

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

**Dr. Daniel G. Sbarbaro H.**

Profesor Co-guía:

**Dr. Rubén S. Peña G.**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:

**Ingeniero Civil Eléctrico**

## Análisis del impacto de la operación de múltiples camiones en sistema de trolleys mineros

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
Dr. Daniel G. Sbarbaro H.

# Análisis del impacto de la operación de múltiples camiones en sistema de trolleys mineros



Nicolás Ignacio Sanhueza Rivera

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

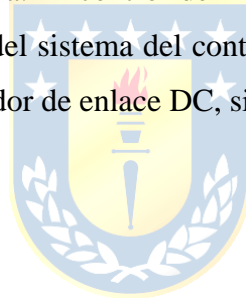
Ingeniero Civil Eléctrico

Mayo 2024

# Resumen

En este trabajo se ha desarrollado un modelo de un sistema de asistencia trolley con capacidad regenerativa implementado en la plataforma PLECS, una herramienta especializada en la simulación de sistema de potencia, reconocida por su interfaz gráfica intuitiva y la capacidad de realizar simulaciones a alta velocidad. El sistema de asistencia de trolley diseñado está compuesto por convertidores VSI de dos niveles, con control vectorial de frente activo para el convertidor de línea y control vectorial indirecto para las máquinas de inducción que forman parte del modelo los camiones mineros. Se detallan los principales componentes de un sistema de asistencia trolley y sus consideraciones de diseño para abordar la simulación en PLECS. Por último, se presenta el modelo diseñado en PLECS y se analizan tres escenarios operativos.

Los resultados muestran un desempeño eficiente, con bajos niveles de THD, factor de potencia unitario, una dinámica acorde a las condiciones operacionales evaluadas. El uso de las baterías logran disminuir la carga energética del sistema. El control de frente activo deberá ser lo suficientemente rápido para asegurar la sincronización del sistema del control ante la alta demanda energética junto con la selección adecuada del condensador de enlace DC, siendo los aspectos críticos de diseño.



## Abstract

A model of a regenerative trolley assistance system has been developed using PLECS, a specialized tool for power system simulation, known for its intuitive graphical interface and ability to perform high-speed simulations. The design comprises two-level VSI converters, with active front-end vector control for the line-side converter and indirect vector control for the induction machines representing the mining trucks. The main components of the system and their design considerations for the simulation are detailed. Finally, the model designed in PLECS is presented, and three operational scenarios are analyzed.

The results show efficient performance with low levels of THD, unity power factor, and dynamics in line with the evaluated operational conditions. Using batteries enables a decrease in the energy burden on the system. The active front end control must be fast enough to ensure system control synchronization given the high energy demand, along with the appropriate selection of the DC link capacitor, being critical design aspects.





A quienes confiaron en mi...

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a mi amada familia, cuyo amor y apoyo han sido invaluable a lo largo de todo el proceso. Gracias por la confianza y por hacer todo lo posible para poder surgir y crecer como persona, por alentarme a seguir adelante.

A mis amigos, por su constante fuente de motivación y ánimo. El apoyo, las risas, y consejos han hecho de este camino mucho más llevadero. En especial, estoy muy agradecido de ser parte del gran tridente, su inquebrantable amistad y lealtad serán siempre recordadas. Estoy eternamente agradecido por compartir este camino con ustedes.

A mis profesores. Sus enseñanzas, paciencia y guía han sido fundamentales para mi desarrollo profesional. En especial, a los profesores Daniel Sbarbaro y Rubén Peña, estoy agradecido por brindarme la oportunidad de desarrollar mi memoria de título. Su constante orientación, sabiduría y consejos serán siempre una fuente de inspiración invaluable. Estoy honrado de haber aprendido de ustedes.



# Índice General

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XI</b>
<b>ABREVIACIONES .....</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2.1 <i>Hipótesis de Trabajo</i> .....	2
1.2.2 <i>Objetivo General</i> .....	2
1.2.3 <i>Objetivos Específicos</i> .....	2
1.3. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	3
1.4. TEMARIO Y METODOLOGÍA.....	3
<b>CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA.....</b>	<b>5</b>
2.1. TROLLEY ASSIST.....	5
2.1.1 <i>Infraestructura</i> .....	5
2.1.2 <i>Beneficios y Consideraciones</i> .....	7
2.2. FLOTAS DE CAMIONES.....	9
2.2.1 <i>Camión Convencional</i> .....	9
2.2.2 <i>Camión híbrido diésel-eléctrico con asistencia trolley</i> .....	10
2.2.3 <i>Camiones BEV con asistencia trolley</i> .....	11
<b>CAPÍTULO 3. FUNDAMENTO DE CONTROL DE CONVERTIDORES Y ACCIONAMIENTOS.....</b>	<b>16</b>
3.1. TRANSFORMADAS CLARK-PARK.....	16
3.2. MODULACIÓN VECTORIAL SVPWM .....	17
3.3. SISTEMA DE POTENCIA .....	21
3.3.1 <i>Convertidores bidireccionales AC-DC</i> .....	21
3.3.2 <i>Convertidor bidireccional DC-DC</i> .....	21
3.3.3 <i>Enlace DC</i> .....	23
3.3.4 <i>Filtro enlace DC</i> .....	24
3.3.5 <i>Motor de tracción inducción AC</i> .....	24
3.4. ACTIVE FRONT END (AFE).....	28
3.4.1 <i>Principio de operación</i> .....	28
3.4.2 <i>Ventajas y desventajas del sistema AFE</i> .....	31
3.5. CONTROL POR CAMPO ORIENTADO (CONTROL VECTORIAL) .....	32
3.6. FRENADO REGENERATIVO APLICADO EN MOTORES ASÍNCRONOS .....	37
<b>CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>39</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	39
4.2. CONTROL VECTORIAL CONVERTIDOR FRONT-END.....	39
4.2.1 <i>Diseño lazo de tensión</i> .....	39
4.2.2 <i>Diseño lazo corriente</i> .....	42
4.3. DISEÑO CONTROL VECTORIAL INDIRECTO .....	43
4.3.1 <i>Determinación de la posición flujo del rotor</i> .....	44
4.3.2 <i>Diseño lazo de velocidad</i> .....	44
4.3.3 <i>Diseño lazo de corriente</i> .....	45
<b>CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN .....</b>	<b>47</b>
5.1. DESCRIPCIÓN .....	47

5.2.	ESCENARIO 1: DOS CAMIONES EN TRAMO DE SUBIDA .....	60
5.3.	ESCENARIO 2: CAMIONES EN TRAMO DE SUBIDA Y EN BAJADA .....	68
5.4.	ESCENARIO 3: TRES CAMIONES CON BATERÍA EN TRAMO DE SUBIDA .....	75
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....</b>		<b>88</b>
6.1.	CONCLUSIONES .....	88
6.2.	TRABAJO FUTURO.....	89
<b>REFERENCIAS .....</b>		<b>90</b>
<b>ANEXO A. CÓDIGOS .....</b>		<b>94</b>



# Lista de Tablas

Tabla 1 Estados de conmutación de los vectores espaciales .....	18
Tabla 2 Parámetros de la Máquina de Inducción Jaula de Ardilla PLECS .....	58
Tabla 3 Datos operacionales de los Motores de Inducción Jaula de Ardilla y convertidor asociado .....	58
Tabla 4 Parámetros línea y convertidor asociado.....	58
Tabla 5 Tabla resumen criterio de diseño y ganancias lazos de control .....	59
Tabla 6 Parámetros en configuración PLECS .....	59
Tabla 7 THD corriente trifásica Escenario 1 .....	61
Tabla 8 THD en corriente trifásica en Escenario 2 .....	69
Tabla 9 THD en corriente trifásica en Escenario 3 .....	77



## Lista de Figuras

Figura 2.1 Infraestructura Sistema de asistencia trolebús [7] .....	5
Figura 2.2 Diagrama en bloques del sistema de tracción de un camión minero convencional [12] ..	10
Figura 2.3 Esquema camión minero híbrido diésel-eléctrico conectado al sistema TA [13].....	10
Figura 2.4 Esquema configuración de Carga Dinámica BEV, adaptado de [9].....	12
Figura 2.5 Esquema configuración BEV de Carga Estacionaria, adaptado de [9].....	13
Figura 2.6 Esquema configuración BEV sistema dual, adaptado de [9].....	14
Figura 3.1 Diagrama fasorial Clark-Park [14] .....	16
Figura 3.2 Vectores conmutados y sectores SVPWM [15].....	19
Figura 3.3 Secuencia de estados en SVPWM simétrica [17].....	20
Figura 3.4 Diagrama circuital convertidor DC-DC bidireccional simplificado.....	23
Figura 3.5 Modelo máquina inducción jaula de ardilla PLECS [22] .....	25
Figura 3.6 Subsistema “abc $\leftrightarrow$ dq” del modelo de máquina de inducción jaula de ardilla en PLECS [22] .....	25
Figura 3.7 Diagrama general sistema de potencia Trolley Assist .....	27
Figura 3.8 Diagrama esquemático de un convertidor AFE, basado de [25] .....	28
Figura 3.9 Circuito equivalente AFE por fase, basado de [25] .....	29
Figura 3.10 Diagrama fasorial AFE bajo diferentes modos operativos (a) fp unitario (b) fp retraso (c) fp adelantado (d) Operación regenerativa a fp unitario, basado de [25] .....	30
Figura 3.11 Circuito equivalente por fase máquina de inducción.....	32
Figura 3.12 Operación cuatro cuadrantes de una máquina asíncrona .....	37
Figura 3.13 Curva torque velocidad para operación en cuatro cuadrantes [28].....	38
Figura 4.1 Diagrama en bloques del lazo de tensión en red, basado de [29] .....	41
Figura 4.2 Esquema de control de corrientes AFE.....	43
Figura 4.3 Diagrama en bloques control vectorial indirecto operando bajo la velocidad base, adaptado de [30].....	46
Figura 5.1 Diagrama general Trolley Assist diseñado en PLECS .....	48
Figura 5.2 Cálculo de potencia activa y reactiva instantánea en PLECS.....	49
Figura 5.3 Variables $I_o$ y $V_{dc}$ de enlace DC en PLECS.....	49
Figura 5.4 Filtro enlace DC.....	49
Figura 5.5 Transformadas abc/dq conservativas en amplitud en PLECS .....	50
Figura 5.6 Subsistema AFE Controller diseñado en PLECS .....	51
Figura 5.7 Subsistema Voltage Controller diseñado en PLECS .....	51
Figura 5.8 Subsistema Decoupled dq current control diseñado en PLECS .....	52
Figura 5.9 Sistema de potencia en Truck System diseñado en PLECS .....	53
Figura 5.10 Variables de control en Truck System diseñado en PLECS.....	54
Figura 5.11 Subsistema Control Vectorial diseñado en PLECS .....	55
Figura 5.12 Subsistema PI Velocidad diseñado en PLECS .....	55
Figura 5.13 Subsistema PI Corrientes diseñado en PLECS .....	55
Figura 5.14 Subsistema Modulador diseñado en PLECS .....	56
Figura 5.15 Subsistema Batería diseñado en PLECS.....	56
Figura 5.16 Variables motores Truck System 1 en Escenario 1 .....	62
Figura 5.17 Variables motores Truck System 2 en Escenario 1 .....	63
Figura 5.18 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 1 en Escenario 1 .....	64
Figura 5.19 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 2 en Escenario 1 .....	64
Figura 5.20 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 1 .....	65

Figura 5.21 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 1.....	65
Figura 5.22 Tensión en enlace DC en Escenario 1 .....	66
Figura 5.23 Corriente $I_o$ y valor RMS en Escenario 1 .....	66
Figura 5.24 Espectro armónico corriente $I_o$ previo al filtrado en Escenario 1 .....	67
Figura 5.25 Corriente $I_o$ filtrada en Escenario 1 .....	67
Figura 5.26 Variables motor Truck System 1 en Escenario 2.....	70
Figura 5.27 Variables motor Truck System 2 en Escenario 2.....	71
Figura 5.28 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 1 en Escenario 2.....	72
Figura 5.29 Voltaje y corriente por red ante conexión Trolley 2 en Escenario 2 .....	72
Figura 5.30 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 2 .....	73
Figura 5.31 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 2.....	73
Figura 5.32 Tensión en enlace DC en Escenario 2 .....	74
Figura 5.33 Corriente $I_o$ filtrada en Escenario 2.....	74
Figura 5.34 Variables motores Truck System 1 en Escenario 3 .....	78
Figura 5.35 Variables motores Truck System 2 en Escenario 3 .....	79
Figura 5.36 Variables motores Truck System 3 en Escenario 3 .....	80
Figura 5.37 Corriente inyectada por la batería de Truck System 1 en Escenario 3 .....	81
Figura 5.38 Corriente inyectada por la batería de Truck System 1 en Escenario 3 - Zoom .....	81
Figura 5.39 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 3 .....	82
Figura 5.40 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario.....	82
Figura 5.41 Tensión enlace DC en Escenario 3 .....	83
Figura 5.42 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 3 – Zoom.....	84
Figura 5.43 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 3 – Zoom.....	84
Figura 5.44 Tensión enlace DC en Escenario 3 – Zoom.....	85
Figura 5.45 Efecto en aumento de capacitancia en tensión de enlace DC en Escenario 3.....	86
Figura 5.46 Efecto en aumento de capacitancia en Igd en Escenario 3 .....	86
Figura 5.47 Efecto en aumento de capacitancia en Potencia Activa en Escenario 3 .....	87

# Nomenclatura

## Vectores

$\vec{v}_x$	: Vector de tensiones en marco $\alpha\beta$ , con $x = \alpha$ o $\beta$
$\vec{v}_s$	: Vector de tensiones, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{i}_s$	: Vector de corrientes, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{i}_r$	: Vector de corrientes, por fase, en rotor (marco abc)
$\vec{\psi}_s$	: Vector de flujo, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{\psi}_r$	: Vector de flujo, por fase, en rotor (marco abc)
$\vec{\psi}_{ls}$	: Vector flujo de dispersión estator
$\vec{\psi}_{lr}$	: Vector flujo de dispersión rotor
$\vec{\psi}_o$	: Vector de flujo en entrehierro
$\vec{v}_g$	: Vector de tensiones, por fase, de red (marco abc)
$\vec{i}_g$	: Vector de corrientes, por fase, de red (marco abc)
$\vec{v}_c$	: Vector de tensiones, por fase, resultantes en el convertidor AFE (marco abc)

## Escalares

$\alpha\beta$	: Marco de referencia bifásico Alpha-Beta (Clark)
$dq$	: Marco de referencia giratorio directo y en cuadratura (Park)
$V_{dc}$	: Tensión de enlace DC
$V_{xn}$	: Tensiones línea-neutro, con $x = a, b$ o $c$
$V_{xi}$	: Tensión línea-línea, con $x = a, b$ o $c$ , $i = a, b$ o $c$ , $x \neq i$
$T_x$	: Ciclo de trabajo del vector x-ésimo, $x = 0$ a $7$
$T_V$	: Ciclo de trabajo total de los vectores espaciales
$s_x$	: Estado de conmutación del interruptor de la rama $x$ , con $x = a, b$ o $c$
$\bar{s}_x$	: Estado complementario de conmutación de $s_x$ , con $x = a, b$ o $c$
$v_{gx}$	: Tensión de red por fase, con $x = a, b$ o $c$
$C_{dc}$	: Capacitancia de enlace DC
$v_{cx}$	: Tensiones entrada/salida convertidor AFE, con $x = a, b$ o $c$
$i_{gf}$	: Componente fundamental de corriente en AFE
$v_{cf}$	: Componente fundamental de tensión en AFE

$\delta$	: Ángulo de potencia
$L_g$	: Inductancia de filtro por red
$R_g$	: Resistencia de filtro por red
$v_c$	: Voltaje de convertidor de línea (fase)
$R_s$	: Resistencia estator
$R_r$	: Resistencia rotor
$L_o$	: Inductancia magnetizante
$L'_s$	: Inductancia de fuga del estator
$L'_r$	: Inductancia de fuga del rotor
$s$	: Deslizamiento
$L_s$	: Inductancia propia del estator
$L_r$	: Inductancia propia del rotor
$\tau_r$	: Constante de tiempo de rotor
$\sigma$	: Coeficiente de dispersión total
$i_m$	: Corriente magnetizante
$J_{eq}$	: Inercia total conjunto motor-carga referida al eje del motor [ $kg \cdot m^2$ ]
$T_e$	: Torque eléctrico desarrollado por el motor [ $N \cdot m$ ]
$T_L$	: Torque de carga presente en el motor [ $N \cdot m$ ]
$B$	: Coeficiente de fricción viscosa referido a la velocidad [ $kg \cdot m^2$ ]
$P$	: Numero de polos de la máquina
$\omega_r$	: Velocidad angular del flujo del rotor respecto al devanado del rotor [ $rads/s$ ]
$v_{sd}$	: Tensión de red en eje directo del marco giratorio dq
$v_{sq}$	: Tensión de red en eje cuadratura del marco giratorio dq
$\psi_{rd}$	: Flujo rotor en eje directo del marco giratorio dq
$\psi_{rq}$	: Flujo rotor en eje cuadratura en el marco giratorio dq
$\psi_{sd}$	: Flujo estator en eje directo en el marco giratorio dq
$\psi_{sq}$	: Flujo estator en eje cuadratura en el marco giratorio dq
$i_{sd}$	: Corriente estator en eje directo en el marco giratorio dq
$i_{sq}$	: Corriente estator en eje cuadratura en el marco giratorio dq
$i_{rd}$	: Corriente rotor en eje directo en el marco giratorio dq
$i_{rq}$	: Corriente rotor en eje cuadratura en el marco giratorio dq

$\omega_{SL}$	: Frecuencia de deslizamiento
$L_B$	: Inductancia convertidor DC-DC
$V_{in}$	: Voltaje de entrada
$V_{out}$	: Voltaje de salida deseado
$\Delta I_{LB}$	: Ripple de corriente estimado por inductor $L_B$
$f_{sb}$	: Frecuencia de conmutación del convertidor DC-DC
$T_{UT}$	: Tiempo de retardo del sistema
$\Delta P_{L,max}$	: Variación máxima de potencia de carga
$\Delta V_{dc,max}$	: Variación máxima de tensión admisible
$C_{dc,min}$	: Capacitancia mínima diseño de enlace DC
$f_c$	: Frecuencia de corte filtro pasa-bajo de enlace DC
$T_{Load}$	: Torque de carga en camión
$T_{grade}$	: Componente de torque asociada al camino de desplazamiento del camión
$T_{rr}$	: Componente de torque asociada a la resistencia de rodamiento
$T_{drag}$	: Componente de torque asociada al arrastre aerodinámico
$T_{friction}$	: Componente de torque asociada a la fricción
$\theta_{road}$	: Ángulo de inclinación del camino
$\mu_1, \mu_2$	: Coeficiente de torque de resistencia a la rodadura
$v_{truck}$	: Velocidad del camión minero
$\omega_{mot}$	: Velocidad angular del motor
$i_{gd}$	: Corriente por red en eje directo en el marco dq
$i_{gq}$	: Corriente por red en eje cuadratura en el marco dq
$i_{gd}^*$	: Corriente de referencia para controlar $i_{gd}$
$i_{gq}^*$	: Corriente de referencia para controlar $i_{gq}$
$E_{dc-link}$	: Energía almacenada en el condensador de enlace DC
$v_{gd}$	: Tensión de red en eje directo en el marco dq
$v_{gq}$	: Tensión de red en eje cuadratura en el marco dq
$i_{dc}$	: Corriente DC resultante de la acción conmutadora del convertidor de línea
$i_o$	: Corriente DC dirigida hacia el convertidor del motor
$P_{dc}$	: Potencia producto de $i_{dc}$
$P_o$	: Potencia producto de $i_o$

$S$	: Potencia Aparente
$v_{cd}$	: Componente eje directo de la tensión resultante en el convertidor AFE
$v_{cq}$	: Componente eje cuadratura de la tensión resultante en el convertidor AFE
$v'_d$	: Tensión resultante del controlador PI corriente $i_{gd}$
$v'_q$	: Tensión resultante del controlador PI corriente $i_{gq}$
$\theta_e$	: Posición angular relativa del flujo de rotor respecto al estator
$\theta_r$	: Posición angular del flujo del rotor
$\omega_{SL}$	: Deslizamiento máquina a partir de la condición de orientación



# Abreviaciones

## Mayúsculas

ABB	: Asea Brown Boveri S.A.
AC	: Corriente alterna (Alternating Current)
AFE	: Puente rectificador de Frente Activo (Active Front End)
BEV	: Vehículo eléctrico con batería integrada (Battery Electric Vehicle)
BMS	: Sistema de gestión de baterías (Battery Management System)
$CO_2$	: Dióxido de Carbono
C-rate	: Tasa de carga o descarga para baterías
DC	: Corriente directa (Direct Current)
GEI	: Gases Efecto Invernadero
IGBT	: Transistor bipolar de compuerta aislada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MW	: Megawatts
MIJA	: Motor Inducción Jaula de Ardilla
$NO_x$	: Óxidos de nitrógeno
PWM	: Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation)
P	: Potencia activa red trifásica
PI	: Proporcional – Integral
PLL	: Lazo de seguimiento de fase (Phase Locked Loop)
Q	: Potencia reactiva red trifásica
SPWM	: Modulación por ancho de pulso sinusoidal (Sinusoidal PWM)
SOC	: Estado de carga de la batería (State of Charge)
SVPWM	: Modulación por ancho de pulso de vector espacial (Space Vector PWM)
TA	: Sistema de asistencia de trolley (Trolley Assist)
TAR	: Sistema de asistencia de trolley regenerativo (Trolley Assist Regenerative)
THD	: Distorsión armónica total (Total Harmonic Distorsion)
$THD_i$	: Distorsión armónica total en corriente
VSI	: Inversor Fuente de Tensión (Voltage Source Inver



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción General

El cambio climático es un fenómeno que se produce como resultado de la intervención humana el cual atenta con la calidad de vida en nuestro planeta tal como lo conocemos. La industria minera desempeña un rol fundamental en el desarrollo económico, siendo una de las actividades más importantes a nivel nacional y global. Sin embargo, estas reflejan emisiones significativas de  $CO_2$ , responsable cerca del 4% - 6% de las emisiones globales [1]. Este es un problema global que requiere la cooperación a nivel mundial para abordar esta problemática. La respuesta ante este escenario es Acuerdo de Paris. El Acuerdo de Paris es un tratado internacional cuyo objetivo principal radica en lograr mantener la temperatura global significativamente inferior a los  $2^\circ C$ , idealmente a  $1.5^\circ C$ , en comparación con los niveles que se registraban antes de la industrialización [2].

La Gran minería es uno de los principales sectores productivo del desarrollo económico a nivel nacional. El segundo proceso que contribuyó con mayores emisiones totales de Gases Efecto Invernadero (GEI) es el de Mina a Rajo, contemplando un 33% del total en las mineras de cobre y de este el 91% son producto de las emisiones GEI directas del uso importante del combustible diésel [3].

Por otro lado, el envejecimiento de los yacimientos implica mayores profundidades de excavación, donde la proporción entre estéril-material mineralizado (Ley de mineral) es cada vez menor, es decir, se requiere retirar mayor material rocoso que no contiene los minerales deseados. La profundización de los rajos implica mayores distancias de acarreo, comprometiendo un mayor consumo de combustible y costos operativos, así como también mayor inversión en flota de camiones para mantener el flujo de material constante. Esto ha triplicado el consumo de combustible entre el 2001-2021 [3].

En particular, los camiones mineros suelen llevar cerca de 3000 a 5000 litros de combustible diésel, cuyo máximo consumo ocurre durante la carga del material durante los tramos ascendentes, consumiendo alrededor de 300 a 400 litros por hora en un tramo de 17 km en media hora [4].

Ante esto, se han buscado distintas soluciones para obtener un desarrollo consciente y sostenible que permitan mitigar el impacto, aprovechando al máximo los recursos disponibles. Con el objetivo de reducir las emisiones directas (alcance 1) existen diversas iniciativas en desarrollo que

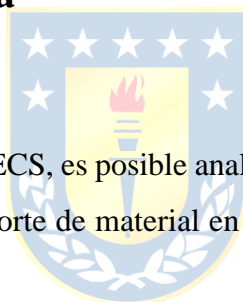
tienen como objetivo lograr el reemplazo del combustible fósil por otros con menor o sin emisiones GEI, o bien con la puesta en marcha de una transición hacia la electrificación total de las operaciones mineras en un futuro desde los puntos de extracción hasta el puerto, destacando el uso de hidrógeno verde o la electromovilidad en el transporte de carga; propuestas aún en desarrollo.

Para cumplir con este compromiso, una solución tentativa es la implementación de los sistemas de Asistencia Trolley (TA). TA es un sistema de propulsión eléctrica de apoyo a los camiones mineros durante sus trayectos en los tramos inclinados importantes que conectan la zona de extracción con las trituradoras para su procesamiento. El objetivo de esta estrategia es reducir la dependencia del alto consumo de combustible diésel para lograr una actividad minera más sostenible y amigable con el medio ambiente. Junto con este, una de las etapas finales para la electrificación total de las minas es la integración de los sistemas de baterías en los camiones mineros [5].

## **1.2. Definición del problema**

### **1.2.1 Hipótesis de Trabajo**

Mediante el uso del software PLECS, es posible analizar una red de distribución de un sistema de asistencia implementado en el transporte de material en aplicaciones mineras mediante camiones mineros.



### **1.2.2 Objetivo General**

Simular mediante el uso del software PLECS una red eléctrica considerando el impacto del sistema de trolleys conectados a ella.

### **1.2.3 Objetivos Específicos**

- Simular en PLECS un rectificador de frente activo
- Incorporar sistema de almacenamiento con baterías
- Simular un sistema de tracción eléctrico de los camiones
- Analizar diferentes escenarios de operación

### 1.3. Alcances y Limitaciones

- Los elementos pasivos que componen el sistema y los motores se consideran ideales e invariantes en magnitud al adquirir temperatura.
- Las fuentes de tensión se consideran balanceadas y equilibradas.
- La propuesta se realiza mediante la información adquirida de la revisión bibliográfica a menos que se indique lo contrario para los valores de los parámetros de los componentes utilizados en el modelo de PLECS.

### 1.4. Temario y Metodología

El desarrollo de la presente memoria de título se compone de ocho capítulos descritos a continuación:

- Capítulo 1 Introducción: En este capítulo se centra en la contextualización para una mejor comprensión de la temática abordada, señalando además los objetivos, alcances y limitaciones del trabajo.
- Capítulo 2 Descripción del sistema de tracción eléctrico: Una vez realizada la contextualización del tema, se realiza el estudio centrado en la identificación y conceptualización de los componentes que integran el sistema de asistencia trolley, señalando su infraestructura, beneficios y consideraciones, así como las flotas de camiones disponibles en el sistema junto con los distintos modos de operación que pueden abordar.
- Capítulo 3 Fundamento de control de convertidores y accionamientos: En este capítulo se identifican los componentes principales integrados en los convertidores back-to-back que modelan el sistema de catenaria. Junto con ello, se estudiaron las principales características del sistema de frente activo, el control campo orientado y la acción regenerativa aplicada en los motores de inducción jaula de ardilla.
- Capítulo 4: Diseño del sistema de control: Se señalan las consideraciones y la metodología de diseño de sistema de control, desarrollando los modelos de control de corriente y tensión asociado a cada etapa.
- Capítulo 5 Simulaciones: Ya identificado los componentes principales del sistema, las consideraciones y diseño de los sistemas de control, se continua con la descripción del modelo de sistema de catenaria diseñado e implementado en la plataforma PLECS.

Adicionalmente, se muestran los resultados gráficos y numéricos de los distintos escenarios simulados, comentando su eficiencia e interpretaciones según el caso de estudio.

- Capítulo 5 Conclusiones: Se señala lo realizado en el trabajo, se organizan las conclusiones del trabajo y se realizan sugerencias de trabajo futuro a partir de los resultados de esta memoria de título.



## Capítulo 2. Descripción del sistema de tracción eléctrica

Para el desarrollo de la simulación se requiere de un estudio de los principales componentes y técnicas implementadas en el sistema. A continuación, se presentarán las descripciones detallando los puntos de interés.

### 2.1. Trolley Assist

También conocido como sistema de catenaria, son sistemas que están diseñados principalmente para proporcionar la potencia y eficiencia energética a los camiones durante la operación de transporte cuesta arriba, donde se requiere mayor cantidad de energía. En vehículos híbridos diésel-eléctricos, permite evitar el uso del generador diésel para obtener la energía directamente desde la línea de alimentación aérea. El uso de combustible diésel se presenta entonces solo durante el tramo final hacia la mina o a las áreas de trituración.

#### 2.1.1 Infraestructura

La infraestructura del sistema consta del suministro de corriente alterna, subestación de corriente continua, un sistema de catenaria con postes y líneas, y la estructura del camión [6], ilustrada en la Figura 2.1. Se describe a continuación cada uno de los componentes:

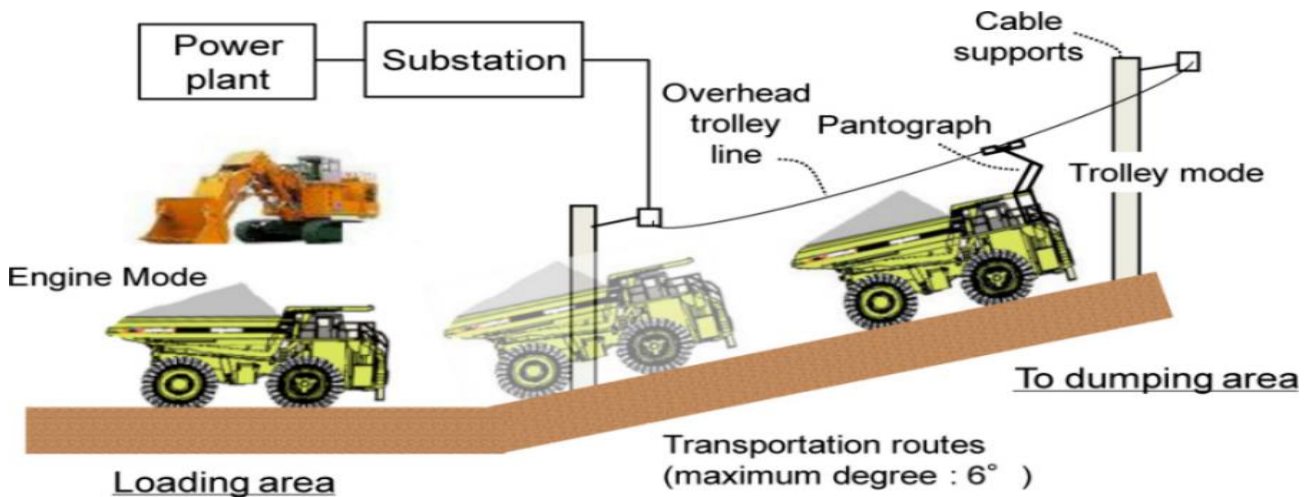


Figura 2.1 Infraestructura Sistema de asistencia trolebús [7]

### **1. Subestación AC**

El sistema comienza con una importante subestación AC. Esta proporciona la energía eléctrica procedente de la red local para el suministro y el uso de las subestaciones DC instaladas en las rutas designadas para el TA.

