía a las resistencias, de esta forma este estado se utiliza principalmente para suprimir transientes de voltaje que se generan por mala conexión del pantógrafo o por una brusca interrupción de la corriente en el inductor.

El chopper evalúa los niveles de potencia eléctrica del Enlace DC, para ello establece el rango normal de operación del enlace, el cual involucra la activación del chooper de frenado que inyecta la energía a las resistencias. Esta activación tiene como función mantener el nivel de potencial eléctrico de los condensadores del convertidor, dentro de un margen admisible, protegiendo los convertidores de posibles alzas del enlace DC. Esto se realiza a través de los parámetros integrados del *Firmware* de los convertidores de las locomotoras y los márgenes de activación están estipulados en el parámetro *P0095*, *P0097* y *P0098*. Estos umbrales corresponden respectivamente al parámetro de máxima tensión admisible del enlace, al parámetro de encendido y al de apagado del chopper. En base a esto, el chopper se activa cuando el voltaje en la barra DC sobrepasa los 790 Volts, en función al cuadro de histéresis mostrado en el control de activación de las resistencias de la *Fig. N° 2-22*.

2.3.1.4 Resistencias de Frenado.

Las resistencias de frenado se utilizan para disipar el exceso de energía almacenada en el enlace DC. De esta forma, del ciclo completo de operación de la locomotora, la activación del frenado es tan sólo una porción del ciclo total de trabajo.

En este intervalo, la correcta operación del frenado electrodinámico, depende del margen de utilización de dicho freno y de la carga en los intervalos de tiempo definidos.

2.2.1.4.1 Potencia y energía de las Resistencias de Frenado

La cantidad de potencia disipada por las placas de las resistencias de las locomotoras SCHALKE mostrada en la *Fig. No 2-12*, varía según su valor que va desde los $0,022 \Omega$ a los $5,6 \Omega$ con una potencia de $500W$ por cada placa. Para el caso de las resistencias de la locomotora, como la mostrada en la *Fig. No 2-13*, estas se componen de 21 placas conectadas en serie, de las cuales existen 9 parrillas SG 14 de 0.27Ω y 12 parrillas SG 15 de 0.33Ω , con una capacidad total de disipación de $10,5 kW$.

La capacidad de disipación de energía por resistencia de frenado depende del valor de resistencia eléctrica y de los tiempos de inyección de energía, la cual varía entre $50 kws$ y $70 kws$, para un aumento de temperatura de $400 \text{ }^\circ\text{C}$, según el tipo y la cantidad de parrillas disipadoras, dependiendo además del tiempo de activación de la inyección de corriente. Para el caso de la locomotora SCHALKE 130T, cada una de las parrillas resistivas posee una capacidad de disipación de $50 kWs$. Por lo tanto por cada resistencia se tiene un total de $1,05 MWS$, lo que se traduce en $8,4 MWS$ por convertidor. Finalmente la locomotora puede convertir una energía de $33,6 MWS$ en forma de calor, lo que define la capacidad de frenado electrodinámico de la locomotora.

La constante de tiempo térmica de la resistencia, asignada por el fabricante, varía de 100 a 140 segundo y depende de factores ambientales, tales como la presión, altura y temperatura.



Fig. N° 2-12: Placa o Parrilla SG

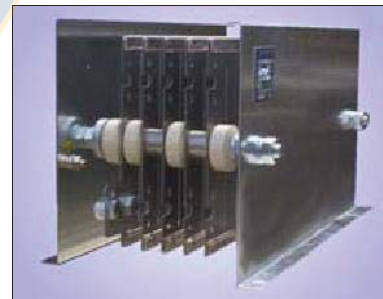


Fig. N° 2-13: Resistencia de Frenado

En la Etapa DC, para una Resistencia se tiene:

- Potencia Nominal Continua de Disipación de las Resistencias:

$$P_{NOM RESIST} = 10.5 kW$$

- Valor de Resistencia:

$$Valor Resistivo = 6.4 \Omega$$

- Corriente DC Continua de Disipación de las Resistencias:

$$I_{NOM CONTINUA RESIST} = \sqrt{\frac{P}{R}} = 40.5A$$

De la misma forma para un convertidor se tiene:

- Potencia Nominal Continua de Disipación de un Banco:

$$P_{NOM CONV} = 84 \text{ kW}$$

- Valor de Resistencia:

$$\text{Valor Resistivo} = 0.8 \Omega$$

- Corriente DC Continua de Disipación de las Resistencias:

$$I_{NOM CONTINUA CONV} = \sqrt{\frac{P}{R}} = 324.1 \text{ A}$$

Tabla 2-1: Especificación Nominal del Banco Resistivo.

	Resistencia	Grupo	Convertidor	Locomotora
Valor Resistivo	6.4 Ω	1.6 Ω	0.8 Ω	0.2 Ω
Corriente	1.28 A	162.0 A	324.2 A	1296.4 A
Potencia	10.5 kW	42 kW	84 kW	336 kW

Cabe mencionar que las corrientes que circulan desde cada uno de los convertidores hacia las resistencias de frenado durante un frenado electrodinámica son de 1296,4 A aproximadamente.

2.2.1.4.2 Grado de Sobrecarga de las Resistencias de Frenado.

Se especifica cómo calcular el factor de sobrecarga de disipación admisible (*OLF*), en función al ciclo de factor de disipación (*DCF*).

Este tipo de sobrecarga se estima según la proporción durante el cual la resistencia debe disipar la energía en exceso durante un ciclo de trabajo establecido.

El *DCF*, puede ser calculado como sigue:

$$DCF = \frac{\text{Switch on time } (t_{on})}{\text{Total cycle time } (T_{total})} \quad \text{ec. 2-5}$$

El *OLF* se obtiene de la curva establecida por el fabricante de las resistencias de frenado, mostrada en la Fig. N° 2-14, en función del ciclo total de disipación.

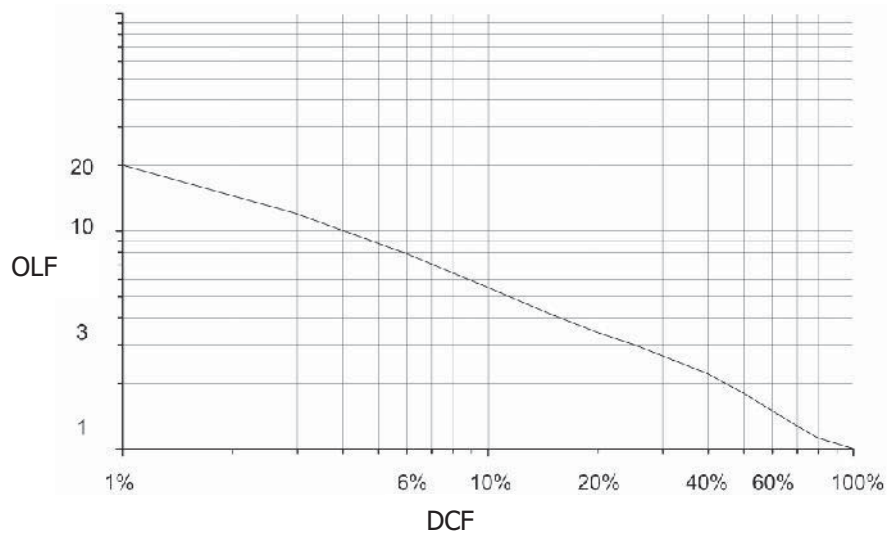


Fig. N° 2-14: Factor de Sobre carga de las Resistencias de Frenado.

Para determinar el grado de sobrecarga admisible por las resistencias de frenado, se analiza su holgura, con respecto al grado de sobrecarga permisible. Cabe mencionar que en este sentido no se especifica la disminución en los tiempos de activación sobre los márgenes de sobrecarga.

$$P_{\text{nominal}} = P_{\text{nominal continua}} \cdot OLF \quad \text{ec. 2-6}$$

- Para un *DCF* de 100%, el grado de sobrecarga u *OLF* es unitario, por tanto la potencia nominal de disipación alcanza los *84 kW* por convertidor, lo que equivale a *336 kW* para la locomotora.
- Para un *DCF* del 60%, el grado de sobrecarga u *OLF* es de 1.5 veces la potencia nominal, por tanto la potencia de disipación total alcanza los *126 kW* por convertidor lo que equivale a *504 kW* para la locomotora.
- Para un *DCF* del 40%, el grado de sobrecarga u *OLF* es de 2.2 veces la potencia nominal, por tanto la potencia de disipación total alcanza los *184.8 kW* por convertidor lo que equivale a *739.2 kW* para la locomotora.

En esta aplicación las resistencias no son cargadas continuamente, sino tan sólo en cortos períodos de operación, en especial cuando la locomotora se encuentra frenando y el nivel de voltaje del trolley aumenta y sobrepasa un umbral estipulado, el cual se especifica en 790 Volts para el encendido y en 760 Volts para el apagado.

2.2.1.4.3 Tiempo de Disipación de sobrecarga

El tiempo de disipación continua y el tiempo de disipación corto, en función de la sobrecarga, pueden ser calculados de la siguiente forma:

$$\text{Tiempo Disipación Continua} = \frac{\text{Tiempo Disipación Corto}}{OLF} \quad \text{ec. 2-7}$$

Este tiempo depende de la potencia inyectada, como además del factor de sobrecarga a la cual es sometida la disipación de potencia.

Según la gráfica de calentamiento de las resistencias, los tiempos son calculados en función a la sobrecarga. Así, dependiendo del uso y de los requerimientos de las locomotoras, se puede aumentar el margen de disipación continua de los resistores si estas aceptan mayores temperaturas, como es el caso de las locomotoras SCHALKE. En el siguiente la *Fig. N° 2-15* se muestra la dependencia de disipación continua.

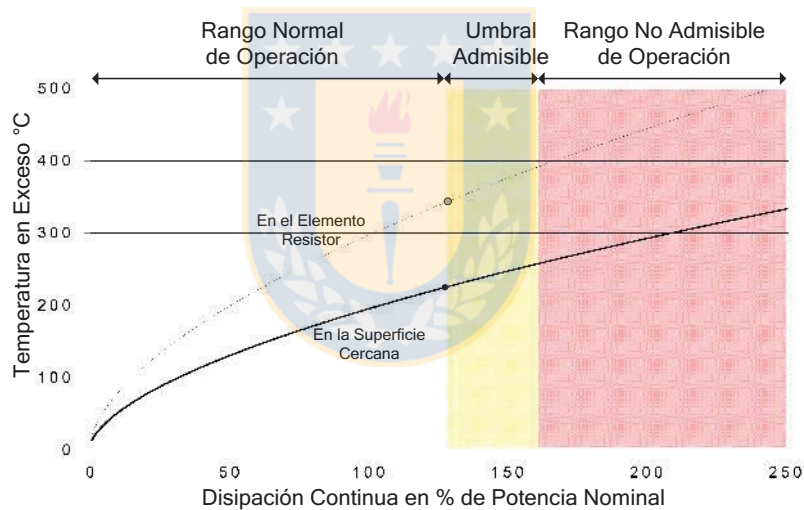


Fig. N° 2-15: Porcentaje de carga de las Resistencias de Frenado.

Para el caso de las resistencias de las locomotoras, si se permite un aumento de 160% de potencia continua, se tiene un delta de aumento de temperatura en la superficie de la resistencia de hasta 400 °C.

- Rango Normal de Operación.

De hasta un 130% de sobrecarga, recomendado para operación sin falla y de mayor vida útil.

- Umbral Admisible

Desde un 130% a un 160% de sobrecarga, mostrado en amarillo, es el rango admisible de operación, con mayor probabilidad de falla y deteriorada vida útil.

- Rango no Admisible de Operación

Mayor a un 160% de sobrecarga, mostrado en rojo. En este rango se produce la destrucción de las resistencias, por su deformación y pérdida de la aislación, además de un calentamiento excesivo en los equipos cercanos.

De los tiempos de activación, la temperatura en las resistencias alcanza el valor límite, según el tiempo disipación y la capacidad de potencia en porcentaje del valor nominal de disipación continua típica.

En las resistencias de frenado FRIZLEN FK ES3 incorporadas en los accionamientos de las locomotoras SCHALKE, la constante de tiempo definida para la operación en tiempo continuo es de 120 segundos, es decir a la potencia nominal de inyección la temperatura normal de operación sin exceso de calor se alcanza a este tiempo. Por tanto se puede disipar una mayor cantidad de energía en un menor tiempo hasta alcanzar la razón de porcentaje de temperatura en exceso admisible por las resistencias.

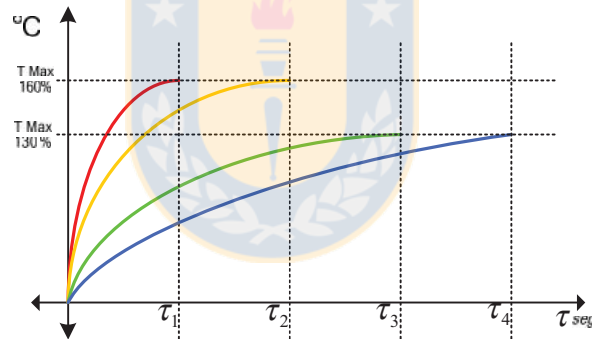


Fig. N° 2-16: Especificación de las Constantes de Tiempo.

2.2.1.4.4 Principio del Modelo del Monitoreo Térmico de las Resistencias

El informe de RefuDrive, muestra en el punto 5.3 estipula los tiempos e intervalos de activación de las resistencias de frenado, en función de la regulación de su monitoreo térmico.

Las resistencias se conectan a través del chooper mostrado en el capítulo anterior, el control y monitoreo se realiza a través del *Firmware* del convertidor RefuDrive. El esquema tanto del control eléctrico como térmico de las resistencias se muestra en la *Fig. No 2-17* y *Fig. No 2-18*.

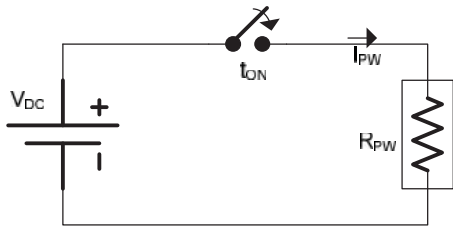


Fig. N° 2-17: Esquema eléctrico del control de las Resistencias

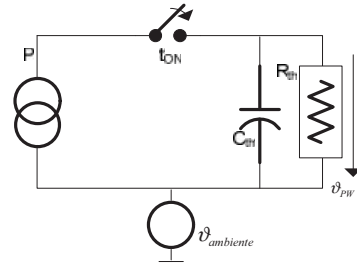


Fig. N° 2-18: Esquema térmico de las Resistencias

La temperatura de la resistencia es función de la potencia disipada y del tiempo que permanecen conectadas. De esta forma se tiene:

$$\vartheta_{PW} = \vartheta_{fin} \left(1 - e^{-\frac{t_{on}}{\tau}} \right) \tag{ec. 2-8}$$

Donde ϑ_{fin} es la temperatura teórica final de las resistencias. Así, cuando el interruptor ha estado mucho tiempo encendido la resistencia disipa una potencia dada por:

$$P = P_{max} = \frac{V_{DC}^2}{R_{PW}} \tag{ec. 2-9}$$

De esta forma si la resistencia alcanza la potencia de disipación continua, luego de un tiempo mayor a τ , lo que relativamente es bastante tiempo, la resistencia alcanza la temperatura máxima permitida ϑ_{MAX} , lo que se explica en la línea verde de la Fig. No 2-19. Así la constante de tiempo para el calentamiento se determina en función de los márgenes de potencias establecidos en la ec. 2-8, por lo que la temperatura final se comporta en forma proporcional a la resistencia.

$$\frac{P_{Max\ Permitido}}{P_{Disipación\ Continua}} = \frac{\vartheta_{final}}{\vartheta_{max}} \tag{ec. 2-10}$$

La constante de tiempo se determina cuando se conoce el tiempo en que la resistencia alcanza la máxima temperatura.

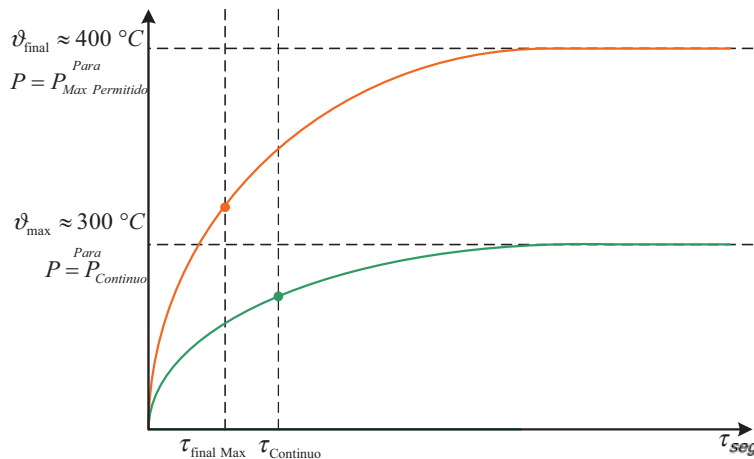


Fig. N° 2-19: Relación de calentamiento entre las resistencias

De esta forma al reemplazar en la ec. 2-9, $t = t_{final\ max}$ y despejando la constante de tiempo t se obtiene

$$\tau = -\frac{t_{final\ maxima}}{\ln\left(1 - \frac{\vartheta_{max}}{\vartheta_{final}}\right)} \quad ec. 2-11$$

Así al reemplazar en la ec. 2-11 la ec. 2-10 se obtiene la constante de tiempo teórica en función de las potencias.

$$\tau = -\frac{t_{final\ maxima}}{\ln\left(1 - \frac{P_{continua}}{P_{max\ permitida}}\right)} \quad ec. 2-12$$

La constante de tiempo determinada es ocupada en las instrucciones de configuración de los equipos, es así como aparece en el parámetro $P625$ del *firmware* de REFU. El propósito del cálculo de carga es determinar si la resistencia de frenado elegida es adecuada para el ciclo de frenado contemplado.

2.2.1.4.5 Cálculo de la potencia de frenado

Para desarrollar este cálculo es necesario una prueba de frenado, que para el caso del fabricante de las locomotoras SCHALKE está dado en la oferta N° 00.33.1030. De esta forma es posible estimar la potencia media de frenado P_{Bm} .

P_B	: Potencia de Frenado
P_{Bm}	: Potencia Media Promedio de Frenado
$P_{B\ MAX}$: Potencia de Frenado Máxima
t_B	: Tiempo de Carga de Frenado
t_P	: Tiempo de Pausa
T	: Constante de Tiempo de las Resistencias
P_{BWn}	: Potencia Nominal de las Resistencias de Frenado
$P_{BW\ MAX}$: Potencia Máxima Permitida
T_{BW}	: Constante Térmica Temporal de las Resistencias de Frenado

Para el caso típico, en donde el frenado se produce en tiempos fijos, y tomando en cuenta $P_B = P_{Bm}$, la potencia se puede calcular como sigue:

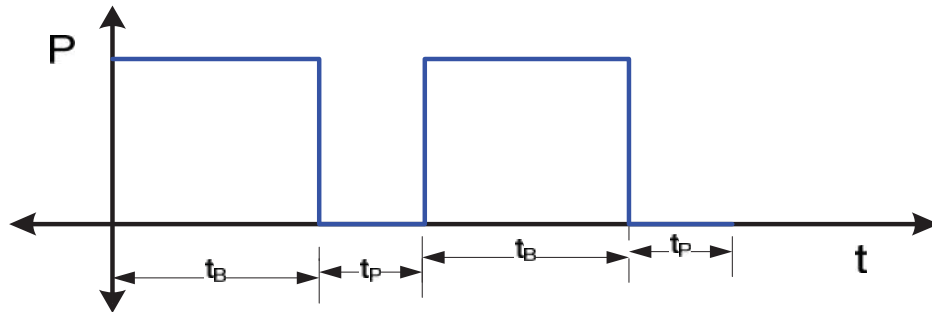


Fig. N° 2-20: Esquema de inyección de energía a las Resistencias

- **Para el Caso de Potencia Máxima de Frenado:**

$P_{B\text{ MAX}} > P_{BW\text{ MAX}}$: En este caso no se puede ejecutar el frenado con las resistencias de frenado.

Una condición básica es que la potencia máxima real no sea mayor que la potencia máxima permitida. En caso que esto no se cumpla hay que considerar otras resistencias de frenado externas.

$P_{B\text{ MAX}} \leq P_{BW\text{ MAX}}$: En este caso es posible el frenado con la potencia de las resistencias. Sin embargo deben respetarse las condiciones nominales de carga de las resistencias.

- **Para un Sobrepasso en la Potencia de Frenado Nominal:**

$P_{Bm} \leq P_{BWn}$: En este caso no se produce ninguna sobrecarga de las resistencias de frenado.

Si la potencia media de frenado es menor que la potencia nominal de las resistencias, entonces las resistencias no se sobrecargan en el largo plazo y no es necesario considerar unidades adicionales.

$P_{Bm} > P_{BWn}$: En este caso es necesario considerar otras pruebas térmicas sobre la carga de las resistencias de frenado, en donde se especifiquen las condiciones de trabajo de las resistencias.

- **Para los tiempos de Carga y de Pausa:**

$P_{Bm} > P_{BWn}$: En este caso se analiza el máximo tiempo de carga y el mínimo de pausa.

En el caso que la potencia media sea mayor a la nominal no se permitirá sobrepasar el tiempo de frenado más allá de un límite. Además para este caso debe existir un tiempo prudente de pausa para el enfriamiento, estos tiempos deben ser calculados en función de la sobrecarga permitida.

Los cambios en las temperaturas, en este caso, las variaciones térmicas de las resistencias se realizan mediante funciones exponenciales. Estas funciones están dadas según el modelo térmico de las resistencias y se determinan los coeficientes en función de la potencia requerida.

Los parámetros involucrados en los convertidores REFU de las locomotoras SCHLAKE 130T que definen la conexión de las resistencias de frenado son:

- Resistencia de Frenado R (Ω): Tabulado como parámetro estandarizado y leído desde el parámetro $P623$.
- Potencia Nominal P_{BWn} (kW): Tabulado como parámetro estandarizado y leído desde el parámetro $P624$.
- Constante Térmica Temporal de las Resistencias T_{BW} (s): Tabulado como parámetro estandarizado y leído desde el parámetro $P625$.

2.2.1.4.6 *Calentamiento de las Resistencias*

El tiempo máximo de carga de frenado debe depender de la potencia media de frenado, de la potencia nominal de la resistencia y de la constante térmica de la resistencia, de esta forma se tiene.

$$t_B \leq T_{BW} \cdot \left(-\ln \left(1 - \frac{P_{BWn}}{P_{Bm}} \right) \right) \quad ec. 2-13$$

El lapso de tiempo de frenado no debiese exceder el tiempo estipulado en la *ec. 2-13*.

2.2.1.4.7 *Enfriamiento de las Resistencias*

El enfriamiento se muestra como una función exponencial, la cual en la práctica se enfría después de cinco veces la constante de tiempo de la resistencia, es decir, luego de $5 T_{BW}$. Este tiempo se debe esperar en caso de usar el tiempo máximo de frenado y para el caso que el tiempo de carga sea menor al calculado, es posible reducir proporcionalmente el tiempo de pausas.

Bajo consideraciones del tiempo de carga, se estima el tiempo de pausa para el enfriamiento de las resistencias de las locomotoras en función de la potencia nominal de las resistencias y de la potencia media de frenado, de esta forma se tiene.

$$t_P \geq T_{BW} \cdot \left(- \ln \frac{P_{BWn}}{P_{Bm} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_B}{T_{BW}}} \right)} + 5 \right) \quad \text{ec. 2-14}$$

En el caso en que dentro del tiempo de pausa, en que se enfría la resistencia, se aplica otra carga de freno, sin que se alcance a enfriar lo suficiente las resistencias y se llegue a la temperatura máxima final, entonces el modelo térmico queda indeterminado y el sistema de control, desactiva el freno electrodinámico, anunciando un “BW Overload”.

2.2.1.4.8 Control de las Resistencias de Frenado

El control de la disipación de energía en las resistencias de frenado, está dado por el chooper de frenado conectado en el convertidor REFU compuesto dos IGBT por convertidor, controlados mediante el *firmware RD500*.

Interactúan en el control tres importantes características:

- Descarga del Enlace DC.
- Energía del Convertidor al actuar el frenado dinámico.
- Conexión de las Resistencias definidos según parámetros.

Dependiendo de la codificación y del estado de los parámetros del convertidor se evalúan las condiciones de encendido y apagado para los umbrales establecidos, los cuales siguen el esquema mostrado en la *Fig. N° 2-21*.

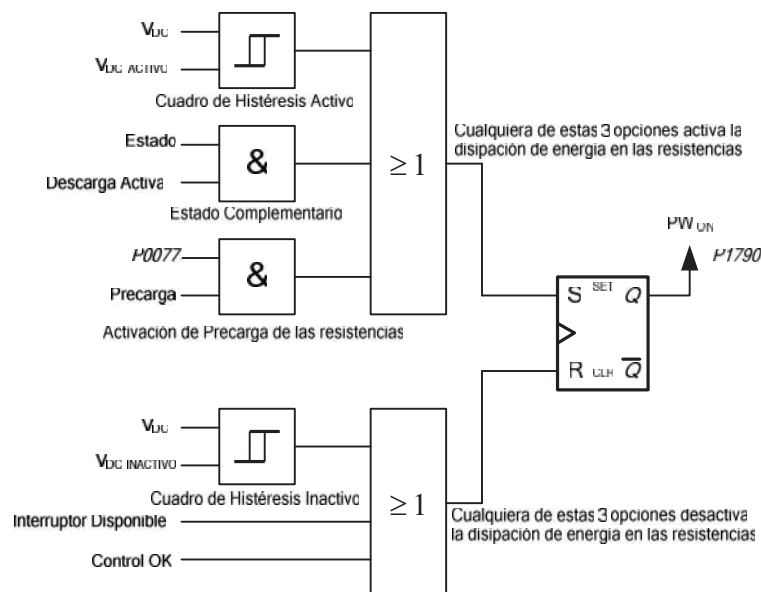


Fig. N° 2-21: Diagrama Lógico del Control de las Resistencias de Frenado.

El valor de $V_{DC \text{ umbral ON}}$ y $V_{DC \text{ umbral OFF}}$ son dependientes de la simulación de la temperatura de las resistencias, y los umbrales de voltaje que los activan están definidos en los parámetros $P 95$, $P97$ y $P98$.

Los valores absolutos de los umbrales de activación se muestran a continuación.

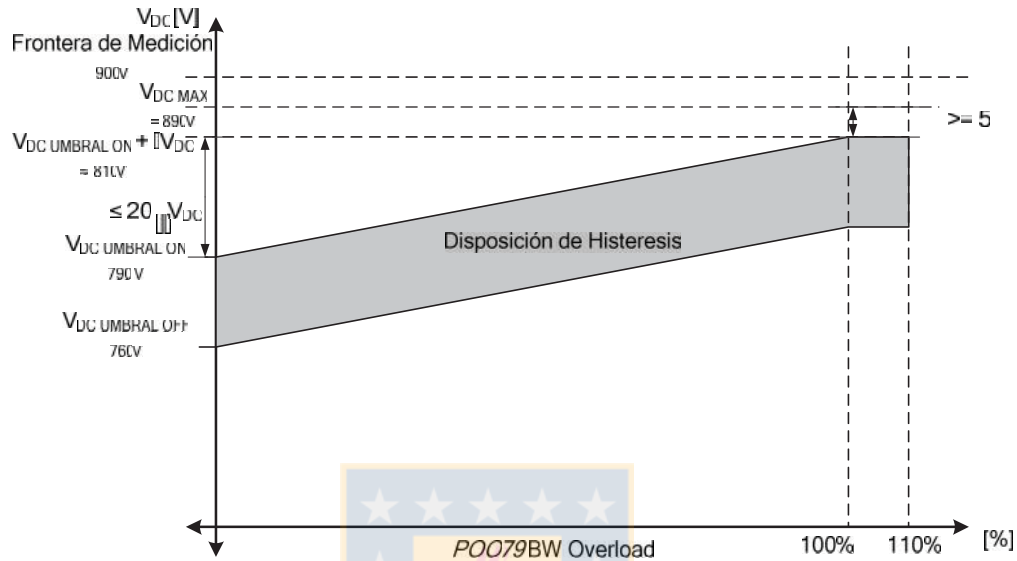


Fig. N° 2-22: Dependencia del Umbral de Potencial de las resistencias.

Para una alarma de sobre temperatura por sobrecarga, sigue una descarga del enlace DC, es decir, se activa la disipación de energía de las resistencias, únicamente cuando la temperatura de las resistencias no sobrepase el 130%, del valor nominal definidos como margen aceptable, esquematizado en la figura Fig. N° 2-15, en que se corta la disipación de energía y deja sin efecto el frenado electrodinámico, como una manera de protección a las resistencias de frenado. Esto sucede en los siguientes umbrales.

- $P97 (V_{DC \text{ MAX}} - V_{DC \text{ PW ON}}) = 890 - 100 = 790 \text{ Volt.}$
- $P98 (V_{DC \text{ MAX}} - V_{DC \text{ PW OFF}}) = 890 - 130 = 760 \text{ Volt.}$
- $P79 (BW_{\text{OVERLOAD}}) = 90 \% \text{ de } 440 \text{ } ^\circ\text{C}$

Para valores estándares, una codificación de los equipos es representada por los parámetros indicados anteriormente.