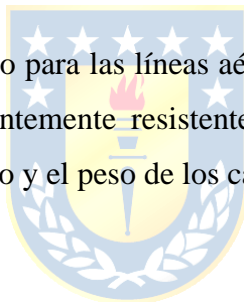
### **2. Subestaciones DC**

Estas subestaciones rectificadoras se encargan de suministrar y controlar la energía eléctrica en las líneas de tensión aéreas requeridas para el uso de los camiones. El número total de subestaciones DC dependerá de la longitud de la ruta y del número de camiones deseados durante la operación; se instalan aproximadamente por cada kilómetro de longitud de ruta.

El voltaje nominal del TA y la potencia por subestación dependerá de las condiciones operacionales de la mina. Los rangos de potencia por subestación varían entre los 2.5 a 10MW [8].

### **3. Postes de soporte**

Proporcionan el soporte necesario para las líneas aéreas DC y la delimitación del sistema de catenaria. Estos deberán ser lo suficientemente resistentes y duraderos para soportar las cargas mecánicas de la catenaria, como el viento y el peso de los cables.



### **4. Líneas aéreas DC**

Compuesto por dos conductores aéreos DC provenientes de las subestaciones DC. El contacto de estas con los pantógrafos de los camiones permite el suministro eléctrico requerido por estos.

### **5. Pantógrafos**

Los pantógrafos son los componentes instalados en el chasis de los camiones. Estos permiten el contacto con las líneas aéreas DC, admitiendo el suministro eléctrico a los motores de tracción del camión. Durante el transporte en terrenos irregulares o en pendientes pronunciadas, la conexión entre estos puede verse comprometida, por lo que el pantógrafo deberá ser capaz de variar su posición para ajustar la distancia entre estos y la línea de transmisión.

## 2.1.2 Beneficios y Consideraciones

La implementación del sistema de asistencia de trolebús resulta en una mejora de eficiencia y sostenibilidad en la industria minera. Esta busca optimizar el rendimiento energético y reducir los costos operativos de la minera a largo plazo. A pesar de los notables beneficios que ofrece, su implementación presenta desafíos a evaluar.

De las principales ventajas que ofrece el sistema se encuentran [6], [7], [9], [10]:

### 1. Mejora en la productividad minera.

Debido a que los motores generan mayor torque a menores velocidades, admiten una mayor aceleración y un buen rendimiento de velocidad durante los tramos con pendientes pronunciadas. Según el estudio señalado por Caterpillar [6], el sistema permitió aumentar la velocidad del camión en un 100%. Esto permite que los camiones puedan completar un ciclo de trabajo en menor tiempo. Por consiguiente, se obtiene un aumento de la capacidad de producción de la mina, reducción del número de camiones en el sistema, y en un aumento de la disponibilidad de estos.

### 2. Reducción de emisiones gases invernadero

La implementación genera un impacto directo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, óxido de nitrógeno ( $NO_x$ ) y material particulado presente en el aire. De acuerdo con los estudios de ABB [11], electrificar un solo camión minero permite reducir 1000 toneladas de  $CO_2$  por año.

### 3. Reducción de consumo de combustible diésel

Al conectar los camiones al sistema de trolebús, la propulsión neta proviene de la electricidad suministrada por la red, minimizando el uso de los motores diésel y maximizando el potencial de los motores de tracción. Los ahorros resultantes dependerán de la comparación del precio del combustible diésel y el consumo eléctrico, los cuales pueden alcanzar ahorros cercanos al 30% [8].

### 4. Mayor vida útil de los motores

Al operar a mayores velocidades, se reduce el tiempo en el que los camiones operan a plena carga; esto disminuye la probabilidad de sobrecalentamiento del motor, así como también la reducción de los costos de mantenimiento.

### 5. Mayor accesibilidad

Los sistemas de trolebús permiten a los camiones operar a plena carga en pendientes pronunciadas. Esto posibilita la accesibilidad a zonas más profundas de la mina que podrían haber sido inaccesibles para los camiones convencionales.

## **6. Capacidad regenerativa**

Cuando el camión opera en el trayecto cuesta abajo, la energía generada por los motores de los camiones excede la energía requerida para la propulsión del camión. Esta energía excedente es disipada en el frenado por fricción. Sin embargo, al implementar la estrategia regenerativa, esta permite capturar y almacenar la energía en dispositivos de almacenamiento de energía. El excedente también puede ser inyectado, a través de un transformador, a la red de distribución de media tensión, permitiendo su uso en otras cargas del sector minero.

La implementación de un sistema de trolley regenerativo (TAR) será posible al reemplazar el puente de diodos no controlados por un puente rectificador de frente activo (AFE).

Por otro lado, se debe tener presente las siguientes consideraciones:

### **1. Alta inversión inicial**

La implementación del sistema implica un alto desembolso de capital. Esto involucra los costos relativos a la infraestructura (considera la distribución energética, las subestaciones, postes y el tendido eléctrico), modificación de los camiones (incluye el sistema de control, pantógrafos).

### **2. Mantenimiento**

El mantenimiento de la ruta de transporte es crucial. Se deberá asegurar una superficie libre de irregularidades o protuberancias significativas, logrando de esta una ruta uniforme y nivelada que evite generar movimientos bruscos, vibraciones excesivas en el camión tal que comprometa la conexión de los pantógrafos a la catenaria.

### **3. Capacidad del sistema**

Al transportar altos niveles de carga, se incrementan los niveles de potencia demandados en el sistema. Debido a la limitación de capacidad del sistema se debe ajustar el número de camiones en operación para no exceder los límites de potencia de las subestaciones. Es vital generar una estrategia de despacho efectiva.

### **4. Operadores capacitados**

Los operadores deberán asegurar el contacto de los pantógrafos con la catenaria. Si el contacto se ve comprometido durante el trayecto, las velocidades de los camiones disminuyen. Esto podría obligar a detener o disminuir la velocidad de los camiones próximos, comprometiendo la productividad y la eficiencia de transporte.

## 5. Perfil y requerimiento de transporte

Se deberá evaluar criterios de selección del tramo inclinado donde se instalará el sistema TA. Las rutas de mayor longitud con pendientes pronunciadas ( $>8\%$  ideal) son las más tentativas. Esto con el fin de permitir un mayor potencial de ahorro en gastos operativos en el transporte de altos volúmenes de carga.

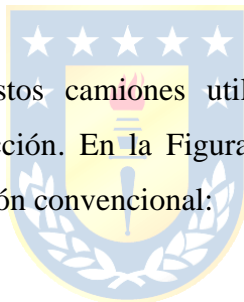
## 6. Ciclos de tiempo

Se deberá evaluar la disminución de los ciclos de tiempo. Mientras mayor sea el ciclo de tiempo se requerirá de una flota mayor, lo cual incrementa los costos asociados.

## 2.2. Flotas de camiones

### 2.2.1 Camión Convencional

Son los más utilizados en Estos camiones utilizan combustible fósil diésel para el funcionamiento de los motores de tracción. En la Figura 2.2 se identifican los subsistemas que componen la estructura base de un camión convencional:



#### 1. Tren de poder

Compuesto por motor diésel, generador síncrono, y el puente rectificador de diodos. El motor diésel se encarga de impulsar el generador síncrono que alimenta al puente rectificador de diodos para proveer de energía al sistema de tracción AC.

#### 2. Sistema de tracción AC

Compuesto por dos convertidores de frecuencia y dos motores de inducción ubicados en las ruedas traseras. Junto con el sistema de control asociado, este sistema se encargará de proveer el movimiento del camión.

#### 3. Sistema de retardo

Compuesto por parrillas de retardo y choppers IGBT. La función de la parrilla de retardo es disipar la energía cinética y potencial excedente con el objetivo de evitar altas aceleraciones durante el descenso en pendientes pronunciadas. Esta transferencia de energía provocará aumentos en los niveles de tensión de enlace DC. Cuando los niveles de tensión superen cierto umbral de tensión, se

detectará un excedente de energía en el enlace DC, por lo que el sistema de control asociado activará los chopper para modular la energía cinética a disipar en las resistencias durante el descenso.

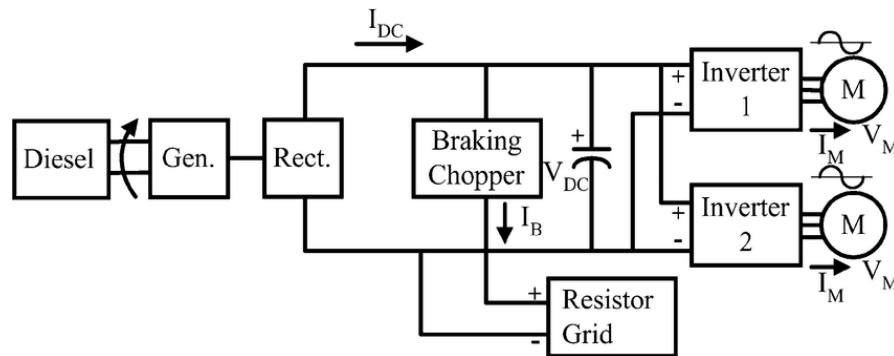


Figura 2.2 Diagrama en bloques del sistema de tracción de un camión minero convencional [12]

### 2.2.2 Camión híbrido diésel-eléctrico con asistencia trolley

Como se puede apreciar en la Figura 2.3, el esquema es similar al del camión minero convencional, salvo de la integración del sistema TA. Cuando los camiones se acercan al sistema de catenaria, los pantógrafos se elevarán para establecer la conexión con la línea aérea DC y alimentar el sistema de tracción del camión durante el trayecto. En este instante, se genera un bypass del sistema de combustión diésel para utilizar el sistema eléctrico como alternativa de propulsión, recibiendo la energía directamente en el enlace DC.

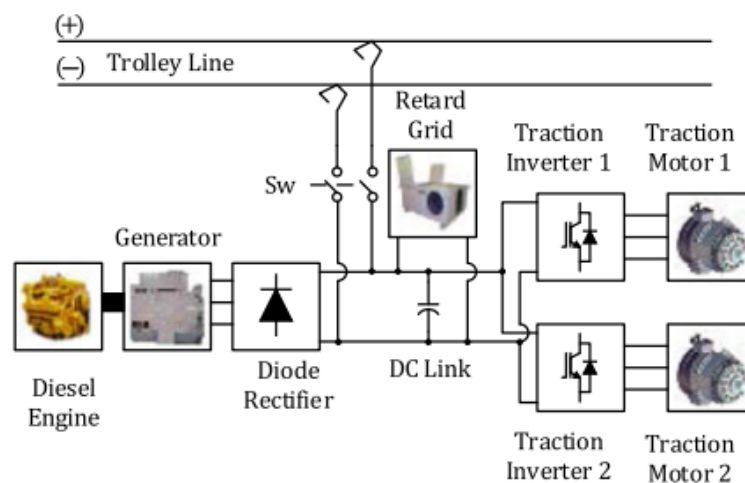


Figura 2.3 Esquema camión minero híbrido diésel-eléctrico conectado al sistema TA [13]

### 2.2.3 Camiones BEV con asistencia trolley

El despliegue de trolebuses con batería integrada (BEV) representa una alternativa que busca optimizar el rendimiento del sistema, la eficiencia del sistema de recuperación energético, y el cumplimiento de los requisitos de flotas con emisiones reducidas utilizando la energía eléctrica en su totalidad. La energía proporcionada por la batería, el sistema de asistencia trolebús y las tecnologías de recuperación de energía son fundamentales para el progreso de reducción de las emisiones.

El uso de las baterías remueve la dependencia del consumo de combustible fósil, lo que conlleva reducciones en los costos de mantenimiento y operacionales en comparación con los camiones equipados con motores diésel. Los BEV, al tener menos sistemas mecánicos y lógica de control, presentan tasas de fallas reducidas. Durante el ascenso, la batería puede funcionar como fuente adicional de propulsión, mientras que, durante descensos, cuando el camión opera en modo regenerativo, el excedente de energía puede recargarse en la batería, provocando cambios significativos en los ciclos de transporte y la energía potencial recuperable por cada ciclo.

Aún con los recientes avances en la tecnología implementada en las baterías, una de las principales ventajas que lidera el combustible fósil es su alta densidad energética (específica y volumétrica) en comparación con las baterías de litio [10]. Al evaluar el sistema, se deben considerar factores como el tamaño y rendimiento de las baterías, aspectos financieros (como la inversión inicial y viabilidad económica), lógicos (disponibilidad y capacidad de la batería), y operativos (despacho de la flota de camiones).

Existen tres posibles configuraciones para el sistema de camiones BEV: Carga dinámica, Carga estacionaria, y sistema dual [9]. Cada una de estas exhiben sus ventajas y desventajas, las cuales se implementan según los requerimientos y especificaciones propias del sector minero.

## 1. Configuración BEV: Carga Dinámica

Esta configuración permite a los camiones utilizar la energía eléctrica suministrada por la red para impulsar simultáneamente los motores de tracción y cargar la batería incorporada. Está compuesta por el camión en sí, los sistemas auxiliares, y la tecnología de carga dinámica asociada.

La Figura 2.4 se muestra el esquema representativo de la configuración de carga dinámica BEV. Los BEV operan con la batería durante los procesos de carga, transporte, espera, descarga y regreso. Cuando los BEV llegan al sistema de catenaria su modo de operación cambia, dejando de depender exclusivamente de la energía almacenada proporcionada por la batería. Al llegar al final del tramo de subida, los BEV nuevamente cambian al modo de batería para continuar con las maniobras. Durante el regreso por el tramo descendente, se habilita el modo de recuperación de energía, el cual transforma la potencia de frenado en energía almacenable en el sistema de almacenamiento. Una vez finalizado el tramo, estos vuelven a utilizar la batería para regresar al punto de carga.

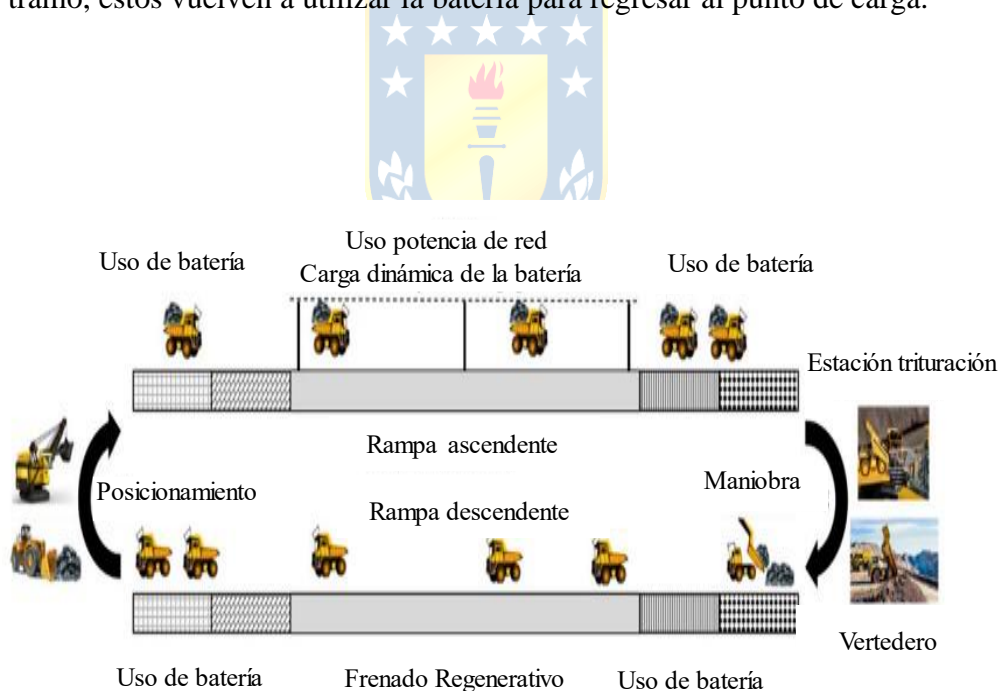


Figura 2.4 Esquema configuración de Carga Dinámica BEV, adaptado de [9]

## 2. Configuración BEV: Carga Estacionaria

Esta configuración requiere de la instalación de una estación de batería para la carga o cambio de la batería. La elección entre carga o cambio dependerá de la tasa de carga de la batería (C-rate) y el tiempo requerido para el cambio de esta.

La Figura 2.5 muestra el esquema representativo de la configuración BEV de carga estacionaria. Los BEV utilizan la batería durante el proceso de carga cambiando su modo de operación una vez llegado al sistema de catenaria, donde la red provee de energía a los motores para operar a velocidades mayores durante el tramo ascendente. Al llegar a terreno plano, vuelve al modo de operación de batería para continuar con las maniobras de transporte, descarga, y regreso. Según el diseño, dimensionamiento y consumo energético, se deberá evaluar la necesidad de recargar o cambiar la batería dentro de cada ciclo o cada dos o tres ciclos. En el descenso, entra en modo de operación de frenado regenerativo, transformando la potencia de frenado en energía eléctrica que carga la batería. Esta energía regenerada es utilizada en el trayecto de retorno al punto de carga.

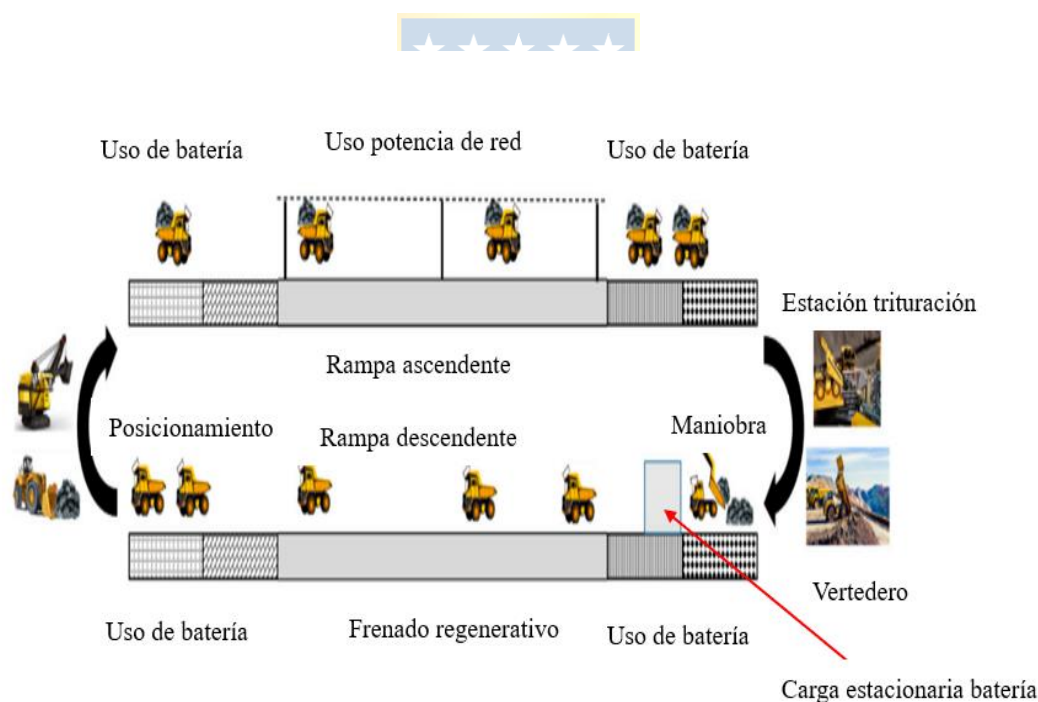


Figura 2.5 Esquema configuración BEV de Carga Estacionaria, adaptado de [9]

### 3. Configuración BEV: Sistema Dual

Otra alternativa es la instalación de subestaciones bidireccionales que permitan la regeneración de la energía a la red durante los tramos descendentes, permitiendo un mejor rendimiento en el sistema. Durante los tramos ascendentes, la red suministra energía para accionar los motores eléctricos mientras que en los tramos descendentes se recupera la energía durante el frenado y la retorna a la red. Este sistema está compuesto por los BEV y el sistema dual.

En la Figura 2.6 se muestra el esquema de la configuración BEV sistema dual descrito. Los BEV emplean la energía almacenada en las baterías durante el proceso de carga, modificando su modo de operación al llegar al sistema de catenaria. En este punto, la red eléctrica suministra energía a los motores permitiendo a estos operar a velocidades mayores durante los tramos ascendentes. Al llegar a terreno plano, vuelven al modo operativo basado en la batería para llevar a cabo las maniobras de transporte, descarga y retorno. Considerando la estación de batería, se deberá realizar la evaluación correspondiente según los requerimientos y características de diseño de las baterías descritos. Durante el tramo descendente, se activa el modo de frenado regenerativo, convirtiendo la potencia de frenado en energía a almacenar en la batería, así como también regenerar la energía a la red. La energía recuperada y almacenada en la batería se utilizará para el trayecto de retorno al punto de carga.

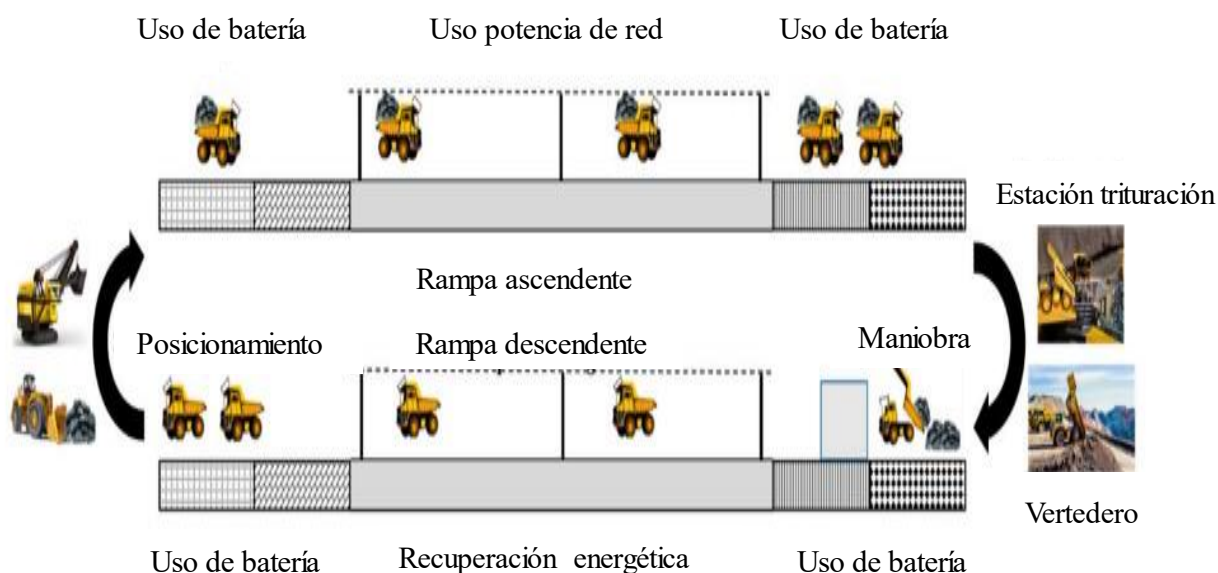


Figura 2.6 Esquema configuración BEV sistema dual, adaptado de [9]

Haiming Bao et .al [9] presentan además un análisis comparativo entre estos sistemas. La alternativa de carga dinámica presenta menor flexibilidad, confiabilidad, escalabilidad, y capacidad en comparación con los camiones que utilizan el sistema de carga. Esto es principalmente a la dependencia de la carga de batería durante los tramos ascendentes y descendentes. Por consiguiente, los camiones no pueden completar un ciclo de trabajo sin tener la suficiente longitud de tramo para poder cargarlo. Aun así, su ventaja reside en la falta de necesidad de recarga o cambiar las baterías. Los sistemas duales son adecuados para condiciones específicas en los sectores mineros, tal como las minas de cobre de gran profundidad.

Uno de los principales desafíos relacionados al diseño de los BEV para minera rajo abierto, es justamente el peso y la dimensión para suministrar la potencia requerida por los BEV durante largos ciclos de trabajo. Es por esto por lo que radica la importancia del sistema trolley, el cual permite que la batería sea más pequeña y pueda ser utilizada continuamente cargándola durante los ciclos de trabajo.



## Capítulo 3. Fundamento de control de convertidores y accionamientos

### 3.1. Transformadas Clark-Park

Las transformadas Clark-Park son técnicas implementadas en el análisis y control de sistemas eléctricos trifásicos, especialmente en sistemas de potencia y máquinas eléctricas. Permiten representar las cantidades trifásicas en un sistema bifásico conveniente para el análisis y control del sistema en estudio. Su análisis se realizará sobre un sistema trifásico equilibrado.

En la Figura 3.1 se presenta el diagrama fasorial y conversión de las variables. La transformada Clark permite la representación del sistema trifásico (marco  $abc$ ) en un sistema bifásico estacionario ortogonal (marco  $\alpha\beta$ ) de coordenadas complejas. La transformada Park convierte el sistema bifásico estacionario en un sistema bifásico giratorio ortogonal (marco  $dq$ ). Es decir, su transformación representará un sistema de referencia móvil, girando los fasores del marco  $\alpha\beta$  para representarlos en fasores constantes. Existen dos transformadas para el marco  $dq$ : Basadas en señal coseno o seno.

Para el análisis de los sistemas se pueden utilizar las transformadas invariante de potencia o de potencia variante. La primera persevera el cálculo de la magnitud de la potencia activa y reactiva; la segunda, también conocida como transformada invariante en amplitud, altera el cálculo de la potencia, manteniendo la amplitud de las variables eléctricas (voltaje y corriente).

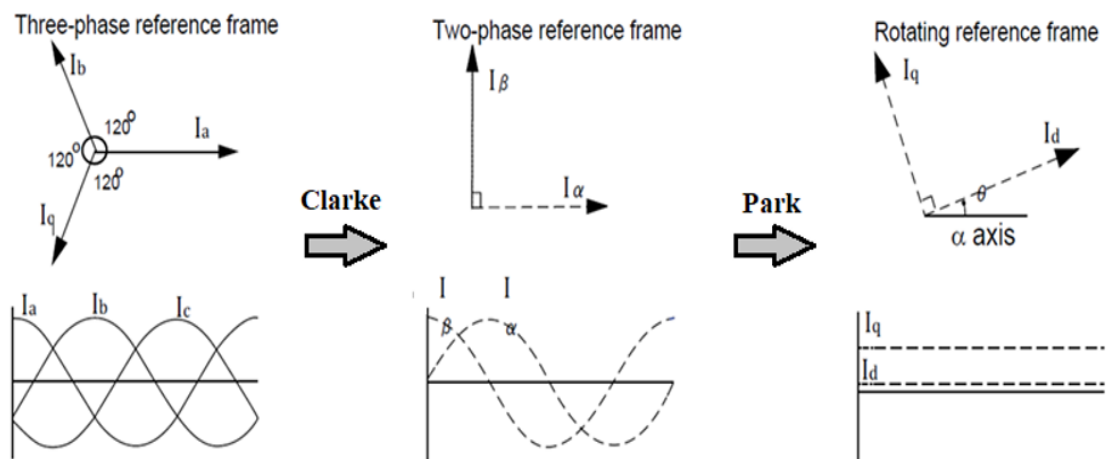


Figura 3.1 Diagrama fasorial Clark-Park [14]

En particular, se ha implementado la transformada **invariante en amplitud**, basada en coseno. La ecuación (3.1) representa la matriz de transformación de un sistema trifásico al bifásico en coordenadas  $\alpha\beta$ , la ecuación (3.2) la matriz de transformación del sistema bifásico  $\alpha\beta$  al bifásico en coordenadas  $dq$ , y la ecuación (3.3) la cual representa la matriz de transformación directa de un sistema trifásico al bifásico de coordenadas  $dq$ :

### Transformada Clark

$$T_{abc-\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### Transformada Park

$$T_{\alpha\beta-dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$



### Transformada Clark-Park

$$T_{abc-dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

## 3.2. Modulación Vectorial SVPWM

La modulación por ancho de pulso por vectores espaciales es uno de varios esquemas de modulación para los inversores triásicos. Esta tiene como objetivo emular una forma de onda sinusoidal de tensión por medio del uso de vectores espaciales de frecuencia y amplitud ajustables, obteniendo los ciclos de trabajo requeridos en función de la tensión requerida en el proceso.

Para implementar esta técnica moduladora se requiere del uso de los niveles de tensión en el marco  $\alpha\beta$ ,  $\vec{v}_\alpha$  y  $\vec{v}_\beta$ , resultantes al aplicar la transformada Clark. El vector de tensión resultante dependerá de la acción conmutadora de los semiconductores en cierto instante de tiempo.

Los inversores trifásicos de dos niveles constan con un total de seis semiconductores, con dos de ellos ubicados en cada una de las ramas del inversor. Los semiconductores pueden optar por dos estados de conmutación: abierto o cerrado. Una restricción de los estados conmutados posibles es el estado complementario asignado a los semiconductores de una misma rama. Por lo tanto, se tendrá un total de  $2^3 = 8$  estados de conmutación. A modo de simplificación, se designa  $s_x$  a la señal de disparo recibida por el interruptor superior de una rama y  $\bar{s}_x$  el interruptor complementario. Es decir,  $s_a$  indicará el estado del interruptor superior de la rama fase A, y el segundo interruptor de la misma rama recibirá la señal de disparo complementaria, es decir,  $\bar{s}_a$ . El resto de los interruptores siguen la misma lógica. La Tabla 1 resume los estados de conmutación y los valores de tensión por fase y línea. Las tensiones indicadas son múltiplos de  $V_{dc}$ .

Tabla 1 Estados de conmutación de los vectores espaciales

Vectores Estado	Estados switch			Voltaje línea-neutro			Voltaje línea-línea		
	$s_a$	$s_b$	$s_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2/3$	$-1/3$	$-1/3$	1	0	-1
2	1	1	0	$1/3$	$1/3$	$-2/3$	0	1	-1
3	0	1	0	$-1/3$	$2/3$	$-1/3$	-1	1	0
4	0	1	1	$-2/3$	$1/3$	$1/3$	-1	0	1
5	0	0	1	$-1/3$	$-1/3$	$2/3$	0	-1	1
6	1	0	1	$1/3$	$-2/3$	$1/3$	1	-1	0
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

El hexágono mostrado en la Figura 3.2 representa el conjunto de las posibles combinaciones de las tensiones en el plano  $\alpha\beta$  que puede tomar el vector espacial  $\bar{v}$ . En el centro de este se encuentran dos estados de conmutación,  $(1,1,1)$  y  $(0,0,0)$ , los cuales conforman vectores espaciales cuya amplitud es nula. En este hexágono se definen seis sectores. Para obtener un vector dentro de un sector se deberá realizar un promedio entre los vectores adyacentes con sus respectivos ciclos de trabajo.

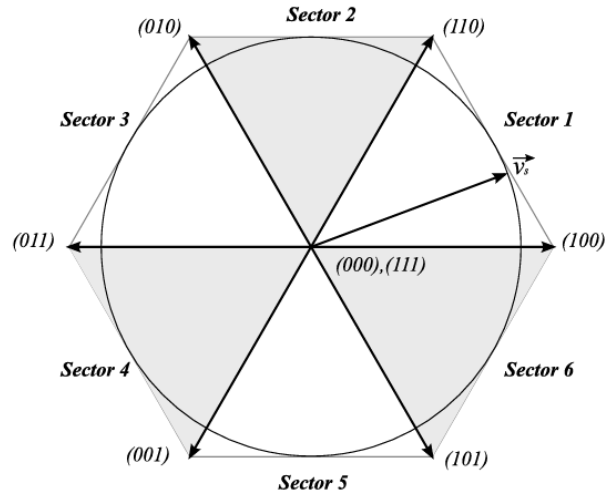


Figura 3.2 Vectores conmutados y sectores SVPWM [15]

La estrategia moduladora simétrica en SVPWM utilizará, además de los vectores adyacentes, los dos vectores nulos durante una secuencia de conmutación. Uno de ellos se ubicará en el centro del periodo y el otro se distribuye uniformemente en el inicio y el final del periodo. Esta estrategia permite que entre cada transición de estado solo se cambie un interruptor. Esta reduce significativamente el THD de tensión en los motores los cuales causan sobrecalentamiento y fluctuaciones en el torque [15] [16].

Los ciclos de trabajo deberá cumplir con la condición expresada en la ecuación (3.4):

$$T_V = T_{V_1} + T_{V_2} + T_{V_0} + T_{V_7} = 1 \quad (3.4)$$

Para el caso en que el vector espacial sea menor al voltaje máximo, se utilizarán los vectores nulos. Un ejemplo es considerar una magnitud de tensión equivalente al 80% del voltaje máximo. En este caso, un 20% restante se distribuirá uniformemente en los vectores nulos. Así, la ecuación (3.5) representa el tiempo de encendido por cada interruptor:

$$T_V = 0.4 + 0.4 + 0.1 + 0.1 = 1 \quad (3.5)$$

Así, un ejemplo ilustrativo de la secuencia de estados se puede observar en la Figura 3.3.

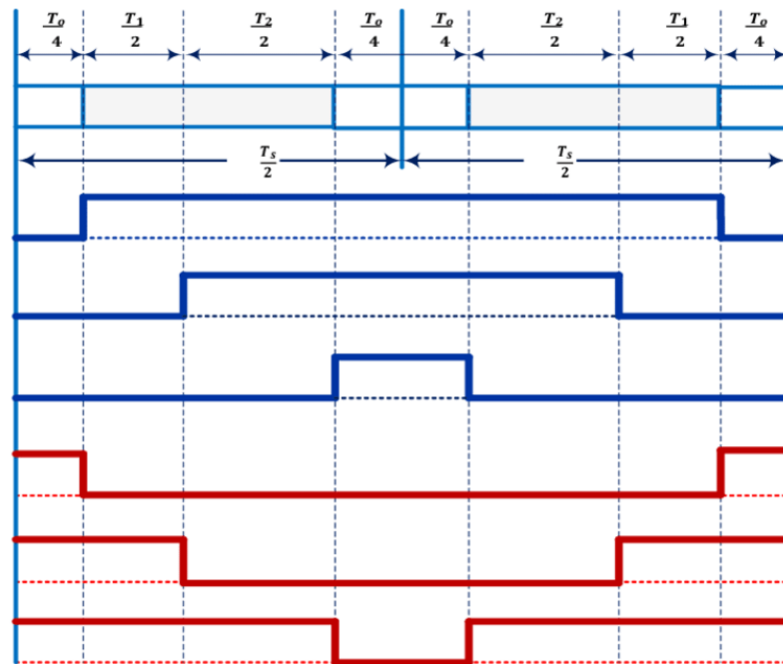


Figura 3.3 Secuencia de estados en SVPWM simétrica [17]

Como se puede observar en la Figura 3.2, el hexágono contiene una circunferencia. Recordando que los vectores espaciales que limitan los sectores son de magnitud igual al voltaje  $V_{dc}$ , el radio de esta circunferencia representa el nivel de tensión máximo que puede adquirir el módulo del vector espacial restringido por los límites del hexágono. En comparación con la estrategia sinusoidal PWM (SPWM), si bien resulta un procedimiento más complejo, se puede utilizar completamente el rango de tensión, lo cual refleja un incremento aproximado del 15% en comparación a SPWM, permitiendo un uso eficiente de  $V_{dc}$  [18].

### 3.3. Sistema de potencia

#### 3.3.1 Convertidores bidireccionales AC-DC

El circuito de potencia consta de convertidores de línea y convertidores de motores. Los convertidores de línea son convertidores de 4 cuadrantes auto conmutados. La frecuencia de conmutación aplicada es significativamente mayor en comparación con la frecuencia de red, esto para obtener una corriente casi sinusoidal, cuyo contenido armónico sea mínimo. Según las condiciones de control, se podrá controlar los reactivos tal que pueda operar a factor de potencia unitario durante la operación del vehículo, tanto en marcha como en frenado. Los convertidores por motor, al igual que los convertidores de línea, están compuestos semiconductores controlados mediante PWM. La conexión DC se conectará directamente con el enlace DC, mientras que en el lado AC se conecta con el motor de tracción, suministrando la tensión AC pulsante de amplitud constante, proveniente del enlace DC, requerida para la operación de los motores. El conjunto convertidor-motor del camión se conecta en paralelo al enlace DC.

Así, los convertidores pueden operar como rectificador o como inversor según el modo de operación en el que se encuentre el accionamiento. Visto desde la red, la etapa rectificadora se presenta cuando la transferencia de potencia es desde la fuente de tensión hacia el sistema de catenaria, y la inversora desde esta a los motores. Cuando se opera en modo regenerativo, los motores actúan como generadores, por lo que el proceso de conversión se invierte.

Los inversores implementados para camiones mineros más pequeños, con un peso aproximado de 240 toneladas, optan por el uso de IGBT. El uso de estos semiconductores beneficia en la simplificación y compactación del circuito, teniendo además protecciones más eficientes ante sobrecorrientes. Para camiones de alto tonelaje, con un peso entre 300 y 360 toneladas, por ejemplo, se puede optar por el uso de GTOs para los altos requerimientos de potencia, donde se pueden encontrar dispositivos de 4.500 [V] y 3.000 [A] [12].

#### 3.3.2 Convertidor bidireccional DC-DC

Los convertidores DC-DC son convertidores de potencia cuyo principio de operación se basa en la conversión de un nivel de tensión DC a otro. Esto se logra mediante el uso de transistores, capacitores e inductores. El proceso implica la modulación del ciclo de trabajo de los semiconductores para controlar la energía transferida mediante modulación PWM.

Una de sus principales implementaciones son en accionamiento aplicados al control de motores eléctricos en donde se requiera de elevar o reducir el nivel de tensión para adaptarlo según el requerimiento de la carga.

La implementación de un convertidor DC-DC bidireccional fundamental para el almacenamiento energético en la batería instalada en los vehículos eléctricos. El convertidor bidireccional implementado permite el suministro de energía por medio de una batería ayudando al transporte de los camiones cuando se operan en modo motor.

En comparación, la impedancia de los capacitores resulta ser significativamente mayor a la de las baterías, por lo que la corriente circulante por el capacitor será baja, ya que el capacitor actúa como filtro y permitirá únicamente la circulación de la componente continua de la corriente hacia la batería. Esto, a modo de análisis, permite simplificar el estudio al despreciar los capacitores en esta condición, cuyo diagrama circuital se puede observar en la Figura 3.4.

En [19] se ha realizado el análisis de convertidores DC-DC para el uso en baterías, determinando su función de transferencia según su modo de operación. Despreciando las pérdidas, la ecuación (3.6) representa la función de transferencia que determina el control de corriente:

$$G_{iL}(s) = \frac{V_{dc}}{L_B \cdot s + R_B} \quad (3.6)$$

Por otro lado, la inductancia a considerar en el diseño se determina mediante la ecuación (3.7):

$$L_B = \frac{V_{out} \cdot (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_{LB} \cdot f_{sb} \cdot V_{out}} \quad (3.7)$$

donde,

$L_B$  : Inductancia convertidor DC-DC [mH]

$V_{in}$  : Voltaje de entrada [V]

$V_{out}$  : Voltaje de salida deseado [V]

$\Delta I_{LB}$  : Ripple de corriente estimado por inductor  $L_B$  [A]

$f_{sb}$  : Frecuencia de conmutación del convertidor DC-DC [kHz]

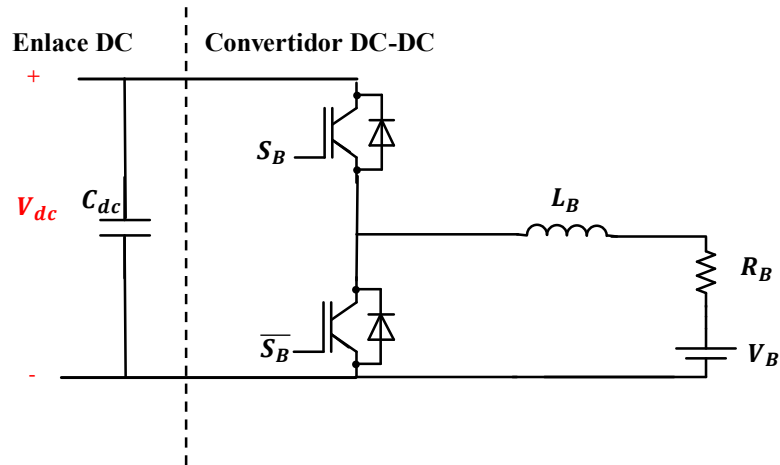


Figura 3.4 Diagrama circuital convertidor DC-DC bidireccional simplificado

### 3.3.3 Enlace DC

El enlace DC permite la conexión entre la etapa rectificadora e inversora. La conexión de un condensador tiene como objetivo suavizar y estabilizar los niveles de tensión con bajas ondulaciones durante el régimen estacionario, y a su vez actúa como elemento almacenador de energía para suplir la diferencia de potencia entre la carga y la fuente. Este debe ser capaz de almacenar suficiente energía para mantener la potencia demandada durante un periodo de tiempo equivalente al retardo temporal del lazo de tensión  $T_{UT}$ . El dimensionamiento de la capacitancia de enlace debe ser tal que mantenga lo más estable posible en todas las condiciones operacionales, esto para disminuir o evitar las fluctuaciones no deseadas que puedan afectar a los motores y sus convertidores asociados.

Considerando  $\Delta P_{L,max}$  como la variación máxima de potencia de carga,  $\Delta V_{dc,max}$  la variación máximo de tensión admisible, y  $C_{dc,min}$  la capacitancia mínima a considerar se determina mediante la ecuación (3.8) [20]:

$$C_{dc,min} = \frac{T_{UT} \cdot \Delta P_{L,max}}{V_{dc} \cdot \Delta V_{dc,max}} \quad (3.8)$$

Por otro lado, se deberá considerar el voltaje mínimo, por diseño, requerido para el control apropiado de las corrientes. A partir de la teoría de vectores espaciales, se determina que la tensión de

enlace mínima mediante la ecuación (3.9), la cual depende de la amplitud de la tensión de red  $V_g$ , la frecuencia de la red  $\omega_g$ , la inductancia de filtro de red  $L_g$ , y el valor peak de corriente por red  $I_g$  [20]:

$$V_{dc} \geq \sqrt{3 \cdot (V_g^2 + (\omega_g L_g I_g)^2)} \quad (3.9)$$

### 3.3.4 Filtro enlace DC

Debido a las altas frecuencias de conmutación en los convertidores, se presenta ruido con componentes de alta frecuencia. Para mitigar estas componentes, se implementó un filtro pasa-bajo garantizando una señal más limpia y precisa. Definiendo  $f_c$  como la frecuencia de corte correspondiente al filtro, su función de transferencia queda determinada mediante la ecuación (3.10):

$$f_{iltro_{dc}}(s) = \frac{1}{\frac{s}{2\pi f_c} + 1} \quad (3.10)$$

### 3.3.5 Motor de tracción inducción AC

Los camiones mineros se componen de dos motores de tracción. Los motores de inducción son conocidos por su robustez, versatilidad, económicos, y su capacidad de ser controlados mediante variadores de frecuencia. Se utilizaron máquinas de inducción jaula de ardilla, considerando los datos señalados en [21].

En la Figura 3.5 se ilustra el modelo de MIJA proporcionado por PLECS [22]. El modelo de la máquina se basa en el marco de referencia estacionario. Esta máquina puede operar como motor o generador dependiendo de la velocidad rotacional o del torque aplicado. Todas sus variables y parámetros están referidos al estator. En la Figura 3.6 se ilustra la implementación sofisticada de la transformada Clark implementada en el modelo. Según lo ilustrado en la Figura 3.6, la conexión del devanado es en estrella.

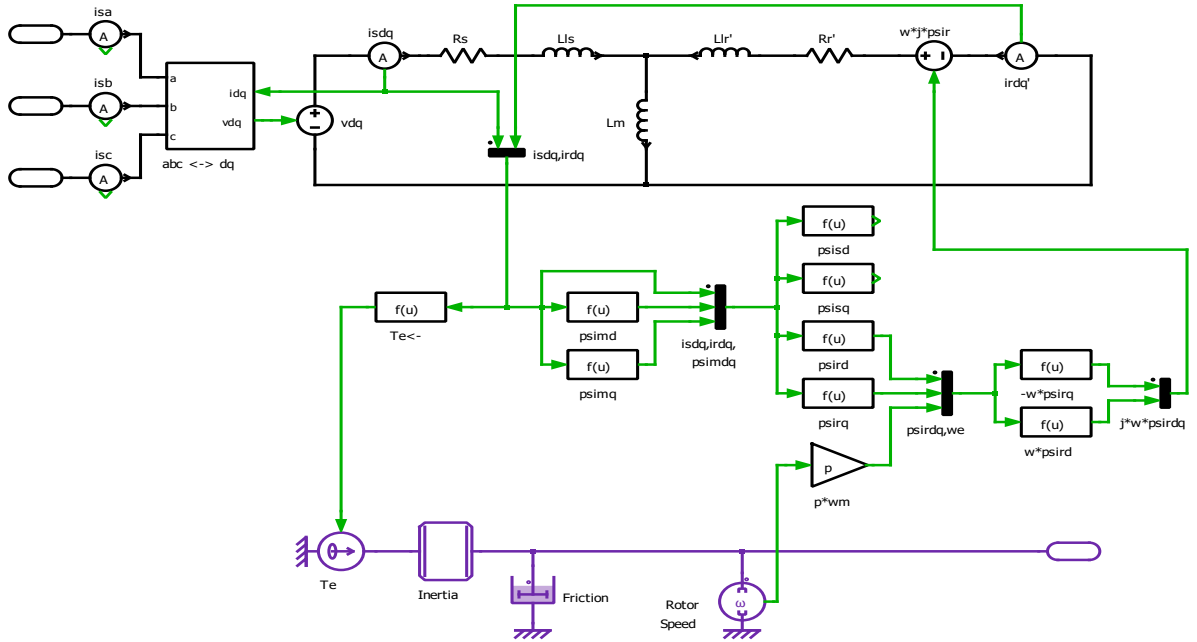


Figura 3.5 Modelo máquina inducción jaula de ardilla PLECS [22]

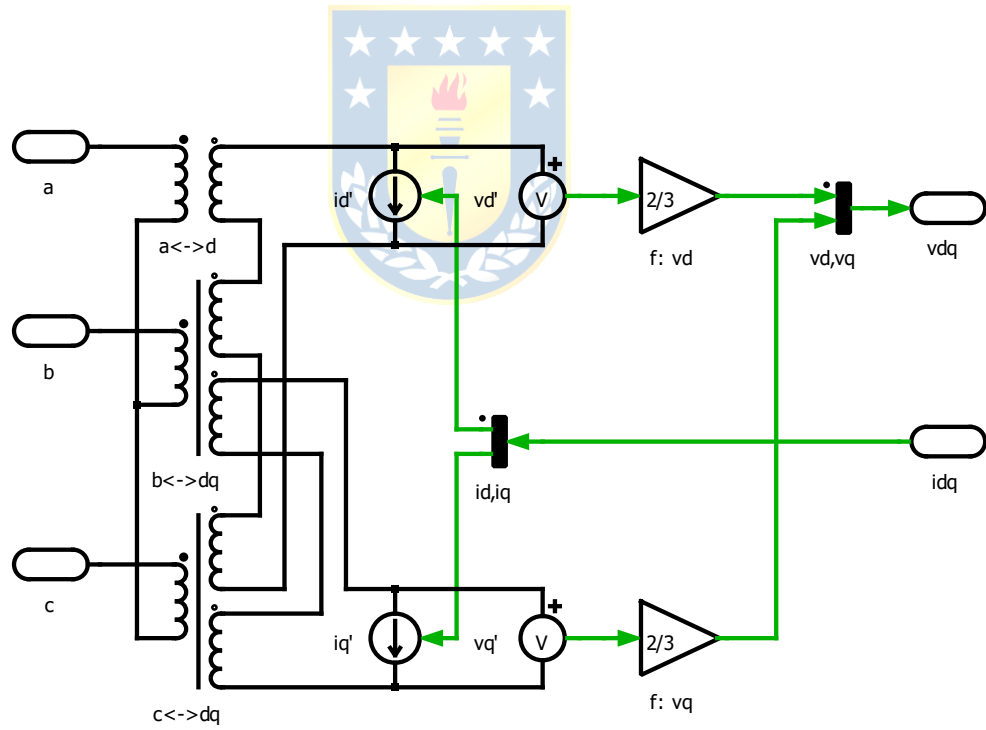


Figura 3.6 Subsistema “abc <-> dq” del modelo de máquina de inducción jaula de ardilla en PLECS [22]

En [23] se describe el modelo de un camión minero híbrido diésel-eléctrico. De este modelo se debe considerar la importancia de aquellos factores que influyen en la fuerza de carga que deberá ser superada por los motores de tracción. Su expresión generalizada se describe a continuación [13]:

$$T_{Load} = T_{grade}(\theta_{road}) + T_{rr}(\mu_1, \mu_2, \theta_{road}) + T_{drag}(v_{truck}) + T_{friction}(\omega_{mot}) \quad (3.11)$$

donde,

$T_{Load}$  :Torque de carga en camión [Nm]

$T_{grade}$  :Componente de torque asociada al camino de desplazamiento del camión [Nm]

$T_{rr}$  :Componente de torque asociada a la resistencia de rodamiento [Nm]

$T_{drag}$  :Componente de torque asociada al arrastre aerodinámico [Nm]

$T_{friction}$  :Componente de torque asociada a la fricción [Nm]

$\theta_{road}$  :Ángulo de inclinación del camino [%]

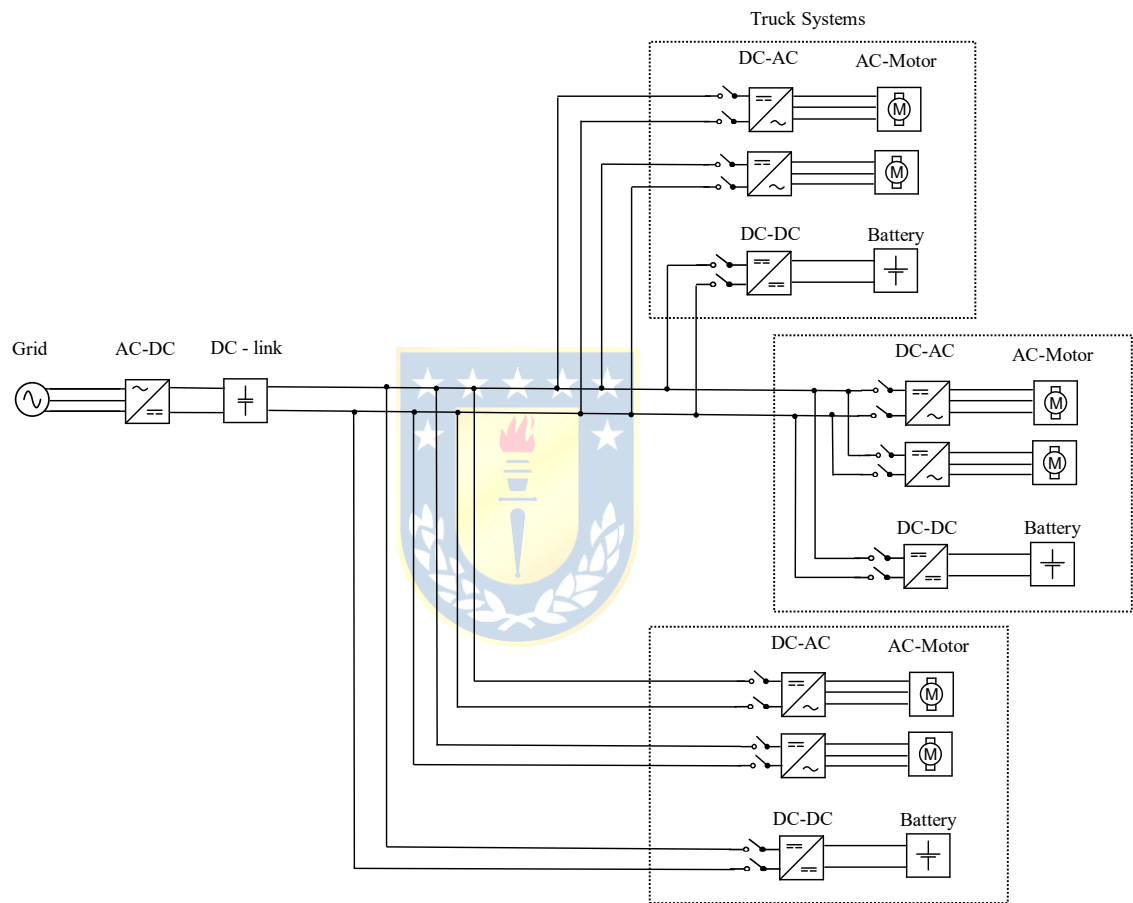
$\mu_1, \mu_2$  :Coeficiente de torque de resistencia a la rodadura

$v_{truck}$  :Velocidad del camión minero [km/h]

$\omega_{mot}$  :Velocidad angular del motor [rad/s]

Se menciona además las componentes más relevantes en el cálculo del torque de carga, que son  $T_{grade}$  y  $T_{rr}$ . Para determinar sus magnitudes,  $\theta_{road}$  y  $\mu_1, \mu_2$  deberán ser especificados.  $\theta_{road}$  se obtiene mediante sensores instalados en los camiones;  $\mu_1, \mu_2$  se deberán extraer a partir de los registros de campo de los camiones que circulan en la sección evaluada del tramo.

Una vez descrito los principales componentes se muestra la Figura 3.7 la cual representa un diagrama general del sistema de potencia Trolley Assist descrito anteriormente.



**Figura 3.7 Diagrama general sistema de potencia Trolley Assist**

### 3.4. Active Front End (AFE)

#### 3.4.1 Principio de operación

AFE consiste en una etapa convertidora conectada a la línea, mostrado en la Figura 3.8, en aplicaciones de accionamientos de motores, cuyos dispositivos semiconductores son controlados por técnicas moduladoras PWM. El principio de funcionamiento se basa en los principios análogos a los de la transmisión de energía de la red eléctrica. Es decir, en el punto de interconexión, la red asume el comportamiento de un gran generador síncrono de frecuencia estable, en donde el sistema IGBT se comporta como un sistema adicional de corriente alterna conectado a este mediante una impedancia [24].

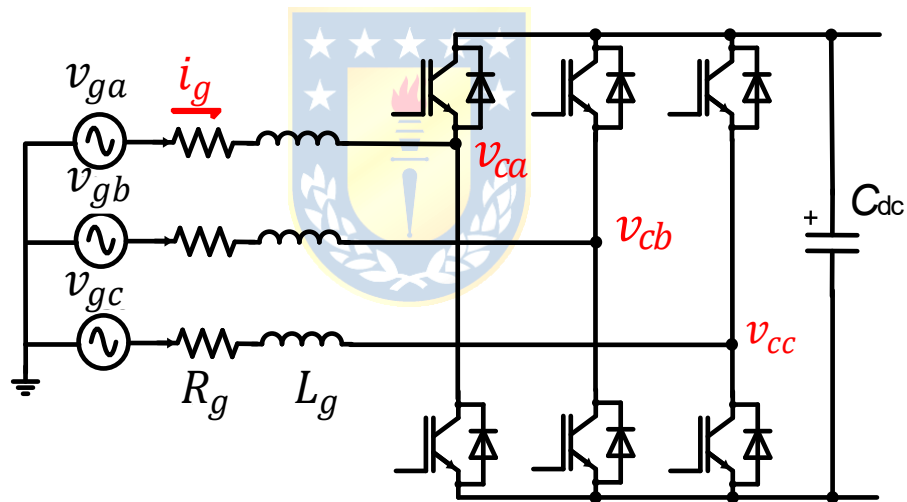


Figura 3.8 Diagrama esquemático de un convertidor AFE, basado de [25]

La componente fundamental de la tensión de entrada controla el flujo de potencia activa y reactiva en el sistema. Esta dirige la cantidad de energía que se transfiere y distribuye. Así, la igualdad de la componente fundamental de la tensión en el convertidor con la tensión de la red es imprescindible para la transferencia de potencia en el sistema [25]. La presencia de los armónicos de alta frecuencia es contrarrestada por el inductor de filtro  $L_g$ . En la Figura 3.9 se muestra el circuito equivalente por fase y, a partir de este, en Figura 3.10 se muestra el diagrama fasorial AFE de las componentes

fundamentales de corriente por red  $i_{gf}$  y de tensión en convertidor  $v_{cf}$  utilizando la tensión de red  $v_g$  como referencia. La resistencia de filtro  $R_g$  suele ser bastante baja en comparación con la reactancia de línea. En esta sección, por simplicidad, se obviará la resistencia en los diagramas.

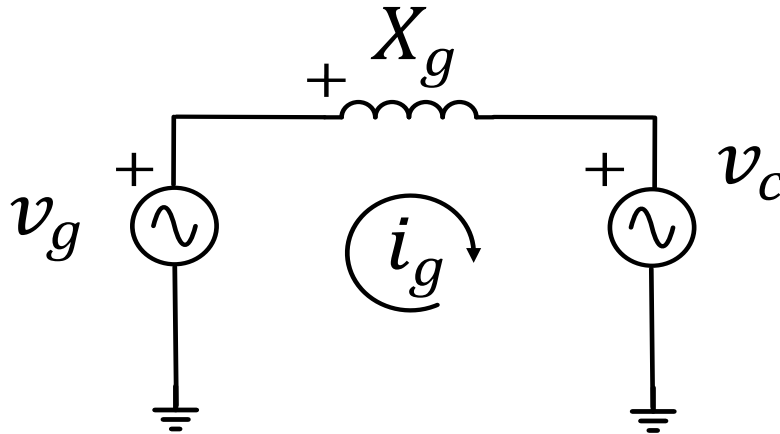


Figura 3.9 Circuito equivalente AFE por fase, basado de [25]

En Figura 3.10a voltaje y corriente se encuentran en fase, por lo que se opera a factor de potencia unitario. En este modo se suministra energía hacia el convertidor. Las Figuras Figura 3.10b y Figura 3.10c corresponden a un factor de potencia en retraso y adelanto respectivamente. El flujo de potencia activa es desde la red al convertidor. La Figura 3.10d corresponde al modo de operación regenerativo a factor de potencia unitario. El flujo de potencia activa es desde el convertidor hacia la red.

Como se puede observar, el diagrama fasorial es idéntico al de una máquina síncrona de rotor cilíndrico, por lo que la potencia activa y reactiva son se obtienen mediante las ecuaciones (3.12) y (3.13) respectivamente:

$$P = \frac{3v_g v_c}{X_g} \sin \delta \quad (3.12)$$

$$Q = \frac{3v_g v_c}{X_g} \cos \delta - \frac{3v_g^2}{X_g} \quad (3.13)$$

El ángulo  $\delta$  se define como el ángulo de potencia debido a su influencia en el control de flujo de potencia en el sistema; además, se observa la proporcionalidad indirecta entre la reactancia de línea y las expresiones de potencia, lo cual resulta un factor determinante en el control del sistema frente activo.

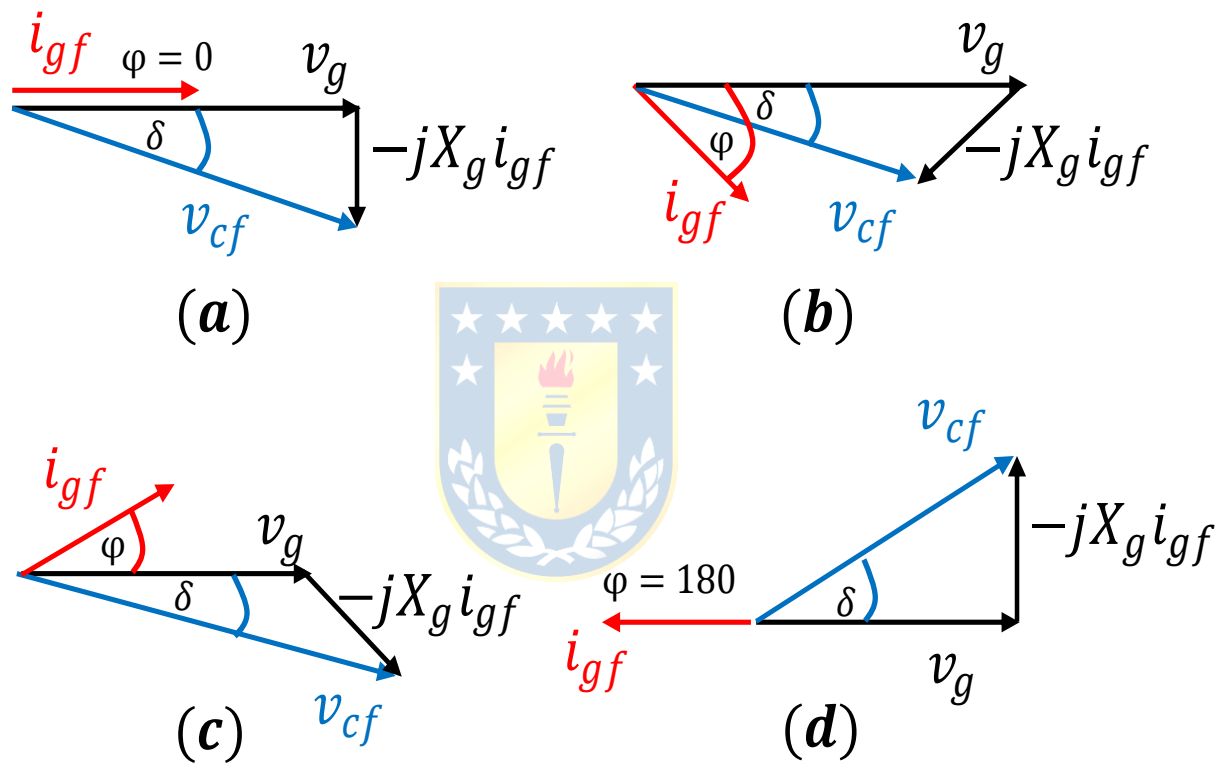


Figura 3.10 Diagrama fasorial AFE bajo diferentes modos operativos (a) fp unitario (b) fp retraso (c) fp adelantado (d) Operación regenerativa a fp unitario, basado de [25]

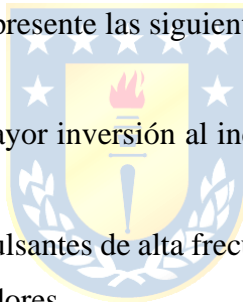
### 3.4.2 Ventajas y desventajas del sistema AFE

La implementación de los convertidores de frente activo permite solucionar diversos aspectos relacionados a la calidad de la potencia. Dentro de los beneficios que otorga esta topología se encuentran [24] ,[26] y [27]:

1. Admite la bidireccionalidad del flujo de potencia, es decir, el sistema además de operar en modo motor también podrá regenerar energía al sistema durante el frenado.
2. El control de frente activo permite regular el factor de potencia, admitiendo la operación a factor de potencia unitario.
3. El contenido armónico en la alimentación es bajo en ambos modos de operación.
4. El sistema de control admite una rápida respuesta dinámica ante cambios en el flujo de potencia demandados por la carga.