2.3.1.5 Banco de Resistencias de Frenado

Los bancos de resistencias de frenado de la locomotora, se utilizan como protección de los convertidores y están diseñadas para disipar el exceso de potencia almacenada en el enlace DC, producto del frenado electrodinámico de las locomotoras. Cada uno de los cuatro convertidores de la locomotora posee un grupo resistivo compuesto de 8 resistencias conectadas en paralelo.

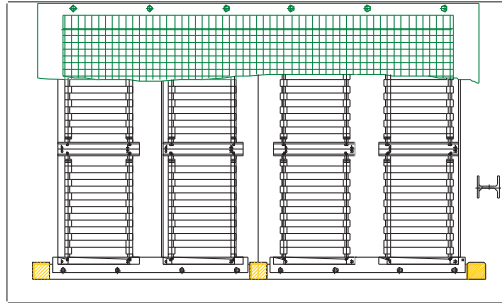


Fig. N° 2-23: Banco Resistivos de la Locomotora por Convertidor

Estas ocho resistencias como la *Fig. No 2-23*, deben disipar la potencia generada por dos motores acoplados a un convertidor, el cual posee dos inversores conectados en paralelo en cuya puerta DC se conectan dos grupos de cuatro resistencias cada uno, de esta forma transforman la energía cinética del movimiento de la locomotora en calor en el grupo de ocho resistencias del convertidor. Las resistencias de frenado están montadas en el techo de la locomotora, refrigeradas al ambiente y tienen una protección de sobre temperatura. La disposición sobre el techo de la locomotora, se muestra en la *Fig. No 2-24*, donde se aprecia la ubicación de los bancos resistivos según su convertidor.

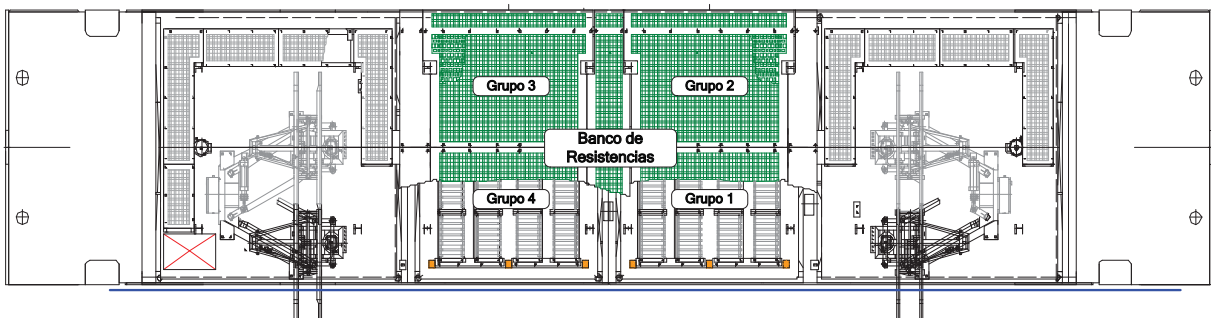


Fig. N° 2-24: Disposición de los Bancos Resistivos en el Techo de la Locomotora.

2.3.2 Sistema de Frenado de la Locomotora

La locomotora de producción SCHALKE tiene dos sistemas de frenado, que funcionan de manera independientemente.

2.3.2.1 Frenado Electrodinámico

El frenado electrodinámico, es el freno principal durante la travesía de la locomotora en la vía. Normalmente la locomotora se frena usando este tipo de freno. En esta condición, las resistencias de frenado disipan la energía eléctrica generada a partir de la energía cinética de la locomotora. De esta forma se limita el aumento de voltaje del enlace DC, que recibe la energía de los motores a través del inversor.

No existiendo la posibilidad de regeneración desde el trolley, la energía de frenado es automáticamente disipada en las resistencias. Estas están diseñadas de manera que la masa de la locomotora pueda ser frenada. Las resistencias de frenado están limitadas para absorber sólo la energía cinética de la locomotora. Los frenos de servicio operacional y de emergencia de los carros de un tren completamente cargado actúan en combinación con el sistema de frenos del tren.

El freno electrodinámico opera dentro de todo el rango velocidad de la locomotora. En caso de falla o sobrecarga de este freno, se desconecta y comienza a actuar el freno neumático de la locomotora. A medida que el freno electrodinámico está operando, la presión de aire del freno es bloqueada por lo que el frenado neumático, en este caso no se encuentra operativo.

El freno electrodinámico no se aplica en la eventualidad de un frenado de emergencia.

2.3.2.2 Frenado de Aire a Alta presión de la Locomotora.

Este segundo sistema Neumático de frenos es independiente y sólo es efectivo, en el caso de que el freno electrodinámico esté fuera de servicio. En este caso el aire a alta presión frena para mantener los ajustes con exactamente el mismo nivel de frenado que se tenía al momento en que el freno electrodinámico se desactiva. De esta forma no es posible superponer ambos sistemas de frenos.

El freno neumático tiene tres modos de funcionamiento: el frenado de servicio, el frenado de estacionamiento y el frenado de emergencia. El primer tipo de freno actúa en la locomotora siempre y cuando el freno electrodinámico no esté activado, y es operado directamente por aire a alta presión, el cual tiene efecto sobre los disco de freno de las ruedas en cada eje de la locomotora a través de un cilindro de aire y un par de balatas de freno, como se aprecia en la *Fig. N° 2-25*.

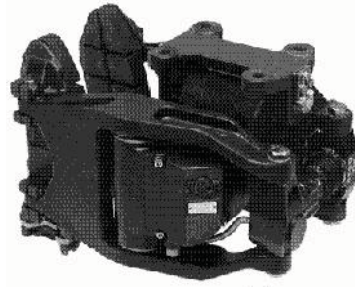


Fig. N° 2-25: Unidad de Mordazas del Freno Neumático de las Locomotoras

El freno de estacionamiento evacua el aire del acumulador de freno, por lo que el contacto de freno, presiona las balatas de freno de igual forma como lo hace para el freno de servicio. La fuerza de cierre del freno de estacionamiento es independiente de la fuerza de frenado del freno de servicio, aplicando con ello la presión total del freno de estacionamiento. Análogamente para deshabilitar el freno de estacionamiento, los cilindros inyectan aire al freno para soltar las balatas de freno, moviéndose nuevamente a la posición de afloje.

El freno de emergencia se activa en el caso de no existir aire a alta presión y es efectuado bajo un procedimiento de emergencia que bota el aire del cilindro de frenado aplicando de esta forma el frenado de emergencia.

2.4 Carros de Producción Metaleros

Los carros metaleros del ferrocarril nivel Teniente 8, tienen la función de transportar el mineral proveniente del interior de la mina, y depositar su contenido de manera segura y autónoma en los buzones de descargar ubicados en la planta de chancado. Este equipo posee un sistema llamado *TIC* que verifica la integridad de cada carro e informa a la locomotora la cantidad de carros que conforman el tren, de manera similar ejecuta el vaciado automático del mineral y verifica un posible descarrilamiento del convoy.

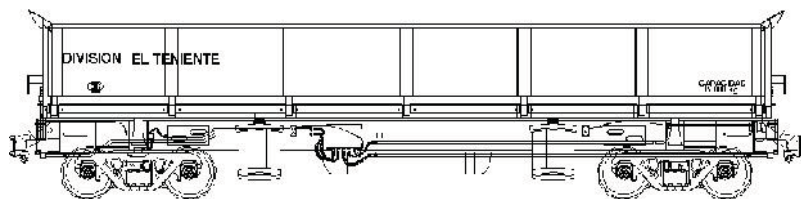


Fig. N° 2-26: Carro Metalero de 80 Toneladas

2.4.1 Sistema de Freno del Carro Metalero

El concepto teórico del frenado de los carros se basa en conseguir un trabajo resistente adicional a la periferia de ruedas, sin que la adherencia entre la rueda y el riel se pierdan.

En este sentido, el frenado máximo se logra en el punto cuando la rueda aún está rodando, en el instante anterior que empiece a deslizar.

La adherencia es el coeficiente de fricción entre la rueda y el riel. Si la fuerza de frenado es mayor que la adherencia entre la rueda y el riel, la rueda finalmente desliza sobre el riel.

El esquema de frenado de los carros, es como sigue

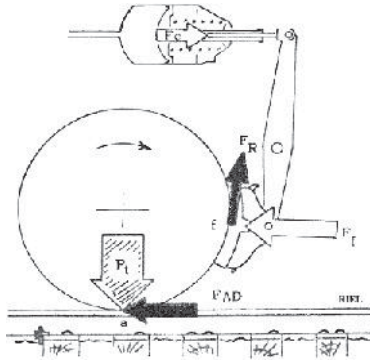


Fig. N° 2-27: Esquema Básico del Frenado de los Carros Metaleros

Donde:

- F_C Esfuerzo suministrado por el cilindro de freno
- F_F Esfuerzo ejercido por la zapata de freno
- f Coeficiente de fricción entre la zapata y la rueda
- F_R Esfuerzo de frenado [$F_F \times f$]
- P Peso ejercido por la rueda sobre el riel
- a Coeficiente de adherencia entre la rueda y el riel
- F_{AD} Esfuerzo de adherencia [$P \times a$]

El esfuerzo de frenado F_R es la fuerza que detiene la rueda y F_{AD} es el esfuerzo que la mantiene en rotación. Claramente si F_R es mayor a F_{AD} , la rueda se bloquea provocando un deslizamiento del carro.

El coeficiente de adherencia a es el esfuerzo máximo que se puede aplicar sin que la rueda deslice asumiendo un peso P en cada rueda, de esta forma el producto punto entre ambos debe ser mayor a la fuerza de aplicación del frenado en cada zapata.

De esta forma:

$$F_R \leq F_{AD} \quad \text{ec. 2-15}$$

O equivalente

$$F_R \leq P \times a \quad \text{ec. 2-16}$$

En base a las fuerzas asignadas a cada zapata de freno, se analiza el porcentaje de frenado (PF), que se define como el coeficiente entre la fuerza total ejercida por las zapatas de freno, por el peso del carro, expresado en porcentaje. De esta forma se tiene:

$$PF = \frac{F_F}{P}$$

ec. 2-17

La normativa AAR, expresa que cada carro debe contener dos porcentajes de freno, uno que contemple el peso del carro cargado y otro que contemple el peso del carro vacío como lo mostrado en el esquema de la *Fig. No 2-28*. La normativa especifica que un carro que utiliza zapatas de freno de alta fricción, el *PF* debe estar entre 8,5% y 13% para los carros cargados y el *PF* no debe exceder al 38% para el caso de los carros vacíos, a una presión del cilindro, para el inicio de frenado, sobre los 50 *psi* equivalentes a 3,5 *bar*.

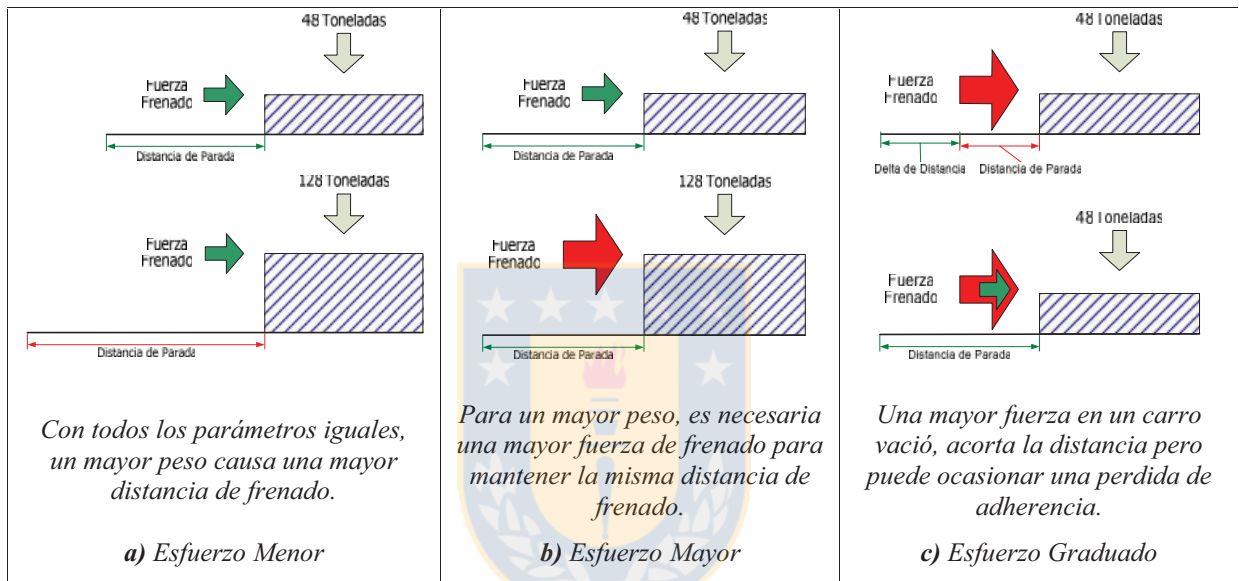


Fig. N° 2-28: Esquemas de Carga Efectiva.

Se aprecia que la fuerza real teórica se ejerce en los puntos de presión de la zapata de frenos de los carros, los cuales en un sistema regulado, donde la carga esta homogeneizada, la fuerza se ejerce esencialmente sobre los puntos *ABCD*, como mostrados en la *Fig. N° 2-29*.

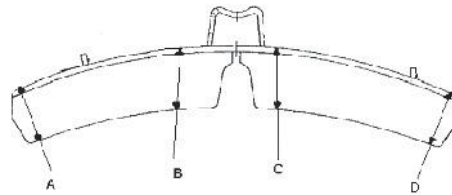


Fig. N° 2-29: Zapata de Freno de los Carros Metaleros (CAMES)

2.4.1.1 Frenado Mecánico de los Carros Metaleros

El frenado de los carros está comandado por una válvula de control neumática del tipo *ABDX*, que tiene la función de provocar la activación del frenado de los carros. El funcionamiento se basa principalmente en las diferencias de presiones que existen sobre ambas caras de la válvula.

De esta forma la locomotora alimenta con presión de aire a los depósitos de cada carro para que el émbolo de la válvula se mueva generando la fuerza de frenado del cilindro de freno, ejecutando un frenado de servicio o simplemente descarga la totalidad de aire aplicando un frenado de emergencia.

Esta válvula de control especifica que el tiempo de transmisión es de 10 segundos en un tren de 150 carros, que para el caso de los 18 carros metaleros del Tte. 8, es de 1,2 segundos. De igual forma para el caso del tiempo de aplicación del freno, estima el retardo en unos 55 segundos en un tren de 150 carros, que para el caso del FFCC Tte. 8 equivale a 6 segundos.



Capítulo 3. Teoría de los Accionamientos de la Locomotora

3.1 Introducción

Hacia fines de los años 70 toda la tracción de motores eléctricos era realizada con motores de corriente continua. Independiente del fabricante estos accionamientos existían hace más de 50 años y se mantenían en el mercado debido a la facilidad de controlar las variables de interés como lo son la velocidad y el torque. Sin embargo, este tipo de accionamiento presentaba grandes desventajas en relación a su homólogo la máquina de corriente alterna, como lo son la mantención intensiva y los altos costos asociados. No obstante el problema de los accionamientos en alterna era la dificultad de controlar las variables de interés ya mencionadas, en donde es necesario ajustar tanto el voltaje como la frecuencia, manteniendo un torque y una corriente controlada en función de la carga manejada. Por lo expuesto anteriormente a fines de los años 70, el desarrollo de la electrónica de potencia y junto con ello de los convertidores estáticos con nuevas estrategias de control permite la introducción a la industria de motores en alternas para tracción.

El accionamiento alterno de las locomotoras considerado en este trabajo tiene la capacidad de trabajar en los cuatro cuadrantes, traccionando la locomotora o devolviendo la energía en modo generador al enlace DC del circuito intermedio, presentando con ello un frenado regenerativo el cual se usa para reducir el desgaste de los frenos mecánicos del tren.

3.2 Análisis teórico de los accionamientos de la Locomotora

El tipo de accionamiento de las locomotora SCHALKE, es alimentado desde convertidores estáticos cuyo objetivo es producir una forma de onda alterna a partir de una fuente continua, este tipo de forma de onda se requiere para ajustar la velocidad y el torque aplicado a la máquina, de esta forma la amplitud frecuencia y fase debieran ser controlables

La forma de onda de la señal de salida en este caso una forma de voltaje no es sinusoidal.

En el caso de la aplicación de las locomotoras la energía del lado AC del inversor es enviada devuelta al lado DC, en el instante en que la locomotora se frena con lo que disminuye su velocidad, de esta forma la energía cinética del movimiento es enviada al enlace DC en lo que se conoce como modo regenerativo. Así si el capacitor es usado para mantener el voltaje del enlace DC, la energía debe ser disipada en el enlace DC.

3.2.1 Modelo del accionamiento de la locomotora

El siguiente esquema muestra los dos inversores trifásicos de dos niveles con sus respectivos chopper que se encuentran en el interior del gabinete de conversión de la locomotora.

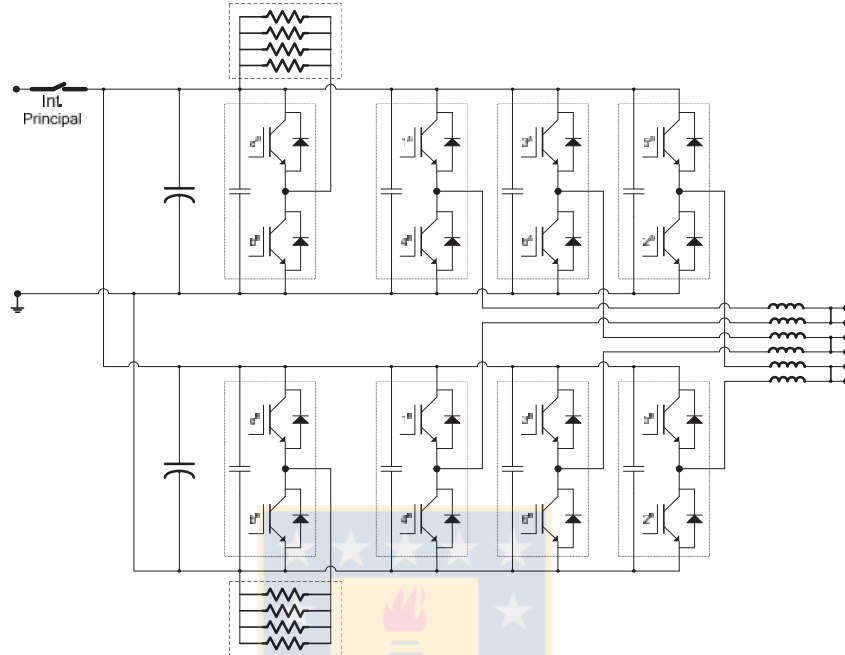


Fig. N° 3-1: Esquema de conexiones del convertidor de la Locomotora.

Cabe mencionar que el esquema del accionamiento dado por el fabricante REFU parte en detalle, luego del inductor principal de entrada, que está conectado en serie con la bajada de los pantógrafos de la locomotora, por tal motivo se puede mencionar que todo el enlace en continua se encuentra ubicado dentro de la locomotora.

3.2.1.1 Modelo funcional del Inversor Fuente de Voltaje

Se genera un modelo funcional del inversor fuente de voltaje de dos niveles, como uno de los dos que se encuentran al interior del gabinete del convertidor de tracción de la locomotora.

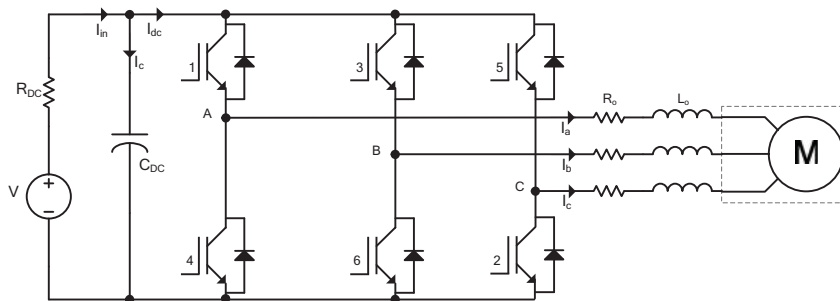


Fig. N° 3-2: Topología del Inversor.

Por Balance de Potencia instantánea, se tiene

$$P_I = P_O \quad \text{ec. 3-1}$$

$$V_{dc} \cdot I_{dc} = v_{ao} \cdot i_{ao} + v_{bo} \cdot i_{bo} + v_{co} \cdot i_{co} \quad \text{ec. 3-2}$$

Por Invarianza de potencia dividiendo por cada una de las variables de interés para encontrar la función de transferencia, se tiene

$$I_{dc} = \frac{v_{ao}}{V_{dc}} \cdot i_{ao} + \frac{v_{bo}}{V_{dc}} \cdot i_{bo} + \frac{v_{co}}{V_{dc}} \cdot i_{co} \quad \text{ec. 3-3}$$

$$V_{dc} = v_{ao} \cdot \frac{i_{ao}}{I_{dc}} + v_{bo} \cdot \frac{i_{bo}}{I_{dc}} + v_{co} \cdot \frac{i_{co}}{I_{dc}} \quad \text{ec. 3-4}$$

De esta manera de la ec. 3-3 se obtienen las ecuaciones que definen la corriente del inductor en ejes abc

$$I_{dc} = h_a \cdot i_{ao} + h_b \cdot i_{bo} + h_c \cdot i_{co} \quad \text{ec. 3-5}$$

$$I_{dc} = [h]_{abc}^T \cdot [i]_{abc} \Leftrightarrow [i]_{abc} = I_{dc} \cdot [h]_{abc} \quad \text{ec. 3-6}$$

De igual forma de la ec. 3-4 se obtienen las ecuaciones que definen el voltaje del inductor en ejes abc

$$V_{dc} = v_{ao} \cdot h_a + v_{bo} \cdot h_b + v_{co} \cdot h_c \quad \text{ec. 3-7}$$

$$V_{dc} = [v]_{abc} \cdot [h]_{abc}^T \Leftrightarrow [v]_{abc} = V_{dc} \cdot [h]_{abc} \quad \text{ec. 3-8}$$

De esta forma al evaluar el inductor con la técnica de modulación se genera la función de transferencia con la cual se puede integrar las partes continuas y alternas a partir del circuito equivalente mostrado en la Fig. N° 3-2, simplificando el modelo del motor como una carga RL .

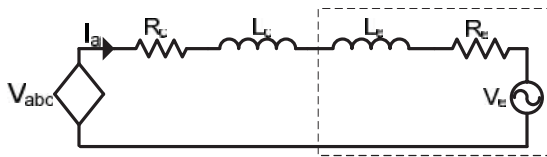


Fig. N° 3-3: Circuito Equivalente AC

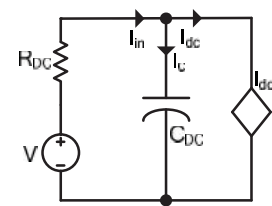


Fig. N° 3-4: Circuito Equivalente DC

Para el caso del Inversor Fuente de Voltaje, se tiene una función de transferencia descrita tan sólo por lo switch superiores, ya que los inferiores son los negados de los superiores, cumpliéndose con ello la restricción principal del VSI, que indica que no se deben producir corto circuitos en una misma pierna del inversor.

$$[\mathbf{H}] = \begin{bmatrix} h_a \\ h_b \\ h_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sw_1 \\ sw_3 \\ sw_5 \end{bmatrix} \quad ec. 3-9$$

Obtenida la F de T del inversor, se procede a evaluar el convertidor completo conmutando las variables de interés entre la puerta continua y alterna.

Así en la entrada del convertidor se tiene:

$$\frac{V_{dc} - V}{R_{dc}} = C_{dc} \frac{d}{dt} V_{dc} + I_{dc} \quad ec. 3-10$$

En la salida del convertidor se tiene:

$$v_o^{abc} = (L_o + L_e) \cdot \frac{d}{dt} i_o^{abc} + (R_o + R_e) \cdot i_o^{abc} + V_e^{abc} \quad ec. 3-11$$

Asumiendo una carga RL en el motor

- $R_L = R_o + R_e$
- $L_L = L_o + L_e$
- $\Delta V_o = V_o^{abc} - V_e^{abc}$

De esta forma las ecuaciones que permiten modelar el Inversor, se describen de la siguiente manera, obteniendo la siguiente matriz de estados.

$$\frac{\partial}{\partial t} i_o^{abc} = \frac{\Delta V_o^{abc}}{L_L} - \frac{R_L}{L_L} i_o^{abc} \quad ec. 3-12$$

$$\frac{\partial}{\partial t} V_{DC} = \frac{V_{DC} - V}{R_{DC} C_{DC}} - \frac{I_{DC}}{C_{DC}} \quad ec. 3-13$$

Con las Ecuaciones de estado del inversor, es posible modelar el sistema definiendo un sistema de entrada salida. Para ello se integra la modulación del sistema y se definen las variables de estado, las de entrada y la salida del sistema.

Integrando la modulación en ejes abc , el sistema descrito en las ecuaciones *ec. 3-12* y *ec. 3-13* queda definido por

$$\frac{\partial}{\partial t} i_o^{abc} = \frac{V_{DC} [h]_{abc}}{L_L} - \frac{R_L}{L_L} i_o^{abc} \quad ec. 3-14$$

$$\frac{\partial}{\partial t} V_{DC} = \frac{V_{DC} - V}{R_{DC} C_{DC}} - \frac{[h]_{abc}^T i_o^{abc}}{C_{DC}} \quad ec. 3-15$$

Las ec. 3-14 y ec. 3-15 corresponden a las ecuaciones de estado del convertidor expresadas en ejes trifásicos abc , donde i_o^{abc} , V_{DC} , son las ecuaciones de estado del inversor y las variables $[h]^{abc}$ y V_{DC} , son las entradas al sistema, en este caso solo la primera variable es manipulable por lo que la fuente de tensión continua se toma como una perturbación al sistema, y la salida es claramente el voltaje alterno entre líneas. En este caso la función de transferencia se utilizará para controlar el convertidor, ya que la referencia sinusoidal de la técnica de modulación mediante vectores espaciales, se considera igual a la salida y es por ello que ajustando la amplitud y la fase de la referencia se logra controlar las variables deseadas al modificarse la función de transferencia del inversor.

Se modela ahora el sistema en coordenadas $\alpha\beta$ en los ejes $dq0$. Esta técnica representa las variables de estado sinusoidales trifásicas de estado estacionario en variables de estado continuas bifásicas, entonces para obtener el vector de estados en ejes continuos, se utiliza la matriz de transformación de Park.

A partir de una transformación lineal variante en el tiempo

$$\mathbf{x}^{dq0} = \mathbf{T}_{abc-dq0} \cdot \mathbf{x}^{abc} \quad ec. 3-16$$

$$\mathbf{T}_{abc-dq0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 120^\circ) & \sin(\omega t - 240^\circ) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t - 240^\circ) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad ec. 3-17$$

Cabe mencionar que se supone que la carga se encuentra balanceada. Con este supuesto, la componente de secuencia cero de las variables de estado es simplemente cero.

De esta forma:

$$\frac{dT_{dq0 \rightarrow abc} x^{dq0}}{dt} = \frac{dT_{dq0 \rightarrow abc}}{dt} x^{dq0} + T_{dq0 \rightarrow abc} \frac{dx^{dq0}}{dt} = T_{dq0 \rightarrow abc} W x^{dq0} + T_{dq0 \rightarrow abc} \frac{dx^{dq0}}{dt}$$

Para una frecuencia ω constante, de donde W se define como:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad ec. 3-18$$

De esta forma al reemplazar la matriz ec. 3-18 y al realizar la transformación del vector de estados del sistema se tiene

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} i_o^d \\ i_o^q \\ V_{DC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \cdot i_o^q + \frac{1}{L_L} [V_{DC} h^d - R_L i_o^d] \\ -w \cdot i_o^d + \frac{1}{L_L} [V_{DC} h^q - R_L i_o^q] \\ \frac{1}{C_{DC}} \left[\frac{V_{DC} - V}{R_{DC}} - h^d i_o^d - h^q i_o^q \right] \end{bmatrix} \quad \text{ec. 3-19}$$

Con el sistema descrito en la matriz de ecuaciones de ec. 3-19, se puede simular y caracterizar el accionamiento mediante un sistema lineal, para lo cual se requiere de un estado estable para describir el sistema en su estado transiente.

De esta forma, se propone un sistema lineal continuo a partir de las ecuaciones anteriores, para linealizar es necesario tener un sistema de la forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})$$

Donde las funciones \mathbf{f} y \mathbf{h} son funciones vectoriales, \mathbf{x} es el vector de estados, \mathbf{u} el vector de entradas, \mathbf{p} el vector de perturbaciones, e \mathbf{y} es el vector de salidas del sistema. El sistema lineal resultante a partir del sistema no lineal anterior, puede expresarse como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{E}\Delta\mathbf{p}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u} + \mathbf{F}\Delta\mathbf{p}$$

Ahora definiendo adecuadamente las variables de estado, el sistema entrada - salida queda descrito por los estados $\mathbf{x} = [i_o^d \ i_o^q \ V_{DC}]^T$, la salida $\mathbf{y} = [i_o^d \ i_o^q]^T$, la entrada $\mathbf{u} = [h^d \ h^q]$, y la perturbación $\mathbf{p} = [V_{DC}]$.

Las matrices del sistema a linealizar, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , y \mathbf{D} se calculan como el Jacobiano de las funciones \mathbf{f} y \mathbf{h} respecto a las variables de estado o las entradas según sea el caso, evaluadas en el punto de operación. Es decir se tiene que:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}} \quad \mathbf{B} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}} \quad \mathbf{E} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}} \quad \mathbf{C} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}} \quad \mathbf{D} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}} \quad \mathbf{F} = \left. \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{p}} \right|_{\substack{\mathbf{x}_o \\ \mathbf{u}_o \\ \mathbf{p}_o}}$$

De esta forma, se tiene:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L_L} & w & \frac{h^d}{L_L} \\ -w & -\frac{R_L}{L_L} & \frac{h^q}{L_L} \\ \frac{1}{C_{DC}R_{DC}} & -\frac{h^d}{C_{DC}} & -\frac{h^q}{C_{DC}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{V_{DC}}{L_L} & 0 \\ 0 & \frac{V_{DC}}{L_L} \\ -\frac{i_o^d}{C_{DC}} & -\frac{i_o^q}{C_{DC}} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_{DC}R_{DC}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 1 \quad 0] \quad \mathbf{D} = [0 \quad 0] \quad \mathbf{F} = [0]$$

Con el sistema de ecuaciones descrito anteriormente, es posible modelar y simular el sistema de inversión de los convertidores del accionamiento de las locomotoras.

Este tipo de topología está compuesta por un filtro capacitivo en el lado DC y un filtro inductivo en el lado AC. El voltaje reflejado en el lado AC del inversor está referido a un neutro distinto de la referencia del voltaje DC de la barra negativa, por esta razón la ecuación dinámica de una fase alterna es:

$$v_{an} = L_o \frac{d}{dt} i_a + R_o i_a \quad ec. 3-20$$

Este voltaje v_{an} tiene una componente dependiente del estado de los switch y otra componente debida a la diferencia de voltaje entre la referencia del lado DC y la referencia del lado AC.

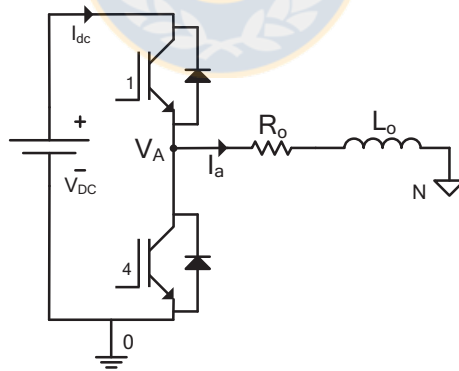


Fig. N° 3-5: Esquema de una fase del inversor

De esta forma el voltaje entre fase y neutro es:

$$v_{an} = v_{DC} h_a + v_{0N} \quad ec. 3-21$$

Es claro que los valores de la función de transferencia equivalen al valor del estado del switch superior, en este caso al sw_1 debido a que los voltajes del lado continuo están referidos a un punto cero en la parte negativa del DC link. Por esta razón, la función de transferencia del voltaje del convertidor esta expresada en función de los voltajes entre líneas.

Teniendo en cuenta una carga balanceada, se cumple que la suma de las corrientes es cero, de esta forma se tiene que:

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} = V_{DC}(h_a + h_b + h_c) + L_L \frac{\partial}{\partial t}(i_{oa} + i_{ob} + i_{oc}) + R_L(i_{oa} + i_{ob} + i_{oc}) + 3V_{N0}$$

Como se supone un sistema balanceado, la suma de las corrientes de línea es cero, así para calcular los voltajes de fase a neutro se reemplazan las funciones de transferencia del convertidor, para generar las tres fases obteniendo:

$$V_{N0} = -V_{DC} \frac{h_a + h_b + h_c}{3} \quad \text{ec. 3-22}$$

De esta forma aparece un tercer nivel en la medición de los voltajes de fase a neutro del inversor.

3.2.1.2 Tipo de Modulación de los VSI

La técnica de modulación usada en los accionamientos de las locomotoras, es la modulación mediante vectores espaciales. Esta es una mejora de la técnica de PWM sinusoidal aplicada tradicionalmente a inversores trifásicos, permite obtener mayor tensión eficaz de salida y optimiza el número de conmutaciones para reducir el contenido armónico y las pérdidas debido a la cantidad de veces que permutan los switch.

Esta Modulación aprovecha los ocho estados definidos en un VSI a través de las reglas de conmutación para cada uno de los estados de los voltajes y corrientes resultantes en ejes α y β . Esta representación vectorial corresponde a la transformación de variables trifásicas de entrada y/o de salidas al plano complejo a través de la transformada de Clark.

Mediante la función de transferencia del convertidor descrita en la ec. 3-9, se generan los estados de los switch, los que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3-1: Estados de Conmutación de un VSI

Estado #	FT [H] _{abc}			Estado Switch						Voltajes			Corriente
	h_a	h_b	h_c	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	v_{ab}	v_{bc}	v_{ca}	I_{dc}
1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	V_{dc}	0	$-V_{dc}$	i_a
2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	V_{dc}	$-V_{dc}$	$i_a + i_b$
3	0	1	0	0	1	1	1	0	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	0	i_b
4	0	1	1	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}$	0	V_{dc}	$i_b + i_c$
5	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}$	V_{dc}	i_c
6	1	0	1	1	0	0	0	1	1	V_{dc}	$-V_{dc}$	0	$i_a + i_c$
7	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
8	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	$i_a + i_b + i_c = 0$

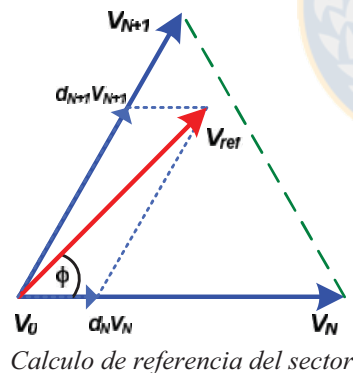
La idea es generar un voltaje de referencia que gire en el plano $\alpha\beta$ a la velocidad a la cual requiera el inversor. De esta forma se define un fasor que sintetiza la referencia sinusoidal por medio de los 8 estados discretos del inversor. Para ello se debe aplicar la transformada de Clark a la referencia trifásica y luego escoger la secuencia de estados del convertidor de manera que el valor medio del pulso aplicado sea igual al valor medio de la referencia en cada intervalo de muestreo. Respecto a los estados discretos del convertidor se puede decir que finalmente se traducen en 8 vectores en el plano bifásico de los cuales 2 son nulos, por lo que este plano se divide en 6 sectores diferentes, de modo que para la síntesis del vector de referencia se deben ocupar distintos estados según el sector en que se encuentre. Así la forma de calcular la longitud de los intervalos en que deben aplicarse los diferentes estados, se muestra a continuación.

Para sintetizar el vector de referencia

$$\int_0^{T_s} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \vec{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \vec{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} \vec{V}_0 dt \quad \text{Ec. 3-23}$$

Asumiendo V_{ref} constante en T_s

$$\vec{V}_{ref} \cdot T_s = \vec{V}_1 \cdot T_1 + \vec{V}_2 \cdot T_2 \quad \text{ec. 3-24}$$



$$d_N = \frac{T_N}{T_s} = M \sin(60 - \phi)$$

$$d_{N+1} = \frac{T_{N+1}}{T_s} = M \sin(\phi)$$

$$T_s = T_{N+1} T_N + T_0$$

Se lleva la función de transferencia a los ejes complejos bifásicos $\alpha\beta$ a través de la transformación de Clark, la cual origina.

$$[T]_{abc \rightarrow \alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

De esta forma, se tiene:

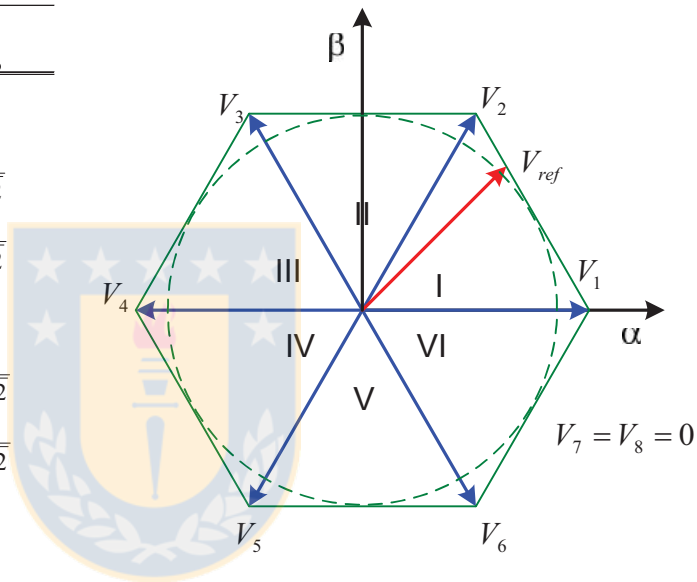
$$\begin{bmatrix} h_\alpha \\ h_\beta \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} h_a \\ h_b \\ h_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} h_\alpha \\ h_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \left(h_a - \frac{h_b}{2} - \frac{h_c}{2} \right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} (h_b - h_c) \end{bmatrix}$$

Ahora con el sistema descrito en plano bifásico, y con todas las variables eléctricas transformadas a valores continuos a través de la transformada de Clark, se genera la modulación de los semiconductores, que para el caso de las locomotoras son IGBT's.

Con esto se muestra una nueva tabla de estados, ahora en el plano complejo

Tabla 3-2: Estados de Conmutación de un VSI

Est. #	Switch On	FT [h] _{αβ}	
		h _α	h _β
1	1,2,6	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	0
2	1,2,3	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
3	2,3,4	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$
4	3,4,5	$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	0
5	4,5,6	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
6	5,6,1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$
7	1,3,5	0	0
8	4,6,2	0	0



Calculo del vector Aplicado

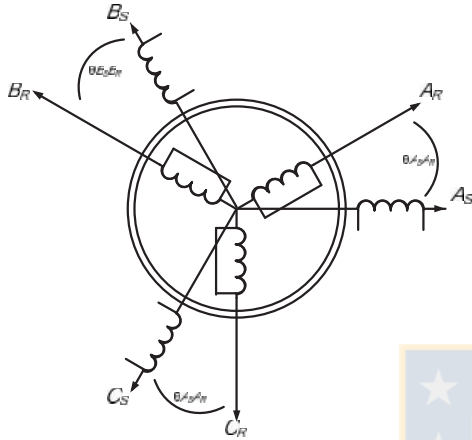
Cabe mencionar que si se pretende generar un sistema de tensiones en la que la frecuencia fundamental de la señal presente una forma más senoidal habrá que considerar más posiciones intermedias del vector de referencia entre los vectores de conmutación. Cuantas más posiciones intermedias pueda tomar el vector de referencia más se parecerá la señal generada a una señal senoidal. Por contra, los cálculos se multiplican conforme aumentan las posiciones intermedias

3.2.1.3 Modelo Fasorial del Accionamiento

El modelo del motor de inducción, se describe para generar el bloque de control, el cual para el caso de las locomotoras es el control vectorial o también denominado control por campo orientado. Para ello es necesario dejar expresado el modelo del motor en ejes constantes y continuos en el plano dq y las variables de rotor referidas al estator. El objetivo es mostrar el modelo de la máquina de inducción, en donde los devanados del rotor están cortocircuitados.

3.2.1.3.1 Ecuaciones Eléctricas del Motor

De esta forma considerando bobinados de estator y rotor simétricos y distribuidos en forma sinusoidal, se puede obtener un modelo simplificado de la máquina de inducción, empleando el modelo equivalente dq0 de dos bobinados dispuestos a 90° uno del otro. Se obtiene este modelo equivalente usando nuevamente la transformación de Park. De esta forma, las ecuaciones de voltaje resultantes son las siguientes:



Disposición de los devanados del motor.

$$[v_s]^{abc} = [R_s][i_s]^{abc} + \frac{\partial}{\partial t}[\lambda_s]^{abc}$$

$$[v_r]^{abc} = [R_r][i_r]^{abc} + \frac{\partial}{\partial t}[\lambda_r]^{abc}$$

Con

$$[\lambda_s]^{abc} = [L_{ss}][i_s]^{abc} + [L_{sr}][i_r]^{abc}$$

$$[\lambda_r]^{abc} = [L_{sr}][i_s]^{abc} + [L_{rr}][i_r]^{abc}$$

Ecuaciones del motor.

Los términos L_x son las inductancias de fuga, mutua y de magnetización del estator y del rotor respectivamente, las que dependen tanto del tiempo como del ángulo respectivo en el plano trifásico, y eventualmente tras la transformación al plano bifásico dependen tan sólo del ángulo respectivo entre el estator y rotor.

Así las ecuaciones eléctricas del modelo de la máquina, en ejes bifásicos son:

$$v_s^{dq0} = R_s i_s^{dq0} + \lambda_s^{dq0} \frac{\partial \theta_s}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_s^{dq0}}{\partial t} \quad ec. 3-25$$

$$v_r^{dq0} = R_r i_r^{dq0} + \lambda_r^{dq0} \frac{\partial \theta_r}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_r^{dq0}}{\partial t} \quad ec. 3-26$$

De esta forma, al referir las variables al estator y aplicando sucesivas transformadas se expresan las ecuaciones de voltaje de la máquina asincrónica, tomando en cuenta el operador p como la derivada con respecto al tiempo, la matriz es:

$$\begin{bmatrix} v_s^\alpha \\ v_s^\beta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_s & -w_1 \cdot L_s & p \cdot L_m & -w \cdot L_m \\ w_1 \cdot L_s & R_s + p \cdot L_s & w_1 \cdot L_s & p \cdot L_m \\ p \cdot L_m & -(w_1 - w_r) \cdot L_m & R_r + p \cdot L_r & -(w_1 - w_r) \cdot L_r \\ (w_1 - w_r) \cdot L_m & p \cdot L_m & (w_1 - w_r) \cdot L_r & R_r + p \cdot L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s^\alpha \\ i_s^\beta \\ i_r^\alpha \\ i_r^\beta \end{bmatrix} \quad ec. 3-27$$

3.2.1.3.2 Ecuaciones Mecánicas del Motor

En términos generales, la ecuación de torque surge de un análisis de energías de la interacción de los campos magnéticos, la que se expresa:

$$\vec{E}_{eléctrica} = \vec{E}_{perdidas} + \vec{E}_{flujo} + \vec{E}_{mecánica} \quad ec. 3-28$$

Finalmente la expresión del torque, queda definida como:

$$T_e = \frac{2}{3} \frac{P}{2} \frac{X_M}{DW_s} (\varphi_{qs} \varphi_{dr} - \varphi_{ds} \varphi_{qr}) \quad ec. 3-29$$

Con:

- p *Numero de Polos de la Maquina Asincrónica*
- X_M *Reactancia de Magnetización*
- D *Equivalente Inductivo de Fuga, Rotor y del Estator*
- W_s *Velocidad Sincrónica del eje de la maquina*

De esta forma, con las principales ecuaciones descritas y expresando el sistema en función de las variables dependientes, en este caso el flujo de estator es posible modelar un motor asincrónico, y controlar este sistema, en función del voltaje, flujo y corrientes de estator.

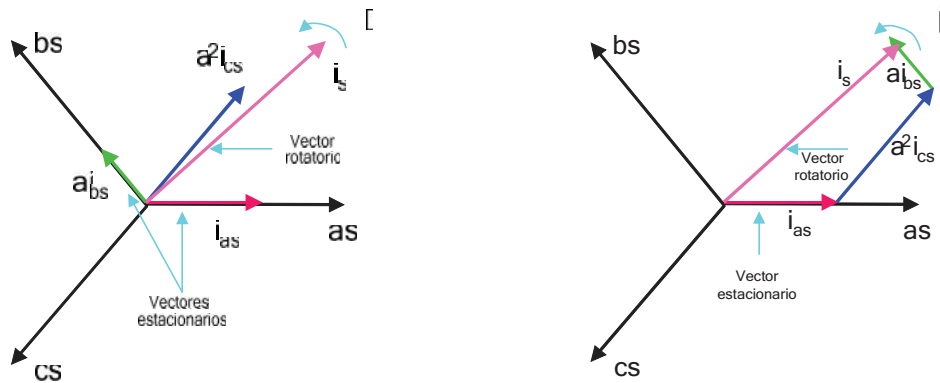
3.2.1.3.3 Control por Campo Orientado del Motor de Inducción

En los accionamientos de motores de corriente alterna no existe un desacoplamiento de las variables de interés de forma intrínseca, como lo es en el caso de las maquinas de corriente continua, es decir, entre el flujo y el torque. El desacoplo se puede lograr separando las corrientes de estator, lo que se traduce en que la corriente de componente directa i_s^d sea la que produzca el campo y la corriente de componente en cuadratura i_s^q la que produce el torque, siendo la corriente de cuadratura controlada por el torque demandado.

En el caso de los accionamientos de las locomotoras de tracción del Teniente 8, el método de control de campo orientado, es el indirecto, para el cual determina el flujo y su posición relativa por medio de los valores de voltaje, corriente y posición.

La aplicación de una estrategia de control lineal en el caso de los MCA no permite obtener un alto desempeño, pues una apropiada descripción de su comportamiento implica incluir significativas no linealidades en el modelo. Sin embargo, aplicando una adecuada transformación no lineal, es posible obtener un modelo más conveniente para aplicar estrategias de control similares a las de las máquinas de corriente continua.

Para representar estos vectores referidos al estator se deben escribir en el plano complejo, como sigue:



Transformación de Ejes.

Generación del Vector Rotatorio.

De esta forma las ecuaciones de interés se escriben en el plano complejo, de la siguiente manera:

$$i_s = \frac{2}{3}(i_a + a \cdot i_b + a^2 \cdot i_c) \quad v_s = \frac{2}{3}(v_a + a \cdot v_b + a^2 \cdot v_c) \quad \psi_s = \frac{2}{3}(\psi_a + a \cdot \psi_b + a^2 \cdot \psi_c)$$

Donde $a = e^{j\theta}$

El método incluye los siguientes puntos:

- El vector de flujo de rotor referido ψ_R esté completamente sobre el eje real, con ello se asegura que la componente en cuadratura del flujo ψ_R^q es cero y la componente directa ψ_R^d , sea igual al valor del flujo del rotor.
- Se debe mantener constante el flujo de manera que el torque sea proporcional a la corriente en el eje de cuadratura i_s^q , con lo que se tiene un equivalente a la ecuación de torque de la máquina de corriente continua.

De esta forma la ecuación del torque definida en la *ec. 3-29* queda como:

$$T_e = k\psi_R^d \cdot i_s^q \quad \text{ec. 3-30}$$

De las ecuaciones de voltaje y del flujo enlazado de *ec. 3-25*, se tiene:

$$v_s = R_s i_s + \frac{\partial}{\partial t} \psi_s + j\omega \psi_s \quad \text{ec. 3-31}$$

$$v_r = R_r i_r + \frac{\partial}{\partial t} \psi_r + j\omega \psi_r \quad \text{ec. 3-32}$$

Como el voltaje en el rotor es cero, ya que los devanados están cortocircuitados, por lo que se tiene:

$$v_s = R_s i_s + \frac{\partial}{\partial t} \psi_s + j\omega \psi_s \quad \text{ec. 3-33}$$

$$0 = R_r i_r + \frac{\partial}{\partial t} \psi_r + j\omega \psi_r \quad \text{ec. 3-34}$$

Como se mencionó el control vectorial es conocido por desacoplar los vectores y generar un control similar al de los accionamientos DC. Esta técnica puede ser clasificada como método indirecto o feedforward y método directo o feedback, dependiendo de la forma de obtención del vector rotatorio del flujo.

En el caso de los accionamientos de las locomotoras, este vector se obtiene de la estimación del flujo del estator, es decir por el método indirecto, a través de las corrientes de componentes directas y en cuadratura, como además del voltaje entre líneas de los terminales del estator.

Blaschke demostró que reduciendo la dinámica de control, se logra definir un vector de variación de tiempo que corresponde a la onda de flujo sinusoidal moviéndose en el entrehierro del motor, lo que se traduce en lo mencionado anteriormente, es decir, en que sólo la componente de cuadratura contribuye al torque y el flujo sólo es afectado por la componente directa de la corriente de estator. De esta forma, la corriente de estator se define en un marco de referencia determinado por el vector de tiempo variable en coordenadas bifásicas, por lo que se asigna a la componente directa de la corriente de estator a la corriente de campo y a la componente en cuadratura de la corriente de estator a la corriente de armadura de un motor de continua.

En los esquemas del método indirecto se emplea, como es el caso de los accionamientos de las locomotoras, un encoder de gran exactitud que censa su posición relativa, con que se determina la posición del rotor y con ello el vector espacial de flujo.

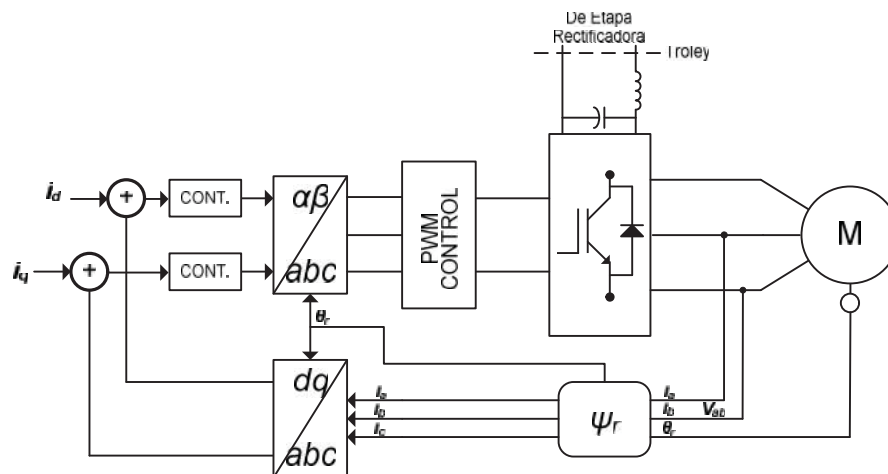


Fig. N° 3-6: Diagrama en Bloques del control FeedForward.

En este diagrama, tal cual se expresa en los esquemas de los accionamientos de las locomotoras, el flujo se estima mediante la realimentación de las variables eléctricas la cual está parametrizada linealmente por el fabricante de los accionamientos *REFU DRIVE*.

3.2.2 Freno Regenerativo en Motores Asíncrónicos

En general el frenado eléctrico lleva al motor a una velocidad menor o al reposo, absorbiendo la energía cinética de las partes móviles del motor, esto se explica de la siguiente manera.

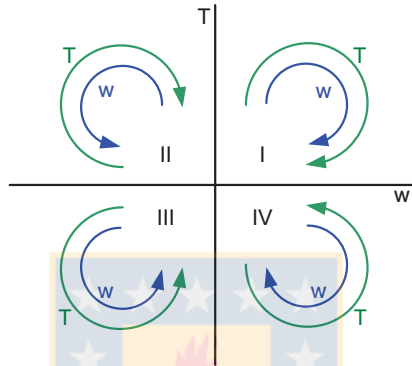


Fig. N° 3-7: Cuadrantes de Operación de un Motor Asíncrono

El primer cuadrante se refiere a la operación normal del motor girando en sentido horario, es decir, traccionando la carga. En el cuarto cuadrante el sistema mecánico demanda un torque negativo de tal forma de proveer un frenado, de esta forma el motor opera como generador convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

Durante la ejecución del frenado, cuando el rotor gira en la misma dirección del campo magnético pero con una velocidad mayor que la sincrónica el deslizamiento y el torque se vuelven negativos, de tal forma que el punto de operación queda establecido por la magnitud del torque de la carga y de la naturaleza de la curva torque velocidad como la mostrada en la *Fig. No 3-8*.

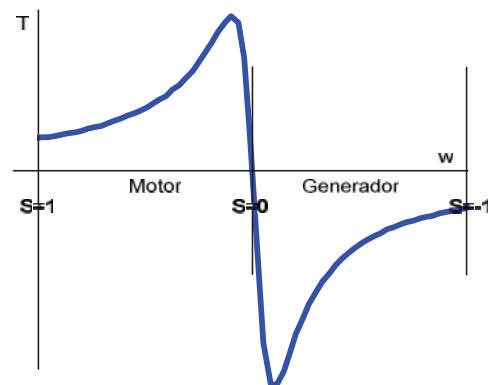


Fig. N° 3-8: Curva Característica Torque Velocidad de un motor asíncrono.

La curva Torque Velocidad del motor de inducción trabajando en los cuatro cuadrantes se muestra en la *Fig. N° 3-9*.

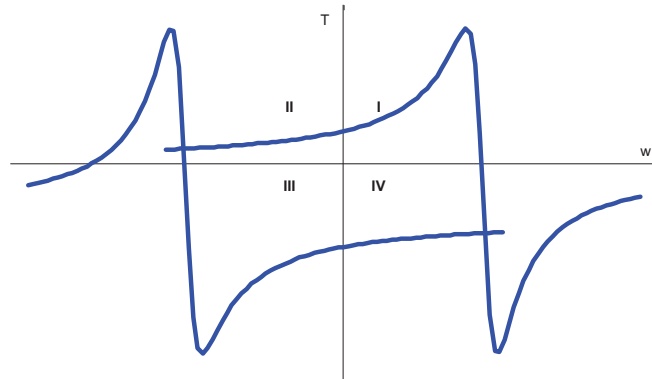


Fig. N° 3-9: Diagrama Torque Velocidad para operación en los cuatro Cuadrantes

De esta forma se aprecia la operación del accionamiento tanto en modo tracción como en modo generador para ambos sentidos de desplazamiento de la locomotora.

$$s = \frac{w_s - \frac{P}{2} w_m}{w_s}$$

ec. 3-35

Mediante la ecuación *ec. 3-35*, que define el deslizamiento en un motor asíncrono, asumiendo un motor de dos polos, se puede entender la operación del motor en los cuatro cuadrantes. De esta forma se analiza ahora un accionamiento con un convertidor estático que provee voltaje y frecuencia variable, asumiendo un flujo magnético constante, se extienden las curvas antes mostradas más allá de las velocidades sincrónicas y mecánicas, ejemplificándose de mejor forma el frenado.

Se considera que el motor está inicialmente operando con una frecuencia de estator f_0 y con una velocidad de rotor w_{m0} por debajo de la velocidad sincrónica w_{s0} , ahora si la frecuencia de estator disminuye a f_1 , la nueva velocidad sincrónica será w_{s1} , el deslizamiento del motor se vuelve negativo, luego el torque se vuelve negativo, este torque negativo provoca que la velocidad del motor disminuya y que parte de la energía cinética de la carga sea regenerada y devuelta a la fuente conectada al estator, en este caso el convertidor estático que inyecta la energía al enlace DC.

El convertidor es quien controla la velocidad con que se mueve la carga reduciéndola o aumentándola según sea la necesidad. Sin embargo, esta puede variar restringiendo el valor nominal de la corriente que circulará por el convertidor.

En este caso se analiza el accionamiento para un sentido de giro, es decir, el motor tracciona y frena en un mismo sentido de giro de los ejes de las locomotoras.

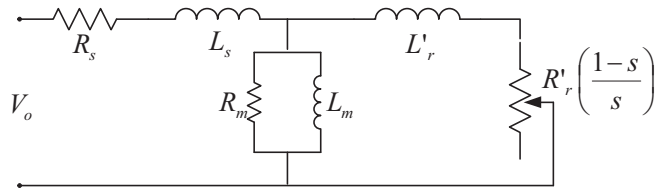


Fig. N° 3-10: Esquema de una fase del motor

Se presenta un diagrama fasorial para entender de mejor forma la interacción del frenado electrodinámico con el sistema convertidor motor, se muestra una representación del motor, con un modelo simplificado de una fase de este, se asume como carga el equivalente RL de dicha fase.

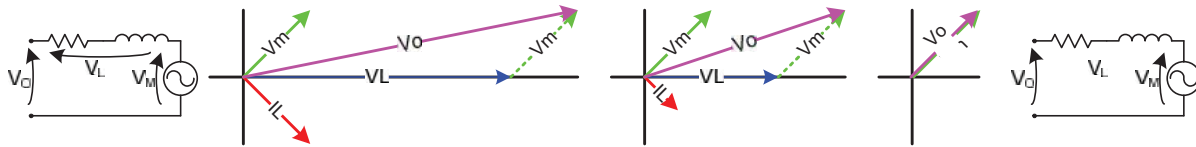


Fig. N° 3-11: Esquema de tracción.

La Fig. No 3-11 muestra la aplicación del frenado regenerativo, en ella el motor cambia de cuadrante, reduciendo la corriente que se inyecta a la carga, así la caída de tensión en las bobinas del estator se iguala al voltaje aplicado desde el convertidor.

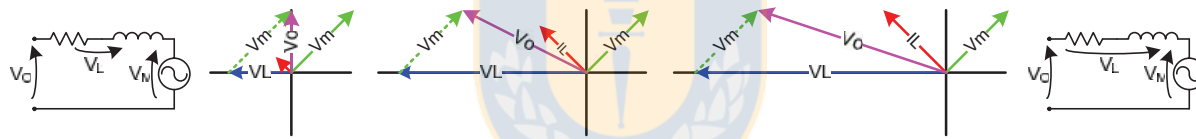


Fig. N° 3-12: Esquema de frenado.