Por contraparte, se deberá tener presente las siguientes consideraciones en la implementación del sistema AFE:

1. Requerimiento de una mayor inversión al incorporar la unidad de frente activo en los variadores.
2. Presencia de corrientes pulsantes de alta frecuencia debido a la acción conmutadora de los dispositivos conmutadores.



### 3.5. Control por campo orientado (Control vectorial)

El torque electromecánico producido en las máquinas eléctricas se debe a la interacción entre los campos magnéticos generados por las corrientes circulante en los devanados del estator y el rotor, según sea el modo de operación de la máquina. De las características constructivas de una máquina de corriente continua, el conmutador mecánico de la máquina de corriente continua actúa como un convertidor mecánico, permitiendo que los ejes magnéticos de los devanados de campo y armadura estén en cuadratura. Bajo la suposición de una máquina de corriente continua ideal, es decir, despreciando la saturación y la reacción de armadura, resulta un torque proporcional al producto de las corrientes de excitación y armadura. Otra característica importante por considerar es el control desacoplado de estas corrientes. La corriente de campo regula el flujo de la máquina, y la corriente de armadura controla el torque eléctrico. Esto resulta en un control de alto desempeño en respuestas de torque tanto en régimen transitorio como estacionario.

Las características constructivas de una máquina de inducción son comparativamente más sencillas a las de la máquina de corriente continua, presentan devanados únicamente en el estator y se implementa un inversor compuesto por semiconductores. Sin embargo, bajo estas características, no se logra un control independiente del flujo y el torque. Para ello, se implementa la técnica de control por campo orientado, conocida también como control vectorial. El control vectorial admite el control independiente del flujo y torque, de la máquina de inducción al utilizar las variables eléctricas, voltaje y corriente, en el marco de referencia dq, siendo un control análogo al utilizado en las máquinas de corriente continua.

En la Figura 3.11 se muestra el circuito equivalente, por fase, del motor de inducción en estado estacionario. Todas las variables están referidas al estator.

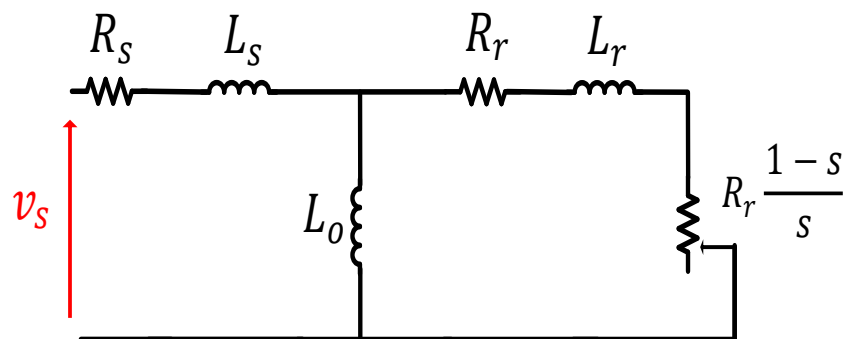


Figura 3.11 Circuito equivalente por fase máquina de inducción

donde,

$R_s$	: Resistencia estator
$R_r$	: Resistencia rotor
$L_o$	: Inductancia magnetizante
$L'_s$	: Inductancia de fuga del estator
$L'_r$	: Inductancia de fuga del rotor
$L_s = L_o + L'_s$	: Inductancia propia del estator
$L_r = L_o + L'_r$	: Inductancia propia del rotor
$s$	: Deslizamiento

Si bien este circuito equivalente por fase permite el análisis del motor en estado estacionario, cuando se requiere el estudio de la respuesta en estado transiente es conveniente implementar un modelo más adecuado que considere los efectos dinámicos de este.

Al alimentar los devanados del estator con corrientes trifásicas balanceadas, se producen componentes de flujo por fase desfasadas en  $120^\circ$ . Las ecuaciones de tensión en estator y rotor en marco abc, ecuaciones (3.14) y (3.15) respectivamente, se muestran a continuación:

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt} \quad (3.14)$$

$$\vec{v}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} = 0 \quad (3.15)$$

donde,

$\vec{v}_s$	: vector de tensiones, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{i}_s$	: vector de corrientes, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{i}_r$	: vector de corrientes, por fase, en rotor (marco abc)
$\vec{\psi}_s$	: vector de flujo, por fase, en estator (marco abc)
$\vec{\psi}_r$	: vector de flujo, por fase, en rotor (marco abc)

Notar que el voltaje el voltaje de rotor es igual a cero debido a la característica constructiva del rotor de la máquina jaula de ardilla; el circuito del rotor está cortocircuitado. Considerando además el flujo de entrehierro, determinado por la ecuación (3.16), los flujos de estator y rotor , ecuación (3.17) y (3.18) respectivamente, resultan:

$$\vec{\psi}_o = L_o(\vec{i}_s + \vec{i}_r) \quad (3.16)$$

$$\vec{\psi}_s = \vec{\psi}_o + \vec{\psi}_{ls} = L_s \vec{i}_s + L_o \vec{i}_r \quad (3.17)$$

$$\vec{\psi}_r = \vec{\psi}_o + \vec{\psi}_{lr} = L_o \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \quad (3.18)$$

donde,

$\vec{\psi}_{ls}$  : vector flujo de dispersión estator

$\vec{\psi}_{lr}$  : vector flujo de dispersión rotor

$\vec{\psi}_o$  : vector flujo del entrehierro

Definiendo la constante de tiempo de rotor  $\tau_r = L_r/R_r$ , y el coeficiente de dispersión total  $\sigma = \frac{L_s L_r - L_o^2}{L_s L_r}$ , luego de un desarrollo matemático, las ecuaciones de estator y rotor de la máquina se pueden expresar mediante las ecuaciones (3.19) y (3.20) respectivamente:

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + \sigma L_s \frac{d\vec{i}_s}{dt} + \frac{L_o}{L_r} \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} \quad (3.19)$$

$$0 = \frac{\vec{\psi}_r}{\tau_r} - \frac{L_o}{\tau_r} \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} \quad (3.20)$$

Por otro lado, se especifica la ecuación mecánica del rotor, ecuación (3.21), la cual depende directamente de la razón de cambio de la velocidad mecánica del rotor, y la definición del torque eléctrico, mediante la ecuación (3.22):

$$J_{eq} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r \quad (3.21)$$

$$T_e = \frac{2P}{3} \text{Im}\{\vec{\psi}_s^* \vec{i}_s\} = -\frac{2P}{3} \text{Im}\{\vec{\psi}_r^* \vec{i}_r\} \quad (3.22)$$

donde,

$J_{eq}$  : Inercia total conjunto motor-carga referida al eje del motor [ $kg \cdot m^2$ ]

- $T_e$  : Torque eléctrico desarrollado por el motor [ $N \cdot m$ ]  
 $T_L$  : Torque de carga presente en el motor [ $N \cdot m$ ]  
 $B$  : Coeficiente de fricción viscosa referido a la velocidad [ $kg \cdot m^2$ ]  
 $P$  : Numero de polos de la máquina  
 $\omega_r$  : Velocidad angular del flujo del rotor respecto al devanado del rotor [ $rads/s$ ]

Notar que el factor 2/3 del torque eléctrico concierne a la constante correspondiente en las transformadas Clark-Park **conservativas en amplitud** definidas anteriormente. Finalmente, aplicando estas transformadas a ( 3.14), ( 3.15), ( 3.17) y ( 3.18) se obtiene el modelo de la máquina en el sistema de referencia rotatorio dq. Las ecuaciones (3.23) y (3.24) se refieren a (3.14), (3.25) y (3.26) se refieren a (3.15), (3.27) y (3.28) se refieren a (3.17), y (3.29) y (3.30) se refieren a (3.18):

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \sigma L_s \omega_e i_{sq} + \frac{L_o}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_e \frac{L_o}{L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} \quad (3.23)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \sigma L_s \omega_e i_{sd} + \frac{L_o}{L_r} \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_e \frac{L_o}{L_r} \psi_{rd} \quad (3.24)$$

$$0 = \frac{\psi_{rd}}{\tau_r} - \frac{L_o}{\tau_r} i_{sd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_{SL} \psi_{rq} \quad (3.25)$$

$$0 = \frac{\psi_{rq}}{\tau_r} - \frac{L_o}{\tau_r} i_{sq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_{SL} \psi_{rd} \quad (3.26)$$

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_o i_{rd} \quad (3.27)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_o i_{rq} \quad (3.28)$$

$$\psi_{rd} = L_o i_{sd} + L_r i_{rd} \quad (3.29)$$

$$\psi_{rq} = L_o i_{sq} + L_r i_{rq} \quad (3.30)$$

Donde  $\omega_{SL}$  corresponde a la frecuencia de deslizamiento. Una vez obtenidas las ecuaciones en el sistema de referencia rotatorio, se orientará el flujo del rotor en el eje directo ( $\psi_{rq} = 0$ ), determinado por la ecuación (3.31), por lo que no se tendrán variaciones de flujo en el eje de cuadratura, expresado en la ecuación (3.22). Además, al operar flujo constante, la corriente  $i_{sd}$  se aproxima a la corriente magnetizante  $i_m$ , representado mediante la ecuación (3.33):

$$\psi_r = \psi_{rd} + j0 \Rightarrow |\overrightarrow{\psi_r}| = \psi_{rd} \quad (3.31)$$

$$\frac{d\psi_{rq}}{dt} = 0 \quad (3.32)$$

$$i_{sd} \approx i_m \quad (3.33)$$

Reemplazando las ecuaciones ( 3.31) y ( 3.32) en las ecuaciones (3.22)-(3.32) se obtiene:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \sigma L_s \omega_e i_{sq} + \frac{L_o}{L_r} \frac{d\psi_{rd}}{dt} \quad (3.34)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \sigma L_s \omega_e i_{sd} + \omega_e \frac{L_o}{L_r} \psi_{rd} \quad (3.35)$$

$$0 = \frac{\psi_{rd}}{\tau_r} - \frac{L_o}{\tau_r} i_{sd} \quad (3.36)$$

$$0 = -\frac{L_o}{\tau_r} i_{sq} + \omega_{SL} \psi_{rd} \quad (3.37)$$

$$\psi_{rd} = L_o i_{sd} \quad (3.38)$$

$$T_e = \frac{2P}{3} \frac{L_o}{L_r} \psi_{rd} i_{sq} \quad (3.39)$$



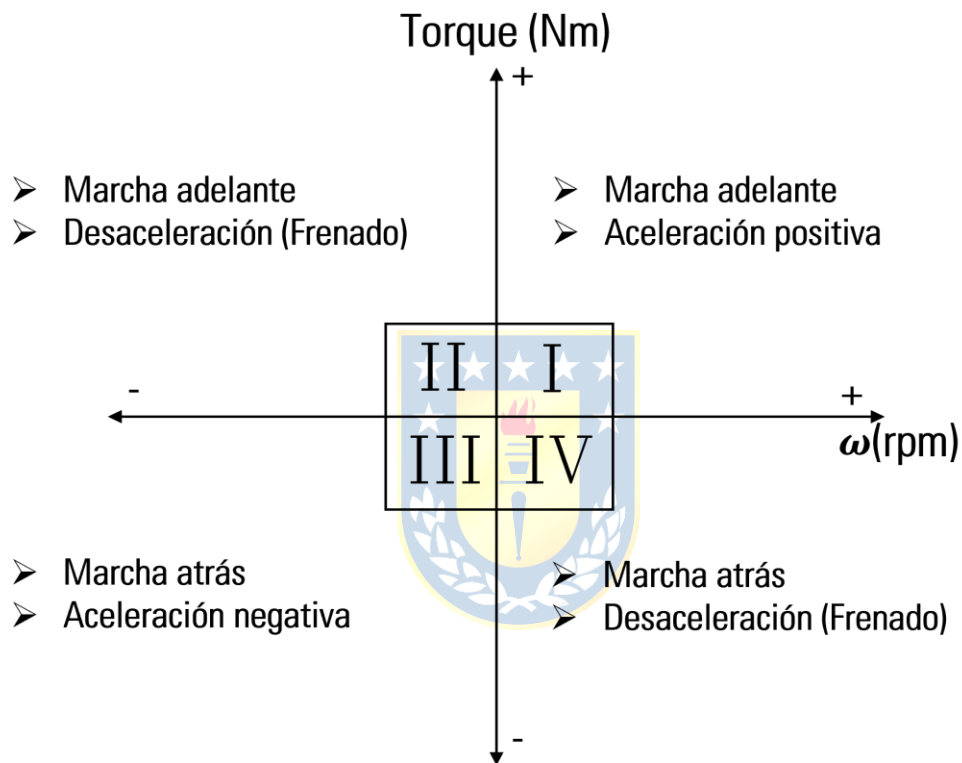
Donde las ecuaciones (3.34) y (3.35) corresponden a las componentes dq de tensión estator bajo la condición de orientación, mientras que (3.36) y (3.37) representan las componentes dq de tensión rotor en la misma condición; la ecuación (3.38) representa el flujo total y (3.39) al torque, ambos bajo la condición de orientación. Luego, reemplazando ( 3.38) en ( 3.37) se obtiene la ecuación (3.40) de frecuencia de deslizamiento:

$$\omega_{SL} = \frac{1}{\tau_r} i_{sq} \quad (3.40)$$

Las ecuaciones ( 3.38) ,( 3.39) y ( 3.40) son fundamentales para el entendimiento del principio operacional del control vectorial. A partir de las transformaciones de las corrientes medidas en el estator al eje rotatorio dq, se puede controlar la máquina por medio de las corrientes en el mismo marco. El flujo de la máquina se controla mediante la corriente  $i_{sd}$  mientras que el torque eléctrico es controlado únicamente por  $i_{sq}$ . Esto presenta el atractivo del control desacoplado de corriente, explicado con mayor detalle en el apartado 4.3.3.

### 3.6. Frenado Regenerativo aplicado en motores asíncronos

Durante el frenado del vehículo las máquinas eléctricas tendrán doble sentido de giro. Estas actuarán en modo motor o generador según la condición de carga que exhiben. Junto con ello, se tendrá doble sentido de giro, así como también doble sentido de torque aplicado. En la Figura 3.12 se ilustran cuatro escenarios que difieren entre ellos según la dirección de rotación y modo de operación.



**Figura 3.12 Operación cuatro cuadrantes de una máquina asíncrona**

El primer cuadrante corresponde a la máquina operando como motor girando en sentido horario; el vehículo tracciona la carga. El segundo cuadrante la máquina gira en sentido antihorario con un torque positivo; la máquina opera como generador. En el tercer cuadrante la máquina opera como motor girando en sentido antihorario con un torque negativo. En el cuarto cuadrante la máquina gira en sentido horario con torque negativo; la máquina opera como generador. Esta característica de transición entre operación modo motor o generador se puede visualizar en la curva torque-velocidad de un motor asíncrono mostrada en la Figura 3.13, la cual está intrínsecamente relacionada con el deslizamiento de la máquina.

El deslizamiento corresponde a diferencia entre la velocidad síncrona,  $\omega_e$ , y la velocidad de rotación del rotor  $\omega_r$ , dividida entre la velocidad síncrona:

$$s = \frac{\omega_e - \frac{P}{2}\omega_r}{\omega_e} \quad (3.41)$$

Los convertidores estáticos controlarán la velocidad según los requerimientos operacionales. Durante el frenado constante del vehículo, operación en el segundo cuadrante, la velocidad del rotor será mayor que la velocidad síncrona. El torque sigue siendo positivo debido a su relación inversa en un motor de inducción. La energía cinética durante esta acción de frenado será regenerada e inyectada al enlace DC a través del convertidor, o bien para recargar la batería de un vehículo eléctrico.

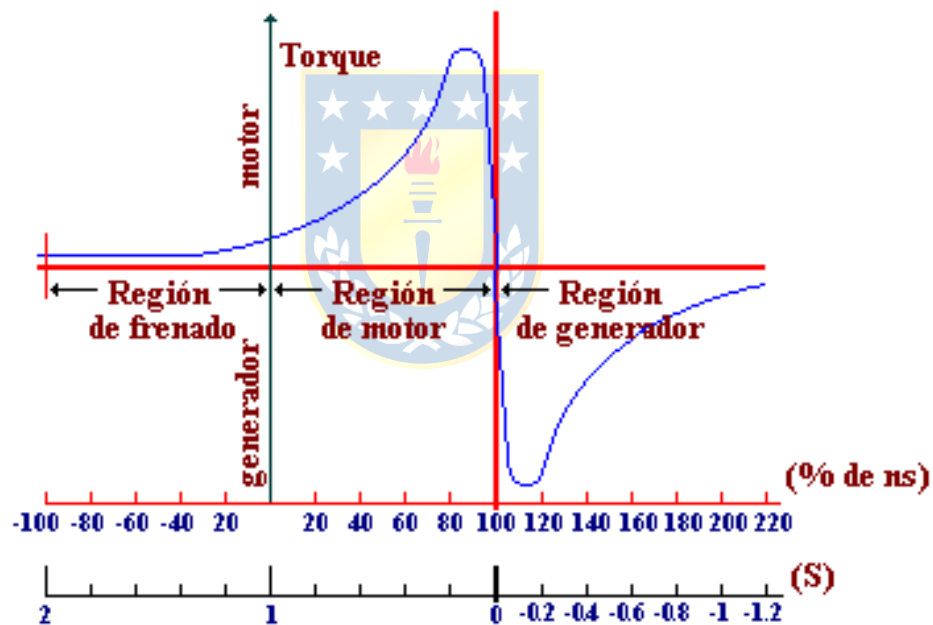


Figura 3.13 Curva torque velocidad para operación en cuatro cuadrantes [28]

## Capítulo 4. Diseño del sistema de control

---

### 4.1. Introducción

En este capítulo se describirán los elementos que componen el sistema de potencia, verificando además las consideraciones de diseño y los métodos de control implementados asociados.

### 4.2. Control Vectorial Convertidor Front-End

En el sistema se busca siempre un control adecuado en el proceso que permita generar una buena calidad de energía en este. Para ello, la estrategia de control asociada al convertidor conectado en la línea debe ser diseñado tal que permita una conversión eficiente de la energía, siendo reflejado en un bajo contenido armónico y un factor de potencia conveniente.

Un buen control es fundamental para obtener las respuestas dinámicas deseadas. Una adecuada respuesta dinámica nos permitirá reducir los condensadores de enlace, lo cual es significativo debido al alto costo de estos y la reducción de espacio que esto implica, permitiendo un control preciso de la tensión que garantice la energía regenerada a la red de manera eficiente, no conduzca a fluctuaciones indeseadas en la red eléctrica, y mantenga el sistema estable con una buena calidad de energía suministrada.

El control de tensión y corrientes se realiza bajo el marco de referencia dq. Para asegurar los niveles de tensión constantes en el enlace DC, se controlará mediante PI el error de tensión en el enlace, obteniendo la referencia de la componente directa de corriente por red  $i_{gd}^*$ . Junto con su componente de cuadratura de referencia  $i_{gq}^*$  se procede con el control de corrientes. Mediante el control PI apropiado, se controlará el error de corrientes. Consecuentemente, se generan las tensiones en el convertidor  $v_{cd}^*$ ,  $v_{cq}^*$  para el controlador PWM. Este último producirá el patrón de conmutación necesario para satisfacer los requerimientos de potencia activa y reactiva.

#### 4.2.1 Diseño lazo de tensión

Se implementa un método de control basado en el balance energético propuesto en [29]. Este permite regular la tensión de enlace y remover las fluctuaciones del enlace limitando la potencia de entrada. La energía almacenada en el condensador se define mediante la ecuación (4.1):

$$E_{dc-link} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \quad (4.1)$$

donde  $C_{dc}$  es la capacitancia del condensador de enlace y  $V_{dc}$  la tensión a través del enlace. A partir de esta ecuación se determina que la energía del condensador depende únicamente de la tensión instantánea de tensión en el enlace.

El algoritmo detectará la tensión instantánea inicial y calculará su potencia de enlace respectiva, comparando luego con sus valores referenciales. Luego, la energía instantánea circulante por el enlace se calcula utilizando la ecuación (4.2):

$$\Delta E_{dc-link} = \frac{1}{2} C_{dc} \Delta V_{dc}^2 = \frac{1}{2} C_{dc} (V_{dc}^2(\text{referencia}) - V_{dc}^2(\text{instantaneo})) \quad (4.2)$$

Para la implementación de la ecuación en el sistema de control se realiza LCK en el nodo superior del enlace determinado por la ecuación (4.3). Luego, al expresarlos en términos energéticos se obtiene la ecuación (4.4):

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_o \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{2} C_{dc} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{dc} - P_o \quad (4.4)$$

donde  $i_{dc}$  corresponde a la corriente continua resultante de la acción conmutadora del convertidor conectado en línea,  $i_o$  la corriente continua dirigida hacia el convertidor conectado al motor,  $P_{dc}$  y  $P_o$  potencias producto de las corrientes  $i_{dc}$  y  $i_o$  respectivamente. A partir de la ecuación (4.4) se obtiene la planta a controlar determinada por la ecuación (4.5). El lazo de tensión se ilustra en la Figura 4.1.

$$\frac{V_{dc}^2}{(P_{dc} - P_o)} = \frac{1}{\frac{C}{2} \cdot s} \quad (4.5)$$

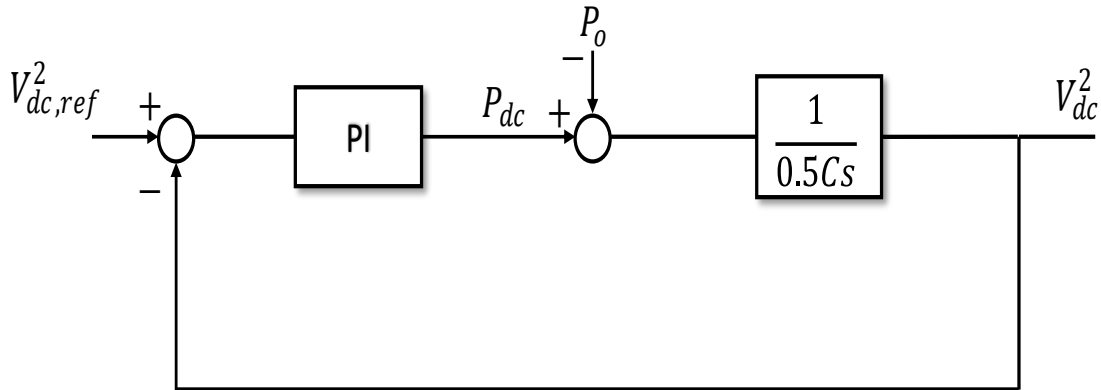


Figura 4.1 Diagrama en bloques del lazo de tensión en red, basado de [29]

Para obtener la corriente de referencia se utilizará la ecuación de potencia en marco dq. La potencia aparente, utilizando las transformadas exhibidas en 3.1, se calcula mediante la ecuación (4.6):

$$S = \frac{3}{2} \left( (v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) + j(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \right) \quad (4.6)$$

Orientando con el ángulo de red en la tensión  $v_{gd}$  se tiene que  $v_{gq} = 0$ . Reordenando términos se obtiene la ecuación (4.7):

$$S = \frac{3}{2} \left( (v_{gd}i_{gd}) + j(-v_{gd}i_{gq}) \right) \quad (4.7)$$

De aquí se tiene que las componentes  $i_{gd}$  e  $i_{gq}$  tienen un control desacoplado, donde  $i_{gd}$  controla la potencia activa requerida, mientras que  $i_{gq}$  controla la potencia reactiva. Bajo esta premisa, para lograr un control de reactivo al mínimo, se establece  $i_{gq} = 0$ .

Así, la corriente de referencia se determina mediante la ecuación (4.8):

$$i_{gd}^* = \frac{P_{dc}}{\frac{3}{2}v_{gd}} \quad (4.8)$$

Nuevamente, el factor 3/2 en la potencia aparente es debido al uso de la transformada Clark-Park **invariante en amplitud**. Este factor varía según el tipo de transformada implementada.

## 4.2.2 Diseño lazo corriente

Se utiliza el marco dq con orientación de voltaje con la red, transformando las variables alternas a continuas que permitan el control de estas utilizando un controlador PI. En el control de corrientes se utiliza un control desacoplado, permitiendo el control independiente de las corrientes de red. La corriente  $i_{gd}$ , la cual está alineada con el voltaje de red, controla la potencia activa, mientras que  $i_{gq}$ , perpendicular al vector de voltaje de red, controla la potencia reactiva.

Para el diseño del lazo de corriente es preciso obtener el modelo dinámico de la planta en un sistema SISO tal que permita el control en el marco dq. El modelo en marco abc del convertidor en red se describe en la ecuación (4.9):

$$\vec{v}_g = R_g \vec{i}_g + L_g \frac{d\vec{i}_g}{dt} + \vec{v}_c \quad (4.9)$$

Donde  $\vec{v}_c$  corresponde a los niveles de tensión en el convertidor de línea. Para implementar el control vectorial se deberá conocer el ángulo de red  $\theta_e$ . Debido a la orientación de  $\theta_e$  con  $v_{gd}$ , no habrá proyección en el eje q. Aplicando las transformadas en la ecuación (4.9) se obtiene el modelo en marco dq, donde (4.10) y (4.11) corresponden a la tensión de red en componentes directa y cuadratura respectivamente:

$$v_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_g i_{gq} + v_{cd} \quad (4.10)$$

$$v_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_g L_g i_{gd} + v_{cq} = 0 \quad (4.11)$$

Para desacoplar las ecuaciones de los ejes d y q se establece un nivel de tensión conveniente resultante en el convertidor en componentes dq, representados en las ecuaciones (4.12) y (4.13) respectivamente:

$$v_{cd} = -v'_d + (\omega_g L_g i_{gq} + v_{gd}) \quad (4.12)$$

$$v_{cq} = -v'_q - (\omega_g L_g i_{gd}) \quad (4.13)$$

Donde los términos en paréntesis corresponden a los términos compensadores de tensión. Luego, reemplazando (4.12) en (4.10) y (4.13) en (4.11) se obtienen las ecuaciones (4.14) y (4.15) respectivamente:

$$v'_d = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} \quad (4.14)$$

$$v'_q = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} \quad (4.15)$$

Finalmente, al aplicar la transformada de Laplace a las ecuaciones (4.14) y (4.15) se obtiene la función de transferencia de la planta que define el lazo de corriente, determinada por la ecuación (4.16). Así, el esquema de control de corrientes AFE resultante se ilustra en la Figura 4.2.

$$\frac{i_{gd}(s)}{v'_d(s)} = \frac{i_{gq}(s)}{v'_q(s)} = \frac{1}{L_g s + R_g} \quad (4.16)$$

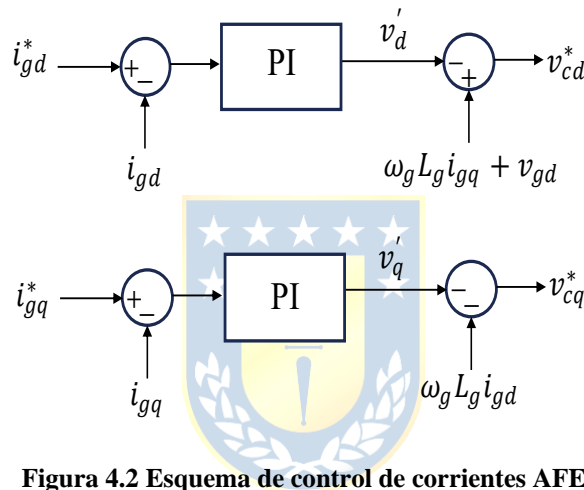


Figura 4.2 Esquema de control de corrientes AFE

### 4.3. Diseño Control Vectorial Indirecto

El esquema de control implementado es de lazos anidados. El lazo externo consiste en el control de la velocidad de la máquina de inducción, el cual determinará el torque requerido para mantener el control de velocidad mediante la corriente de cuadratura de referencia  $i_{sq}^*$ . En el lazo interno, se establece el control de las corrientes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$  mediante el control desacoplado de estas. El modo de operación de la máquina será bajo la velocidad base, es decir, se mantendrá el flujo de rotor constante, por lo que la corriente de referencia  $i_{sd}^*$  será constante e igual a la corriente de campo requerida para magnetizar la máquina según la operación nominal. La ventaja de utilizar el marco de referencia dq es el controlar las corrientes como señales de corriente continua, utilizando así los controladores PI para regularlas.