En el instante cuando el voltaje aplicado a las bobinas de estator es igual al voltaje que posee la máquina, se invierte el sentido de la corriente circulante por la carga mostrada en la Fig. No 3-12 y es aquí donde se produce la regeneración electrodinámica.

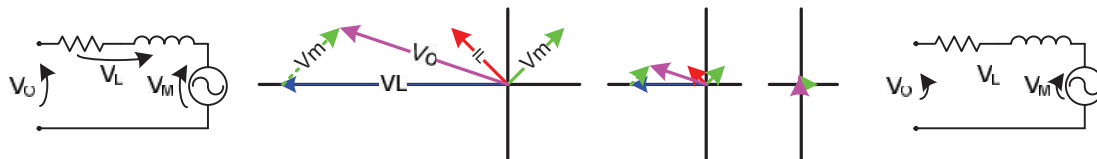


Fig. N° 3-13: Esquema de detención.

Finalmente como muestra la Fig. No 3-13, cuando la fuente generadora de la máquina entrega toda su energía en el flujo de corriente de forma controlada no sobrepasando los valores nominales del motor y del convertidor, el rotor del motor se detiene.

3.2.3 Simulación del Inversor del Accionamiento

El sistema a modelar, se puede analizar matemáticamente mediante la simulación en “*Matlab*” de las variables de estado especificadas en la *ec. 3-19*. De esta forma es posible obtener un análisis en lazo abierto, para una referencia de velocidad fija, y torque de carga constante. Sin embargo, la simulación del inversor se realiza mediante “*PSIM*” con una frecuencia de la portadora arbitraria y un índice de modulación fijo dada por SPWM.

Cabe señalar que la topología estudiada es la mostrada en la *Fig. N° 3-2*, por lo que en la simulación efectuada se especifica una fuente de voltaje ideal sin ripple y se asume una carga inductiva resistiva sin fuente regenerativa, lo que da origen a un análisis del convertido en tan solo uno de los cuatro cuadrantes de operación de la máquina.

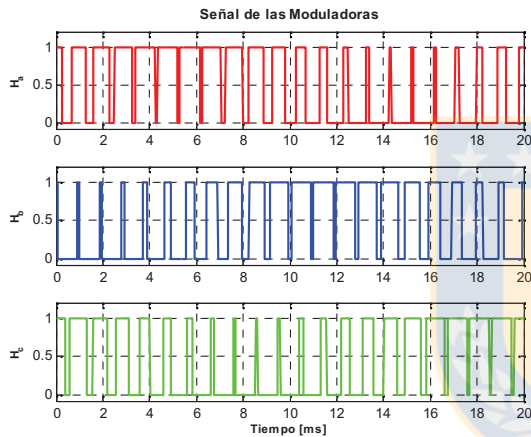


Fig. N° 3-14: Función de Switch de las moduladoras

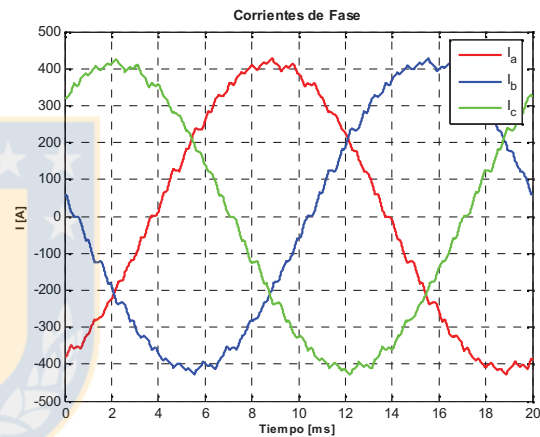


Fig. N° 3-15: Salida en Corriente del Convertidor

En la *Fig. No 3-14*, se muestra las señales de control que se disparan a cada una de las tres piernas de los IGBT del inversor, como se menciona, esta secuencia de disparo se programa por SPWM, por tanto es tan sólo una combinación de las tantas que puede entregar la modulación SVM. Cada una de estas señales va a los tres switch superiores del VSI, las cuales están desfasadas en 120° para lograr el disparo secuencial de los distintos semiconductores que generan finalmente la conversión de continua a alterna.

En la *Fig. No 3-15*, se muestran las salidas en corriente alterna que produce el VSI, y se aprecia el contenido armónico que presentan las corrientes de fase y que se inyectan al motor. De esta manera, la forma sinusoidal que presentan da cabida al control de los convertidores. Cabe mencionar que estas corrientes dependen de la carga conectada al inversor, en este caso un motor de tracción asincrónico, que para efectos de la simulación se modela simplemente como una carga inductiva.

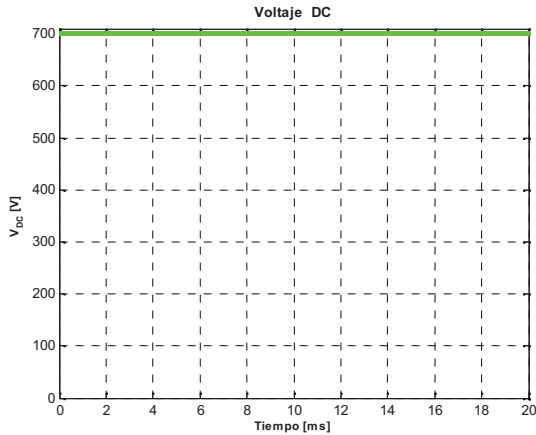


Fig. N° 3-16: Voltaje en el DC Link

En la *Fig. No 3-16*, se muestra el voltaje en el enlace DC, en este caso no es de interés, ya que se simula el sistema contemplando una fuente ideal, la cual no presenta fluctuaciones, en el instante de tiempo simulado, que es tan solo un ciclo de red

En la *Fig. No 3-17*, se muestra la corriente DC y se aprecia el alto contenido armónico que produce el convertidor al enlace DC producto de la conmutación del inversor. Cabe mencionar que el valor medio de esta señal es un valor continuo y constante, la cual es efectivamente la señal de corriente que alimenta al inversor.

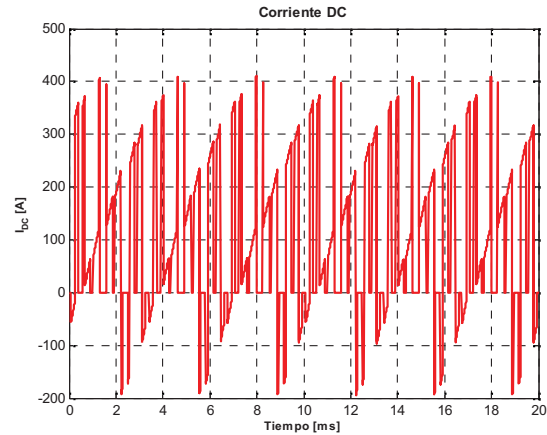


Fig. N° 3-17: Corriente de entrada al Convertidor

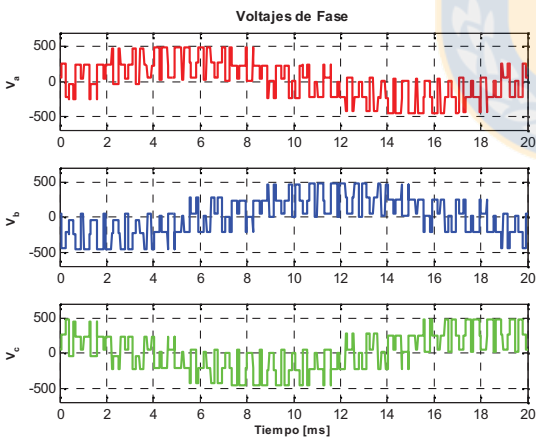


Fig. N° 3-18: Salida del Voltaje Fase Neutro del VSI

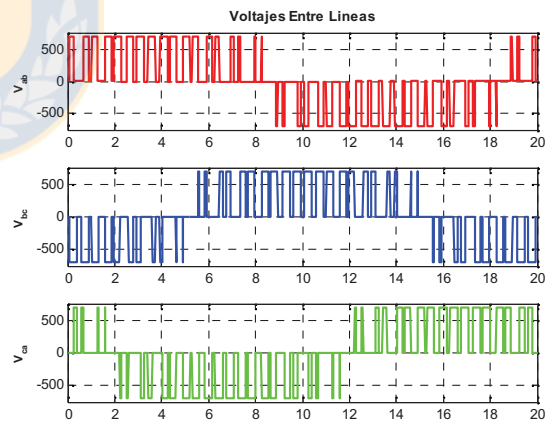


Fig. N° 3-19: Salida del Voltaje Entre Línea del VSI

En la *Fig. No 3-18* se muestra el voltaje fase neutro que se refleja en la salida del convertidor, se aprecia que este voltaje presenta varios niveles, esto se debe a lo explicado en la *Fig. N° 3-5*, ya que se produce un potencial distinto entre la barra negativa del enlace DC y el neutro de cada una de las fases de salida del inversor, en este caso no interfiere en el análisis ya que la carga fue simulada en conexión delta, equivalente al caso de los motores de las locomotoras.

Finalmente en la *Fig. No 3-19*, se muestran los voltajes entre líneas de salida del convertidor, del tipo PWM y están desfasados en 120° .

Capítulo 4. Evaluación de los datos de la locomotora

4.1 Análisis Funcional de los diagramas de control.

Para comprender la aplicación del control de los accionamientos, se analizan sus diagramas de control, así se especifican posteriormente las curvas de las gráficas obtenidas de los datos que arroja la locomotora.

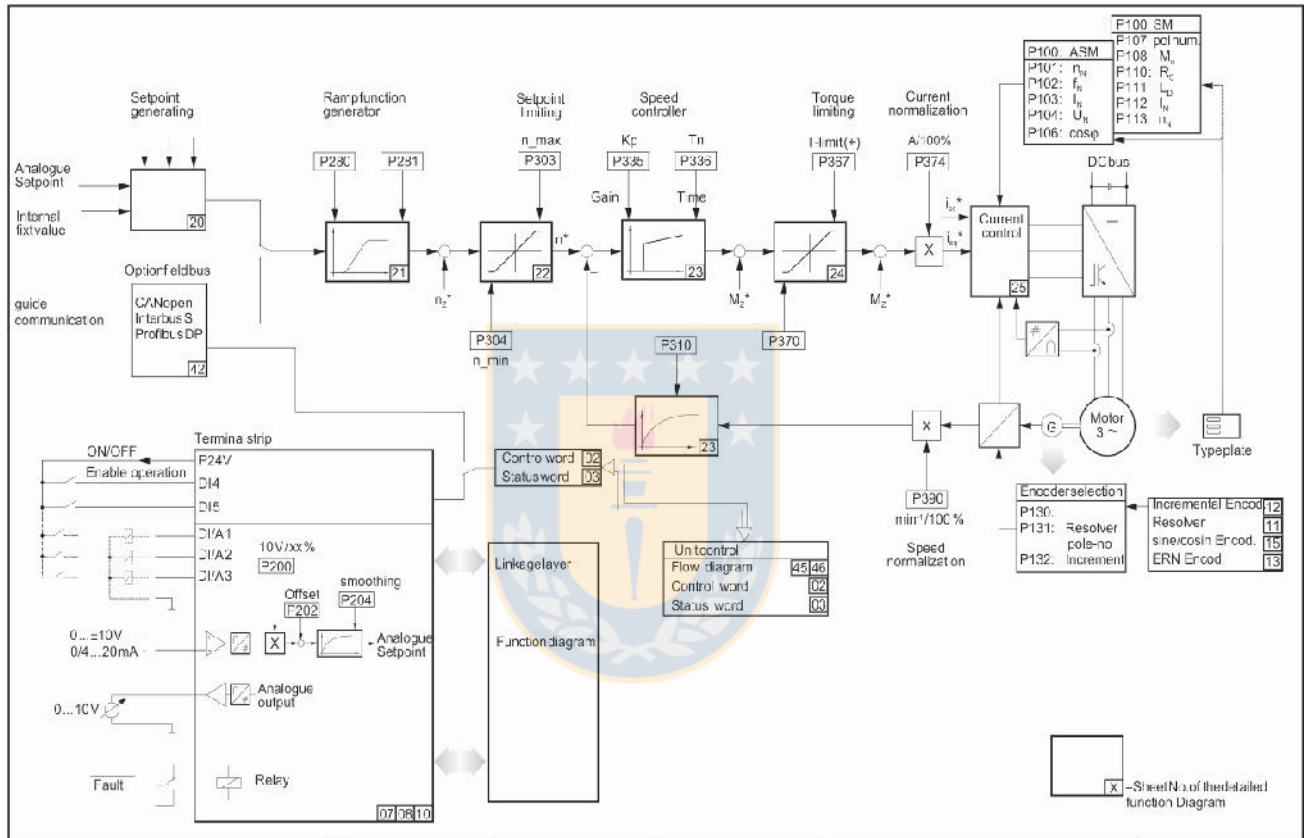


Fig. N° 4-1: Diagrama de Control General del Accionamiento

Como se aprecia en la *Fig. No 4-1*, el control del inversor, que en la hoja aparecen en los bloques 21 al 25, se realiza en función de la activación de estos bloques, que determinan la intervención de cada una de las secuencias lógicas que están sometidos los inversores de los accionamientos de las locomotoras. En esta hoja se muestran cada uno de los sub-bloques que generan en cada caso el control de los subtemas de cada una de las variables de interés, como son, la velocidad, la corriente y el torque de la máquina.

En los siguientes diagramas se especifica la forma en que los convertidores de la locomotora controlan, las Referencias, la Velocidad, la Corriente y el Torque.

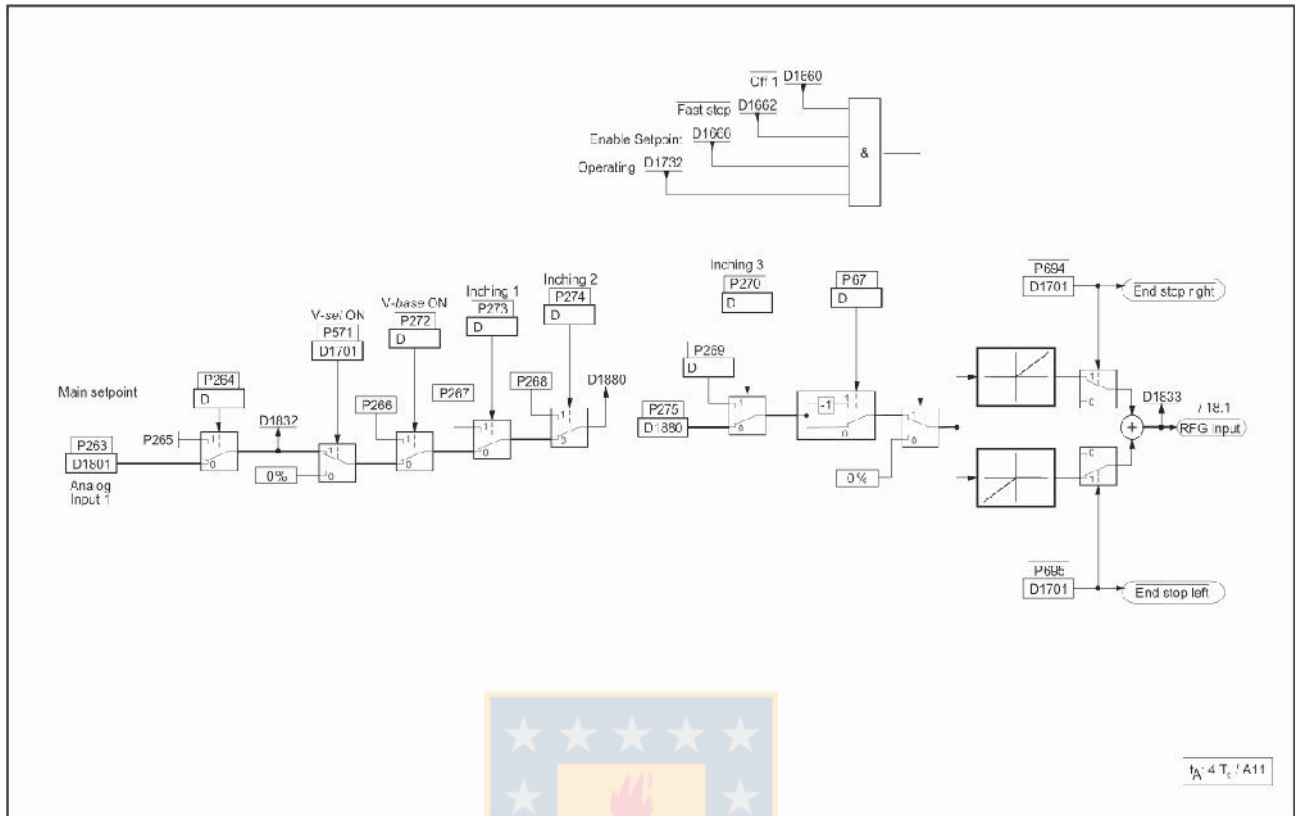


Fig. N° 4-2: Bloque Generador de los Set-Point

El esquema funcional, de la Fig. No 4-2, muestra el bloque generador del set-point. En él se activa la secuencia generadora de las referencias, ya sea de velocidad y/o de torque. Principalmente en este bloque se revisan los enclaves que habilitan la salida activa, y con ello inicializa e integra el valor de referencia para cada una de las variables.

Tabla 4-1: Parámetros Relevantes del Bloque.

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> • D1801: AI 1 (habilita lectura SP, desde PLC). • D1832: Activa SP principal. • D1701: Activa la Velocidad Base. • D1880: Set-Point en cola. • D1732: Operación de Estado. • D1666: Habilita SP principal. • D1662: Parada de Emergencia. • D1660: Apagado. • D1833: Salida Generador de Rampa 	<ul style="list-style-type: none"> • P277: Habilita el offset de la moduladora. • P263: SP Principal. • P264: Selecciona SP. • P571: Velocidad Base Activada. • P275: Punto de activación RFG. • P694: Src Detención Right. • P695: Src Detención Left. • P67: Invierte RFG. • P270: Habilita Incremento Src.

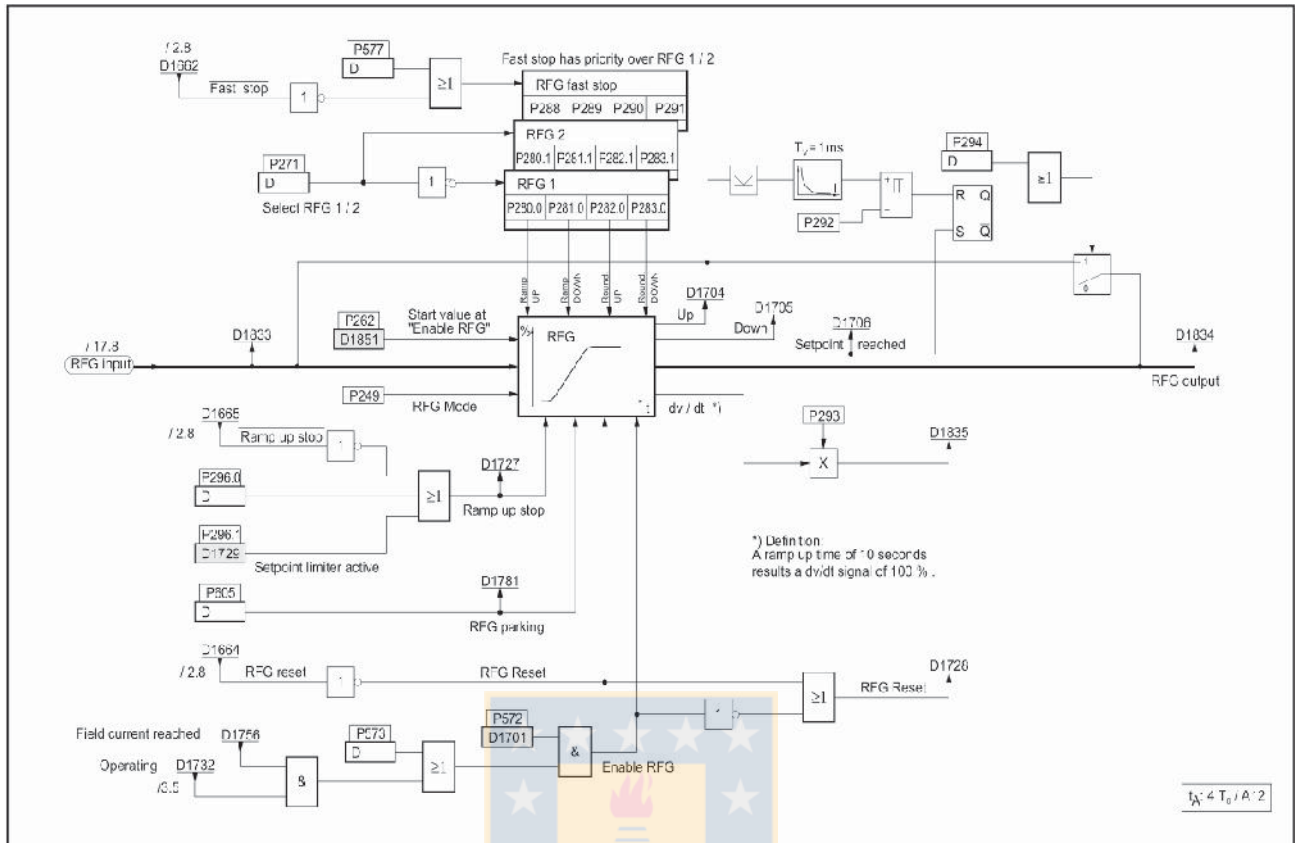


Fig. N° 4-3: Bloque Generador de la Función Rampa.

Este bloque funcional mostrado en la Fig. No 4-3, genera a partir del bloque generador del SP, la secuencia de la función generadora de la rampa (RFG). Aquí se construye la forma de la rampa tanto de subida como de bajada en relación a los tiempos de activación y desactivación, como además de las pendientes tanto positivas como negativas de cada tramo. La salida de este bloque es la respuesta de los convertidores a la entrada de la referencia externa de velocidad dada por el sistema ATO, según la demanda de los accionamientos tanto en los requerimientos de flujo para velocidad, como de corriente para el torque.

Tabla 4-2: Parámetros Relevantes del Bloque

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> • D1756: Chequea el Flujo del Motor. • D1728: Resetea la partida y enclava. • D1727: RFG Detenida. • D1851: Realimenta la Rampa. • D1704: Activa Up. • D1705: Activa Down. • D1729: Activa el Limitador de SP. • D1834: Salida del Generador de Rampa. 	<ul style="list-style-type: none"> • P572: Habilita la RFG. • P249: RFG Up / Down. • P280: Tiempo de rampa Up. • P281: Redondeo de tiempo Up. • P294: Salta el enclave del SP. • P262: Src Valor Inicial. • P282: Redondeo Valor Rampa. • P293: Normaliza la salida.

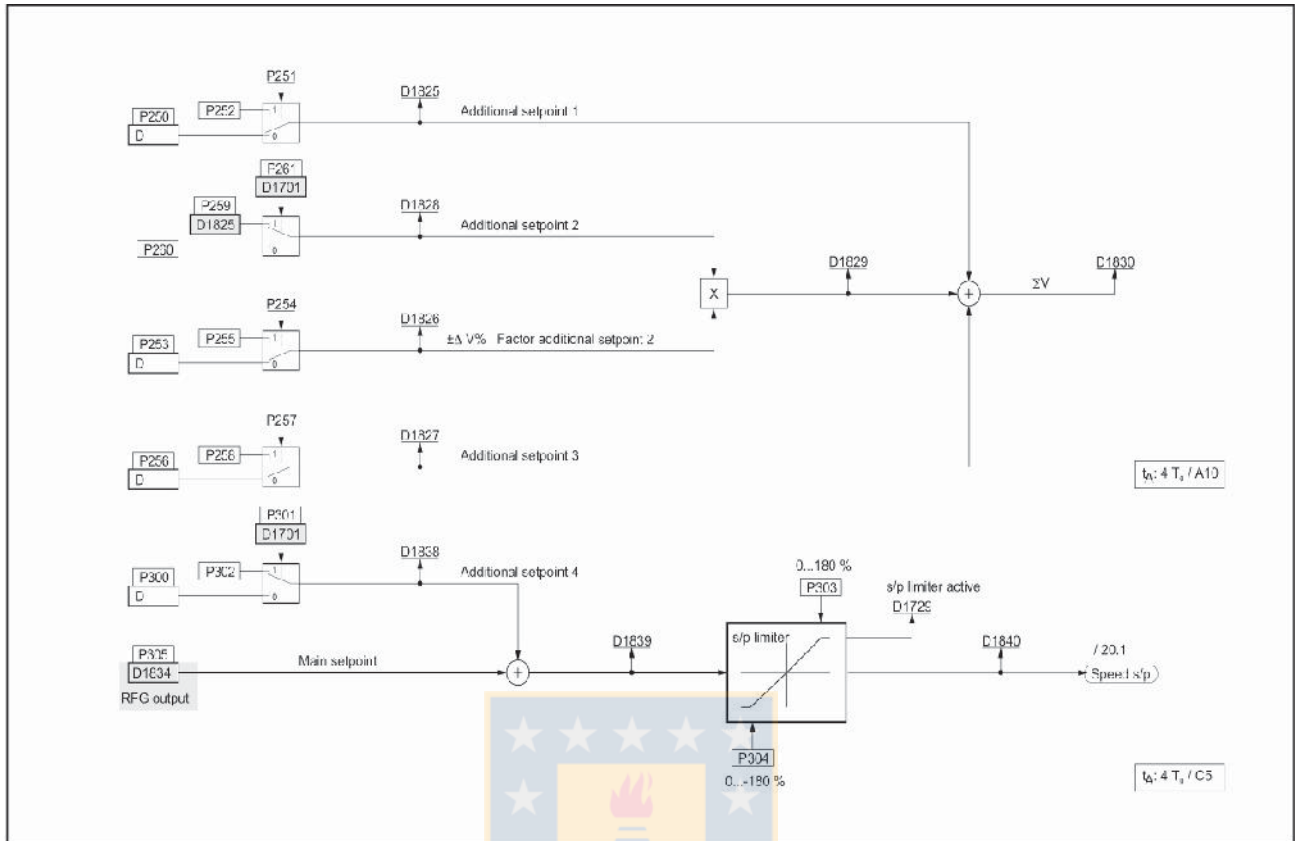


Fig. N° 4-4: Bloque Limitador de los Set-Point.

El bloque funcional de la Fig. No 4-4, muestra la generación del buffer que guarda el set-point (SP) o referencia a seguir. En este bloque se genera una secuencia adicional de valores de referencia que son estimados en función al flujo y a la corriente del motor con el fin de no debilitar el flujo magnético demandado por el motor. Con ello limita la referencia a los cambios de velocidad o torque.

Tabla 4-3: Parámetros Relevantes del Bloque

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> • D1825: SP adicional. • D1830: Salida Sumatoria del SP. • D1826: Factor de Adición al SP. • D1839: Entrada Limitador del SP. • D1729: Activa el Limitador de SP. • D1840: Salida del Limitador del SP. 	<ul style="list-style-type: none"> • P303: Limite Positivo. • P304: Limite Negativo. • P300: Src Aditivo. • P301: Selecciona SP. • P302: Valor Hexadecimal.

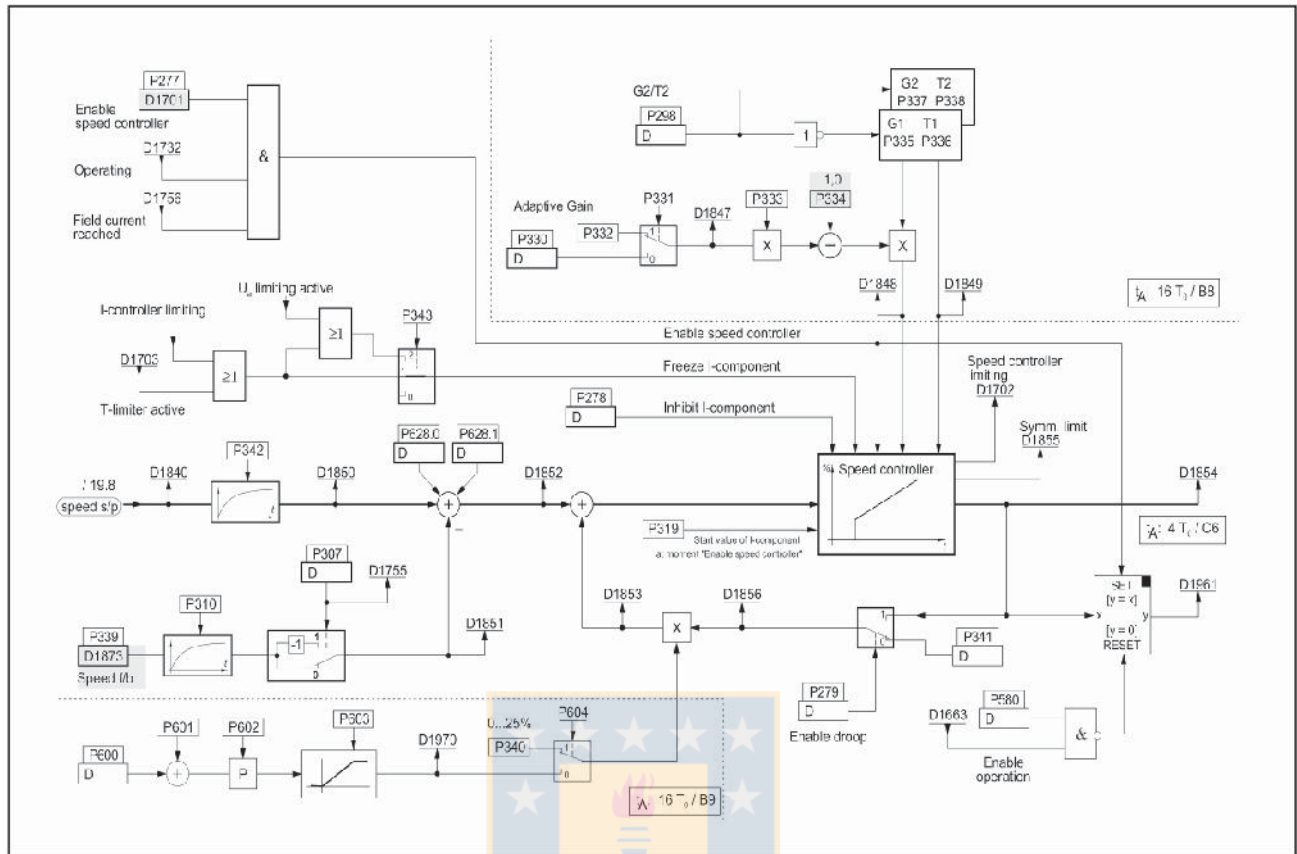


Fig. N° 4-5: Bloque del Controlador de Velocidad.

El controlador de velocidad mostrado en la Fig. No 4-5, habilita el control de la velocidad, en relación a los cambios dados por la referencia proveniente de la RFG, con ello debe mantener un flujo constante en el motor a través de la demanda de la corriente de componente directa la cual aporta directamente el flujo y con ello se modifica la velocidad, en cada uno de los tramos en los cuales se produzca algún cambio en la referencia de esta variable.

Tabla 4-4: Parámetros Relevantes del Bloque

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> • D1756: Chequea el Flujo del Motor. • D1732: Verifica el Estado. • D1703: Verifica el Límite de Torque. • D1850: Chequea la Demanda de Velocidad. • D1840: Chequea el Límite del SP de Velocidad. • D1852: Error de la señal de Referencia de Vel. • D1755: Rotación del Motor • D1873: Realimentación de Velocidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • P277: Habilita el offset de la moduladora. • P310: Señal Filtrada de Velocidad. • P330: Ganancia Adaptativa. • P331: Selecciona la Ganancia. • P335: Ganancia del Controlador. • P336: Tiempo Integral Controlador. • P343: Congela el Tiempo Integral • P339: Fuente de la Medición de Velocidad.

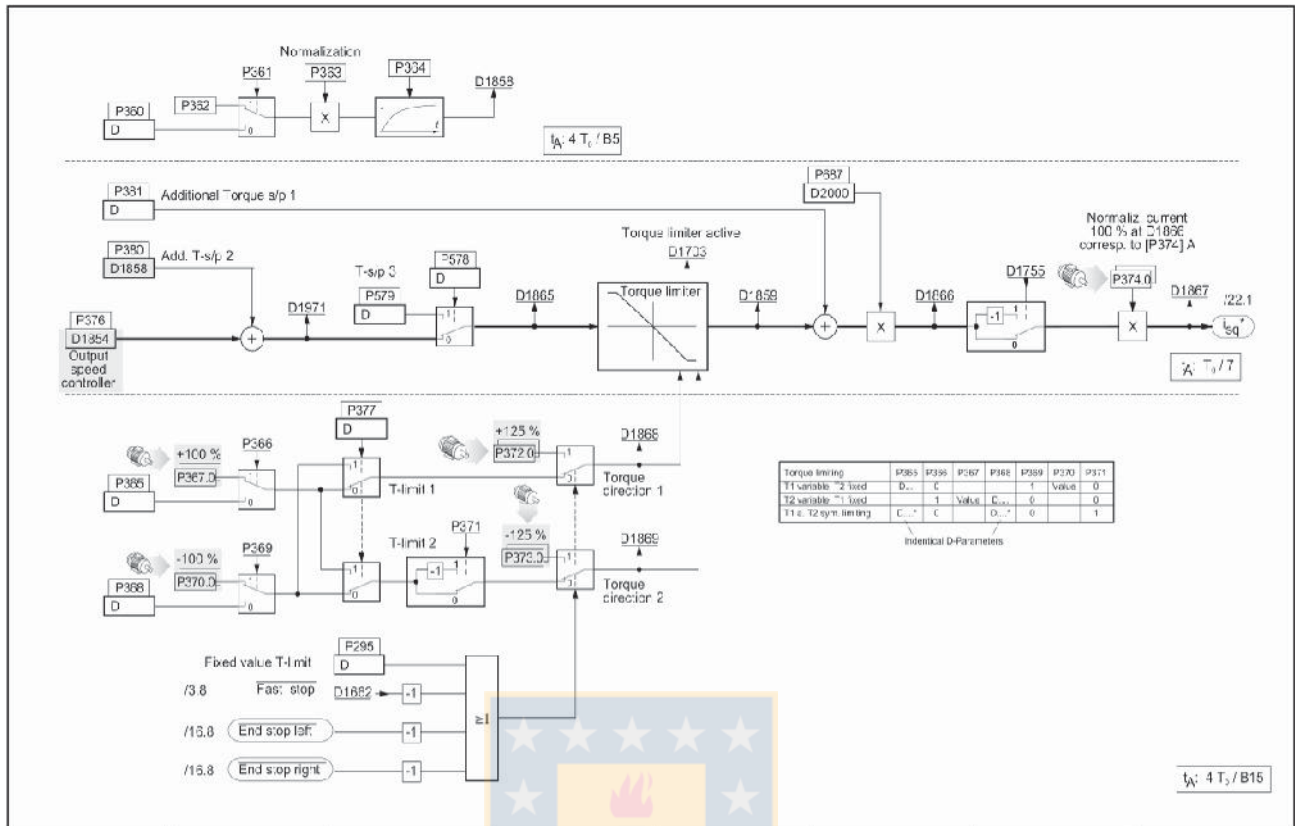


Fig. N° 4-6: Limitador de Torque, Inversor de Accionamiento

La hoja de control mostrada en la Fig. N° 4-6 referente al limitador del torque, que es controlado directamente por la corriente de componente de cuadratura, genera los límites en función del controlador de corriente como también del controlador de velocidad. De esta forma, la generación de los parámetros que habilitan cada uno de los límites, tanto positivo como negativo, provienen de la salida de los bloques del control de velocidad como del de corriente. Estos bloques habilitan estos límites, según la demanda de torque que requieran los motores.

Tabla 4-5: Parámetros Relevantes del Bloque

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> D1858: Torque Adicional. D1865: Limite de Torque. D1866: Demanda de Torque. D1755: Rotación del Motor. D1868: Dirección del Torque. D1867: Corriente de Alimentación I_{sQ}. 	<ul style="list-style-type: none"> P360: Agrega Torque. P364: Filtra la señal de Torque. P367: Valor Hexadecimal del Torque. P377: Limite Inverso.

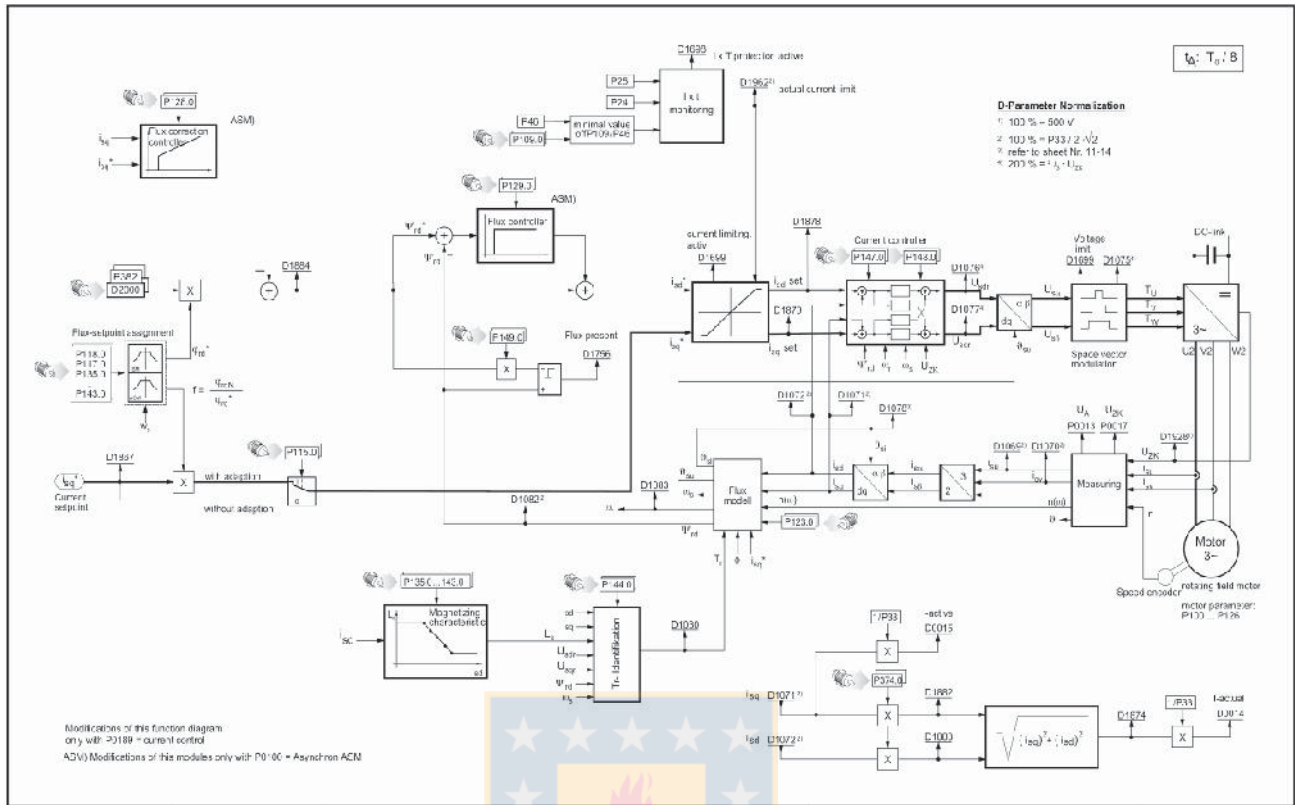


Fig. Nº 4-7: Lazo Cerrado del Control del Motor

El diagrama funcional de la Fig. No 4-7, muestra el esquema final del lazo cerrado, en donde se especifica la modulación SVM que dispara los IGBT's, controlando el voltaje de alimentación de los motores. De igual forma se muestra el controlador de flujo, el controlador de corriente, la curva de magnetización y finalmente un bloque observador estimador que identifica el rotor.

Tabla 4-6: Parámetros Relevantes del Bloque

Lectura D:	Escritura P:
<ul style="list-style-type: none"> D1867: Set Point de Corriente I_{sD} D1962: Limite Actual de Corriente D1874: Corriente I_{RMS} D1082: Salida flujo Rotor D1083: frecuencia de deslizamiento D1030: Torque estimado Rotor D1071: I_{sD} D1072: I_{sQ} 	<ul style="list-style-type: none"> P128: Adapta la corrección del flujo. P382: Fuente de I_{sD} P46: Peack de Corriente Continua P123: Constante de Tiempo Rotor P129: Ganancia Controlador de Flujo. P149: Nivel de Flujo.

4.2 Análisis del Inversor

Se presenta la topología existente al interior de los convertidores en los esquemas de la locomotora con el fin de identificar los módulos representativos que involucran la toma de datos de las variables de interés.

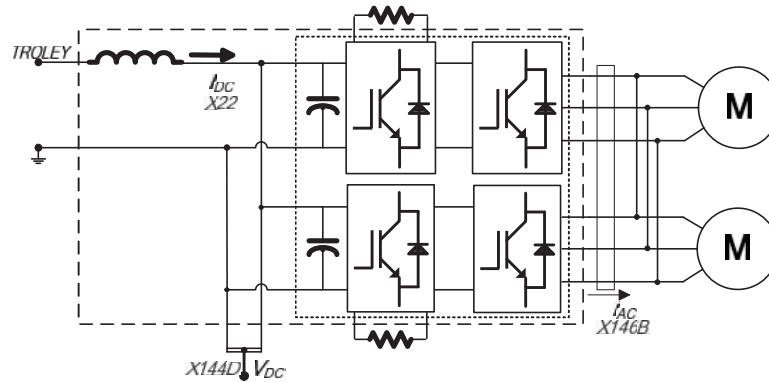


Fig. N° 4-8: Topología General del Ondulador de potencia de la locomotora

En este informe se hace mención a uno de los cuatro convertidores presentes en la locomotora. De este esquema general se especifica la ubicación de donde el sistema de control recoge y mide las variables de interés, como son:

Corriente DC	La cual se mide desde el Terminal T_2 , en el punto de conexión X22.
Voltaje DC	El cual se mide desde el Terminal T_1 , en el punto de conexión X144D.
Corriente AC	La cual se mide desde el Terminal T_3 , en el punto de conexión X146B.

Las demás señales de interés, como son la referencia de velocidad dada por el sistema ATO, las presiones de freno y la velocidad final del tren, se encuentran en parámetros externos a los analizados para el inversor.

4.2.1 Análisis de los Datos extraídos desde la Locomotora.

Los datos son extraídos a través del software “SERVICELAB”, con un intervalo de 2 milisegundos y son expresados en segundos, cabe mencionar que se tomaron los datos de un recorrido promedio al tiempo que demora el trayecto (subida y bajada).

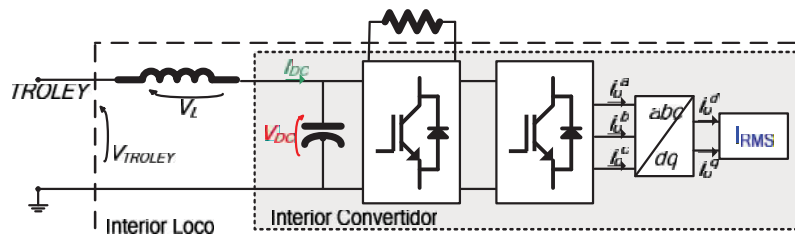
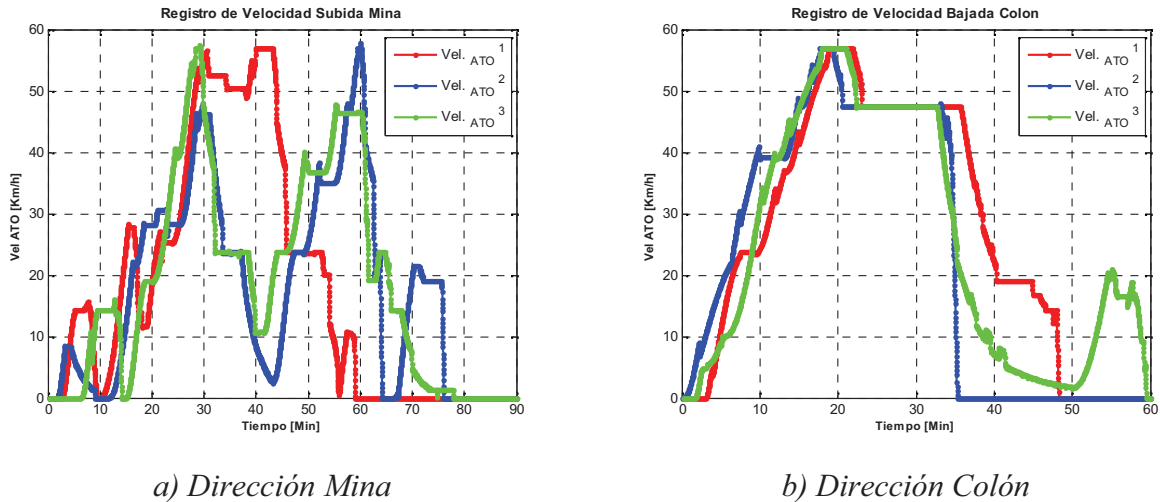


Fig. N° 4-9: Esquema de toma de datos.

En los análisis de la gráficas que se muestran en la *Fig. No 4-10*, se toma en cuenta el comportamiento de la locomotora, en un ciclo completo del trayecto, tanto en subida en dirección a la mina, como en bajada con destino a la planta de chancado en Colón.



a) Dirección Mina

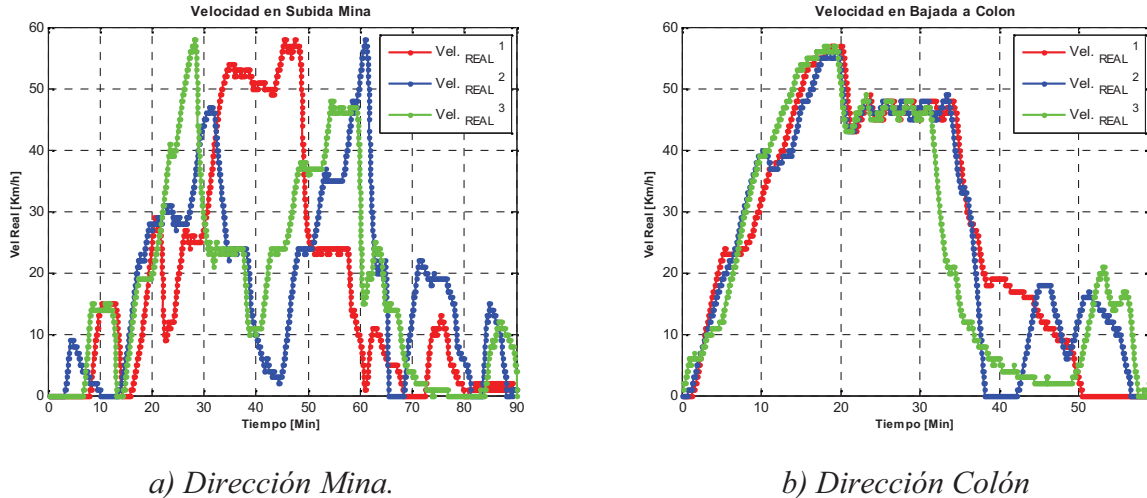
b) Dirección Colón

Fig. N° 4-10: Registros de Velocidad.

Las gráficas de la *Fig. No 4-10*, muestran los registros de velocidad realizadas por el sistema *ATO*, tanto en la subida en la dirección mina, como en la bajada en dirección a Colón. En ellas se muestran tres registros completos tanto en la subida como en la bajada. Estas referencias se realimenta del estado de otras variables como son, el voltaje del trolley, la distancia hasta el próximo cruzado (unión de 2 vías), y de si en la vía existen otros convoyes o equipos de servicios que obstruyen la línea. De esta forma en la *Fig. No 4-10.a*, se aprecia la variabilidad en el registro de velocidad en dirección a la mina, debido a la cesión de la vía, a los trenes que descienden desde la mina en dirección a Colón, lo que produce tales disminuciones de velocidad.

De este modo en el registro de velocidad del trayecto en la dirección desde la mina a Colón en la *Fig. No 4-10.b*, se aprecia el otorgamiento de vía, que se caracteriza por una rápida rampa de aumento de velocidad. Cabe mencionar el brusco descenso de velocidad que solicita el sistema para optimizar los tiempos en los recorridos del convoy, lo que provoca una gran exigencia de los frenos.

Esta referencia de velocidad se configura mediante la puesta de un *SP* externo que en este caso entrega el *ATO* al *PLC* de la locomotora y mediante configuración *Profibus* llega al convertidor como valor continuo, que es tomado por el bloque *RFG*, quien genera finalmente la referencia de velocidad en función de los requerimientos de la locomotora, como el aumento en los cambios de velocidad en función de la capacidad del flujo y de la disponibilidad de torque generado por la corriente de cuadratura inyectada a los motores.

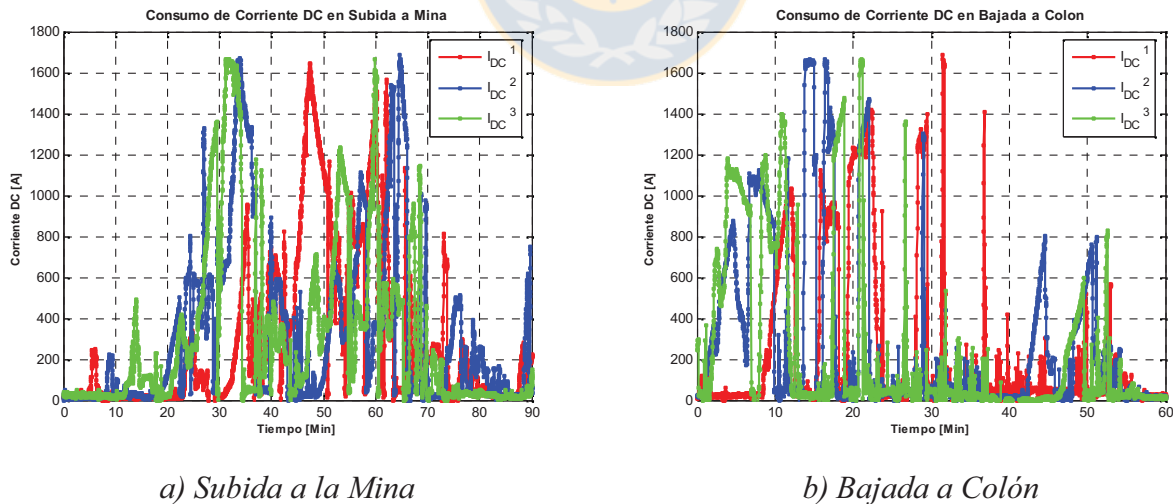


a) Dirección Mina.

b) Dirección Colón

Fig. No 4-11: Velocidad de la Locomotora.

Las gráficas de las Fig. No 4-11.a y Fig. No 4-11.b, muestran el valor real de velocidad que alcanza finalmente la locomotora para cada uno de los tres ciclos de viajes analizados, tanto en la dirección hacia la mina, como en la dirección hacia Colón. En ellas se puede mencionar que la salida de velocidad sigue a la referencia, con un retardo y un sobrepaso que desde el punto de vista del recorrido es poco significativo. Este registro de velocidad la entrega el convertidor mediante la derivada de la expresión matemática del encoders de posición ubicados en cada una de los 4 ejes de la locomotora.



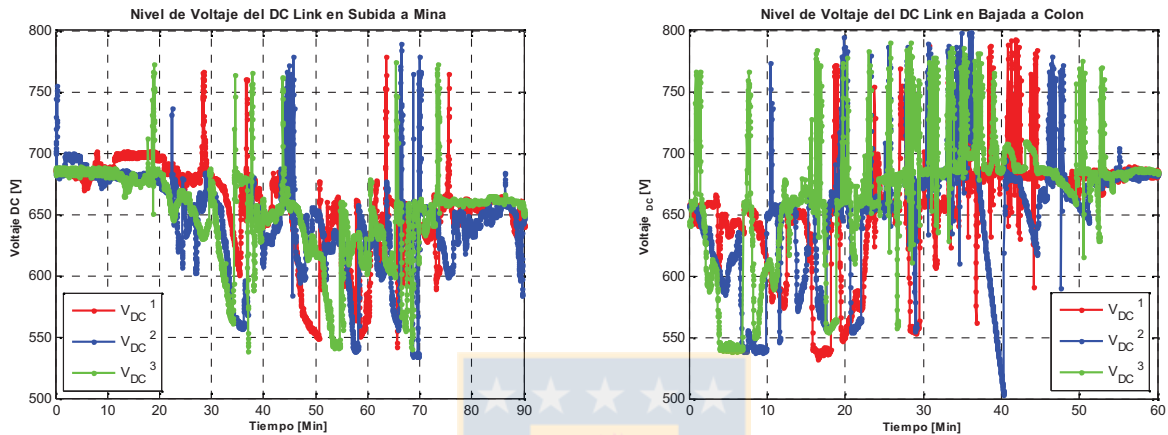
a) Subida a la Mina

b) Bajada a Colón

Fig. No 4-12: Consumo de corriente del Trolley.

En las gráficas de la Fig. No 4-12.a y Fig. No 4-12.b, se aprecia el consumo de corriente continua de los tres recorridos del tren. Se aprecia un rápido aumento del consumo en el descenso debido al aumento de velocidad del tren cargado.

Este consumo es demandado según los requerimientos de las locomotoras para los cambios de velocidad o de torque, lo que se traduce en la conversión de energía continua en alterna a través del inversor, que origina la corriente de componente directa y de cuadratura respectivamente que alimentan al motor para satisfacer la demanda requerida. En este sentido, se aprecia un pequeño retardo con respecto a los cambios en la referencia de velocidad, debido principalmente a la carga o descarga de los elementos almacenadores de energía del *DC link*.

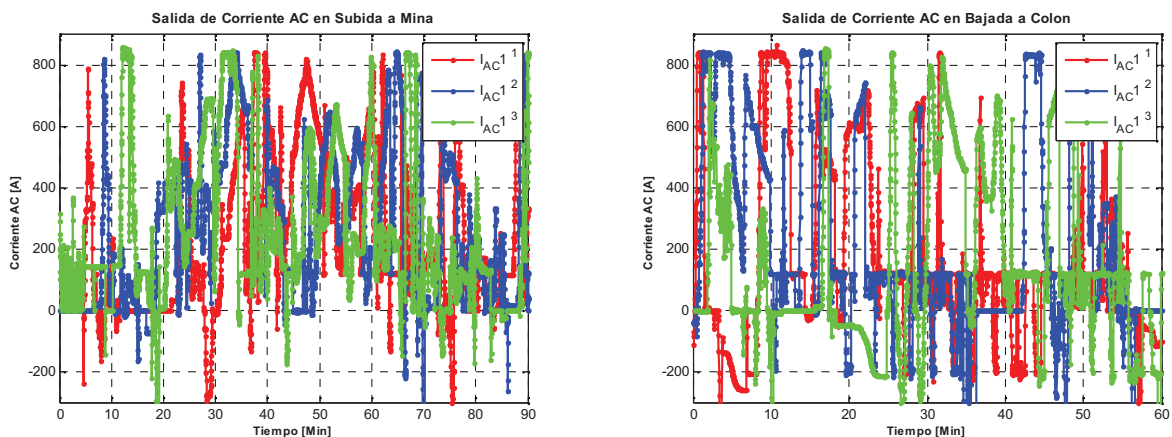


a) Voltaje ingresando en dirección Mina

b) Voltaje saliendo en dirección Colón

Fig. N° 4-13: Nivel de Voltaje DC del Trolley.

Las gráficas de la Fig. No 4-13.a y Fig. No 4-13.b, muestra la evolución del nivel de voltaje del enlace DC en la entrada al convertidor, de esta forma los condensadores presentes en el convertidor mantienen el voltaje entregado por el trolley al enlace DC. Estas fluctuaciones que presenta el voltaje del enlace, referidas a su disminución, se deben principalmente a la demanda de energía de las locomotoras o a los cambios entre subestaciones rectificadoras; y referidas al aumento del voltaje del enlace se presenta debido a la regeneración de la energía de lo trenes.



a) Corriente Convertidor 1 Subida Mina.

b) Corriente Convertidor 1 Bajada a Colón.

Fig. N° 4-14: Corriente de alimentación a los Motores

En las gráficas de la *Fig. No 4-14.a* y *Fig. No 4-14.b*, se aprecia el valor *RMS* de la corriente de salida de los convertidores que alimenta a dos motores en una parada de rueda, esto es cierto cuando el parámetro *D0015* está activado, en ese momento aparece el valor efectivo que está siendo suministrado a los motores como salida de los bloques que controlan los accionamientos en función de las entradas, como son el voltaje del trolley y el disparo de las moduladoras, como además a las referencias tanto de velocidad como de torque. Este valor *RMS*, aparece multiplicado por una señal que se obtiene del control de las cajas reductoras de los boogies de las paradas de rueda, esto se muestra como una corriente negativa producto de la interacción de los sensores que detectan el deslizamiento de las ruedas, provocando un aumento del torque necesario para mover la locomotora.

4.2.1.1 Registro de Datos en la Bajada desde la Mina a Colón.

Con las gráficas mostradas en los tres ciclos anteriores, se continua el análisis, con tan solo uno de ellos, en este caso, se considera solo el descenso del primer recorrido, ejemplificado en las gráficas de color rojo, que muestra una salida promedio del trayecto del tren.

Para ello se individualiza las variables y se analiza su evolución en el trayecto desde la salida en algunos de los sectores de la zona de carguío en la mina, hasta la llegada a los buzones de descarga ubicados en la planta de chancado de Colón. Se estudia tan solo este segmento del recorrido, ya que es este el que provee el mayor nivel energético y posterior esfuerzo del frenado electrodinámico cuando el tren desciende cargado.