### 4.3.1 Determinación de la posición flujo del rotor

El método indirecto no requiere de la medición del flujo de rotor para orientar. Se utiliza la ecuación del deslizamiento (3.40), la cual asegura la orientación requerida. Para efectuar el control vectorial indirecto se requiere de una medición precisa de la velocidad rotacional o la posición del rotor de la máquina para determinar el ángulo de posición del flujo del rotor para orientar el marco dq del sistema de control. A partir de la velocidad angular a la que gira el flujo del rotor respecto del estator  $\omega_e$ , definida por la ecuación (4.17), la velocidad angular del rotor  $\omega_r$ , y el deslizamiento  $\omega_{SL}$ , se determina la posición angular relativa del flujo de rotor respecto al estator  $\theta_e$ , determinada por la ecuación (4.18):

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{SL} \quad (4.17)$$

$$\theta_e = \int \omega_e dt = \int \left( \omega_r + \frac{i_{sq}}{\tau_r i_m} \right) dt = \theta_r + \int \left( \frac{i_{sq}}{\tau_r i_m} \right) dt \quad (4.18)$$



### 4.3.2 Diseño lazo de velocidad

Para el diseño del lazo de velocidad la frecuencia natural en lazo cerrado debe ser al menos 10 veces menor que la del lazo de corriente, de modo que el lazo de corriente sea percibido como ganancia unitaria.

A partir de la ecuación dinámica en el eje del motor, mostrada nuevamente en (4.19) para facilitar la lectura, y considerando  $T_L$  como perturbación, se obtiene, mediante la transformada de Laplace, la planta a controlar determinada por la ecuación (4.20):

$$J_{eq} \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_L - B\omega_r \quad (4.19)$$

$$\frac{\omega_r}{T_e} = \frac{1}{J_{eq} \cdot s + B} \quad (4.20)$$

### 4.3.3 Diseño lazo de corriente

Para el diseño del sistema de control desacoplado de corrientes se utilizan las ecuaciones de tensión en estator en marco dq señaladas en 3.5. Análogamente, en el diseño de lazo de corriente del frente activo, se deberá obtener el modelo dinámico de la planta para obtener un sistema SISO. En este apartado se reescriben las ecuaciones ( 3.34) y ( 3.35) con el propósito de facilitar la lectura y comprensión, representadas por (4.21) y (4.22) respectivamente:

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + (-\sigma L_s \omega_e i_{sq}) \quad (4.21)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left( \sigma L_s \omega_e i_{sd} + \omega_e \frac{L_o^2}{L_r} i_m \right) \quad (4.22)$$

Las tensiones  $v_{sd}$  y  $v_{sq}$  son las tensiones proporcionadas en la salida del conversor PWM VSI. Para lograr el control desacoplado de las corrientes, los términos en paréntesis son considerados como términos compensadores, siguiendo un procedimiento análogo al control de corriente mencionado en 4.2.2.

Finalmente, al aplicar la transformada de Laplace a las ecuaciones ( 4.21) y ( 4.22) (sin considerar los términos compensadores) se obtiene la función de transferencia de la planta que define el lazo de corriente mediante la ecuación (4.23):

$$\frac{v_{sd}}{i_{sd}} = \frac{v_{sq}}{i_{sq}} = \frac{1}{\sigma L_s s + R_s} \quad (4.23)$$

A modo ilustrativo, la Figura 4.3 muestra el diagrama en bloques del control vectorial indirecto descrito en este apartado.



## Capítulo 5. Simulación

---

En este apartado se procede en la descripción del modelo del sistema implementado en PLECS. Además, se evaluaron tres escenarios para comprobar y validar el diseño del sistema de control, así como también el estudio e interpretación de los resultados en el escenario correspondiente al uso del sistema de catenaria.

### 5.1. Descripción

Para llevar a cabo la simulación se describe la estructura base del modelo implementado en PLECS, ilustrada en la Figura 5.1. La simulación comienza con una fuente de tensión la cual representa el nivel de tensión requerido por la subestación AC. Esta subestación con una relación de cortocircuito  $X/R = 10$ . Las líneas trifásicas se conectan al bloque representativo de un inversor trifásico de dos niveles. La etapa siguiente corresponde al sistema de catenaria, donde se encuentra el enlace DC y los camiones mineros. La conexión de los camiones mineros se representa mediante interruptores ideales, los cuales se cierran cuando reciben la señal escalón de amplitud unitaria. La conexión de estos es secuencial, en donde los camiones siguientes se integrarán al sistema de catenaria luego de que el camión anterior logre la velocidad nominal referencial.

Para la visualización del impacto que producen los camiones al sistema AC durante su conexión y operación se utiliza un bloque de medición de potencia, el cual calcula la potencia activa y reactiva instantánea, ilustrado en la Figura 5.2, siguiendo la premisa de un sistema trifásico balanceado (conexión estrella). La evaluación del sistema de catenaria se visualiza la corriente continua y el nivel de tensión, ilustrados en las Figura 5.3 y Figura 5.4, siendo este último delimitado por un margen de seguridad equivalente al  $\pm 20\%$  del nivel de tensión del enlace DC.

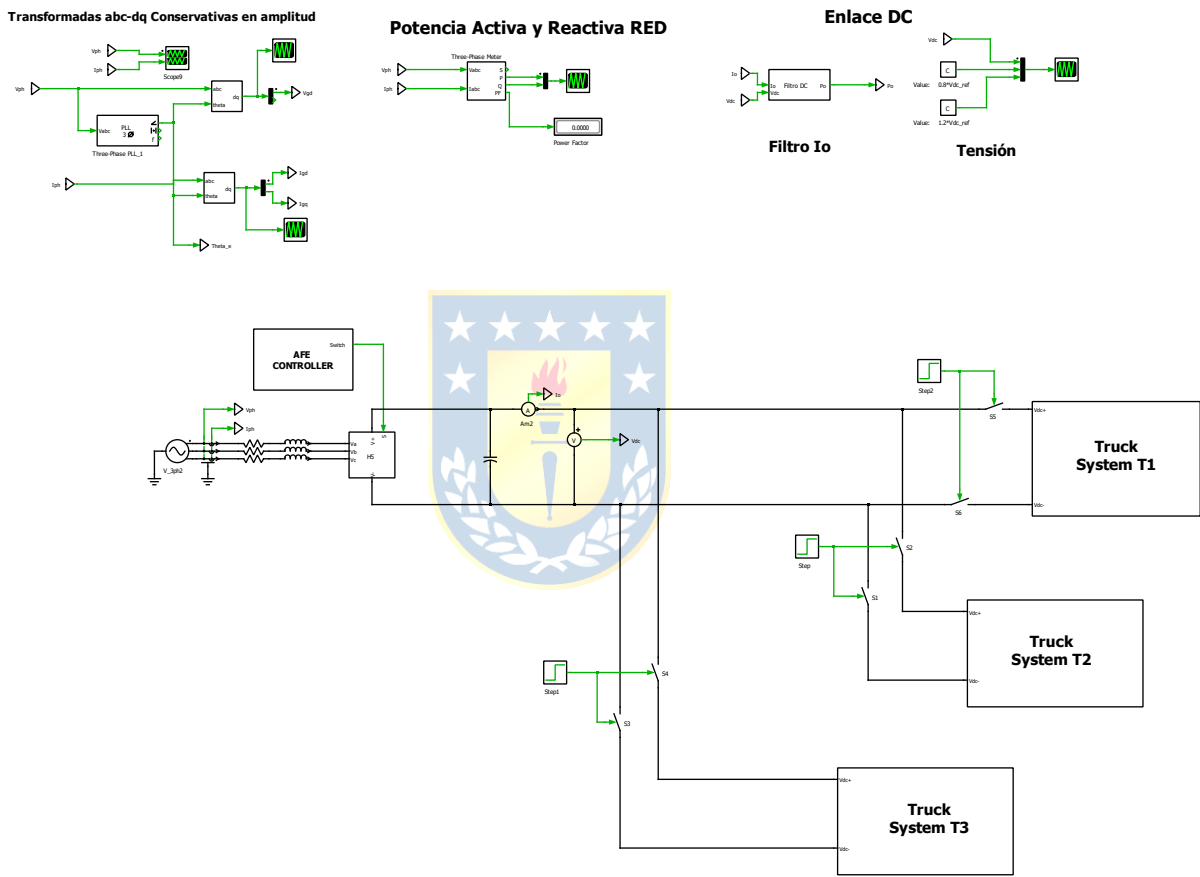


Figura 5.1 Diagrama general Trolley Assist diseñado en PLECS

# Potencia Activa y Reactiva RED

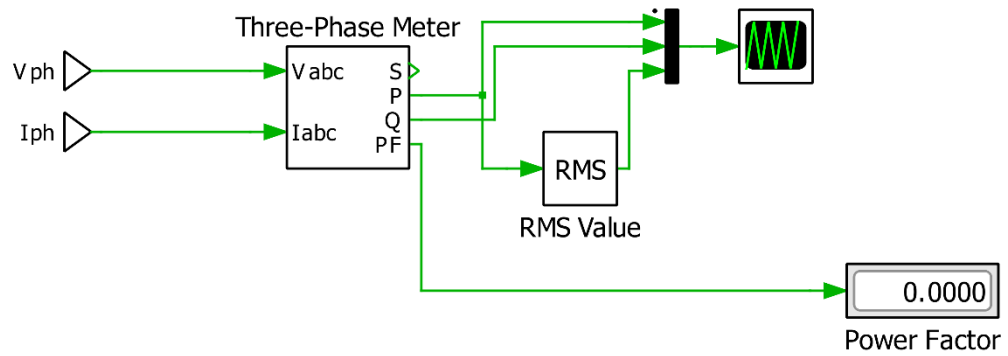
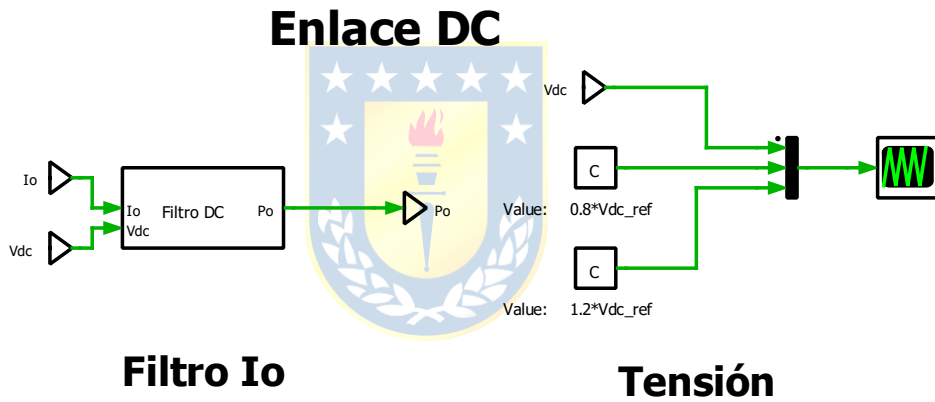


Figura 5.2 Cálculo de potencia activa y reactiva instantánea en PLECS



Filtro Io

Tensión

Figura 5.3 Variables Io y Vdc de enlace DC en PLECS

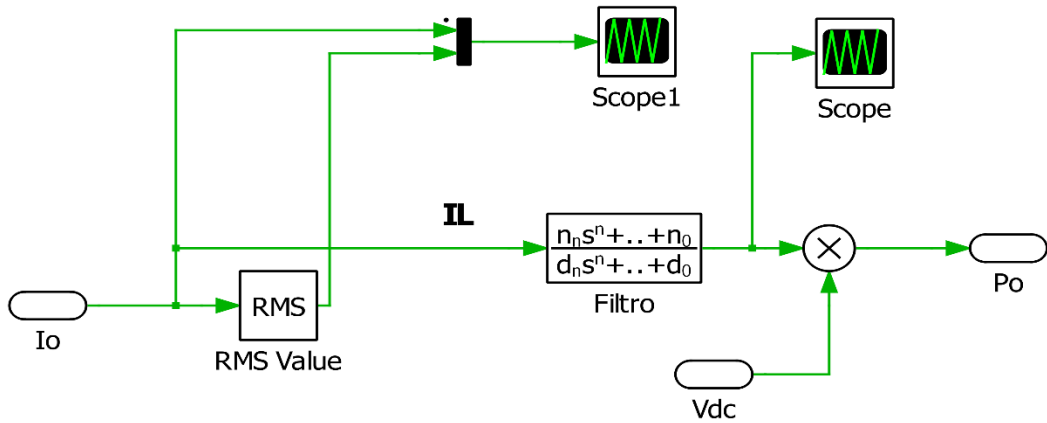


Figura 5.4 Filtro enlace DC

Para establecer el sistema de control se implementa las transformadas Clark/Park conservativas en amplitud basadas en coseno descritas para poder realizar la estrategia moduladora, ilustrado en la Figura 5.5. Para mantener la sincronización entre los marcos de referencia ortogonales se opta por el uso de un Phase Lock Loop (PLL). El ángulo instantáneo de fase se controla por un lazo retroalimentado que regula la componente q a cero. Cuando se encuentra en estado estacionario, es decir cuando la componente q este en cero, la componente d representara la amplitud del vector de tensión. El control PI implementado en el sistema de control interno de PLL utiliza los valores predeterminados determinados por PLECS. Los bloques de transformación no consideran la secuencia cero, por lo que se obtienen directamente las variables en el marco dq. Para la implementación de SVPWM se utiliza bloques otorgados por PLECS, en los que se deberá especificar la frecuencia de conmutación y la estrategia conmutadora.



### Transformadas abc-dq Conservativas en amplitud

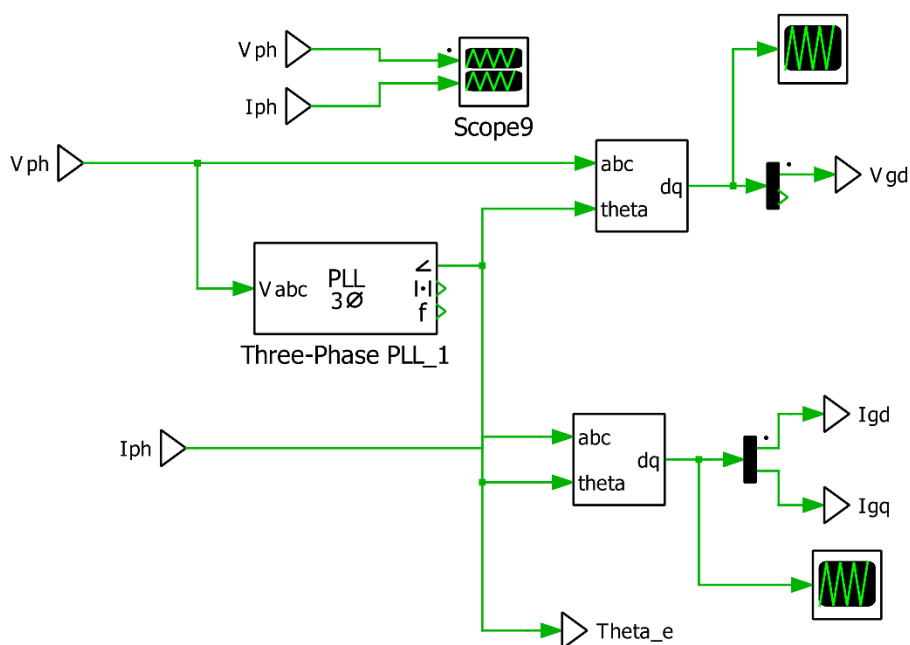


Figura 5.5 Transformadas abc/dq conservativas en amplitud en PLECS

El subsistema de control de frente activo consta de dos subsistemas que representan el control de tensión, ilustrado en la Figura 5.6 y Figura 5.7, y corrientes, ilustrado en Figura 5.8, especificados en 4.2.1. En particular, se busca que la potencia reactiva sea mínima, con el objetivo de obtener un factor de potencia unitario. Para cumplir con ello, se establece un valor referencial de corriente de cuadratura igual a cero.

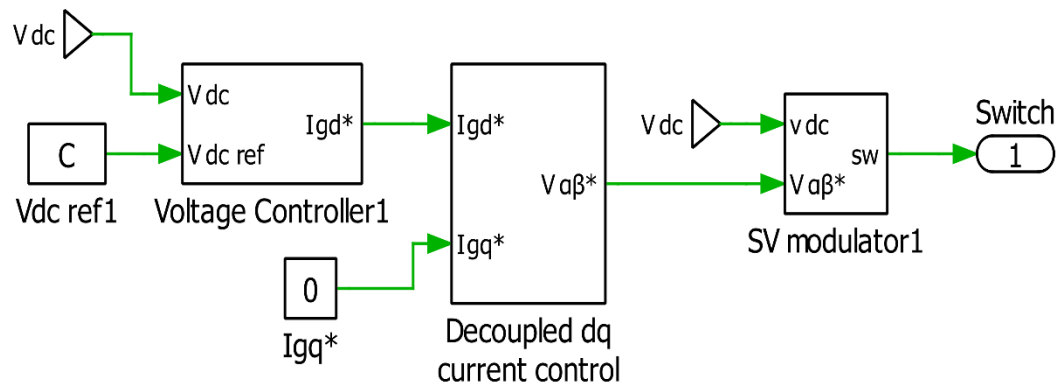


Figura 5.6 Subsistema AFE Controller diseñado en PLECS

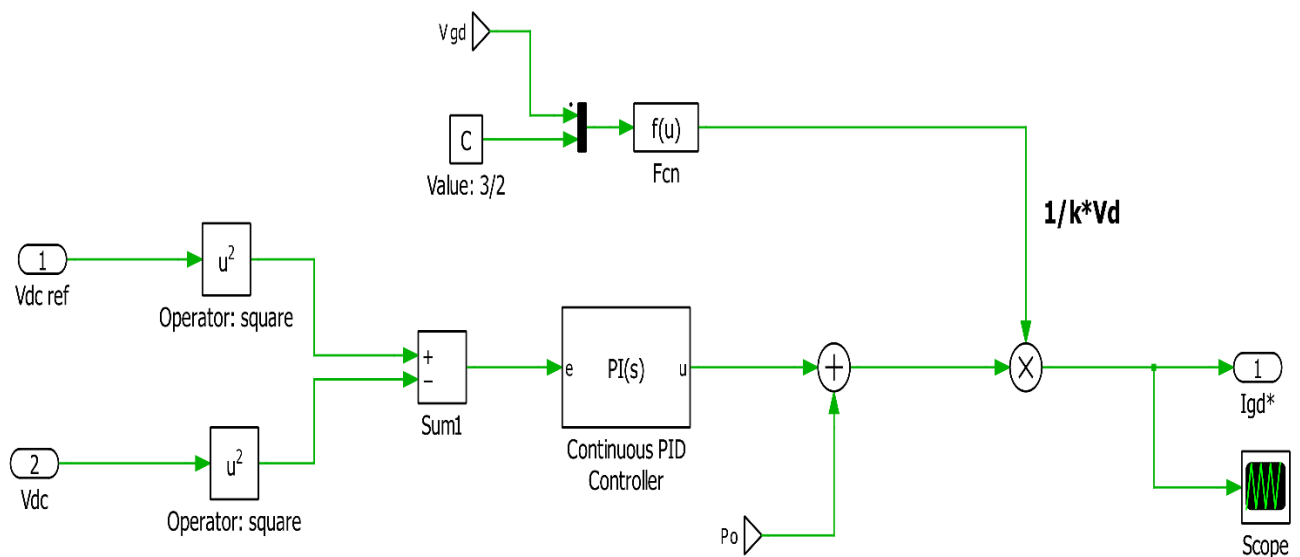
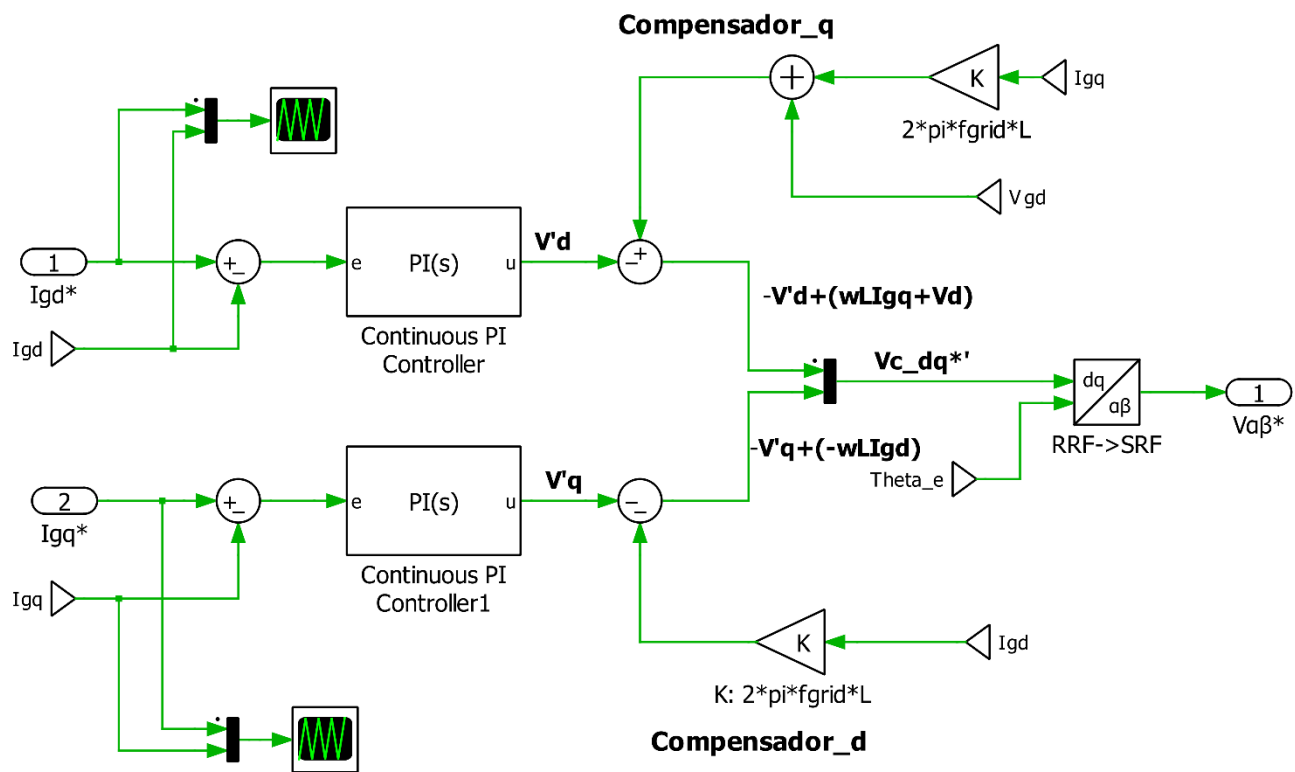


Figura 5.7 Subsistema Voltage Controller diseñado en PLECS



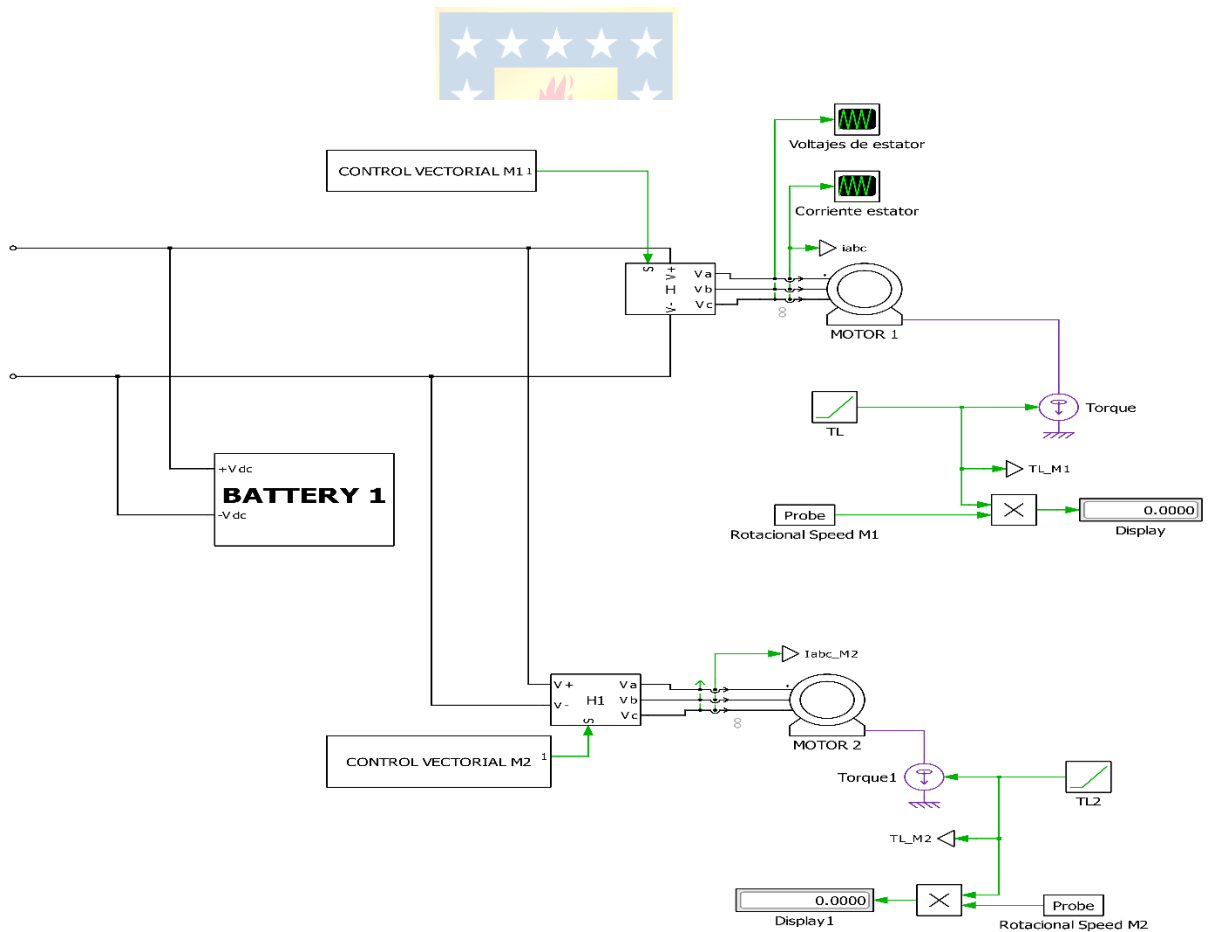
### Tensiones convertidor

$$V_{cd}^* = -V'd + wLI_{qq} + V_d$$

$$V_{cq}^* = -V'q - wLI_{gd}$$

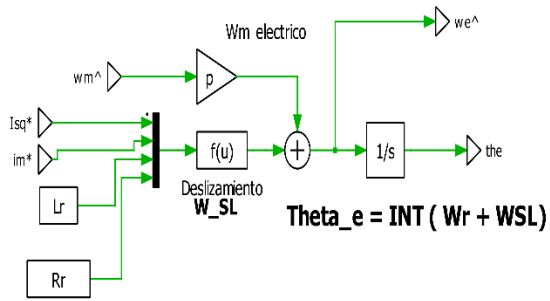
Figura 5.8 Subsistema Decoupled dq current control diseñado en PLECS

El subsistema correspondiente al modelo del camión minero, ilustrado en la Figura 5.9, está compuesto por dos motores de inducción jaula de ardilla y dos subsistemas internos correspondientes al control vectorial indirecto, ilustrado por Figura 5.10 a Figura 5.14, y al modelo simplificado de batería con su respectivo control, ilustrado por Figura 5.15. Tanto el control vectorial indirecto como el control de corriente de la batería utilizan referencias rampa para la velocidad y corriente respectivamente. Los motores accionan cada par de las ruedas traseras, cada uno es alimentado por medio de un inversor trifásico de dos niveles. Los pares motor-inversor y subsistema de batería están conectados en paralelo al enlace DC. El perfil de torque nominal y los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción utilizados son los otorgados por el estudio realizado en [21]. El torque de carga es de 17000 [Nm] por motor. Como solo se dispone de estos parámetros se procedió con el estudio de los valores nominales del motor realizando el ensayo en vacío de este implementado en PLECS. Los parámetros y especificaciones nominales obtenidos se encuentran en Tabla 2 y Tabla 3.