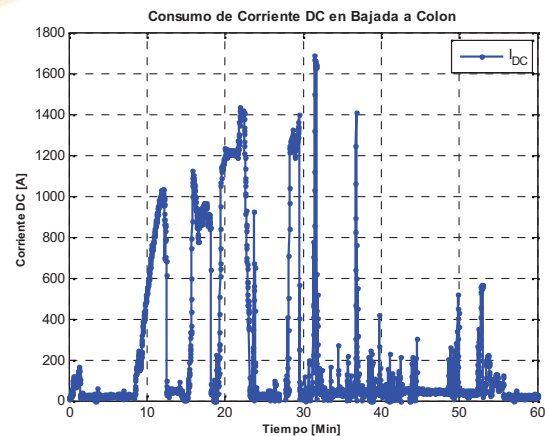
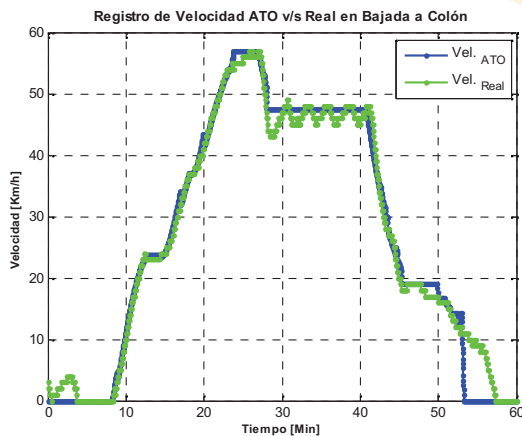


Fig. N° 4-15: Registros de Velocidad, Ciclo Promedio *Fig. N° 4-16: Registro de Corriente, Ciclo Promedio*

En la gráfica de la *Fig. No 4-15* se puede apreciar el seguimiento de la referencia de velocidad dada por el sistema *ATO* a las locomotoras, esta en general muestra una buena respuesta en relación a los márgenes de error de la velocidad final de salida de la locomotora para acelerar el convoy.

Sin embargo, en la última referencia de desaceleración no ocurre lo mismo, debido principalmente a la rápida disminución de velocidad exigida por la referencia del sistema *ATO*, para lo cual la locomotora no responde en forma óptima para la reducción de velocidad, acumulándose un error en el control del seguimiento de las referencias.

En la segunda gráfica de la *Fig. No 4-16*, se muestra el consumo de corriente continua por parte de los inversores para generar la energía necesaria para accionar los motores de tracción. Se ve un rápido ascenso del consumo debido principalmente a la aceleración del convoy cargado entre el octavo y doceavo minuto, en el cual se requiere gran cantidad de corriente para activar los inversores y suministrar la corriente que logra alcanzar la velocidad demandada por el sistema, así mismo se verifica el no consumo cuando la referencia de velocidad sigue un valor constante, dado por la entrada al túnel de la mina, referida al minuto 15 aproximadamente, para cuando alcanza la velocidad final de 58 Km/h, en donde el consumo disminuye conforme el tren desciende a una velocidad constante por la vía férrea, manteniendo el consumo por debajo del 20% del valor peak de corriente.

De igual forma los mayores consumos de corriente se logran en la mitad del trayecto, cuando el tren requiere la máxima energía.

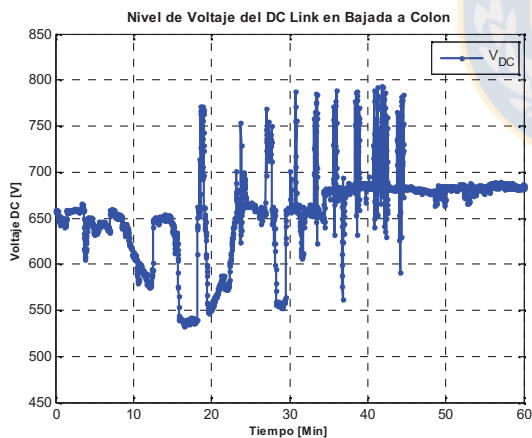


Fig. N° 4-17: Registro de Voltaje, Ciclo Promedio

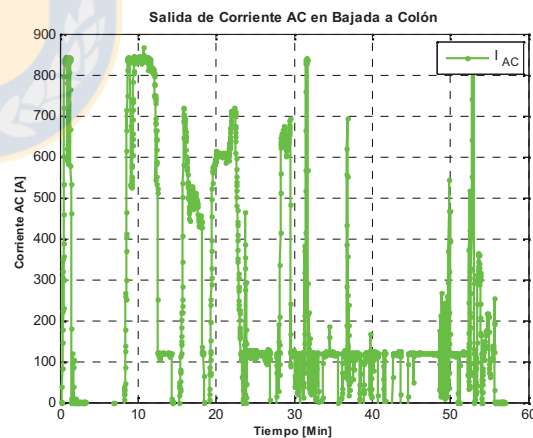


Fig. N° 4-18: Registro de Corriente AC

En la gráfica de la *Fig. No 4-17* se puede apreciar los umbrales en los niveles de tensión del voltaje que soportan los condensadores DC, esto es entregando energía hacia la etapa de inversión y recibiendo nuevamente durante el frenado.

Es en este momento cuando el nivel de voltaje supera un umbral dado por un *SP* de control, el chopper conecta las resistencias, provocando con ello una disipación de la energía en exceso producto del frenado de la locomotora.

En esta gráfica se aprecia como el nivel de voltaje se reduce conforme los convertidores demandan corriente durante los primeros minutos para luego mantener el nivel de tensión para cuando el tren alcanza la primera escala del registro de velocidad determinado.

La gráfica de la *Fig. No 4-18* muestra la corriente *AC RMS* de salida del convertidor que alimenta a un par de motores ubicados en una parada de rueda. Se aprecia claramente lo explicado anteriormente, en la *Fig. No 4-14.b*, para cuando el boogie detecta la falta de torque, se modifica la salida de corriente, mostrada en el descenso de la señal mostrada como pequeños peacks de corriente negativa, lo que produce un mayor agarre de la locomotora sobre los rieles de la vía férrea, para acarrear al tren completo. Cabe mencionar que estos cambios producidos en el valor efectivo de la señal no se producen en todas las paradas de ruedas al mismo instante de tiempo, si no que se intercambian entre uno de los cuatros convertidores a bordo de la locomotora.

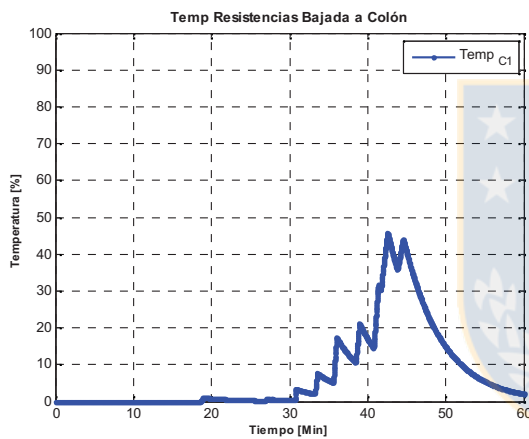


Fig. N° 4-19: Activación Freno Electrodinámico

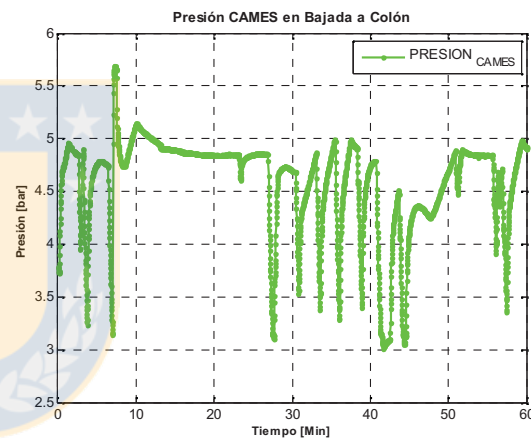


Fig. N° 4-20: Activación freno de los Carros.

En la gráfica de la *Fig. No 4-19* se muestra el aumento de la temperatura producto de la disipación de la energía en forma de calor en las resistencias de frenado. Esta escala está graduada según la máxima temperatura que pueden alcanzar las resistencias, la cual asciende a los 440°C . En la gráfica se aprecia la aplicación del freno electrodinámico, mostrado en el descenso de velocidad de la *Fig. No 4-15*

En la gráfica de la *Fig. No 4-20* se aprecia la aplicación del freno en los carros metaleros, definida por la variación de la presión de aire aplicada al cilindro de freno de cada carro. Se observa la presión fluctuante entre los 3,44 y los 4,82 bar, correspondiente a los 50 y 70 psi respectivamente, referido a la aplicación o afloje del freno de servicio de los carros metaleros. En ella cuando la presión de aire alcanza los 4,82 bar, el cilindro ejerce la mayor presión de freno, sobre las zapatas de los carros.

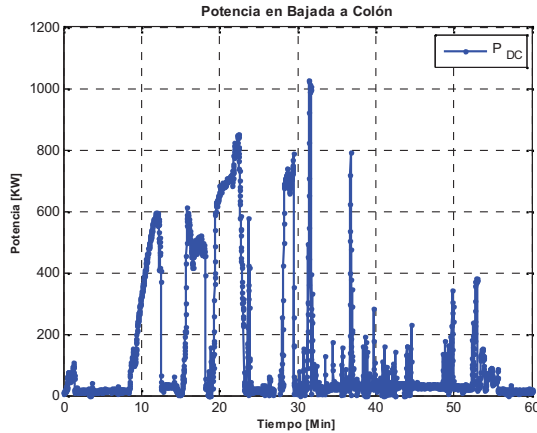


Fig. N° 4-21: Registro de Potencia, Ciclo Promedio

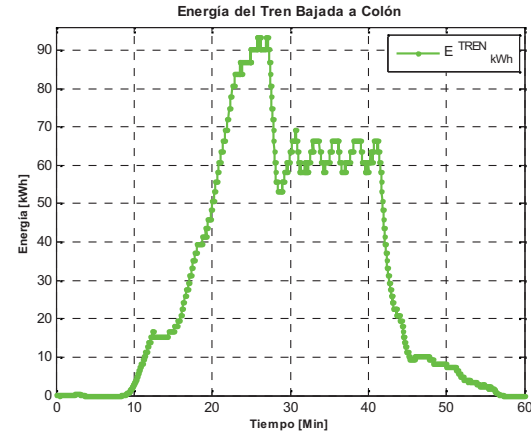


Fig. N° 4-22: Registros de Energía, Ciclo Promedio

La gráfica de la Fig. No 4-21 muestra la potencia eléctrica que alcanza la locomotora, en ella se establecen los niveles máximo tanto de la potencia absorbida como de la potencia total generada. Aquí se aprecia como la potencia consumida comienza a aumentar conforme el tren está acelerando y de la igual forma, como disminuye, en lo que se denomina frenado regenerativo para cuando el chooper de frenado inyecta la potencia almacenada en los condensadores de entrada de la Locomotora con el fin de reducir el aumento del nivel de voltaje, disipando la energía en forma de calor en los bancos resistivos dispuestos especialmente para ello en el techo de las locomotoras.

La gráfica de la Fig. No 4-22 muestra el contenido la energía cinética del tren en un descenso promedio, establecido tanto por el nivel de carga como de velocidad. Esta gráfica no refleja el contenido energético referente a la gradiente de la vía, la cual se especifica en los siguientes capítulos, donde se muestra el nivel energético completo del tren.

Capítulo 5. Análisis de la Potencia y Energía de los Trenes

5.1 Distancias de Frenado

5.1.1 Distancias Empíricas

Del informe *ACT-INF-013/2003* del año 2003, se analizan las mediciones de distancia de frenado que se utilizaron para integrar a las curvas de frenado al sistema *ATP*. Estas pruebas dan origen a los márgenes en las restricciones de velocidad de la vía.

El procedimiento consistió en alcanzar la velocidad máxima de 60 Km/h, bajando con la locomotora en dirección a Colón desde la Mina, para luego aplicar freno de servicio. El punto de referencia para aplicar el freno en el primer tramo, fue la Puerta de la SS/EE Rectificadora T8-A, ubicada en el km 7.122. Para el caso de la segunda medición, el punto de aplicación del freno fue la Máquina de Cambio 401, ubicada en el km 4.188.

La realización de las pruebas se hizo en dos zonas de la línea principal:

- Entre los kilómetros 7.122 y 6.100 (Gradiente 0.3 ‰)
- Entre los kilómetros 4.188 y 3.000 (Gradiente 0.5 ‰)

En estas pruebas, se analizaron, la distancia de frenado y el tiempo, para ir de 60 km/h (16.6 m/s) a 0 km/h (0 m/s), otro de los puntos importante en este estudio se refirió al retardo en la aplicación de los frenos de los carros, con respecto al de la locomotora. Cabe mencionar que la totalidad de los carros acoplados al tren en esta ocasión fue de 16 carros en ambos trenes con carros de 80 Toneladas y de 100 Toneladas.

- Prueba Locomotora sola

Pendiente (‰)	Tiempo (s)	Distancia (m)
0.3	19 - 20	162 - 170
0.5	18 - 21	172 - 178

- Prueba Tren con CAMES 80 Ton.

Pendiente (‰)	Tiempo (s)	Distancia (m)
0.3	58 - 60	582 - 614
0.5	59 - 61	598 - 608

- Prueba Tren con CAMES 100 Ton.

Pendiente (‰)	Tiempo (s)	Distancia (m)
0.3	72 - 80	660 - 752
0.5	70 - 78	612 - 710

Con respecto al retardo en la aplicación del freno de los carros, el análisis arrojó un retardo promedio en la aplicación del freno de al menos 6 segundos, desde el momento que el maquinista ejerce la acción de frenado de servicio del tren hasta que la zapata hace contacto con la rueda. Esto corrobora el retardo estipulado en el accionar de la válvula de control *ABDX* de los carros metaleros.

Por tal razón es evidente que la locomotora de producción *SCHALKE* debe frenar el convoy completo en promedio 6 segundos luego de iniciada la acción de frenar en cada proceso de frenado.

5.1.2 Distancias Teóricas

El análisis cinemático del tren, referido a la distancia y velocidad relativa, comprende:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t - a \cdot t^2 \quad \text{ec. 5-1}$$

$$v(t) = v_0 - a \cdot t \quad \text{ec. 5-2}$$

$$a = \frac{v_0^2}{2 \cdot x(t)} \quad \text{ec. 5-3}$$

Donde

$x(t)$: Es la Posición en cada instante de Tiempo

x_0 : Es la Posición Inicial al Tiempo de Aplicación del Frenado

$v(t)$: Es la Velocidad en cada instante de Tiempo

v_0 : Es la Velocidad Inicial al Tiempo de Aplicación del Frenado

a : Es la Desaceleración que experimenta el convoy

t : Es el Tiempo desde la Aplicación del Freno a la detención

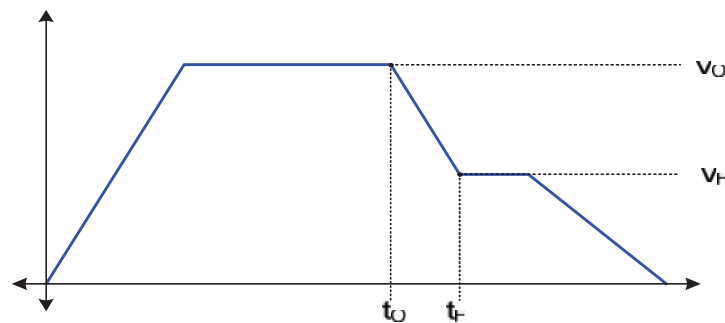


Fig. N° 5-1: Curva Velocidad Teórica

De las bases técnicas de licitación ESP. PM – 33/00, planilla DS – 01, se rescata el ítem que se señala que la locomotora, debe frenar en 450 m a una velocidad de 80 km/h. De esta forma se calcula la desaceleración teórica que alcanza el convoy, mediante la ec. 5-3, en donde se expresa la desaceleración del convoy en función a la velocidad máxima inicial y la distancia recorrida, así se obtiene una desaceleración de $0,55 \text{ m/s}^2$, con ello el fabricante estipuló que la distancia promedio de detención de la locomotora debiera ser al menos de 250 m, lo que claramente es superior a lo real, frenando la locomotora en aproximadamente 30 segundos.

De igual forma si el convoy completo demora aproximadamente 65 segundos en frenar, la desaceleración del tren alcanza a los $0,25 \text{ m/s}^2$ lo que es equivalente a decir que el convoy frena en el doble de la distancia.

5.1.3 Distancias Estipuladas por el Fabricante

De la base de licitación técnica “ESP.PM - 33/00” y compromisos otorgados por el fabricante de las locomotoras SCHALKE en la oferta N° 00.33.1030, se genera una tabla de distancias, en función a la fórmula señalada en la ec. 5-4.

El fabricante, define en sus cálculos la distancia de frenado, mediante la siguiente fórmula:

$$x = \frac{v^2}{\left[t_r \cdot v + \left(\mu \cdot \frac{G_{1,2}}{mz} \right) + (wf \pm (w'' \cdot \circ / \circ)) \right]} \quad \text{ec. 5-4}$$

Donde

- x : Es la distancia de frenado
- v : Es la velocidad en la aplicación del frenado
- t_r : Es el tiempo de reacción del frenado
- μ : Es un valor de la fracción de frenado, tipo de agarre
- G_1 : Es el peso de la Locomotora
- G_1 : Es el peso de la Locomotora y de los carros con carga
- mz : Es el peso del tren completo
- wf : Es la resistencia a la carga
- w'' : Es la resistencia respecto a la gradiente

- Distancia de Frenado del Tren a 60 km/h (16,66 m/s)

Pendiente (‰)	Distancia (m)	
	Sin Freno Carro	Con Freno Carro
0.3	1677.3	138.9
0.5	2192.9	140.8

Esta distancia es calculada por el fabricante considerando el convoy completo y cargado y las diferencias en las distancias radica en la activación o no activación del freno de los carros, en ambos casos la locomotora opera con freno de servicio electrodinámico. Cabe mencionar que el fabricante establece estos cálculos, en vías férreas de normas Europeas y aprobadas por la AAR, en cuya infraestructura existe de alguna forma un sistema de recepción de la energía en exceso provocada por el frenado del tren, ya sea con subestaciones de voltaje controlado o equipos regenerativos.

Estas distancias de frenado son propuestas como las ideales en cuyo caso no habrá sobre temperatura en las resistencias de frenado, en el apartado no se mencionan los tiempos de frenado y cabe mencionar que el tiempo de reacción del freno determinado en la *ec. 5-4* es de 1.5 segundos lo que es menor al real, el cual en promedio se acerca a los 6 segundos.

5.2 Punto crítico de Frenado

Mediante el layout de velocidad de la línea ferroviaria del nivel Tte. 8, es posible identificar el sector promedio de mayor frenado, en que la restricción de velocidad provoca el mayor nivel energético respecto a la regeneración de la energía, la cual se muestra en la *Fig. No 5-2*, con ello es posible identificar las subestaciones que se ven mayormente afectadas, para un descenso promedio del tren, en este caso las subestaciones “T8B - Portal Sapos” y “T8E - Medio Derecha”.

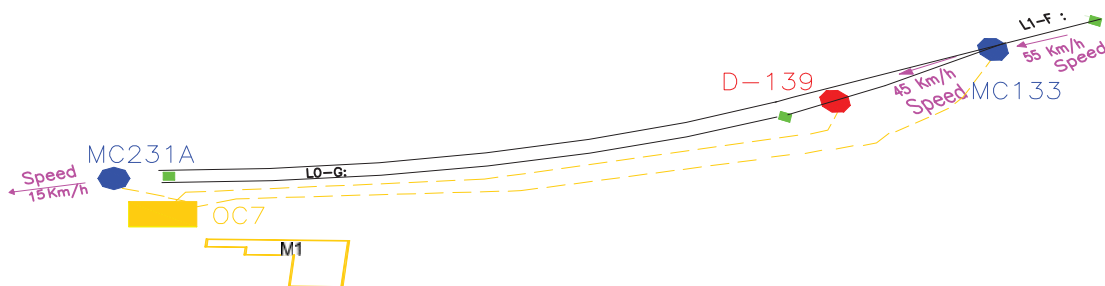


Fig. N° 5-2: layout de mayor restricción de Velocidad

Existen también otros sectores con restricciones de velocidad, pero estos no perturban de manera significativa la curva promedio de referencia de velocidad del ATO, la que muestra la disminución de velocidad desde los 60 km/h a los 45 km/h , para luego reducirla a 15 km/h . Esta restricción de velocidad, se da principalmente entre las máquinas de cambio *MC 133* a la *MC 231A*, con una distancia de 700 m aproximadamente.

En este mismo sentido no se analizan las restricciones de velocidad una vez que el tren ingresa a la mina, ya que en estos casos no contiene carga, por lo que los niveles energéticos son relativamente menores y dependen exclusivamente de la tara de los carros, además el otorgamiento de vía a los convoyes que descienden del interior de la mina, provoca un deteriora del modelo de referencias de velocidad con respecto al ingreso a la mina.

5.3 Incorporación de Fluctuaciones al Modelo

Se incorporan las variaciones de energía que se presentan en el convoy en un trayecto normal. Estas se manifiestan debido a las fluctuaciones tanto eléctricas como mecánicas en el modelo del tren. Cabe mencionar que estas fluctuaciones fueron promediadas en función a una decena de mediciones recopiladas a través del *PLC* mediante el software “*service lab*” a bordo de la locomotora de producción *SCHALKE*.

5.2.1 Fluctuación Eléctrica

Se presentan las fluctuaciones del voltaje en el enlace *DC* que se reflejan en los condensadores de entrada a los convertidores. Estas son perturbaciones que se producen, debido a los cambios entre subestaciones rectificadoras, y a la demanda de energía por parte de las locomotoras presentes en una misma subestación.

El esquema mostrado en el capítulo 2, en la *Fig. N° 2-3*, muestra las 7 *SSEE* que satisfacen los requerimientos de potencia de la vía. En los apartados anteriores, se identificaron como las subestaciones de mayor flujo de potencia las *SSEE T8B* y *T8E*, que son las más afectadas respecto a la regeneración de la energía producto del frenado electrodinámico del tren, lo que se aprecia más claramente en la *Fig. No 5-13*, en donde el nivel de energía aumenta principalmente debido a la pendiente de la vía y a la velocidad que alcanza el convoy cuando es energizado desde estas subestaciones.

Estos cambios en las subestaciones provocan las principales fluctuaciones en el enlace DC, que se manifiestan en la carga o descarga de los elementos almacenadores de energía del enlace, como son el reactor de interfase y los condensadores de los convertidores, que se encuentran al interior de la locomotora.

5.2.2 Fluctuaciones del carguío

Para el trayecto desde la mina al chancado, el tren lleva en promedio un peso aproximado de 2.434 Toneladas, incluyendo la locomotora. Este peso es medido y ponderado por un factor que representa la humedad que trae el mineral desde el interior de la mina.

El proceso de carguío desde los buzones ubicados al interior de la mina, no es un proceso homogéneo, en este sentido se introducen variaciones al peso de los carros dando origen a los distintos pesos que traen los trenes en un turno cualquiera, como se muestra en el gráfico de la *Fig. N° 5-3*. En este se muestra el peso total de cada tren (T2 al T7) en cuatro vueltas. El valor promedio del peso total es aproximadamente de 2.434 Toneladas.

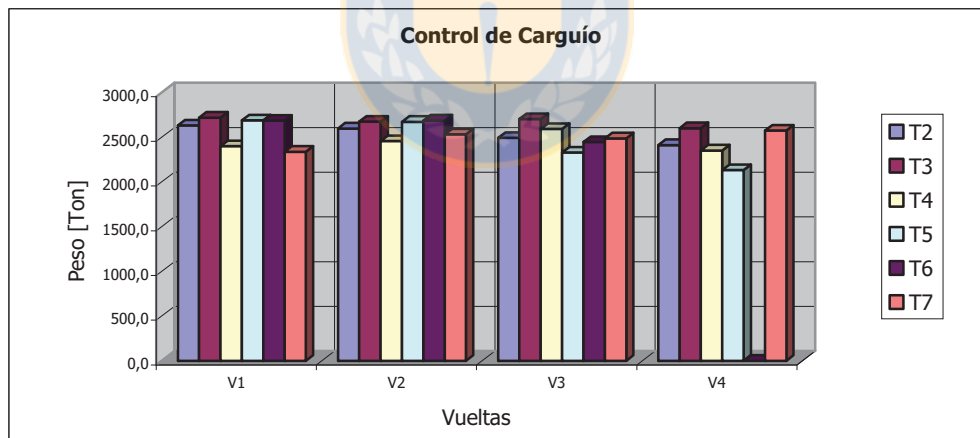


Fig. N° 5-3: Control de Peso del Tren

El promedio en el peso de los carros y por ende el de los trenes, depende de la certeza del operador del buzón de carguío para distribuir equitativamente la carga en cada uno de los 18 carros que conforma el tren. Cabe mencionar que se distinguen los carros de los trenes de fino y de grueso en la tara, por lo que para el convoy es indiferente la granulometría de los carros[^].

[^] Carros de 80 Ton. de capacidad, Tara de 48 Ton.
Carros de 100 Ton. de capacidad, Tara de 28 Ton.

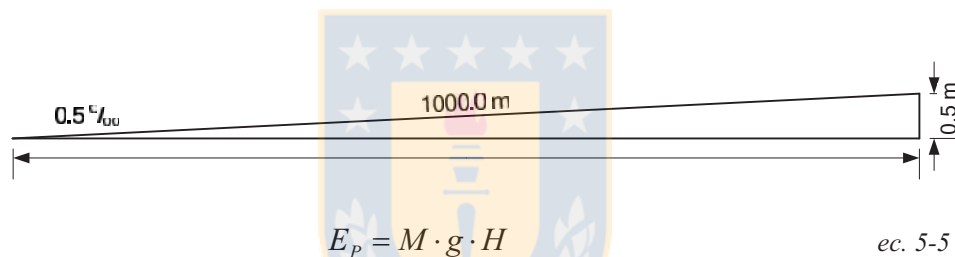
5.2.3 Fluctuaciones de Energía

La vía férrea del nivel Tte. 8 se presenta en su trayecto de 32 kilómetros con distintas pendientes, y presenta una pendiente máxima de 0,5 ‰, que equivale a una altura de 0,5 metros por cada 1000 metros longitudinales de vía.

De esta forma, al tomar en cuenta las distancias de frenado estipuladas tanto por *SCHALKE* en su oferta *Nº 00.33.1030*, como mediante las pruebas efectuadas en el “*Informe Frenado Final ACT 013-2003*” que entregan la distancia promedio de frenado, estipulada en al menos 500 metros, es posible extrapolar el nivel energético que alcanza el tren en un descenso promedio desde la mina a Colón.

5.2.3.1 Energía Potencial

La energía potencial debida a la altura referente del tren en una pendiente de 5 ‰, se calcula como sigue:



Donde

- M : Es la masa del Tren
 g : Es la constante Gravitacional
 H : Es la altura relativa a la Pendiente

Así en general para una pendiente máxima de 5 ‰, la energía potencial alcanzada por el tren depende exclusivamente de la masa, es decir, este análisis es posible efectuarlo tanto para la locomotora sola, como para el tren completo y cargado.

5.2.3.2 Energía Cinética

La energía cinética debida al movimiento referente del tren a una velocidad máxima de 60 km/h, se calcula como sigue:

$$E = \frac{1}{2} M \cdot v(t)^2 \quad \text{ec. 5-6}$$

Donde

M : Es la masa del Tren

$v(t)$: Es la velocidad en cualquier instante de tiempo

La energía máxima se obtiene al inicio del frenado. Cabe mencionar que a todos los análisis se han hecho a partir de la curva de velocidad que arroja el tren, por tanto las variables aquí mencionadas están tabuladas a la masa, velocidad y aceleración del tren completo y cargado.

De esta forma la potencia necesaria para la tracción y disponible en el frenado, se puede calcular como la derivada de la energía.

$$P = \frac{\partial E}{\partial t} \quad \text{ec. 5-7}$$

Ahora si se analiza la energía, en función de la velocidad y extrapolando los datos al diferir tan solo los cálculos en las masas respectivas, tanto de la locomotora, como del tren completo, es posible establecer los márgenes de tolerancia del diseño del banco resistivo para el frenado de la locomotora sola. Cabe mencionar que el diseño del banco resistivo está propuesto en la oferta N° 00.33.1030 del fabricante SCHALKE, pero sólo para proveer el frenado electrodinámico a la locomotora y no así al tren completo.

5.4 Margen de Dimensionamiento de las Resistencias

Con la especificación de la capacidad energética de las resistencias descrito en capítulo 2, es posible establecer el sobre dimensionamiento propuesto por el fabricante, evaluando los niveles de energía que provee la locomotora en un trayecto normal de operación.

De los apartados anteriores, se evaluó el nivel de energía que es posible disipar en el banco resistivo de las locomotoras SCHALKE, establecido en 1,05 MWs por resistencia. De esta forma el total del banco resistivo de la locomotora disipa 33,6 MWs de forma continua, lo que equivale a 9,333 kWh, nominales que dispone el banco resistivo ubicado en el techo de la locomotora.

5.4.1 Energía de la Locomotora

De la ec. 5-5, la Energía Potencial, de la Locomotora es:

$$E_p = M_{Loco} \cdot g \cdot H = 0,32 \text{ MWs}$$

De la ec. 5-6, la Energía Cinética, de la Locomotora es:

$$E_c = \frac{1}{2} M_{Loco} \cdot v(t)^2 = 18,06 \text{ MWs}$$

Al sumar ambas energías, se obtiene la energía total que deberá ser capaz de disipar el banco de resistencias para frenar la locomotora sola. Esta energía alcanza tan solo a los $18,38 \text{ MWs}$ ($5,11 \text{ kWh}$), por lo que aún las resistencias son capaces de disipar otros $15,22 \text{ MWs}$ ($4,22 \text{ kWh}$). Lo que se traduce en un margen de protección del banco de resistencias de la locomotora de un $45,3 \%$ de sobredimensionamiento de disipación de energía del banco resistivo.