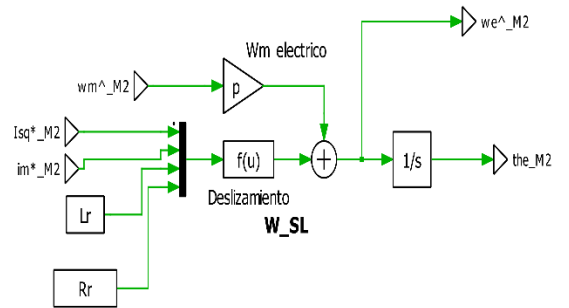


**Figura 5.9 Sistema de potencia en Truck System diseñado en PLECS**

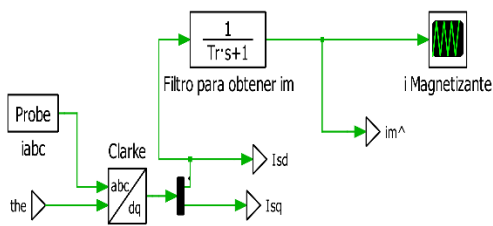
### MOTOR 1



### MOTOR 2



### Corriente Magnetizante



### Corriente Magnetizante

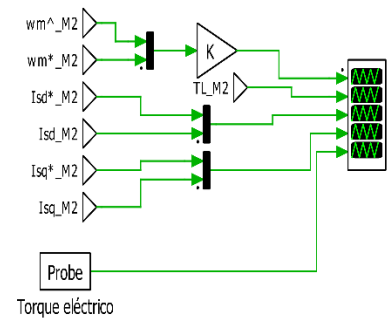
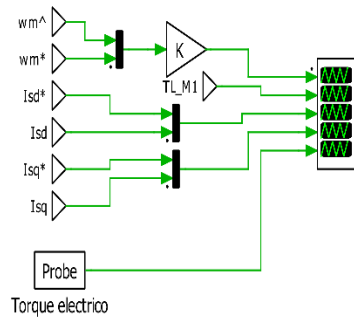
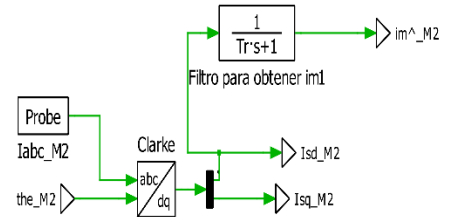


Figura 5.10 Variables de control en Truck System diseñado en PLECS

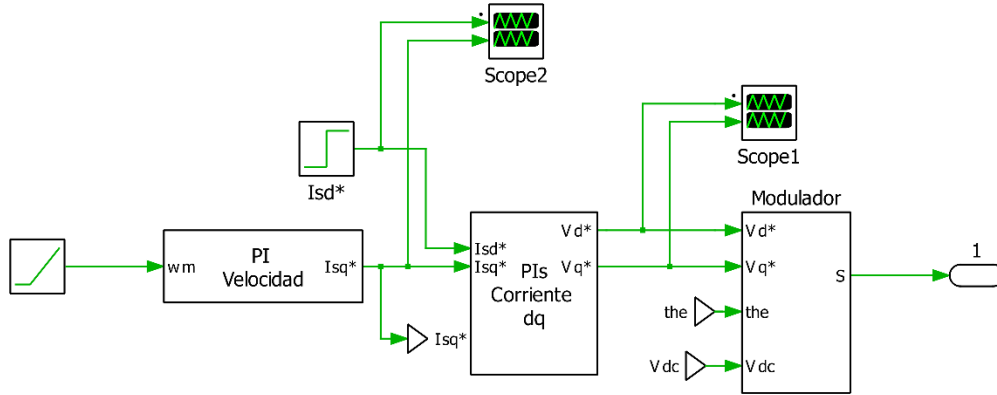


Figura 5.11 Subsistema Control Vectorial diseñado en PLECS

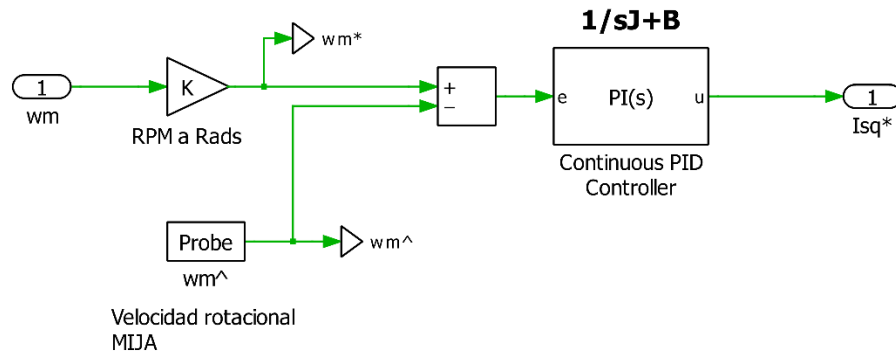


Figura 5.12 Subsistema PI Velocidad diseñado en PLECS

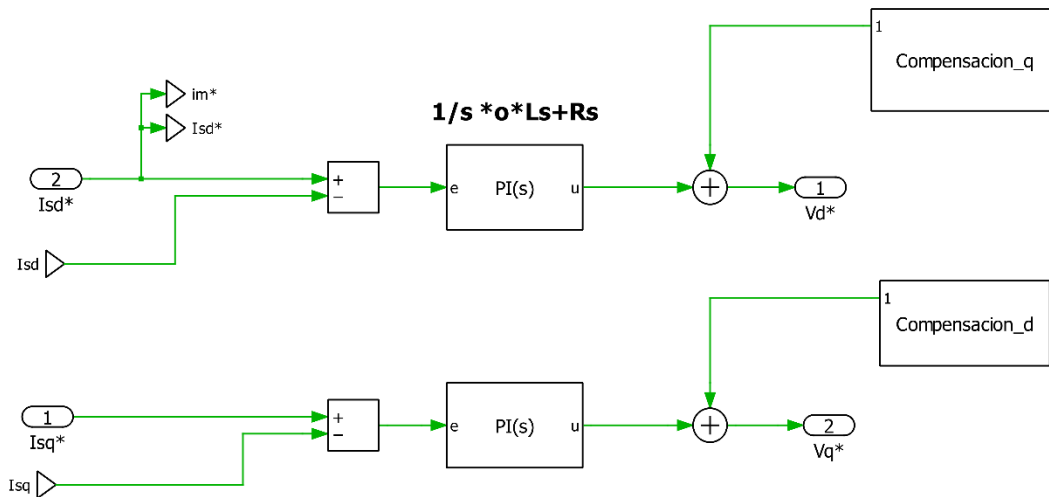


Figura 5.13 Subsistema PI Corrientes diseñado en PLECS

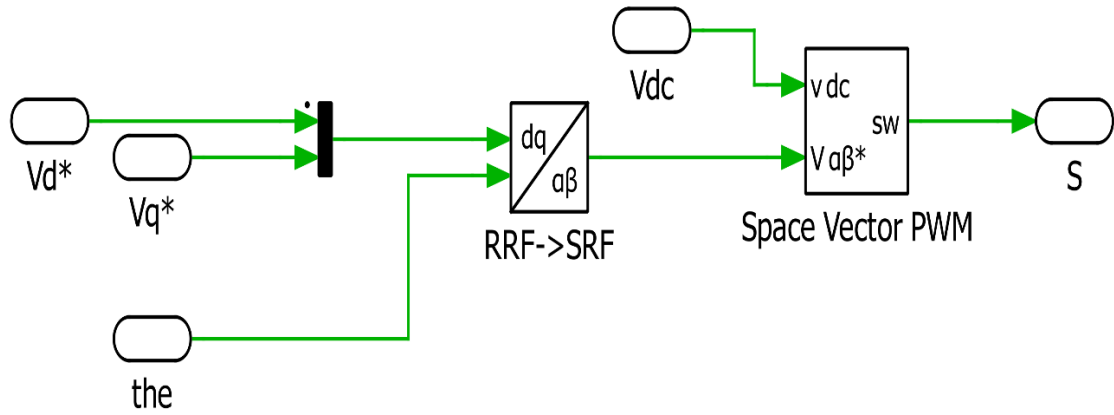


Figura 5.14 Subsistema Modulador diseñado en PLECS

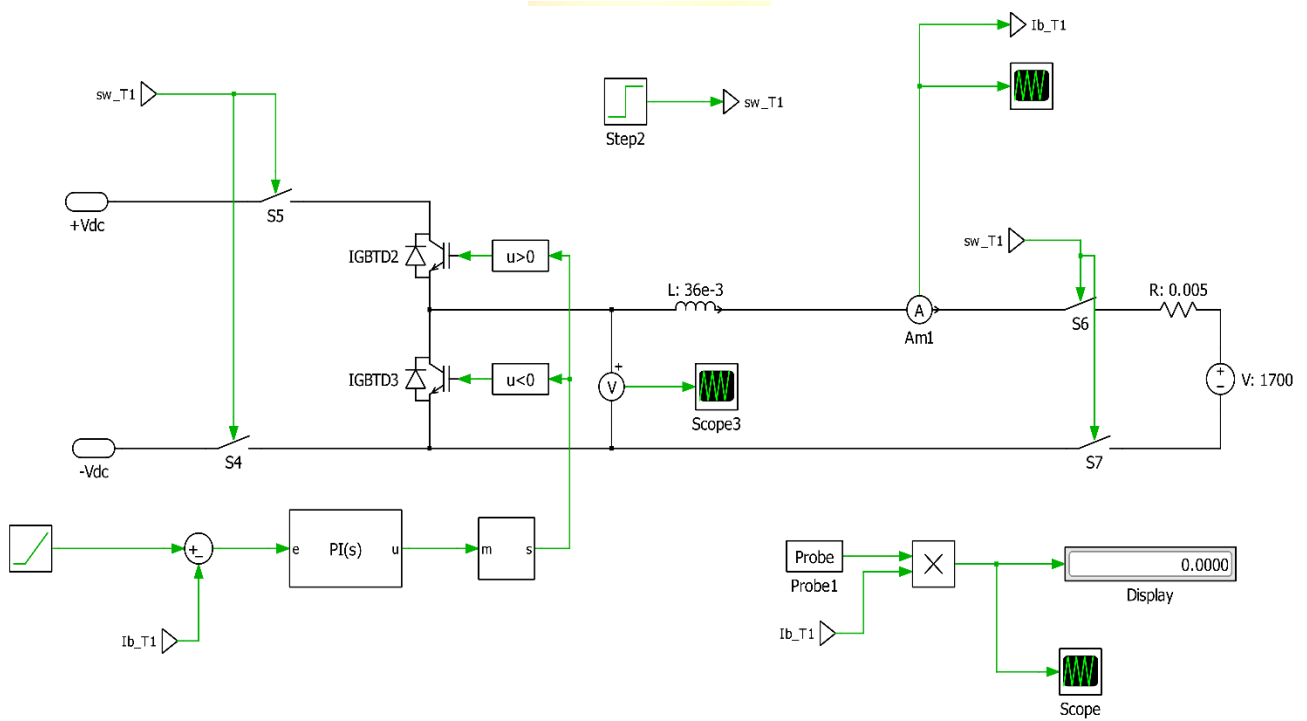
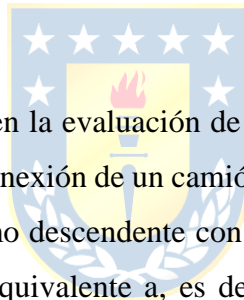


Figura 5.15 Subsistema Batería diseñado en PLECS

Los parámetros de línea y convertidor asociado se resumen en la Tabla 4. Por otro lado, los controladores implementados en los lazos de control son del tipo proporcional-integral (PI), los cuales incluyen Anti-Windup con el método de integración condicional. Para la determinación de los parámetros de control PI se ha utilizado la herramienta *sisotool* de Matlab. Las frecuencias naturales  $\omega_o$ , factor de amortiguamiento  $\xi$  seleccionadas, y las constante proporcional  $K_p$  e integral  $K_i$  resultantes, por lazo de control, se resumen en la Tabla 5.

Las simulaciones abarcan tres escenarios que permiten evaluar diferentes aspectos del sistema de asistencia TA durante la operación de los camiones mineros. El primer escenario se centra en la conexión secuencial de dos camiones al TA cuya velocidad inicial es cero. Esta simulación registra el proceso de conexión secuencial de camiones con el fin de evaluar el impacto en el sistema de distribución, analizando la capacidad del sistema en el suministro eléctrico simultaneo de los camiones.



El segundo escenario se centra en la evaluación de la capacidad regenerativa del sistema de distribución. Se registra el proceso de conexión de un camión al TA y, segundos después, un segundo camión se integra al TA durante el tramo descendente con una carga equivalente al 30% del torque nominal con el fin de representar un equivalente a, es decir, un camión sin material cargado. Se evaluará la capacidad de gestión energética del sistema generada por el frenado regenerativo del camión durante el descenso.

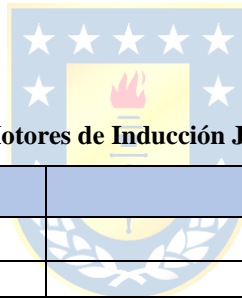
El tercer escenario consiste en la evaluación de la integración de un tercer camión al TA. La particularidad de este escenario es la integración de BEV en el TA. En la simulación se considera, en el modelo eléctrico del sistema de tracción, un modelo simplificado de la batería para su uso temporal durante los tramos ascendentes cumpliendo el rol de un convertidor Boost. Se evalúa los efectos de la integración de las baterías en el rendimiento del sistema, especialmente en términos de reducción de carga en el TA durante el uso de estas.

Las especificaciones sobre la configuración de PLECS al realizar las simulaciones son descritos en la Tabla 6.

**Tabla 2 Parámetros de la Máquina de Inducción Jaula de Ardilla PLECS**

Parámetro	Valor
$R_s$	10,8 [ $m\Omega$ ]
$L_{ls}$	0,2 [ $mH$ ]
$R_r$	19,6 [ $m\Omega$ ]
$L_{lr}$	0,3338 [ $mH$ ]
$L_o$	4 [ $mH$ ]
$J$	50
$B$	0.147
$P^*$	3
$\omega_{mo}$	0
$th_{mo}$	0
$[i_{sa} \ 0 \ i_{sb} \ 0]$	[0 0]
$[psi_{sd} \ 0 \ psi_{sq} \ 0]$	[0 0]

\*Según lo solicitado por PLECS, P corresponde al número par de polos de la máquina



**Tabla 3 Datos operacionales de los Motores de Inducción Jaula de Ardilla y convertidor asociado**

Parámetro	Valor
$P_{nom}$	1,69 [MW]
$\omega_{nom}$	952 [rpm]
$T_{nom}$	17.000 [Nm]
$i_{s,nom}$	1.917,1 [A]
Frecuencia de conmutación	4 [kHz]

**Tabla 4 Parámetros línea y convertidor asociado**

Parámetros	Especificación
$R_g$	7,9 [ $m\Omega$ ]
$L_g$	0,25 [ $mH$ ]
$C_{dc}$	11,25 [mF]
$V_{dc}$	2.000 [V]
$V_{LL}$	1.000 [Vrms]
Frecuencia de conmutación	4 [kHz]

**Tabla 5 Tabla resumen criterio de diseño y ganancias lazos de control**

Lazo de Control	$\omega_n$ [Hz]	$\xi$	$K_p$	$K_i$
Lazo tensión AFE	20	0,8	1,1229	$K_p \cdot 79,17$
Lazo corriente AFE	200	0,8	0,49584	$K_p \cdot 800,4$
Lazo velocidad IFOC	7	0,8	3.503,3	$K_p \cdot 27,42$
Lazo corriente IFOC	70	0,8	0,33676	$K_p \cdot 282,4$
Lazo Corriente Batería	60	0,8	0,0109	$K_p \cdot 236,3$

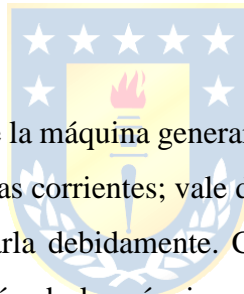
**Tabla 6 Parámetros en configuración PLECS**

Característica	Valor
Tiempo de simulación	15 [s]
Solver	Auto
Tamaño máximo de paso	Tsc
Tamaño de paso inicial	auto
Factor de refinación	1
Tolerancia relativa	1e-3
Tolerancia absoluta	auto

## 5.2. Escenario 1: Dos camiones en tramo de subida

La simulación comienza con la conexión del primer camión conectado al sistema de catenaria. Los motores se magnetizan en  $t = 0,3$  segundos, y el camión acelera en  $t = 0,5$  segundos, alcanzando su velocidad referencia en  $t = 3,5$  segundos. El segundo camión se conecta en  $t = 4,2$  segundos, se magnetizan los motores en  $t = 4,3$  segundos, y acelera en  $t = 4,5$  segundos.

En Figura 5.16 y Figura 5.17 muestran las variables de control correspondientes a los motores de los camiones mineros. Se ha realizado una conexión secuencial. El primer nivel de estas gráficas se visualiza las referencias rampa y muestreo de las velocidades. Las rampas están programadas tal que los camiones alcancen la velocidad nominal, utilizada como valor referencial, luego de tres segundos desde su partida. El segundo nivel corresponde al torque de carga. El tercer y cuarto nivel corresponden a las corrientes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$ , respectivamente, junto con el muestreo de las variables medidas.



La magnetización insuficiente de la máquina generará problemas en el control de la velocidad del motor y del control desacoplado de las corrientes; vale decir, no se puede alimentar una máquina, tratar de producir torque sin magnetizarla debidamente. Consecuentemente, el torque de carga se deberá aplicar luego de la magnetización de la máquina, visualizado en el segundo y tercer nivel respectivamente. Como se modela un camión minero en reposo y cargado, el torque de carga se diseña con una rampa inicial cuya duración es de 0,3 segundos, esto con el fin de no generar impactos repentinos significativos en el modelo del sistema. Al generar el impacto de carga, se observa la respuesta del controlador de corriente, regulando la corriente  $i_{sd}$ , y aumentando la corriente  $i_{sq}$  para la generación de torque requerido. Se observa además como la componente  $i_{sq}$  disminuye una vez que se alcanza la velocidad de referencia debido a la acción reguladora de flujo del controlador para mantener al motor en un punto óptimo de rendimiento.

En Figura 5.18 y Figura 5.19 se muestran los niveles de tensión y corrientes por red cuando los camiones alcanzan su velocidad de referencia. Complementario a estas, se observa en la Figura 5.20 que los niveles de corrientes  $i_{gd}$  corresponden exactamente a los indicados en las figuras señaladas anteriormente, esto debido a la transformación conservativa en amplitud implementada.

En la Figura 5.21 se visualiza el consumo de potencia activa y reactiva en la red. La demanda de potencia activa es consecuente con la dinámica de la conexión secuencial de los camiones y la potencia requerida para la energización de los motores de tracción. El consumo individual por camión, desde el reposo hasta alcanzar la velocidad referencial, se tiene un consumo promedio de 4,08 [MW], teniendo luego un consumo de 3,74 [MW] a velocidad referencial.

En la Figura 5.22 se tiene los niveles de tensión en el enlace DC. En  $t = 3,5s$ , momento en que el primer camión logra alcanzar su velocidad de referencia, se tiene una sobretensión equivalente al 2%, estabilizándose luego de 2ms. En el mismo ámbito, el segundo camión, en  $t = 7,5s$  se tiene una sobretensión equivalente a 5%, estabilizándose luego de 3ms. Para el análisis del THD se dispone del *Data View- THD* presente en los osciloscopios, resumidos en la Tabla 7. A partir de esta, se tiene que el  $THD_i$  presente no supera el 2%.

En la Figura 5.23 se visualiza la corriente  $I_o$ , previo al filtro. Para el diseño del filtro pasabajo se procedió con el estudio del espectro armónico de esta corriente, como se muestra en la Figura 5.24. Como es de esperar, el contenido armónico se presentará en múltiplos de la frecuencia de conmutación seleccionada y en torno a ella. En este, se observa un contenido armónico significativo en alta frecuencia, especialmente en 8.000 [Hz]. La componente DC equivale a 3.643,98 mientras que en 8.000 [Hz] se tiene un equivalente a 2.731,24. Para atenuar las componentes de altas frecuencias, y eliminar las interferencias de estas en el sistema, se ha seleccionado una frecuencia de corte lo más baja posible, en este caso, una frecuencia equivalente a 500Hz, mostrando su efecto en la corriente en la Figura 5.25, generando una corriente DC más limpia y cercana a la forma de onda deseada.

**Tabla 7 THD corriente trifásica Escenario 1**

Evento	$THD_i$ red trifásica
Truck System 1 a velocidad referencial	0,0194
Truck System 2 a velocidad referencial	0,0102

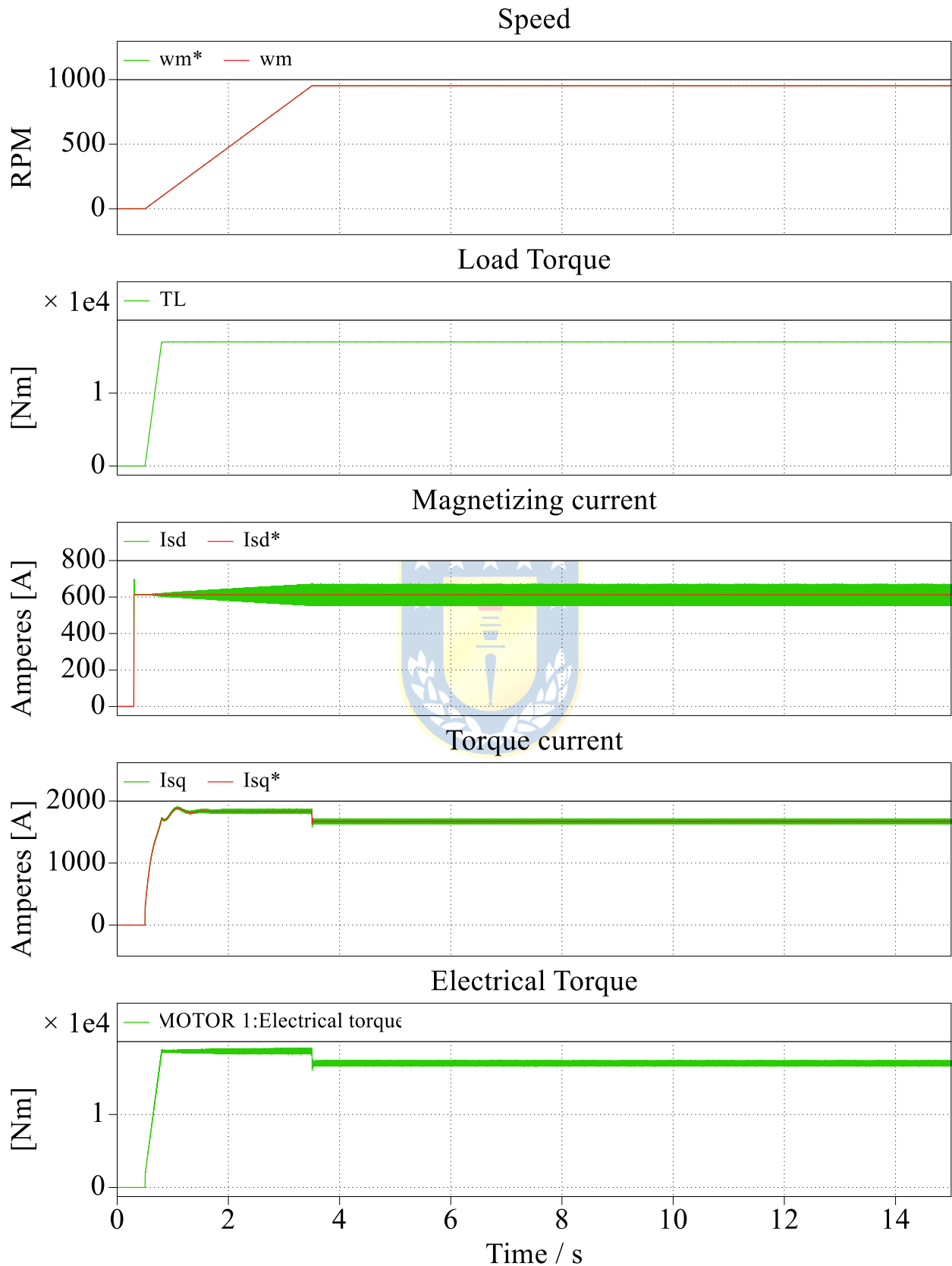


Figura 5.16 Variables motores Truck System 1 en Escenario 1

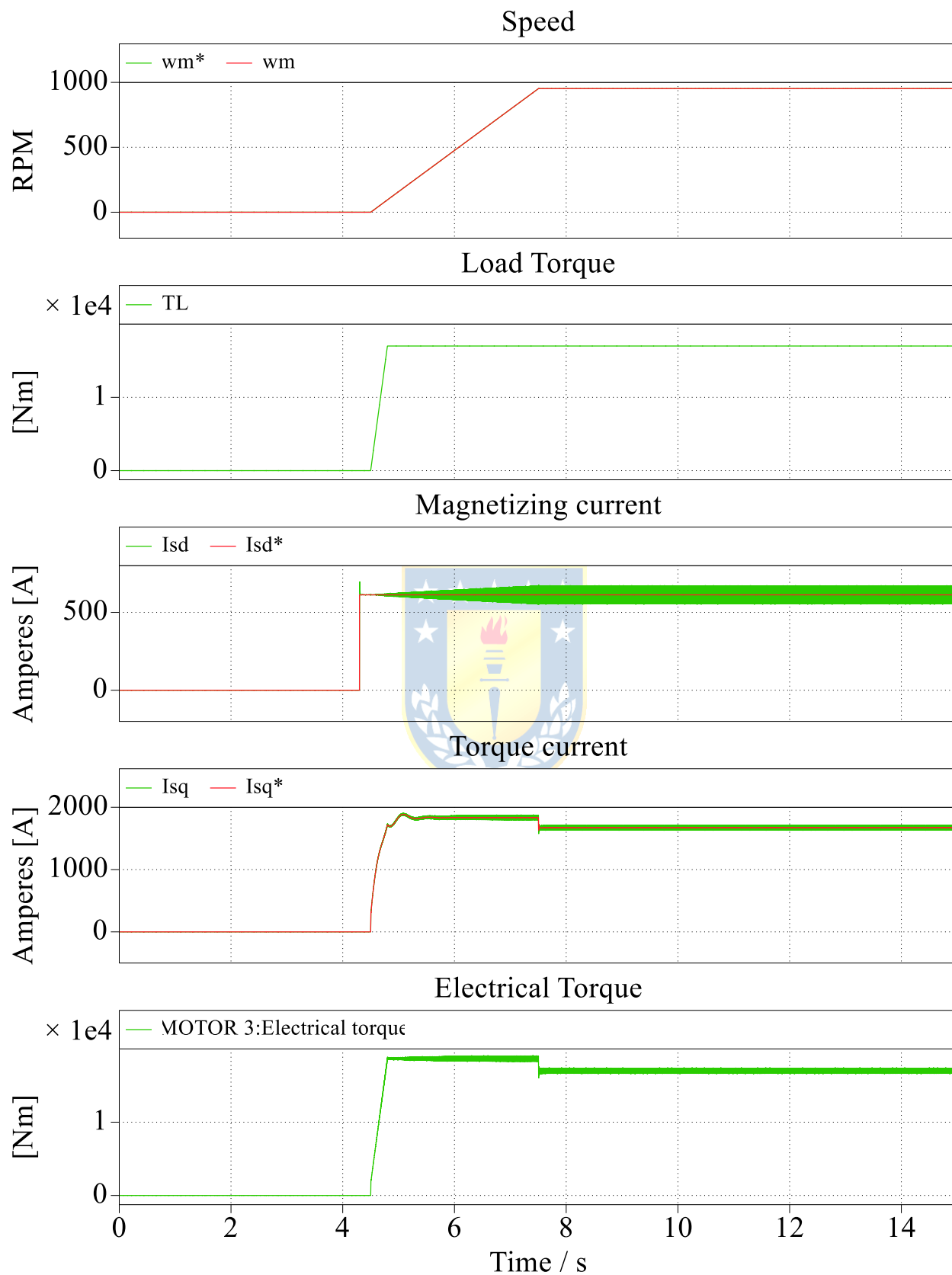


Figura 5.17 Variables motores Truck System 2 en Escenario 1

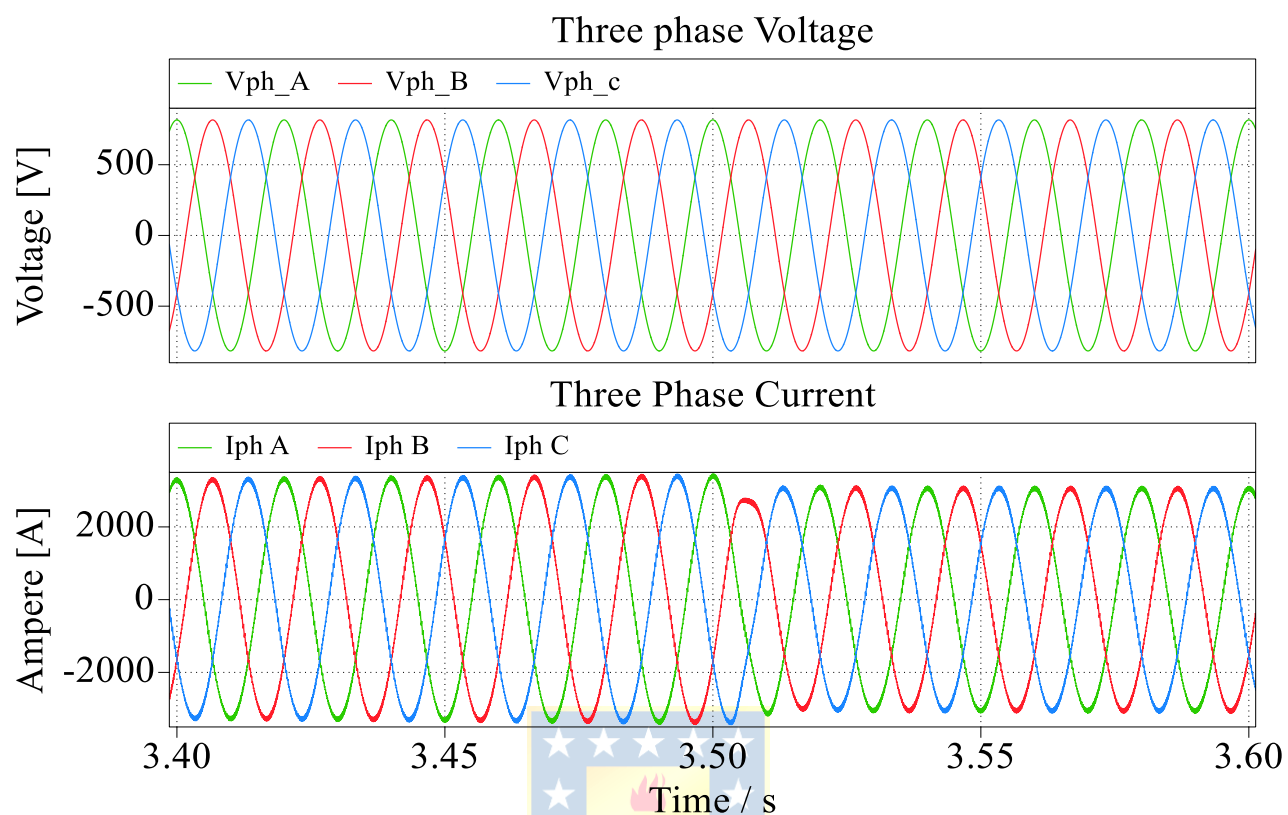


Figura 5.18 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 1 en Escenario 1

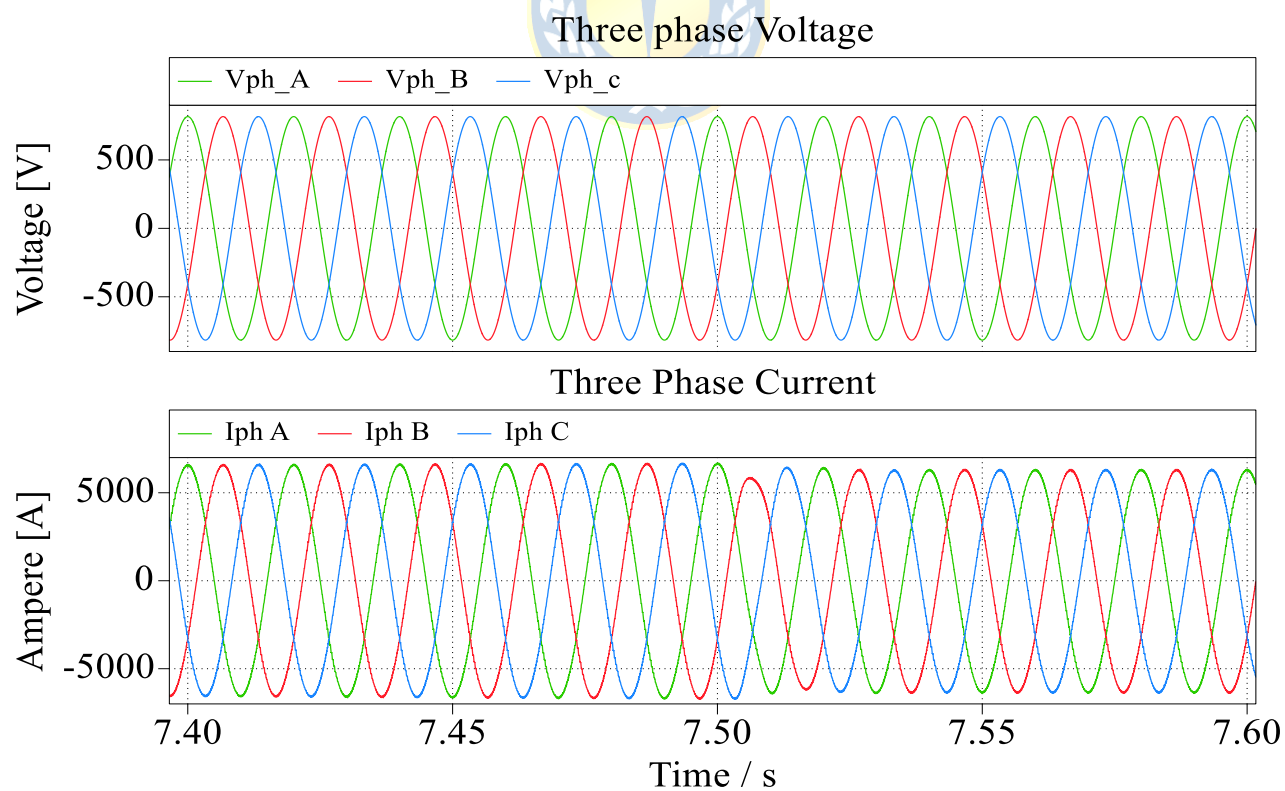


Figura 5.19 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 2 en Escenario 1