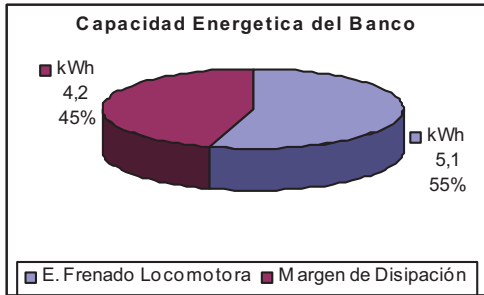


Fig. N° 5-4: Utilización del Banco

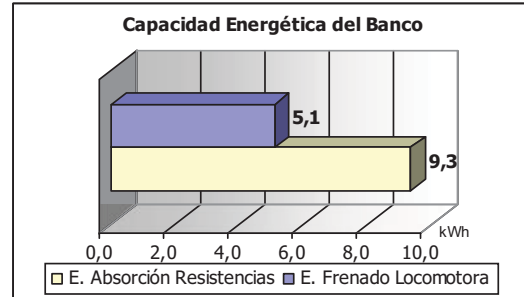


Fig. N° 5-5: Energía del Banco y Locomotora

5.4.2 Energía del Tren Completo y Cargado.

De la ec. 5-5, la Energía Potencial, del Tren es:

$$E_P = M_{Tren} \cdot g \cdot H = 5,96 \text{ MWs}$$

De la ec. 5-6, la Energía Cinética, del Tren es:

$$E_C = \frac{1}{2} M_{Tren} \cdot v(t)^2 = 338,19 \text{ MWs}$$

Al sumar ambas energías, se obtiene la energía total que genera el tren completo con carga, esta energía alcanza los $344,15 \text{ MWs}$, equivalentes a $95,60 \text{ kWh}$, la cual debe ser disipada mientras los carros comienzan a ejercer presión sobre las zapatas de sus ruedas, el cual en promedio se establece en al menos 6 segundos. Por esta razón el banco resistivo debe soportar dicha energía mientras los carros demoran la presión para ejercer su propio frenado.

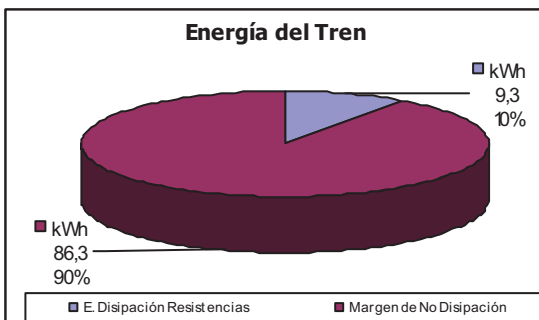


Fig. N° 5-6: % de Sobre Utilización del Banco

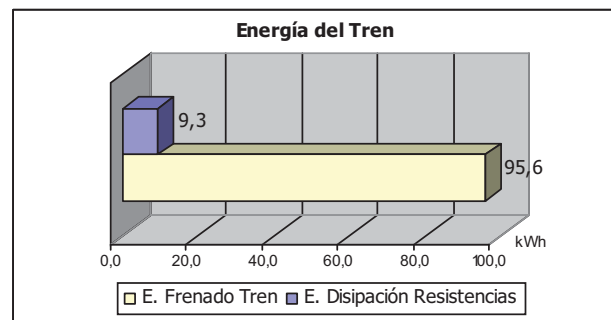


Fig. N° 5-7: Cantidad de Energía del Tren

Bajo estas circunstancias, el banco resistivo es capaz de disipar nominalmente menos del 10% de la energía generada por el frenado durante los primeros 6 segundos de la aplicación del freno, es decir quedan fuera del margen de disipación unos $310,55 \text{ MWs}$ ($86,3 \text{ kWh}$) que genera el frenado, y en estas condiciones el banco de resistencias no está dimensionado para disipar en todo instante de tiempo más de $33,6 \text{ MWs}$ ($9,33 \text{ kWh}$), por lo que es evidente que a este nivel de energía, existan problemas con el frenado electrodinámico.

5.5 Especificación de Potencia por Convertidor

Se analizan los niveles de potencia del enlace en función al consumo de corriente y el nivel de voltaje que poseen el enlace DC, principalmente en los condensadores, de cada uno de los cuatro convertidores presentes en la locomotora, individualizando con ello el valor de potencia de cada convertidor. Con esto se estima el valor de potencia instantánea del tren completo. Esta vez se realizaron nuevas mediciones a bordo de la locomotora, con la finalidad de establecer la variabilidad por cada convertidor tanto del consumo de corriente y el nivel de voltaje, los cuales proyectan la potencia y energía del tren.

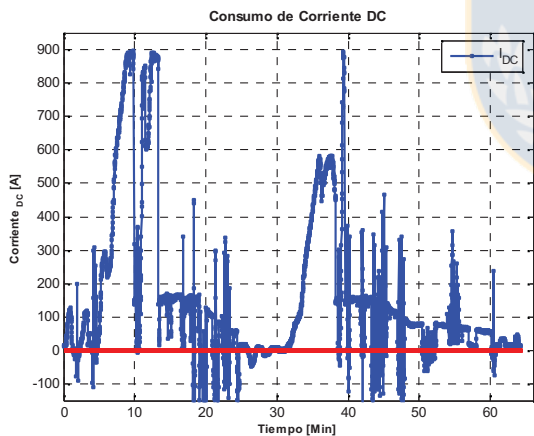


Fig. N° 5-8: Consumo de Corriente por Convertidor

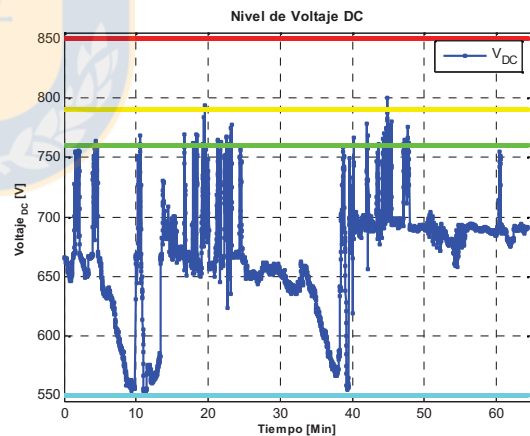


Fig. N° 5-9: Nivel de Voltaje por Convertidor

En la Fig. No 5-8, se aprecia el consumo de corriente que demanda un convertidor. Esta medición de corriente está situada entre el chopper de frenado y los condensadores, es por ello que se aprecia un retorno de corriente durante el proceso de frenado. Este delta de corriente que retorna a los condensadores carga los condensadores del enlace DC, lo que origina el aumento del nivel en el voltaje de estos. El aumento de voltaje activa el chopper de frenado que inyecta la potencia excedida del enlace al grupo de resistencias de cada uno de los 4 convertidores.

En la *Fig. No 5-9* se muestra el nivel de voltaje continuo para el trayecto analizado, con sus parámetros más relevantes como son el umbral de conexión, la desconexión del convertidor por bajo o sobre nivel de tensión. Estas variaciones en el nivel del voltaje se explican principalmente debido a la tracción o al frenado de las locomotoras.

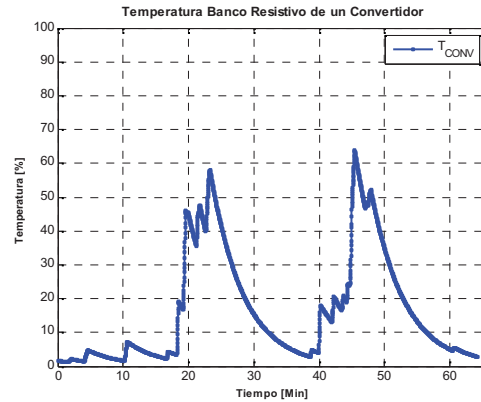
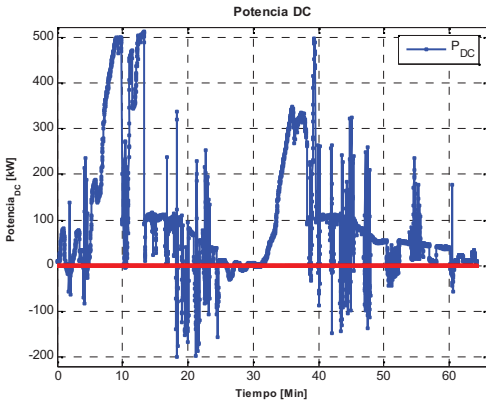


Fig. No 5-10: Potencia Eléctrica por Convertidor

Fig. No 5-11: % de Temperatura de un grupo Resistivo

La gráfica de la *Fig. No 5-10*, muestra el nivel de potencia eléctrica que exige uno de los cuatro convertidores de las locomotoras. La potencia peak de tracción por convertidor alcanza los 500 kW . Cabe mencionar que los convertidores tienen una potencia nominal de 400 kW y una potencia máxima de 550 kW .

La elevación de la temperatura del grupo resistivo de cada convertidor se muestra en la *Fig. No 5-11*. En esta figura se aprecia la activación del freno producto de la disminución de velocidad ocurrida en la mitad del trayecto, la cual se generó para mostrar la exigencia de la detención.

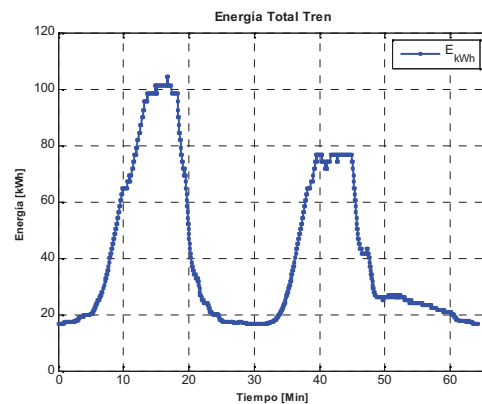
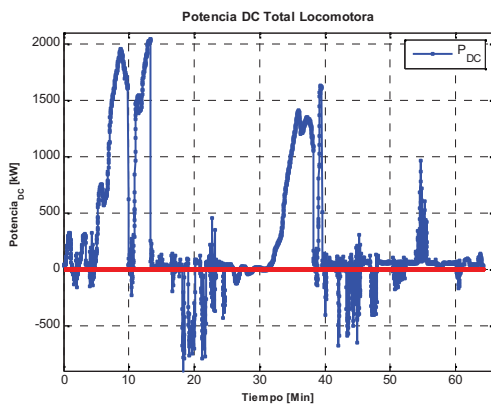


Fig. No 5-12: Potencia Total de los 4 Convertidores

Fig. No 5-13: Energía del Recorrido del Tren

La suma de las potencias de cada uno de los cuatro convertidores, mostrada en la figura *Fig. No 5-12* es igual a la calculada como el consumo total de corriente multiplicada por el nivel de voltaje en cada instante de tiempo. Sin embargo, la suma de las potencias individuales de cada convertidor elimina las desviaciones debido a la varianza de la muestra.

Esta suma de potencias de los convertidores arroja la potencia eléctrica de la locomotora durante el recorrido promedio estudiado.

La Energía Total medida del Tren se muestra en la *Fig. No 5-13*. En la gráfica aparece un offset debido a la energía potencial que contiene el tren referido a la gradiente de la vía. Cabe mencionar que la energía máxima en este caso alcanza los *100 kWh*, debido tanto a la velocidad como al nivel de carga de los carros en el instante en la cual se efectuó esta medición.

5.6 Análisis de la Energía Total

5.6.1 Número de Resistencias de Frenado

La disposición física de las 32 resistencias agrupadas en cuatro bloques de ocho resistencias cada una que forman el banco resistivo a bordo de la locomotora. El banco de resistencias está diseñado para frenar sólo a la locomotora y no así el tren completo, como lo hace actualmente durante los primeros 6 segundos de aplicación del freno de servicio. De esta forma tiene una capacidad de disipación de la energía en forma de calor de *9,33 kWh*.

La energía generada sólo por la locomotora, es de *5,11 kWh*. Sin embargo, el banco puede disipar *9,33 kWh*, lo que permite afirmar que el banco resistivo posee un sobredimensionamiento propio de protección cercano a un 45%, para la disipación de la energía en excedente de la locomotora.

De esta forma al estimar el banco resistivo para la disipación de la energía del tren completo y cargado se obtiene el número de unidades resistivas con igual margen de dimensionamiento que debiese tener la locomotora para la correcta disipación de la energía total del tren. Este nuevo banco de resistencias debe tener una capacidad superior a los *95,6 kWh*, entonces el número de resistencias de frenado que se debiesen agregar a la locomotora, para un frenado completamente electrodinámico sería de al menos 329 unidades. De igual forma con el margen de dimensionamiento propio de la locomotora, se estima que el número de resistencias de frenado debiese ser mayor a las 586 unidades, con lo cual la locomotora sería capaz de frenar el convoy completo con el mismo porcentaje de sobredimensionamiento calculado para frenar la locomotora.

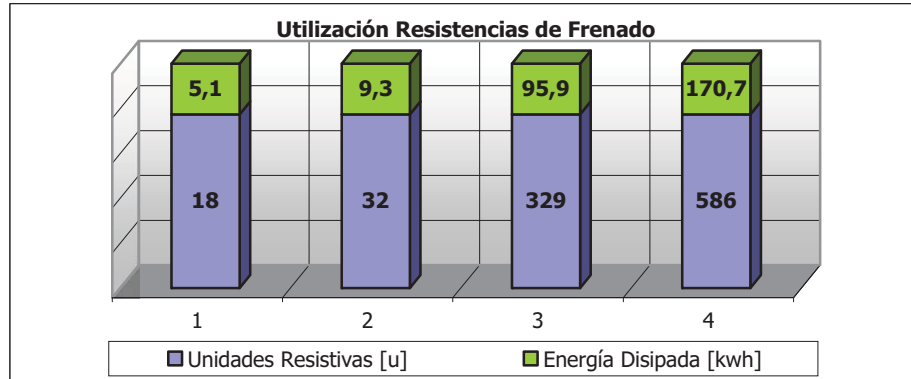


Fig. N° 5-14: Porcentaje de Utilización de las Resistencias de Frenado

- 1) Frenado Locomotora al 100% de Disipación
- 2) Frenado Locomotora al 55% de Disipación
- 3) Frenado Tren Cargado al 100 % de Disipación
- 4) Frenado Tren Cargado al 55 % de Disipación

Con este número de resistencias de frenado disponibles en la locomotora, el frenado electrodinámico sería capaz de frenar el tren completo con carga sin utilizar los frenos de los carros metaleros. Sin embargo, la locomotora no dispone de espacio suficiente para albergar dicha cantidad de resistencias. Por tal razón las alternativas de disipación de la energía no pueden ser aplicables a la locomotora.

5.6.2 Análisis Energético de la Flota de Trenes

Para analizar la energía total consumida por la flota completa de trenes, es necesario tabular los ciclos de salidas con carga de todos los trenes presentes en un turno promedio, para extrapolar la información al flujo energético diario. Con ello se puede establecer el índice de regeneración y por ende el valor de recuperación por *kWh* generado durante el frenado.

Se evaluó, el número de trenes que salen cargados desde la mina, con ello se analizan los intervalos de tiempo entre cada tren y las vueltas de cada uno, como además los tráficos en la vía. Para ello se genera un modelo estadístico que estima el promedio en la hora de salida de cada vuelta por tren, evaluando la variación entre salidas, lo cual indica el tiempo promedio de cada vuelta y finalmente la duración promedio de cada.

Tabla 5-1: Tiempos Promedio

	V1	V2	V3	V4	x
Hora entre Salida	22:16	20:32	18:40	16:44	
Minutos entre Salida	25,5	43,2	29,4	17,4	29,1
Hora entre Salida	1:43	1:52	1:55	1:08	1:40

Tabla 5-2: Tiempos Promedio

	V1	V2	V3	V4	V5	x
Hora entre Salida	22:45	21:24	19:54	18:21	16:37	
Minutos entre Salida	6,4	7,5	12,4	14,5	11,3	10,5
Hora entre Salida	1:21	1:30	1:32	1:43	1:01	1:25

A través del modelo estadístico generado se expresan los itinerarios medios que involucra el transporte del mineral, verificando los tiempos del proceso.

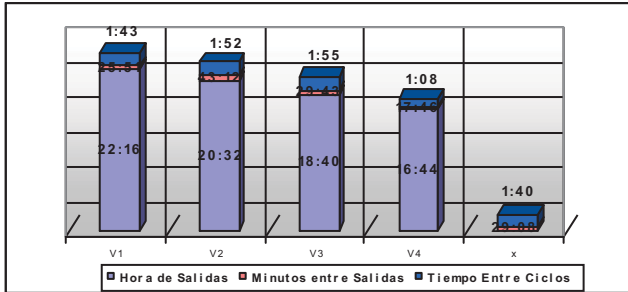


Fig. No 5-15: Promedios en las 5 Vueltas de un Tren

Se identifican los tiempos para un promedio de 5 y 4 vueltas por turno establecidos en la *Tabla 5-1* y la *Tabla 5-2*. Con estos promedios de tiempos estimados se genera una muestra del ciclo completo de energía de la flota total de trenes. Como los datos tomados en el capítulo cuatro fueron preferentemente en turno *A* o a comienzos del turno *B*, se analiza la flota estableciendo un promedio de 4 vueltas por turno, en especial el turno *B*, ya que este no presenta las detenciones de los trenes por horario de ventana (en la cual se realiza la inspección a los trenes), como existe en el turno *A*.

Los promedios de las vueltas asignadas a cada una de las salidas, proporcionan una referencia del tráfico diario al que se ve expuesta la vía férrea. Con ello es posible estimar el tiempo en que los trenes se encuentran regenerando, la que en promedio alcanza las 8 horas diarias. Conocido el tiempo promedio de regeneración es posible estimar el ahorro energético referido a una alternativa de regeneración, la cual involucra un ahorro anual significativo al proceso de transporte.

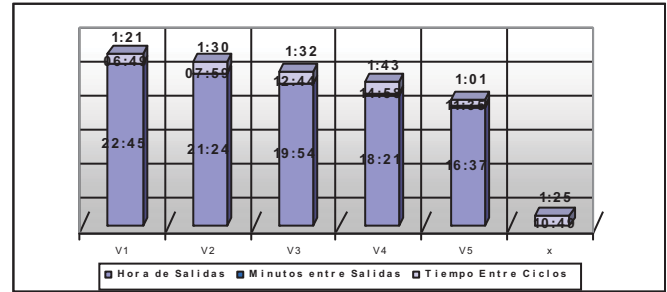


Fig. N° 5-16: Promedios en las 4 Vueltas de un Tren

5.7 Análisis del Porcentaje de Carga de cada tipo de Frenado

El nivel de carga de los frenos mecánicos de los carros metaleros que componen el tren, depende de la aplicación de la presión de aire aplicada desde la locomotora, en una de las modificaciones realizadas al software del PLC, se vario la curva de frenado mecánico de los carros modificando la presión aplicada, además de la efectividad del frenado electromecánico de la locomotora, todo esto para asegurar la operabilidad de los trenes en producción, mientras el frenado no supere la carga máxima de temperatura de las resistencias de frenado establecida en un 70% de aumento de temperatura en el elemento resistivo.

5.6.1 Parámetros de Cambios para el Tipo de Frenado

Para generar el cambio de los parámetros que modifican la aplicación de los frenos tanto de la locomotora como las de los carros metaleros, se monitorea la carga del grupo de resistencias de frenado para cada uno de los cuatro convertidores, de esta forma se conoce el porcentaje de carga de dichas resistencias.

Precisamente si el bloque de resistencias de alguno de los cuatro convertidores supera cierto porcentaje, el control activa una señal que indica una sobrecarga del frenado electrodinámico.

Al momento de activarse esta señal se modifica la curva de frenos de los carros y se modifica la eficiencia en el porcentaje de activación del frenado electrodinámico. En este momento cuando existe una sobrecarga de las resistencias de frenado, se reduce la presión de aire que alimenta los frenos provocando un frenado mayor de los carros al igual que se bloquea el frenado electrodinámico a un porcentaje máximo fijo.

5.6.2 Modificaciones al software del PLC de la Locomotora

Para mejorar la funcionabilidad del freno de los trenes del nivel Tte. 8, se efectuaron modificaciones al sistema de frenos tanto de la locomotora como de los carros metaleros, estos se especifican en el siguiente diagrama de bloque.

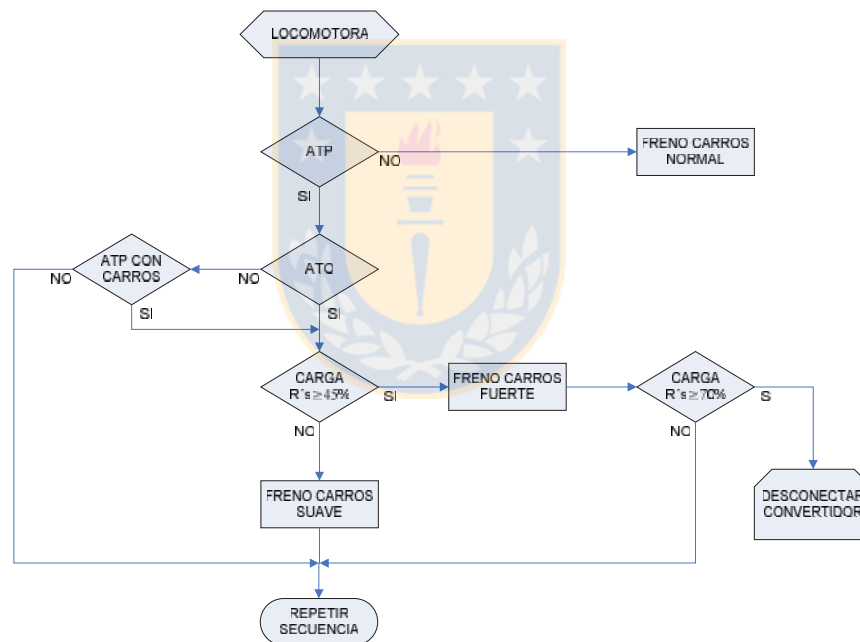


Fig. No 5-17: Diagrama de Flujo del Frenado Utilizado en la Actualidad.

De esta forma el freno electrodinámico está graduado a la capacidad de disipación térmica de las resistencias de frenado. De esta forma si la carga térmica supera el 45%, se reduce la efectividad del freno electrodinámico y se reduce la presión de frenos de la tubería principal de los carros metaleros. Así con una disminución rápida de presión de aire se logra una actuación fuerte de los frenos de los carros metaleros. Finalmente si la capacidad térmica de las resistencias de freno aumenta hasta llegar al 70%, incluso con el aumento de freno de los carros, se produce la desconexión del convertidor, en cuyo banco se produjo este aumento.

Capítulo 6. Evaluación Económica

6.1 Costos Asociados al Frenado de los Trenes

En el informe anual, que prepara la unidad de ingeniería de mantenimiento, se estableció un gran número de fallas en el subsistema de electrónica de potencia, en especial al ítem de diseño y vida útil del subsistema, debido principalmente a las fallas ocurridas en las resistencias de frenado de la locomotora.

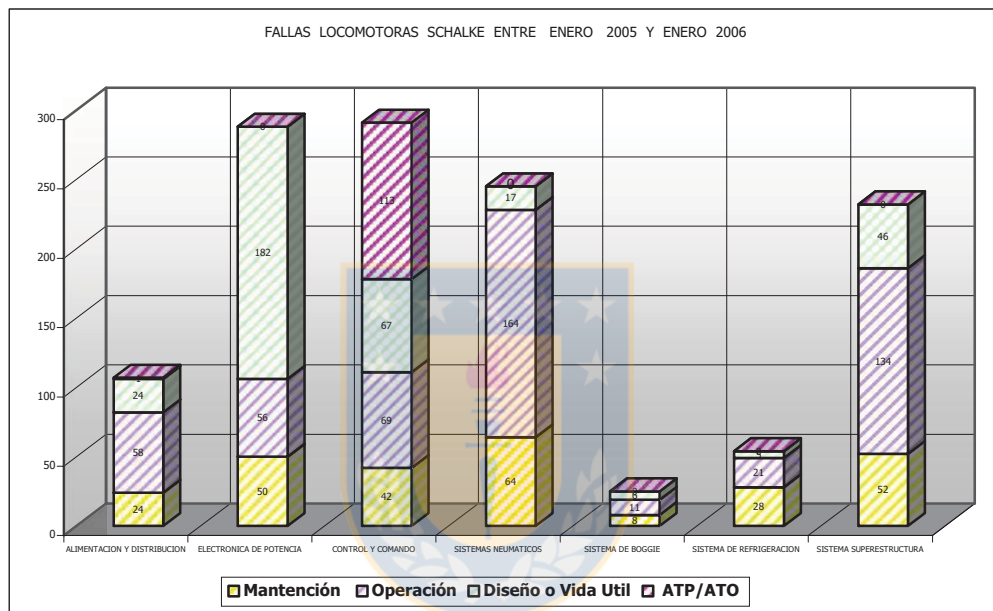


Fig. N° 6-1: Numero de fallas anuales en cada subsistema

Este análisis anual reveló que uno de los mayores costos, en lo que se refiere al frenado de los trenes lo aportan las resistencias de frenado, las zapatas de frenos de los carros metaleros y las zapatas de freno de las locomotoras, las dos primeras más relevantes en cuanto a cantidad y costo.

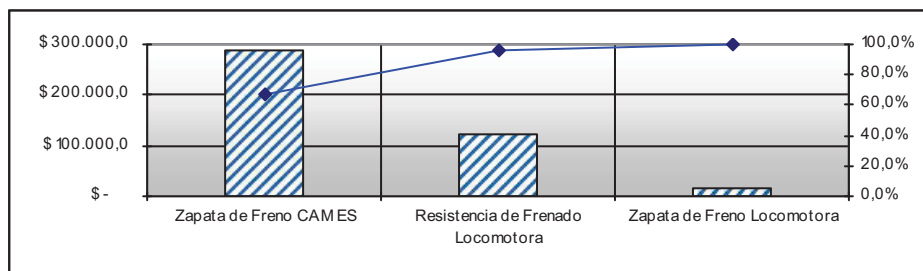


Fig. N° 6-2: Costos de los principales elementos del Frenado de los Trenes.

Del análisis se deduce que si se reducen los costos en las zapatas de frenos de los carros y las resistencias de frenado de la locomotora, se minimiza notoriamente el costo total del sistema de frenado, en donde el costo de las resistencias de frenado debido a su durabilidad y cantidad alcanza el 29% del total, como se aprecia en la *Fig. N° 6-3*.

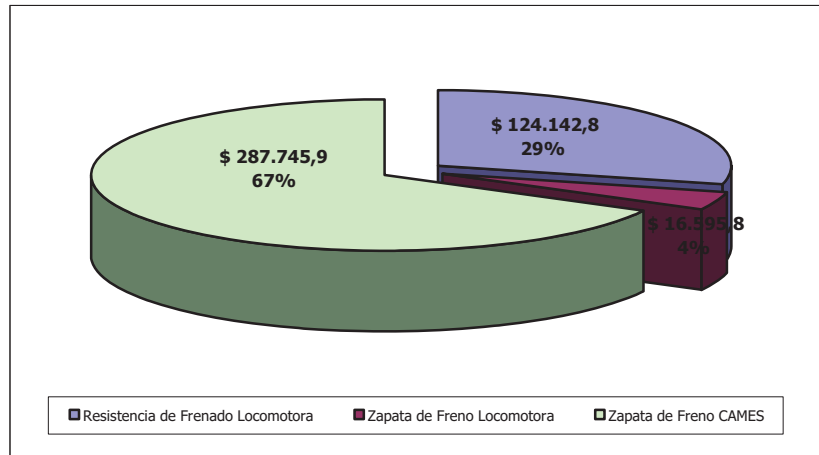


Fig. N° 6-3: Costos asociados a los elementos del frenado

En este análisis se aprecia que las variables que más inciden en los costos asociados al frenado de los trenes son los costos asociados a las resistencias de frenado de la locomotora y a la cantidad de zapatas de frenos de los carros para el parque total de trenes de la unidad ferroviaria.

Para el caso de las resistencias de frenado a contar de enero del 2004 a la fecha, se han solicitado 108 unidades con un costo total de US\$ 124.142,7. En el caso de las zapatas de freno de los Carros Metaleros, se enumeran desde enero del 2004 a enero del 2006 un total de 18.958 unidades de zapatas marca “cobra” con un costo de US\$ 211.571,2; y a partir del cambio en el proveedor de zapatas para los carros desde enero del 2006 a la fecha se han solicitado 5.998 unidades de zapatas marca “siderea”, con un costo de US\$ 76.174,6; lo que se traduce en un total de US\$ 287.745,8 en consumo de zapatas de frenos con un total de 24.956 para el periodo analizado, es decir desde enero del 2004 a enero del 2006.

Se espera que una mejora en el sistema de frenado electrodinámico reduzca estos costos al disminuir la cantidad de fallas, o cambios de las resistencias debido a las deformaciones de las placas, además de reducir el desgaste de las zapatas de frenos de los carros metaleros producto del menor esfuerzo mecánico.