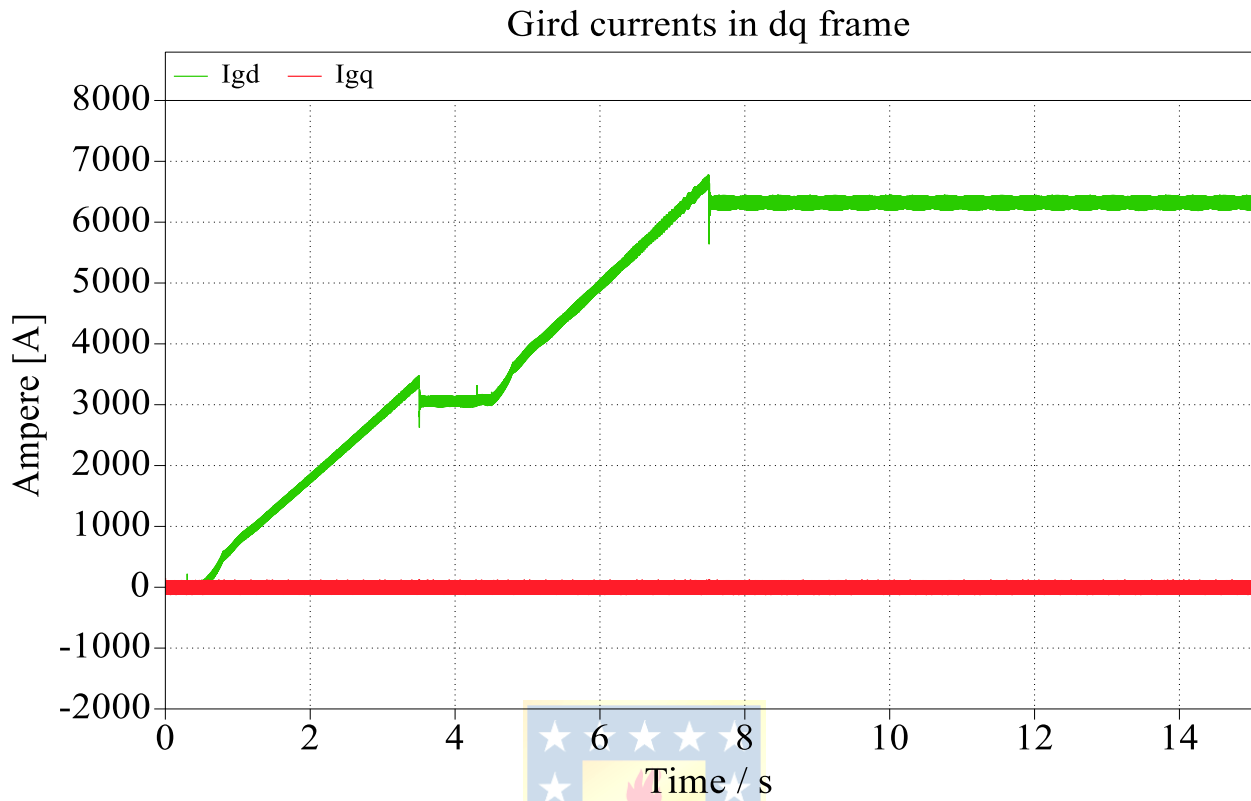


Figura 5.20 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 1

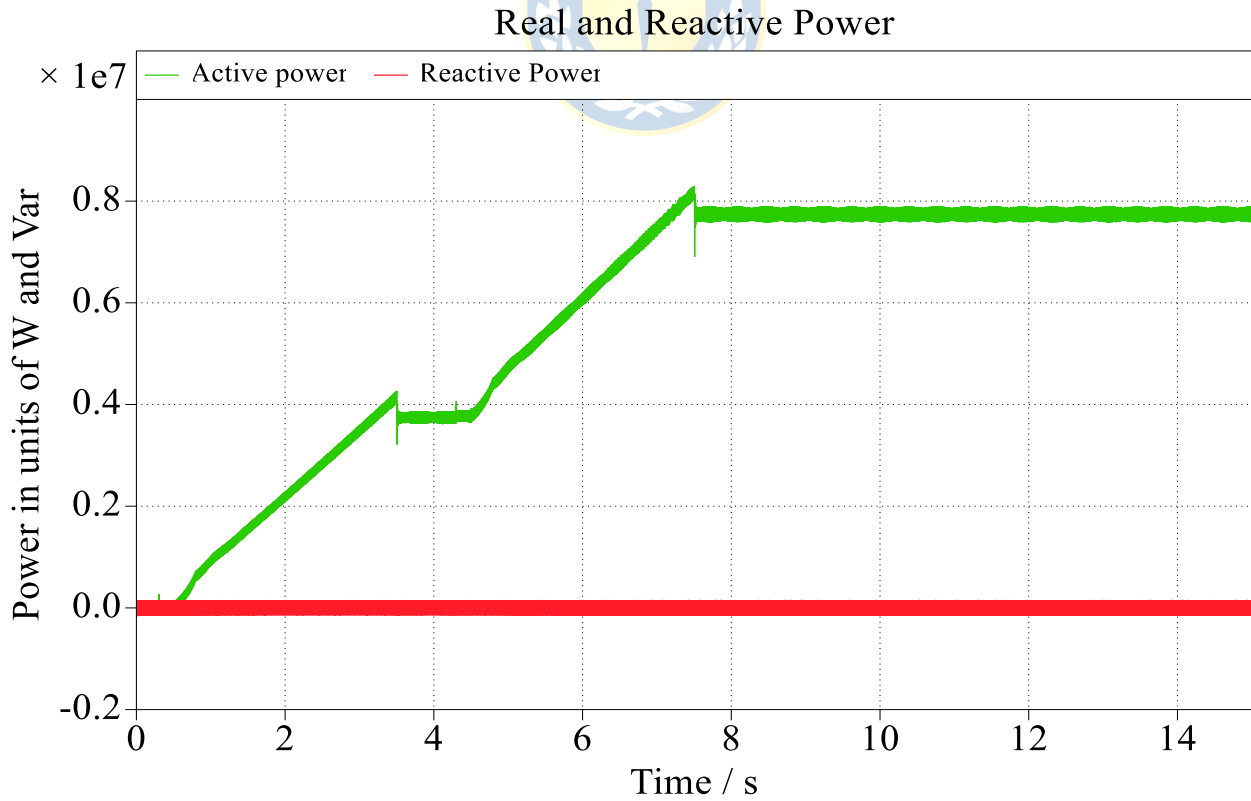


Figura 5.21 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 1

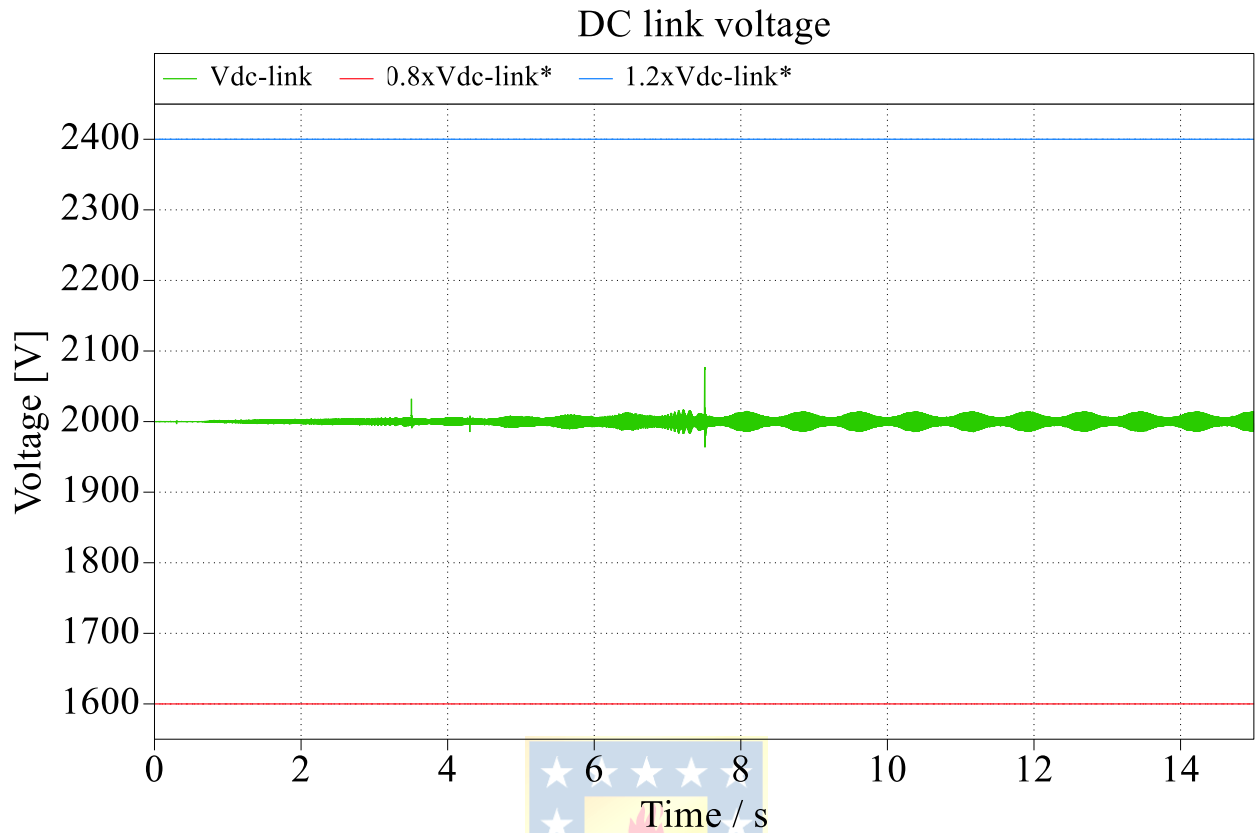


Figura 5.22 Tensión en enlace DC en Escenario 1

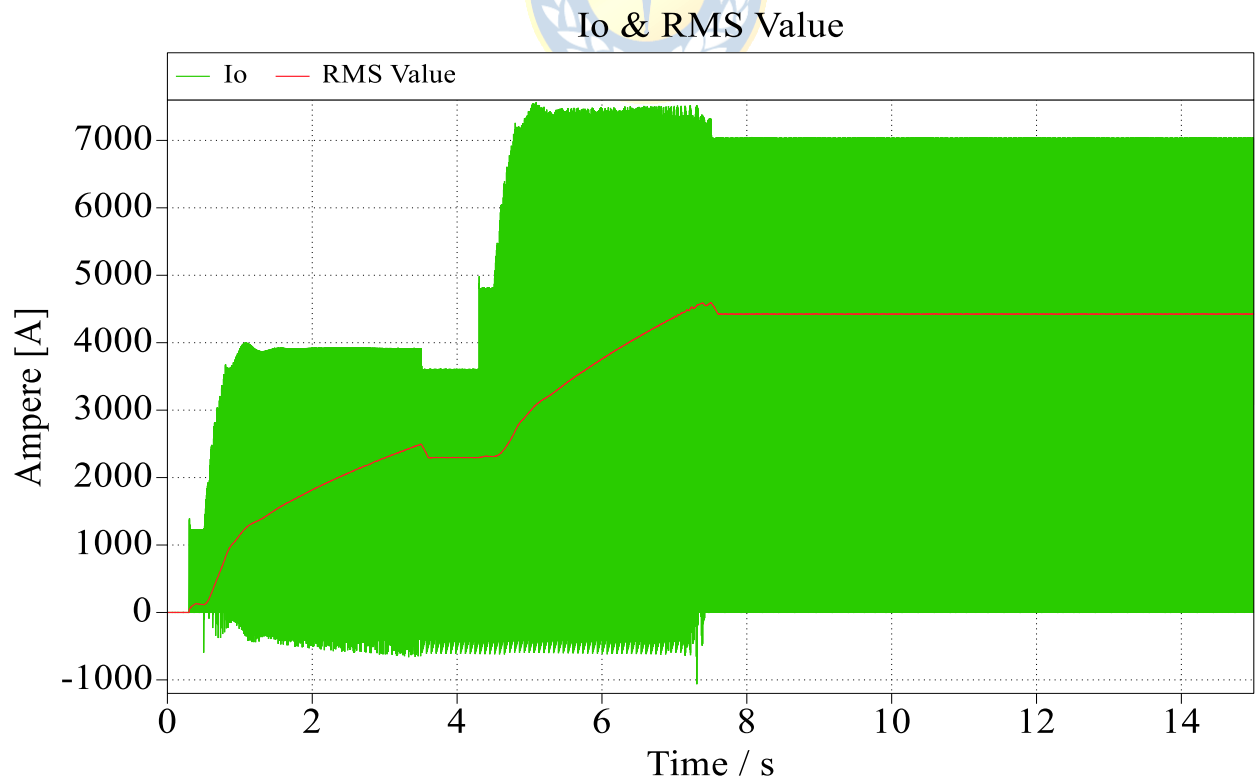


Figura 5.23 Corriente  $I_o$  y valor RMS en Escenario 1

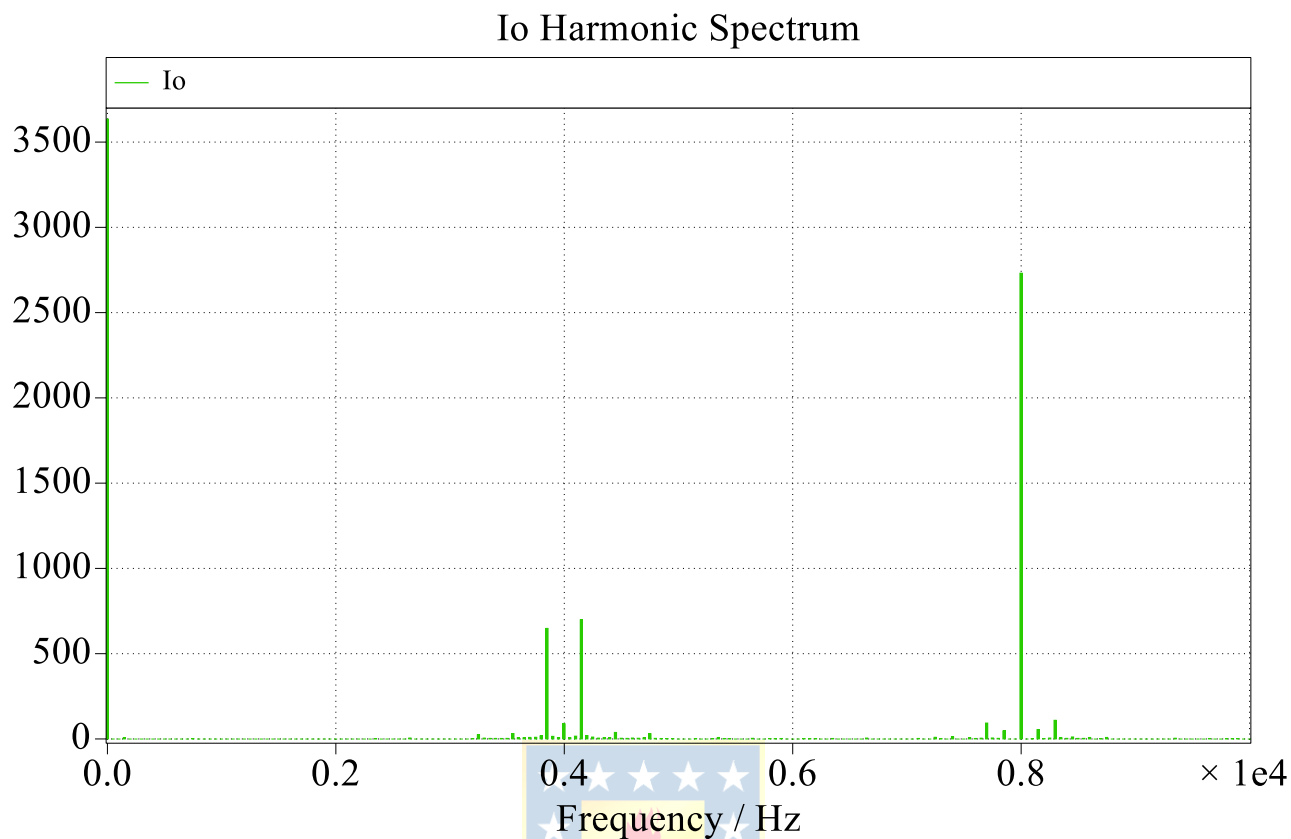


Figura 5.24 Espectro armónico corriente  $I_o$  previo al filtrado en Escenario 1

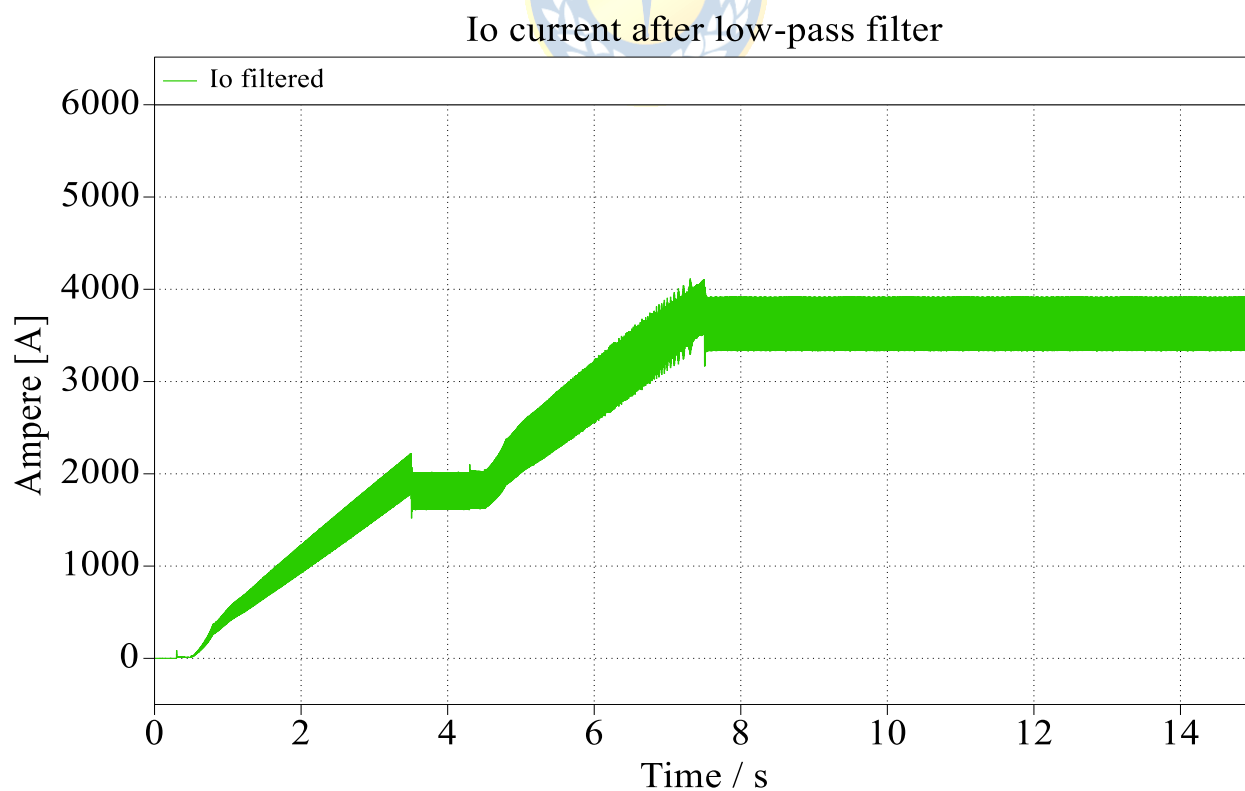
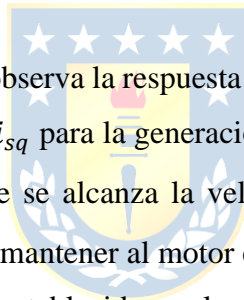


Figura 5.25 Corriente  $I_o$  filtrada en Escenario 1

### 5.3. Escenario 2: Camiones en tramo de subida y en bajada

La simulación comienza con la conexión del primer camión conectado al sistema de catenaria. Los motores se magnetizan en  $t = 0,3$  segundos, y el camión acelera en  $t = 0,5$  segundos, alcanzando su velocidad referencia en  $t = 3,5$  segundos. El segundo camión se conecta en  $t = 4,2$  segundos, se magnetizan los motores en  $t = 4,3$  segundos, y acelera en  $t = 4,5$  segundos.

En Figura 5.26 y Figura 5.27 se muestran las variables de control correspondientes a los motores de los camiones mineros. El primer nivel de estas gráficas se visualiza las referencias rampa y muestreo de las velocidades. Las rampas están programadas tal que los camiones alcancen la velocidad nominal, utilizada como valor referencial, luego de tres segundos desde su partida. El segundo nivel corresponde al torque de carga. El tercer y cuarto nivel corresponden a las corrientes  $i_{sd}$  e  $i_{sq}$ , respectivamente, junto con el muestreo de las variables medidas.



Durante la primera conexión se observa la respuesta del controlador de corriente, regulando la corriente  $i_{sd}$  y aumentando la corriente  $i_{sq}$  para la generación de torque requerido. Además, como la componente  $i_{sq}$  disminuye una vez que se alcanza la velocidad de referencia debido a la acción reguladora de flujo del controlador para mantener al motor en un punto óptimo de rendimiento. En el caso del camión en bajada, la velocidad establecida en el control corresponde ahora a una rampa con pendiente negativa, considerando un torque positivo. Esto indica que el motor ahora actúa como generador; es decir, el camión está en el segundo cuadrante operando con frenado regenerativo. Los requerimientos actuales de torque son menores. El control de velocidad monitorea constantemente los requerimientos de velocidad, ajustando la corriente de cuadratura tal que el motor genere el torque requerido para mantener la velocidad del vehículo cercano a la referencia. La velocidad del alcanza su referencia de velocidad en 3ms, los requerimientos de torque son mínimos y consecuentemente  $i_{sq}$  también. Durante la transición a la velocidad de referencia, el controlador ajusta la corriente para generar el torque de frenado requerido para mantener la velocidad de manera controlada durante esta fase, proporcionando un frenado gradual y controlado, demandando una corriente de torque igual a 336 [A]. Al alcanzar la velocidad referencial, la corriente de torque es igual a 500 [A], requiriendo un torque adicional para mantener la velocidad a controlar.

Al analizar la acción regenerativa del motor, resulta conveniente analizar el control de frente activo y su eficiencia en este escenario. De la Figura 5.28 y Figura 5.29 se observan tanto voltaje como corriente en fase, logrando un factor de potencia unitario. Junto con ello, el análisis de las Figura 5.30 a Figura 5.33 son complementarios. Debido a la operación del segundo camión en bajada, se tiene una reducción de 845[A] de demanda de corriente  $i_{sd}$ , y 470 [A] en  $I_o$ . Adicionalmente, se tiene que la corriente  $i_{gq}$  se mantiene en un mínimo. Esta reducción de demanda de corriente se ve reflejada en la disminución de potencia activa demanda en 1,034 [MW], teniendo un consumo promedio de 2,71 [MW]. Adicionalmente, se visualiza un consumo mínimo de reactivos en el sistema, lo cual es consistente, ya que al estar tanto el voltaje como corriente en fase, se tendrá un factor de potencia prácticamente unitario, reflejado en el control de  $i_{gq}$  en cero y, por consiguiente, un consumo mínimo de reactivos. Para el análisis del THD se dispone del *Data View- THD* presente en los osciloscopios, resumidos en la Tabla 8. A partir de esta, se tiene que el  $THD_i$  presente no supera el 3%.

En la Figura 5.32 se tiene los niveles de tensión en el enlace DC. En  $t = 3,5s$ , momento en que el primer camión logra alcanzar su velocidad de referencia, se tiene una sobretensión equivalente al 2%, estabilizándose luego de 2 ms. En el mismo ámbito, el segundo camión, en  $t = 7,5s$  se tiene una sobretensión equivalente a 1% , estabilizándose luego de 1,6ms.

**Tabla 8 THD en corriente trifásica en Escenario 2**

<b>Evento</b>	<b><math>THD_i</math> red trifásica</b>
Truck System 1 a velocidad referencial	0,0194
Truck System 2 a velocidad referencial	0,0272