6.1.1 Costos Anuales del Sistema de Frenos

Este promedio de costo se estima mediante el cálculo anual del mantenimiento del ítem analizado, para el valor esperado se enumeran las unidades que deben ser cambiadas en el tiempo promedio estimado al valor actual de la unidad. En cambio para el valor real se calcula mediante las unidades compradas durante el tiempo de funcionamiento total del parque, divididas por los años en que se han mantenido operativas.

6.1.1.1 Costos Anuales Asociados a las Resistencias de las Locomotoras.

El fabricante de las resistencias de frenado asegura que la vida útil promedio de las unidades resistivas es a lo menos de veinte años, esto es siempre y cuando no se sobre exijan las unidades y se mantengan los niveles de potencia y tiempo de disipación por debajo de lo establecido por el fabricante.

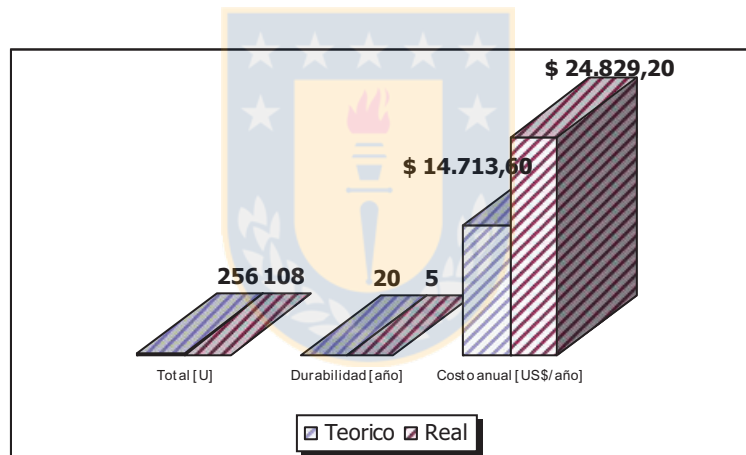


Fig. N° 6-4: Costo anual de las resistencias de frenado.

El parque total de locomotoras utiliza 256 resistencias de frenado, cada resistencia tiene un costo unitario de *US\$ 1.149,5* que traducido al parque total equivale a *US\$ 294.272*. Sin embargo, se debe agregar que este cambio efectivo sólo debe realizarse a lo más cada veinte años, por lo que el costo anual se reduce notoriamente.

En base al análisis de costos reales y los esperados, se estima un gasto mayor aproximado de diez mil dólares, lo que se debe principalmente a la menor duración que experimentan las resistencias de frenado.

6.1.1.2 Costos Anuales Asociados a las Zapatas de los Carros Metaleros

En las pruebas realizadas durante el cambio de proveedor de las zapatas de frenos de los carros metaleros, se estimó que la duración promedio alcanzaba los 90 días, por tanto al costo por flota se debe agregar los cuatro cambios anuales, de esta forma se analiza el costo anual referido a este elemento.

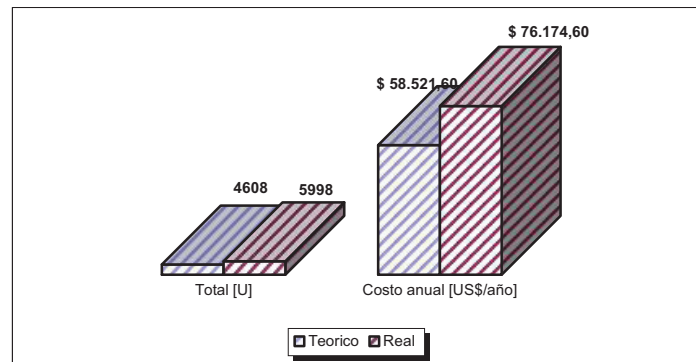


Fig. N° 6-5: Costo anual de las zapatas de freno.

Cada zapata de freno de los carros metaleros tiene un costo de *US\$ 12,3* la unidad, extrapolado a las ocho ruedas dispuestas en los boogies del carro, en donde cada tren contiene 18 carros, el costo por tren equivale a *US\$ 1.828,8*; por tanto el costo de la flota de 8 trenes equivale *US\$ 14.630,4*; con un total de 1.152 zapatas de frenos. Los cambios anuales de zapatas efectuados a cada tren, estimado cada tres meses, ocasiona cuatro cambios anuales, equivalente a *US\$ 7.315,2* por tren, por lo que el costo total anual por flota alcanza los *US\$ 58.521,6*: con un total de 4608 zapatas.

En base al análisis de costos reales y los esperados, se estima un gasto mayor de diecisiete mil dólares, referido principalmente a las exigencias en el frenado neumático de los carros metaleros, producto de la menor eficiencia del frenado electrodinámico de las locomotoras.

6.2 Disminución de Costos en el Mantenimiento

En una primera evaluación, se estima los costos asociados al mantenimiento en función a los gastos fijos del sistema de frenos, generados por la reposición de los elementos que provocan el frenado. De esta forma se analizan los costos asociados al cambio de las resistencias de frenado de las locomotoras, y de las zapatas de freno de los carros, en las actuales condiciones de operación.

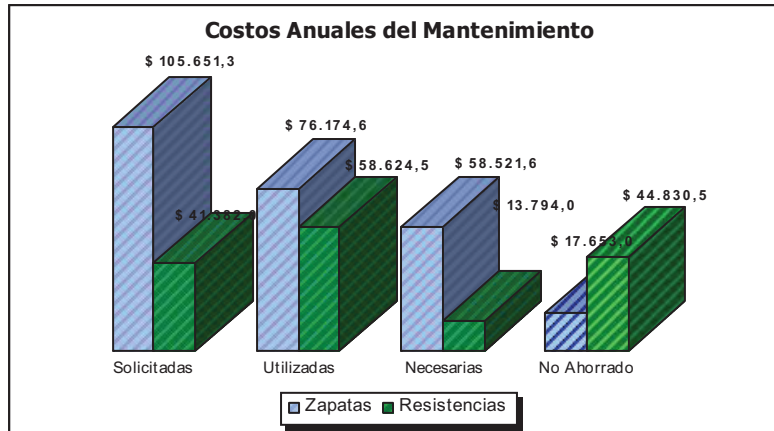


Fig. N° 6-6: Costo Total de Mantenimiento referido al año.

La gráfica muestra los costos en el consumo promedio anual de los elementos que involucran el frenado del tren, en este caso las zapatas de freno de los carros metaleros y las resistencias de frenado de la locomotora. En la *Fig. N° 6-6* se muestra que el costo utilizado no es significativamente mayor que el necesario, ya que para el caso de las zapatas de los carros de los trenes el aumento de frenado produce mayor desgaste reduciendo la durabilidad de la zapata, el cual afecta la media del costo final total anual. Sin embargo, el reducir en al menos un 20% el desgaste total de las zapatas, el costo real será cercano al óptimo entre el valor utilizado y el valor necesario usado en los carros.

Así también se aprecia el alto costo en que se ha incurrido hasta la fecha en resistencias de frenado, debido a las fallas ocurridas en ellas en el transcurso de la puesta en marcha de la operación de la locomotora con ATO Supervisado, debido a las altas exigencias de velocidad que experimenta el tren tanto en la subida como en la bajada de la mina.

Se espera que con las mejoras al sistema de frenado de los trenes, en especial la incorporación de las subestaciones regeneradoras de la energía proveniente del descenso de los trenes metaleros, se haga un uso más eficiente de la energía que alimenta al sistema de rectificación del FFCC Tte. 8.

6.3 Alternativas de Disipación de Energía

En este apartado se presentan algunas de las alternativas para la correcta recuperación de la energía producida por el frenado de los trenes. En base a la viabilidad económica de la mejora, se espera establecer los beneficios que esto traerá, tanto a los equipos como en una posterior alternativa de regeneración de la energía eléctrica producida por el frenado de los convoyes cargados desde el interior de la mina.

Las alternativas más atractivas desde el punto de vista técnico son en el orden de prioridad, y no así desde el punto de vista económico, como sigue:

- La regeneración de la energía para ser traspasada a los usuarios de las estaciones alimentadoras “Cordillera y Reservas Norte”
- La disipación de la energía en resistencias de frenado dispuestas en las subestaciones de mayor nivel energético.
- La regeneración de la energía para el uso de las luminarias al interior del túnel de la mina o en calefactores de agua para el uso de las maestranzas.

6.3.1 Análisis de la Vialidad Económica de la Propuesta

En los puntos anteriores se estableció que las locomotoras para tener un frenado eficiente del convoy completo y cargado, sin sobrecargar las unidades resistivas y utilizando al mínimo las zapatas de freno de los carros, debe disponer en cada locomotora más de 300 unidades resistivas con las características de diseño que tienen las que actualmente se usan.

Bajo este supuesto se analiza los costos asociados a la implementación de esta alternativa que aunque inviable físicamente, presenta la ventaja de recibir y disipar la energía del frenado de cada tren, por lo que la disipación se realiza en forma más eficiente y de forma segregada e individualizada para cada convoy con su carga respectiva.

De esta forma se presenta el análisis económico de esta alternativa con el solo propósito de identificar los costos asociados al frenado del tren con las resistencias de la locomotora. Cabe mencionar que este análisis no involucra la disminución de los costos asociados a la menor utilización de las zapatas de los carros, la cual se analiza en los siguientes puntos.

El total de inversión asociada a la intervención de las locomotoras que involucra las 330 unidades resistivas de frenado por tren, es equivalente a los *US\$ 379.325,1*; lo que traducido al gasto de la flota completa de trenes, equivale a *US\$ 3.034.600,8*.

Esta consideración tiene la ventaja que al no sobrecargar las resistencias de frenado, la vida útil de las unidades resistivas cumpliría con lo estimado por lo el fabricante, el cual supera los diez años sin necesidad de cambio a total operatividad.

La inversión anterior es consideradamente alta, además el no contemplar el freno de servicio de los carros involucra una variable de inseguridad al sistema, por este motivo no se genera un análisis económico de esta alternativa.

6.3.2 Alternativa de Regeneración

Debido al alto nivel energético que produce el descenso de los trenes cargados desde la mina a la planta de chancado ubicada en Colón, se propone un sistema de conversión de la energía continua que proveen las subestaciones del ferrocarril para ser devuelta a las subestaciones alimentadores cordillera y reservas norte.

El equipo que se recomienda utilizar en este caso es suministrado por la firma *Siemens*, el cual incorpora un inversor, proporcionando una alternativa de regeneración al sistema de freno de los trenes. De esta forma la energía fluye desde el convoy al sistema de media tensión a través del inversor.

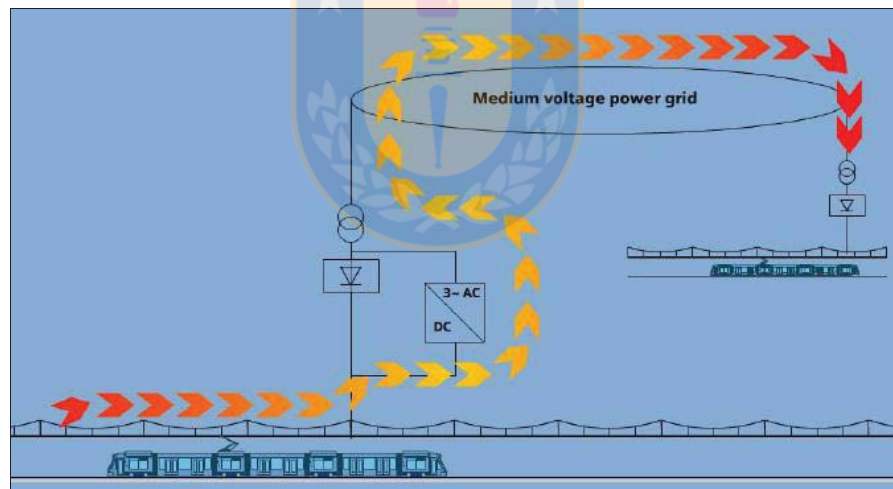


Fig. N° 6-7: Principio de Operación del TCI Sistras

Este equipo es usado en las fuentes de energía convencionales de los sistemas ferroviarios, en donde a través de la conexión en paralelo de cada inversor, las subestaciones equipadas con diodos rectificadores pueden adquirir la capacidad de retornar la energía “excedida” del enlace DC, al sistema de media tensión que alimenta a las subestaciones rectificadoras.

Este equipo presenta entre sus principales características:

- La energía de frenado puede ser transmitida al sistema de potencia de media tensión o a cargas que eventualmente se encuentran lejos.
- El sistema de potencia de media tensión, es usualmente capaz de recibir una cantidad no limitada de energía.
- El número de Resistencias de Frenado de las locomotoras puede ser reducido al mínimo.
- Las subestaciones rectificadoras, pueden absorber la energía excedida del enlace DC.

El sistema inversor puede integrarse fácilmente en las subestaciones, en este caso a un nivel de voltaje de $750 V_{DC}$, este contiene un auto transformador un interruptor, un desconectador DC, y un reactor de continua, como se muestra en la *Fig. No 6-8*.

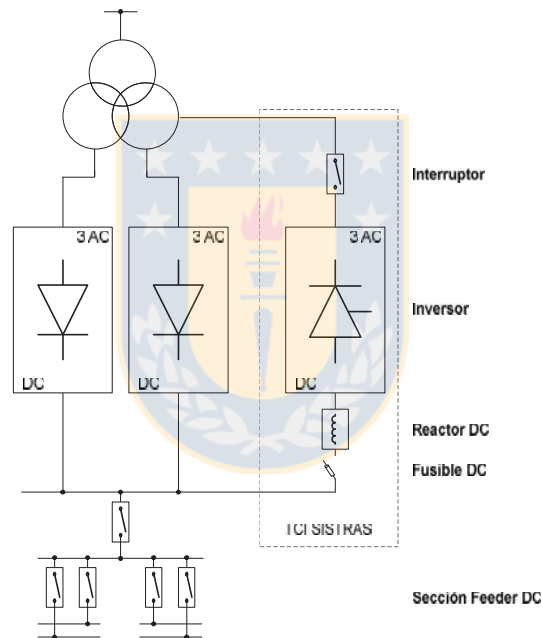


Fig. N° 6-8: Diagrama Esquemático TCI integrado en una SSEE.

El lado DC del inversor se conecta simplemente a los terminales positivo y negativo del rectificador ubicado en la subestación. De igual forma el lado AC trifásico del inversor es conectado al bobinado secundario del transformador existente del rectificador.

Cada equipo puede regenerar una cantidad limitada de energía especificada como se muestra en la *Fig. No 6-9*, en donde la potencia nominal que entrega el equipo a un valor de corriente de $3kA$, durante 30 segundos.

$$Pot = V \cdot I = 750 \cdot 3000 = 2.400kw \quad ec. 6-1$$

$$Ene = Pot \cdot t = 2400000 \cdot 30 = 72Mws = 20kwh \quad ec. 6-2$$

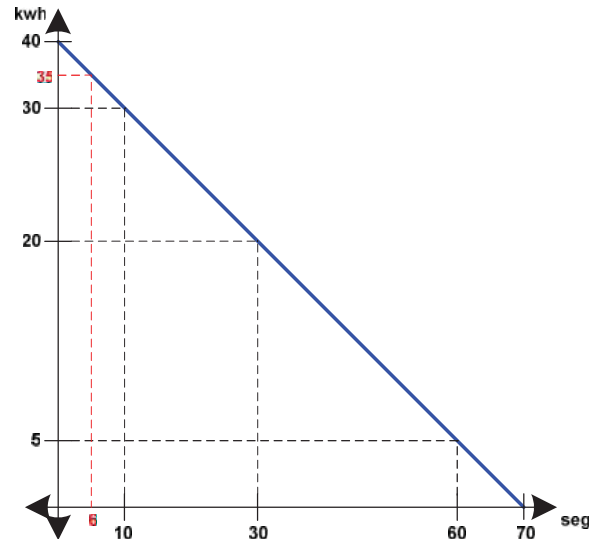


Fig. N° 6-9: Margen de Regeneración de Energía en el tiempo

Además el equipo presenta una eficiencia del 96%, es decir al nivel nominal de potencia especificado en la *ec. 6-1*, las pérdidas asociadas equivalen al 4% restante, es decir, 96kw.

Una imagen del equipo de Regeneración “TCI Sistras”, se muestra en la *Fig. No 6-10*.

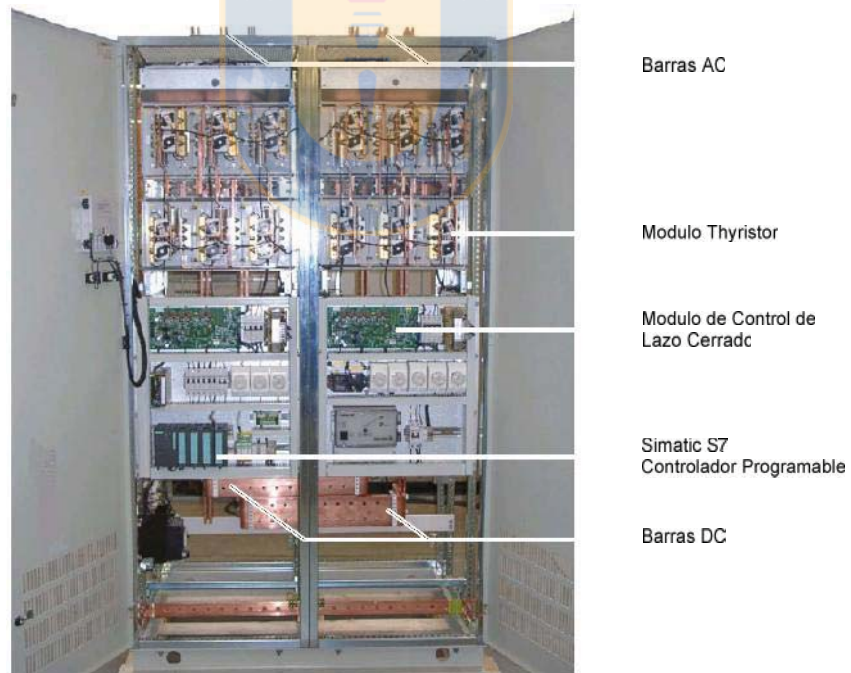


Fig. N° 6-10: Equipo Regenerativo TCI

6.3.2.1 Análisis Económico de la Propuesta

Para analizar la viabilidad de la alternativa, se presenta un análisis económico que contempla principalmente:

- Costo de los Equipos, Montaje y Puesta en Marcha
- Ahorro de Mantenimiento
- Ahorro de Energía
- Ingresos por mayor transporte de mineral.

Del análisis de los principales índices que involucra el *VAN*, en este caso existe una disminución de costos anuales, debido a la menor utilización de los elementos que producen el frenado, por un total de *US\$ 62.000*, de igual forma una disminución en los gastos del consumo de energía anual equivalentes a los *US\$ 11.000* y finalmente un ingreso anual promedio de *US\$ 1.000.000* por concepto de mayor mineral transportado. La tasa de descuento utilizada para proyectos de inversión mineros al interior de la división, alcanza al *8,5%* anual, es por ello que se utiliza esta variable en el cálculo final del valor neto actual.

Tabla 6-1: Viabilidad Técnico Económica de la Propuesta

EVALUACION ECONOMICA SUBESTACIONES REGENERATIVA FFCC TTE 8												
Minutos Perdidos Diarios	20,0											
Horas Perdidas Mensuales	10,0											
Dias Perdidos Anual	5,0											
Ton. Prod./Dia	131.000,0											
Ton. Prod./Anual	47.815.000,0											
Ton. Perd./Anual	655.000,0											
% Ton. Perd./ Anual	1,4%											
US\$ Tonelada	\$ 1,6											
US\$ Ton. Perd./Anual	1.048.000,0											
Eval. Eco. Anual	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Inversión												
TCI	920.000,0	839.200,0	828.400,0	817.600,0	806.800,0	796.000,0	785.200,0	774.400,0	763.600,0	752.800,0	742.000,0	
Depreciación	80.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	10.800,0	
Ahorro												
Energía		11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	11.036,2	
Zapatillas de Frenos		17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	17.653,0	
Resistencias de Frenado		44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	44.830,0	
US\$ Por Toneladas Perd		1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	1.048.000,0	
Flujo Anual A-I		1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	1.121.519,2	
Flujo de Caja	-920.000,0	293.119,2	303.919,2	314.719,2	325.519,2	336.319,2	347.119,2	357.919,2	368.719,2	379.519,2	390.319,2	
Costos	0,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	-8.000,0	
Utilidad Operacional	0,0	285.119,2	295.919,2	306.719,2	317.519,2	328.319,2	339.119,2	349.919,2	360.719,2	371.519,2	382.319,2	
Diferencia por Venta de Activos											112.000,0	
Flujo de Caja Proyecto Final	-920.000,0	285.119,2	295.919,2	306.719,2	317.519,2	328.319,2	339.119,2	349.919,2	360.719,2	371.519,2	494.319,2	
Flujo Neto Anual												
TMAR		8,5%										
VAN		1.172.365										
IVAN		1,27										
TIR		32,0%										

Con el análisis económico presentado se da a conocer que debido a que el *VAN* del proyecto es positivo, la recuperación de la inversión se hará en un tiempo proyectado menor a los 10 años, con un beneficio económico año tras año lo que se muestra en los flujos de caja anuales. De esta forma lo que genera el proyecto es totalmente rentable económicamente desde el punto de vista de los flujos netos representados al inicio del proyecto, así debido a que estos flujos son positivos al inicio del proyecto y son mayores en relación al valor total de inversión, el proyecto es viable.

De igual forma el *IVAN* calculado es positivo y representa la proporción de ingreso total referido al valor inicial de inversión comprometido. Este es otro dato importante que indica el beneficio de la generación de esta propuesta.

Así mismo la *TIR*, que representa la rentabilidad interna del proyecto, arroja un porcentaje aceptable para la envergadura del proyecto. De esta forma se puede decir que el capital invertido es recuperado a la tasa de descuento utilizada en el porcentaje indicado por la *TIR*, para este caso cercano al 32% de utilidad.

El siguiente cuadro muestra de mejor forma los flujos anuales que presenta el proyecto.

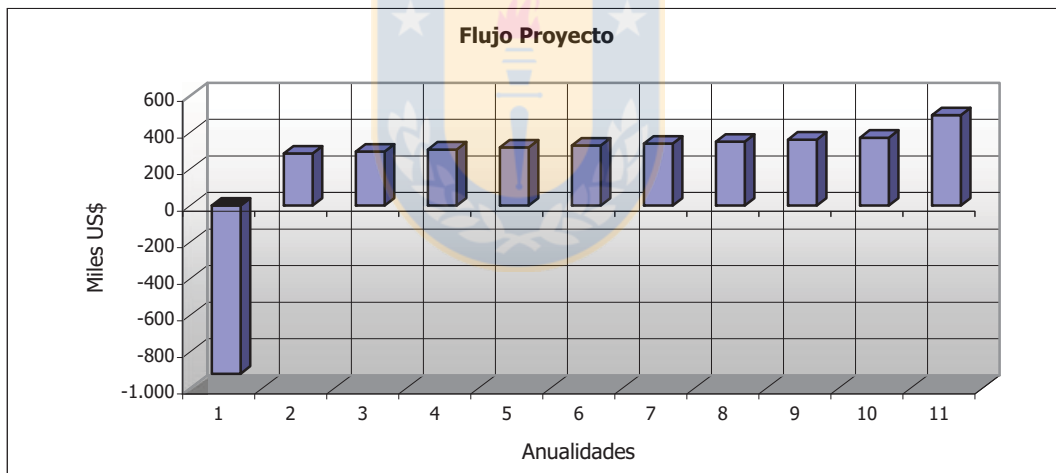


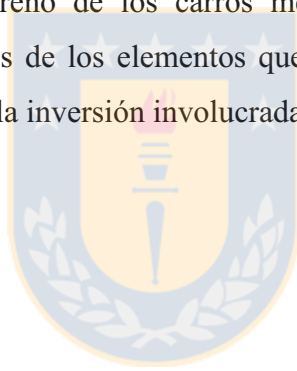
Fig. N° 6-11: Flujo de Caja Final.

Capítulo 7. Conclusiones

A continuación se enumeran las conclusiones del trabajo expuesto y se expresan algunas recomendaciones, referentes al sistema de frenos de los trenes.

- Las fallas ocurridas en las resistencias de frenado de las locomotoras se deben a las exigencias impuestas por el sistema *ATO*, que demanda al máximo la aceleración y el frenado del tren.
- Debido a que la etapa de rectificación son clásicos puentes de diodos, el aumento en el voltaje del enlace DC de las locomotoras producto del frenado electrodinámico, no puede ser descargado hacia la red o controlado por las rectificadoras, por tal razón es necesario disipar este exceso de energía.
- Las resistencias de frenado están diseñadas para disipar la energía generada solamente por la locomotora. La cual alcanza los $5,1 \text{ kWh}$ a una velocidad de 60 km/h . De esta forma existe un margen de sobredimensionamiento de un 45% , sobre el máximo nominal de energía que genera la locomotora, es decir, aún es posible disipar en el banco de resistencias $4,2 \text{ kWh}$.
- El sistema de frenos de la locomotora es superior en cuanto a reacción al frenado mecánico de los carros metaleros, por tal razón la locomotora asume la energía de todo el convoy los primeros seis segundos en promedio de cada aplicación del freno de los trenes. Esta energía alcanza los $95,6 \text{ kWh}$ y el banco de resistencias es capaz de disipar tan solo $9,3 \text{ kWh}$, lo que evidencia la sobrecarga de las resistencias de frenado.
- Para frenar el tren completo y cargado, es necesario disponer de más de 500 unidades resistivas, lo cual tendría la ventaja de disipar segregadamente la energía de cada tren. Desafortunadamente físicamente no es posible integrar dicha cantidad de resistencias de frenado en la locomotora.

- La solución generada por la Unidad de Mantenimiento en relación a las modificaciones del software que controla la aplicación en la carga tanto del freno electrodinámico de la locomotora como del freno mecánico de los carros, está limitada por los rangos admisibles de energía que el banco resistivo pueda disipar. Así es ineludible la inyección de energía por parte de los carros hacia el banco resistivo debido al retardo en la aplicación del freno mecánico. De esta forma en un eventual aumento en la carga o en la velocidad del tren, deberán ser modificados los parámetros que regulan la aplicación de freno.
- La propuesta de regeneración de la energía se enmarca en la utilización del porcentaje que no es capaz de disipar el banco resistivo a bordo de las locomotoras. En este sentido es posible mejorar la eficiencia del frenado electrodinámico, compensando de esta forma el retardo asociado al freno de los carros metaleros. Esta propuesta introduce una disminución de los costos de los elementos que generan el frenado en las condiciones actuales, lo que favorece la inversión involucrada en el equipo regenerativo.



Capítulo 8. Bibliografía

- [1] Ned Mohan, “*Power Electronics, Converters, Applications, and Desing*”, John Wiley & Sons, Inc., USA 1995.
- [2] A. E. Fitzgerald “*Electric Machinery*”, McGraw Hill, USA 1990.
- [3] Mejía Serrano, Oscar Antonio: “*Estudio del Impacto que tiene la conexión de las palas retroexcavadoras regenerativas en los sistemas de distribución*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Septiembre 1997, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [4] The Association of American Railroads: “*Manual of Standards and Recommended Practices*”, USA 2002.
- [5] José R. Rodríguez, Juan W. Dixon, José R. Espinoza, Jorge Pontt, Pablo Lezana “*PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art*”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 52, Febrero 2005 pp 5 – 22.
- [6] M. A. Pérez, José R. Espinoza, José R. Rodríguez and P. Lezana “*Regenerative Medium Voltage AC Drive Based on a Multicell Arrangement with Reduced Energy Storage Requirements*”, Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume 52, Febrero 2005 pp 171 – 180.
- [7] M. H. Rashid “*Power Electronics Handbook*”, Academic Press 2001.
- [8] Gaete González, Fernando Roberto: “*Análisis y Simulación del accionamiento eléctrico de las palas de extracción minera Bucyrus*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Eléctrico, Abril de 2005, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [9] Pérez Leiva, Marcelo Alejandro: “*Análisis Diseño e Implementación de Convertidores Trifásicos CSI y VSI*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Electrónico, Diciembre 2000, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

- [10] Christian G. Flores M. “*Análisis y Evaluación de Accionamientos Regulados en C.A. Con Inversor Fuente de Voltaje*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Eléctrico, Abril de 1997, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.
- [11] Oscar G. Vega A. “*Estudio y Especificación Técnica de Fuentes de Potencia Controlada para Accionar Locomotoras*”, Memoria de Título, Ingeniero Civil Eléctrico, Octubre de 1993, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción
- [12] Codelco Chile - División el Teniente, Proyectos Mina “*Electric Locomotive Railroad Level Teniente 8*” Especificación Técnica, ESP-PM 33/00, Septiembre 2000.
- [13] Frizlen Power Resistor, “*Dynamics Trough Resistor*”, Catálogo de elementos de las Resistencias de Frenado, Reino Unido, Marzo 2000.
- [14] Schalker Eisenhütte, “*Oferta Técnica Locomotoras de Producción*”, Offert N° 00.33.1030, Abril 2001.
- [15] Siemens Product Information, “*TCI SITRAS Thyristor Controlled inverter for DC Traction Power Supply*” Earlang Germany 2005.
- [16] Unidad Ingeniería Mantenimiento “*Evaluación Económica Trolley Desplazable FFCC Tte8 Interior Mina*”, Superintendencia Mantenimiento Mina, La Junta 2006.