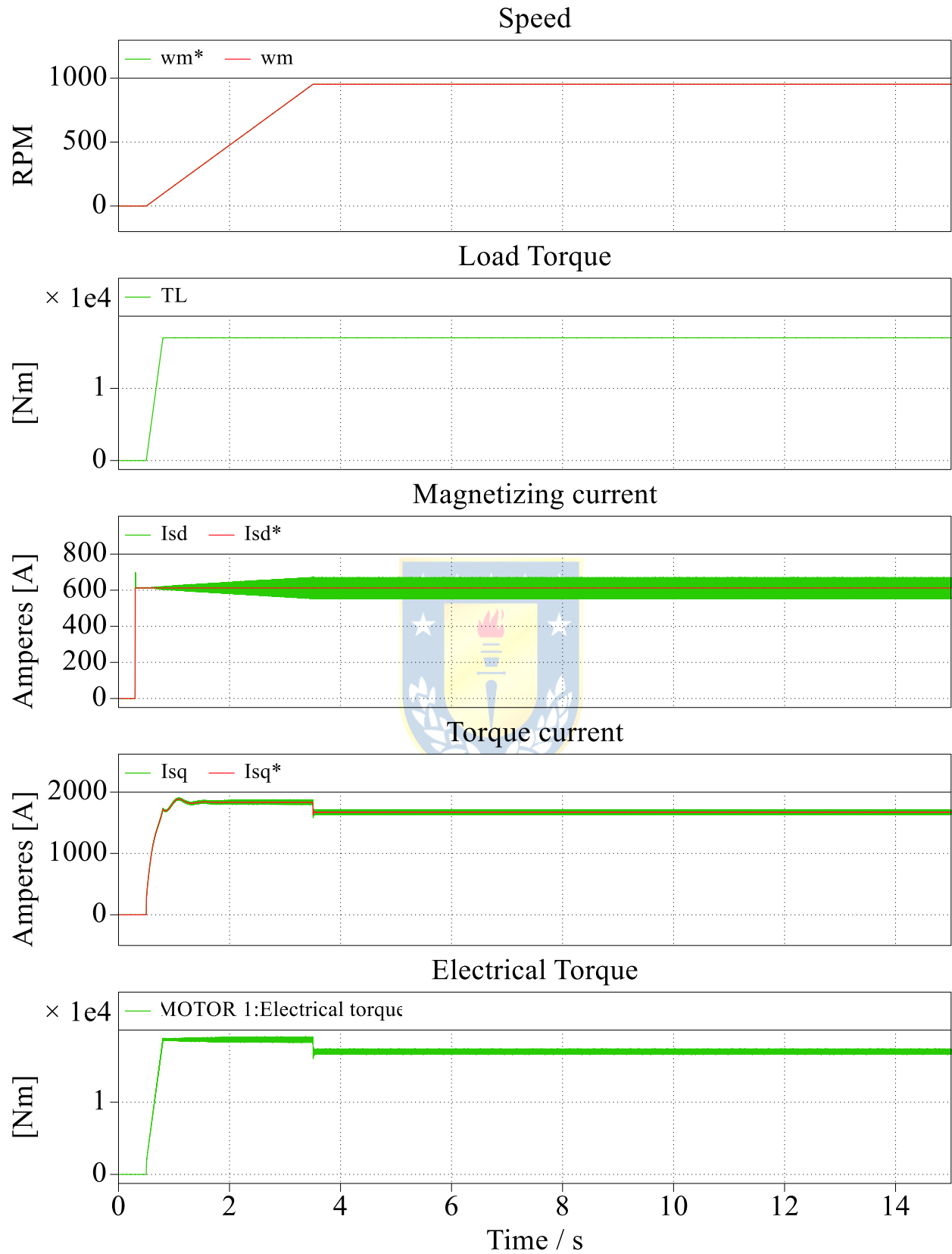


Figura 5.26 Variables motor Truck System 1 en Escenario 2

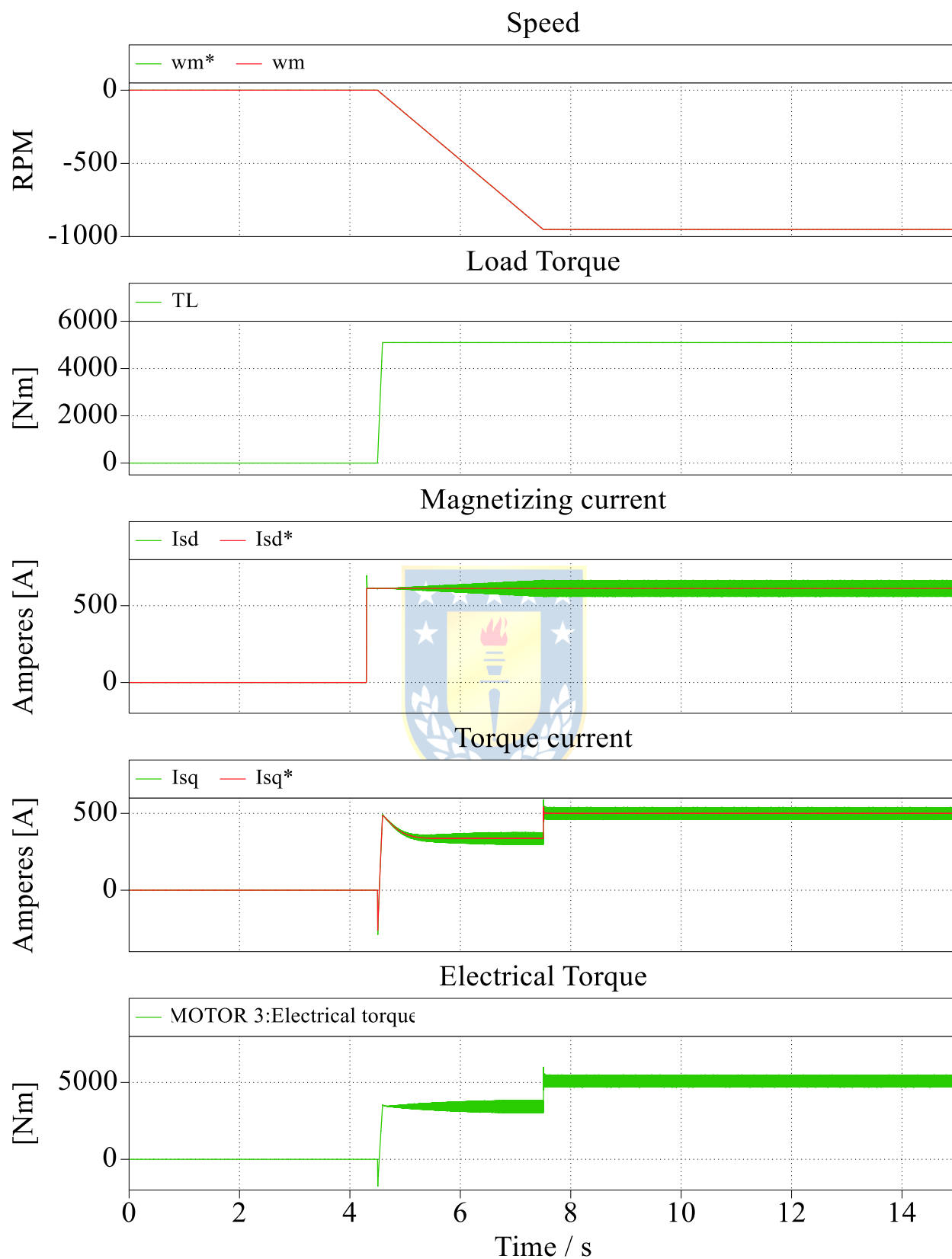


Figura 5.27 Variables motor Truck System 2 en Escenario 2

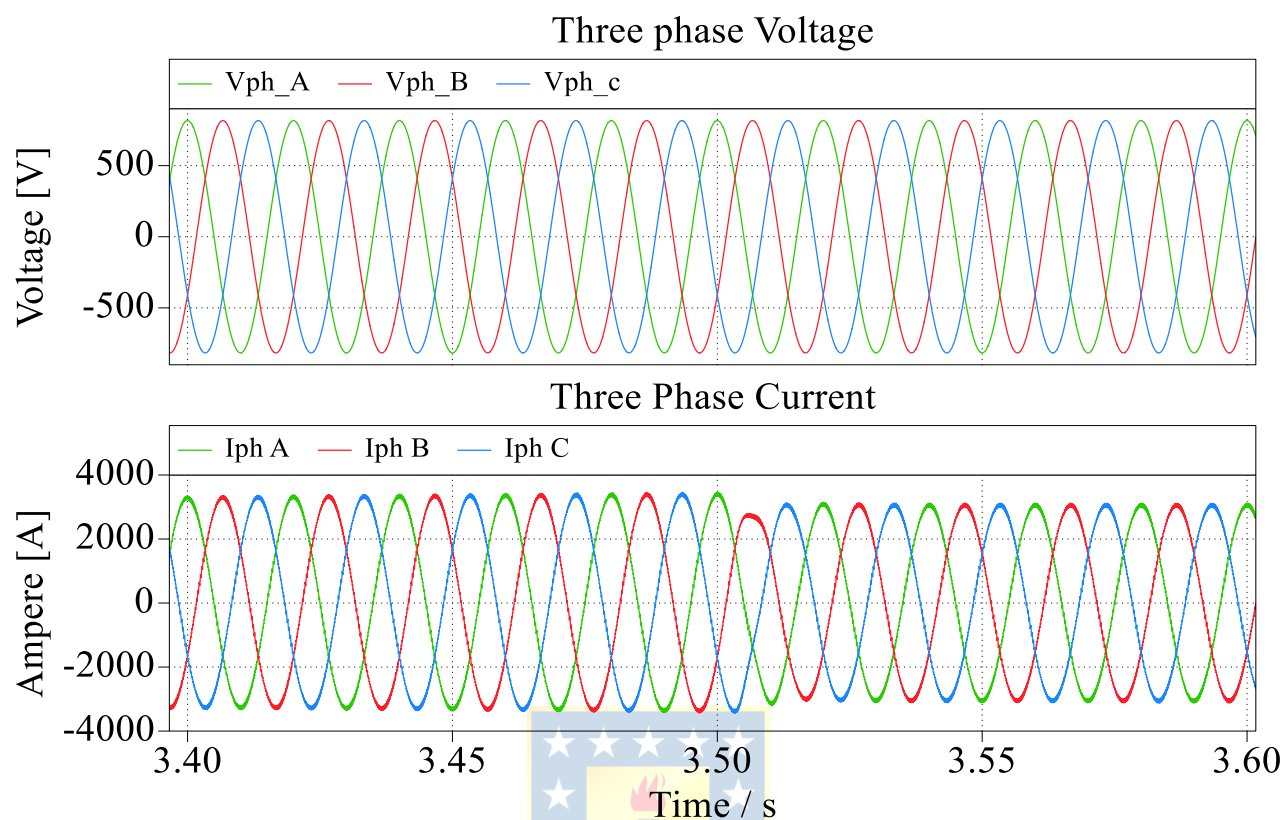


Figura 5.28 Voltaje y corriente por red ante conexión Truck System 1 en Escenario 2

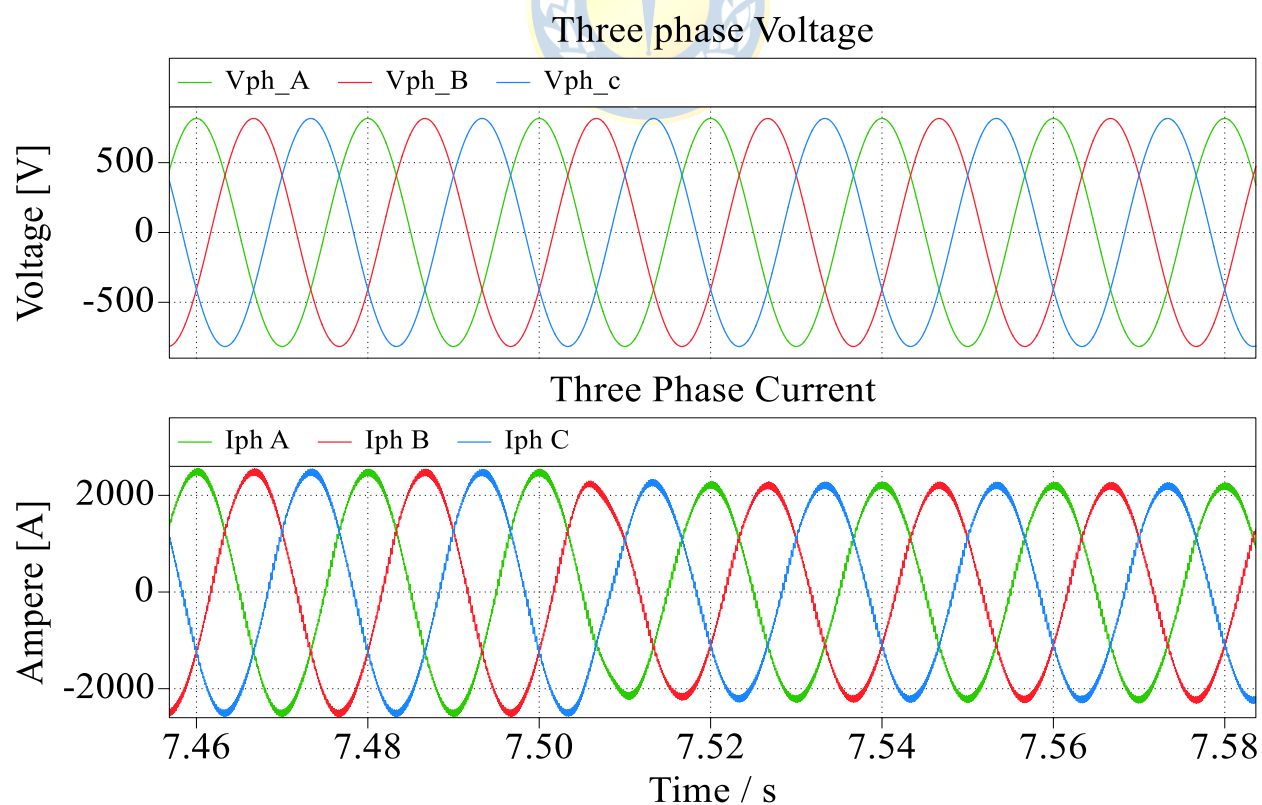


Figura 5.29 Voltaje y corriente por red ante conexión Trolley 2 en Escenario 2

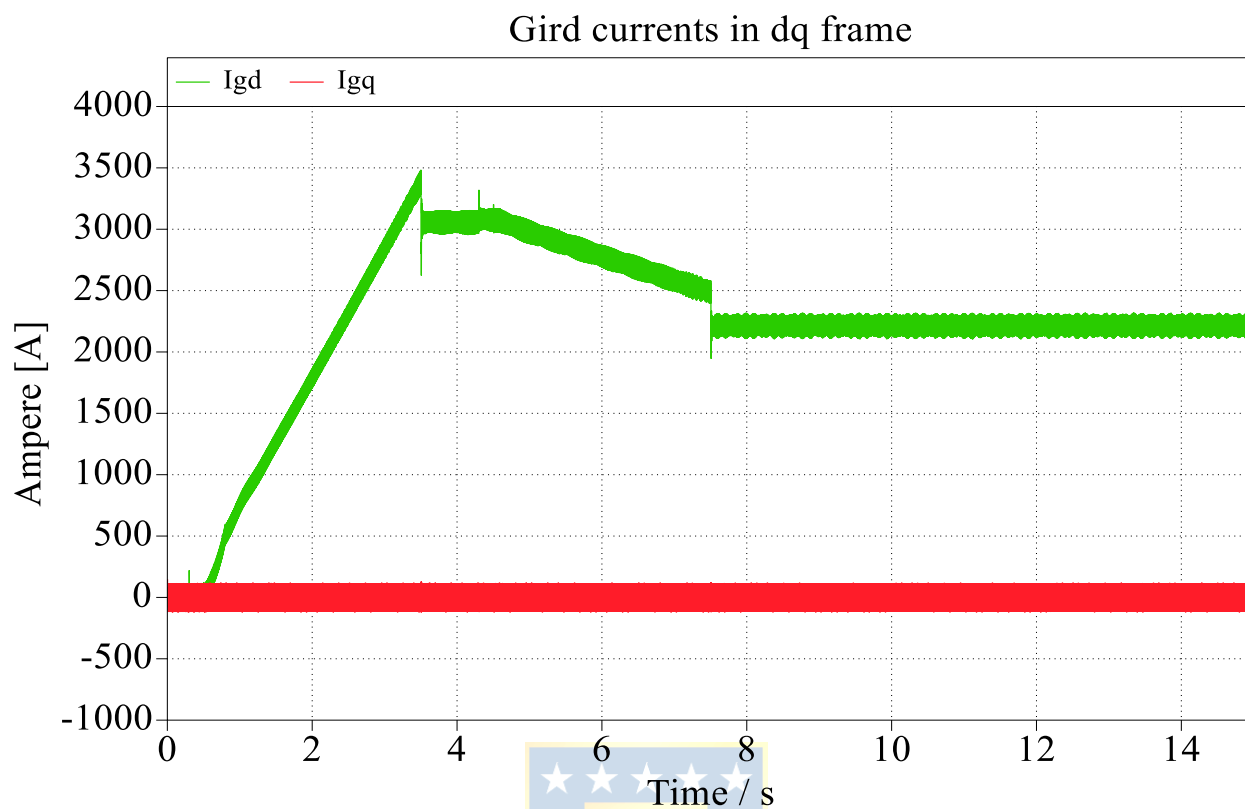


Figura 5.30 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 2

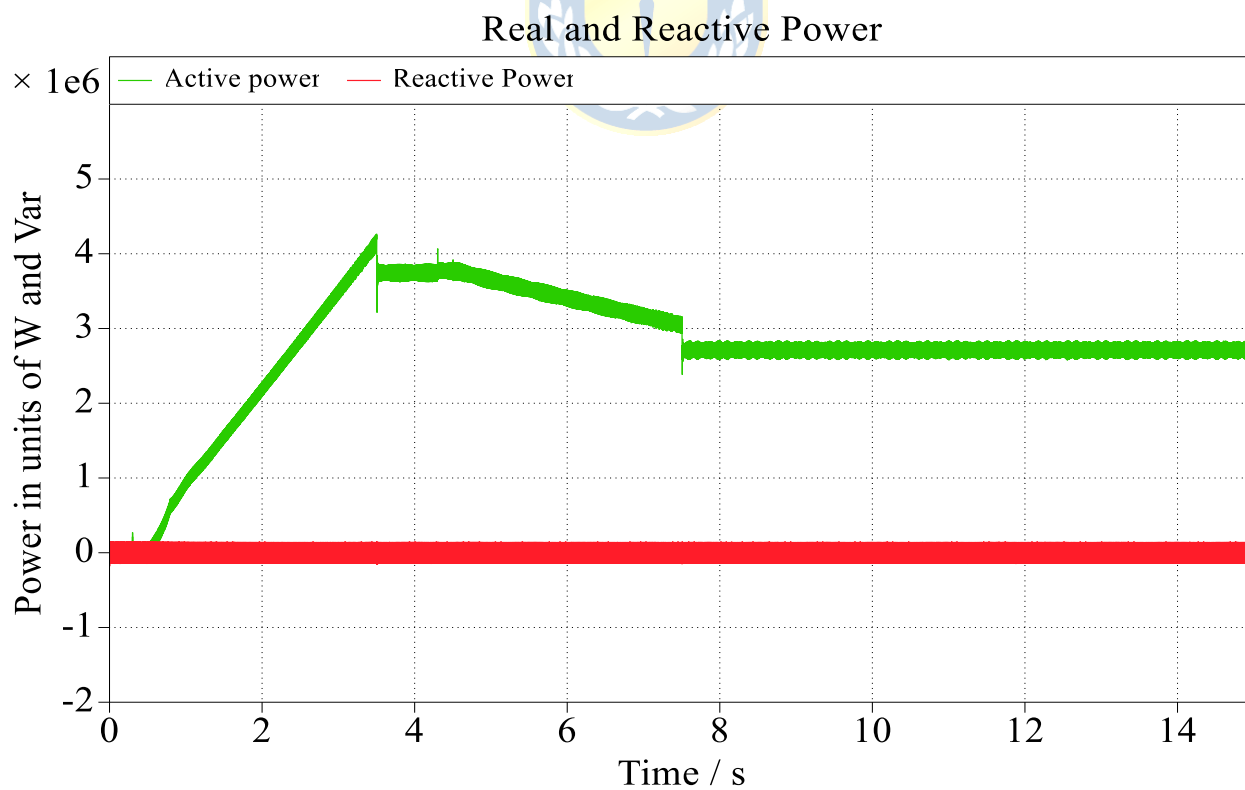


Figura 5.31 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 2

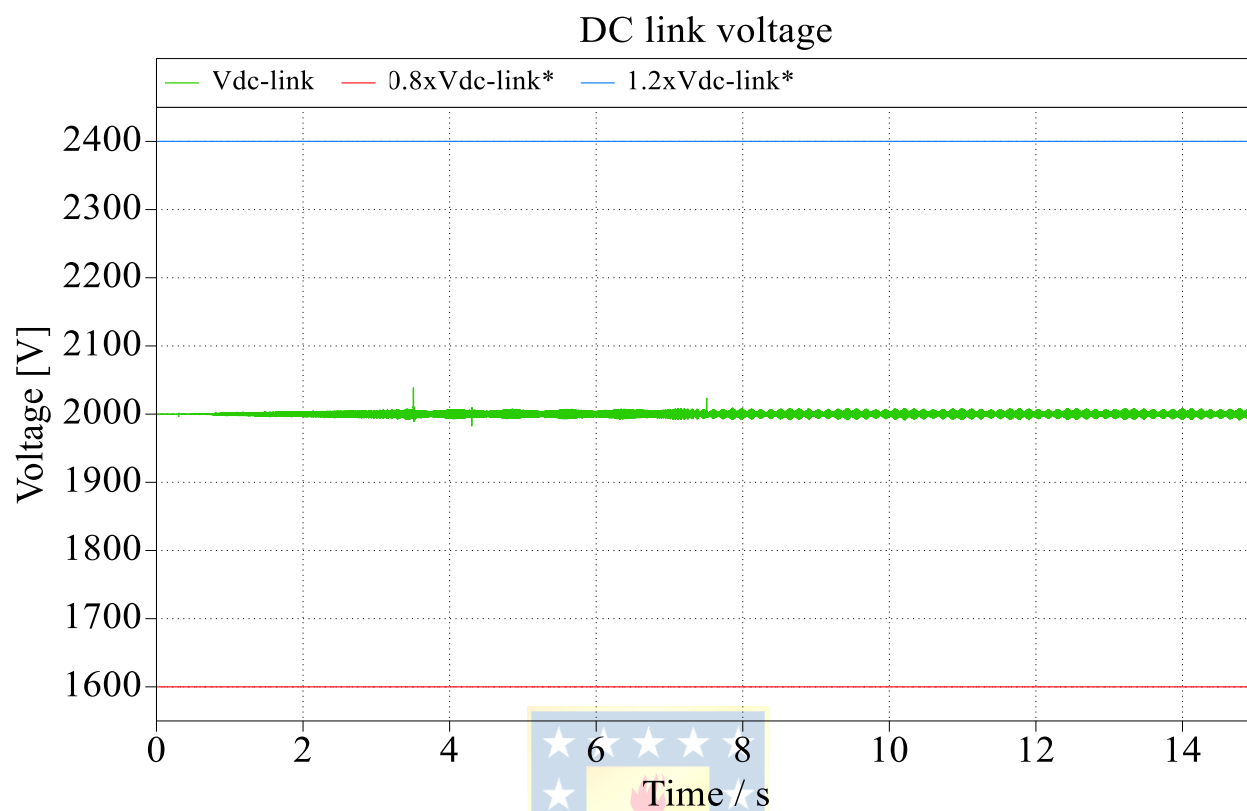


Figura 5.32 Tensión en enlace DC en Escenario 2

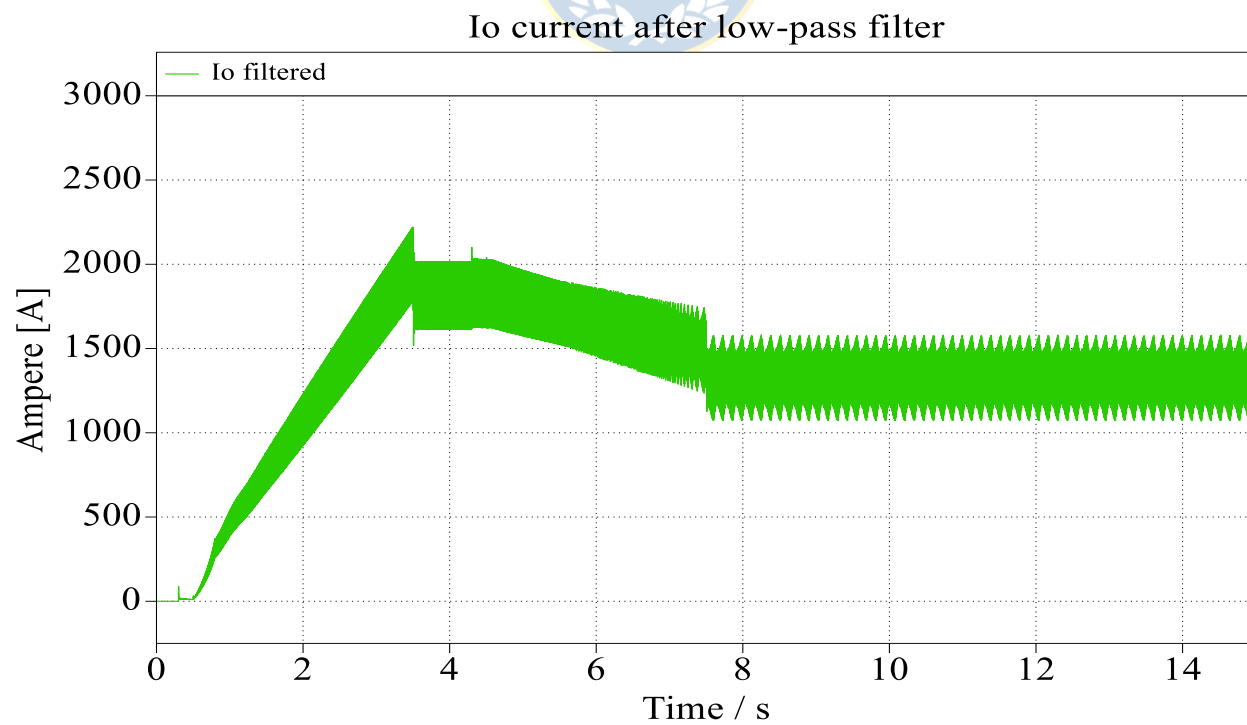


Figura 5.33 Corriente  $I_o$  filtrada en Escenario 2

### 5.4. Escenario 3: Tres camiones con batería en tramo de subida

El proceso de conexión secuencial se conforma con la integración de tres camiones BEV al sistema. La simulación comienza con la conexión del primer camión conectado al sistema de catenaria. Los motores se magnetizan en  $t = 0,3$  segundos, y el camión acelera en  $t = 0,5$  segundos, alcanzando su velocidad referencia en  $t = 3,5$  segundos. El segundo camión se conecta en  $t = 4,2$  segundos, se magnetizan los motores en  $t = 4,3$  segundos, y acelera en  $t = 4,5$  segundos. El tercer camión se conecta en  $t = 8,2$  segundos, se magnetiza los motores en  $t = 8,3$  segundos y acelera en  $t = 8,5$  segundos. El comportamiento de estos se ilustra en las Figura 5.34 a Figura 5.36. Las baterías suministrarán energía al sistema 0,5 segundos luego de que los camiones alcancen su velocidad de referencia.

La integración de las baterías simulado corresponde a la inyección de energía desde estas hacia la red. En el contexto de la gestión de baterías, se pueden encontrar diferentes enfoques de sistema de gestión de baterías (BMS). Una interpretación al comportamiento simulado sugiere que, cuando las baterías alcancen un cierto estado de carga (SOC), estas suministrarán energía al sistema. Al hacerlo a un SOC elevado, se evitaría que las baterías se carguen en exceso, por lo que su vida útil será prolongada. Específicamente, el modelo de batería fue diseñado tal que puedan suministrar 0,6 [MW] a 1.700[V] , 352 [A]. El diseño del control se optimizó para minimizar el sobrepaso máximo al 5,11%, con un tiempo de estabilización de 7 ms, comportamiento ilustrado en las Figura 5.37 y Figura 5.38. Utilizando las baterías como fuente externa de alimentación al sistema de catenaria, se logra reducir la carga que sufre el sistema, lo cual se puede visualizar en términos de corriente y potencia en el sistema, ilustrado en las Figura 5.39 y Figura 5.40.

Por otro lado, la integración de un tercer camión genera mayores impactos en los niveles de tensión del enlace DC, con un aumento del 7,5% del valor referencial. Los niveles de tensión se encuentran dentro de los límites permitidos, como se muestra en la Figura 5.41. Para el análisis del THD se dispone del *Data View- THD* presente en los osciloscopios, resumidos en la Tabla 9. A partir de esta, se tiene que el  $THD_i$  presente no supera el 3%.

En este apartado resulta importante mencionar sobre las consideraciones de diseño de los componentes, así como la relevancia de la sincronización de los controladores de frente activo y control vectorial de los motores de inducción, el cual a su vez es complementario a los escenarios anteriores. Durante el proceso de diseño del modelo y el diseño del sistema de control se presentaron aspectos críticos que determinaban el comportamiento del sistema, involucrando aspectos de transferencia de energía como de estabilidad y rendimiento del sistema en las condiciones de operación presentadas.

El primer aspecto se relacionó con la consideración de aquellos factores que determinan la forma de onda, determinado por  $\xi$ , y la velocidad de respuesta de esta, determinada por  $\omega_n$ . Siguiendo las recomendaciones de la literatura se consideró un factor de amortiguamiento igual a 0,8 para considerar un sistema robusto ante las condiciones y variaciones de los parámetros de la planta. En un comienzo se estableció frecuencias naturales de lazo de control de corrientes similares, tanto para el control de frente activo como el control vectorial de los motores. Sin embargo, esta consideración condujo a errores en la simulación. Este error se explica con el control de la transferencia de energía en el sistema. Los camiones demandaban una cantidad mayor de energía de la que el frente activo podía controlar, lo que provocaba problemas en la sincronización entre los controladores. Este problema se solucionó considerando una frecuencia natural en el control de los lazos de corriente del frente activo superior a la del control del lazo de corriente de los motores. En particular, se estableció una razón de 2.85 que aseguró el correcto funcionamiento de la simulación del sistema.

El segundo aspecto se relaciona con la modificación de los parámetros de la planta de tensión del enlace DC. La integración de un tercer camión supone un impacto significativo en la estabilidad del sistema, reflejado en la corriente y potencia del sistema, así como también en los niveles de tensión del enlace DC, presentando respuestas bastante oscilatorias y con dificultad para estabilizarse. Para una mejor visualización de lo señalado se muestran las Figura 5.42, Figura 5.43 y Figura 5.44, correspondientes a un acercamiento de las Figura 5.39, Figura 5.40 y Figura 5.41 respectivamente. Si bien los niveles de tensión en el enlace DC, ilustrado en la Figura 5.41, se encuentran dentro de los límites de sobretensión, su respuesta es bastante oscilatoria. La estabilización a su valor referencial se logra luego de 0,2 segundos, mostrado con mayor detalle en la Figura 5.44. En conjunto con el

comportamiento oscilatorio y la demora en la estabilización, esto puede ocasionar problemas críticos en el funcionamiento y la estabilidad del sistema para capacitancias menores.

De acuerdo con lo indicado teóricamente en 3.3.3, aumentar un 15% el valor inicial de capacitancia se logra disminuir considerablemente las fluctuaciones de tensión, estabilizándose 0,1 segundos luego de que el camión alcance su velocidad referencial. Este aspecto, al mejorar el control de tensión, disminuye las oscilaciones y valores peak de la tensión de enlace DC, la componente directa de la red  $i_{gd}$ , y la potencia activa del sistema, ilustrados en las Figura 5.45, Figura 5.46, y Figura 5.47 respectivamente.

**Tabla 9 THD en corriente trifásica en Escenario 3**

<b>Evento</b>	<b><math>THD_i</math> red trifásica</b>
Truck System 1 a velocidad referencial	0,0194
Battery T1 Habilitado	0,0233
Truck System 2 a velocidad referencial	0,0110
Battery T2 Habilitado	0,0123
Truck System 3 a velocidad referencial	0,0075
Battery T3 Habilitado	0,0080

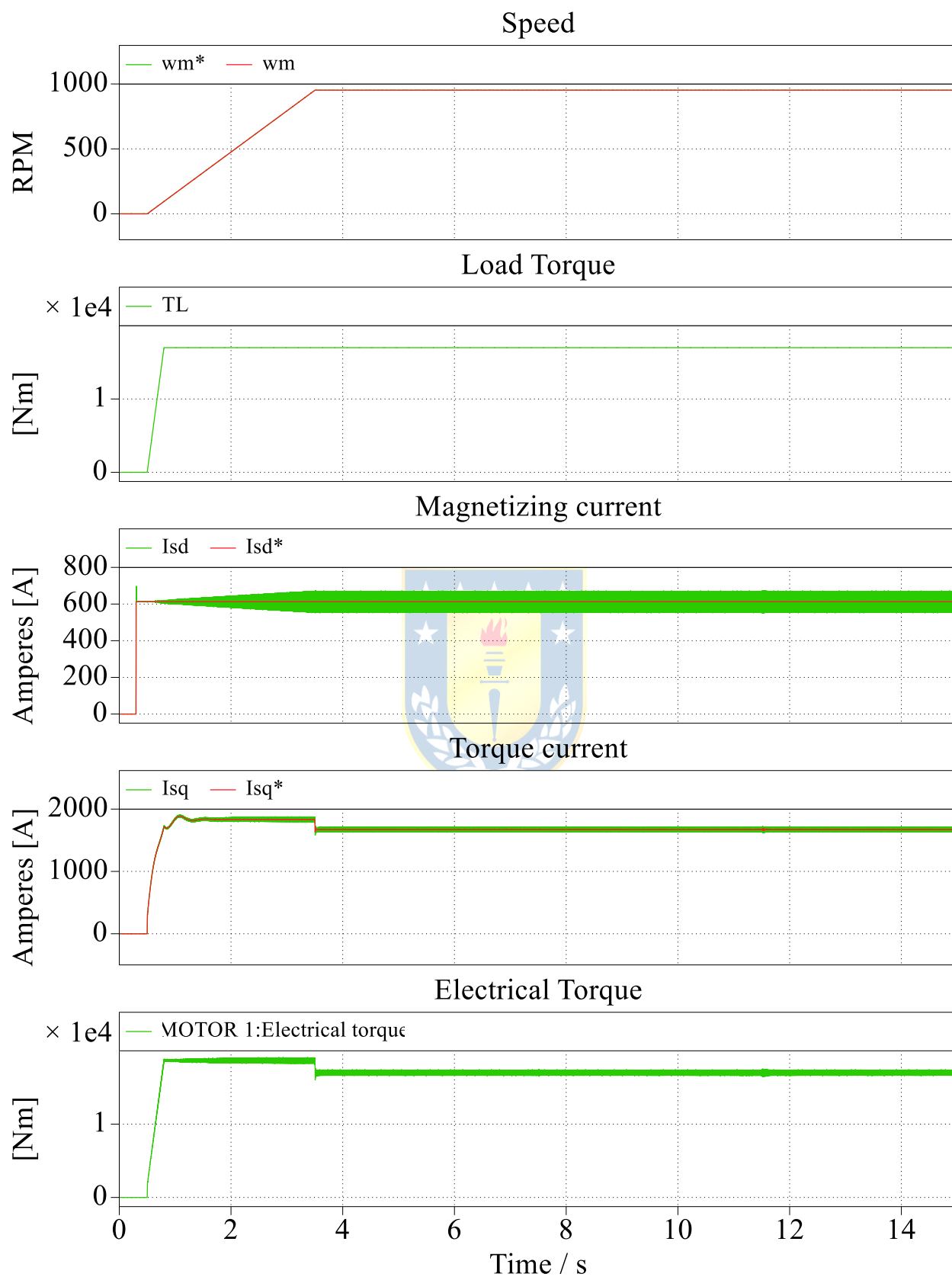


Figura 5.34 Variables motores Truck System 1 en Escenario 3

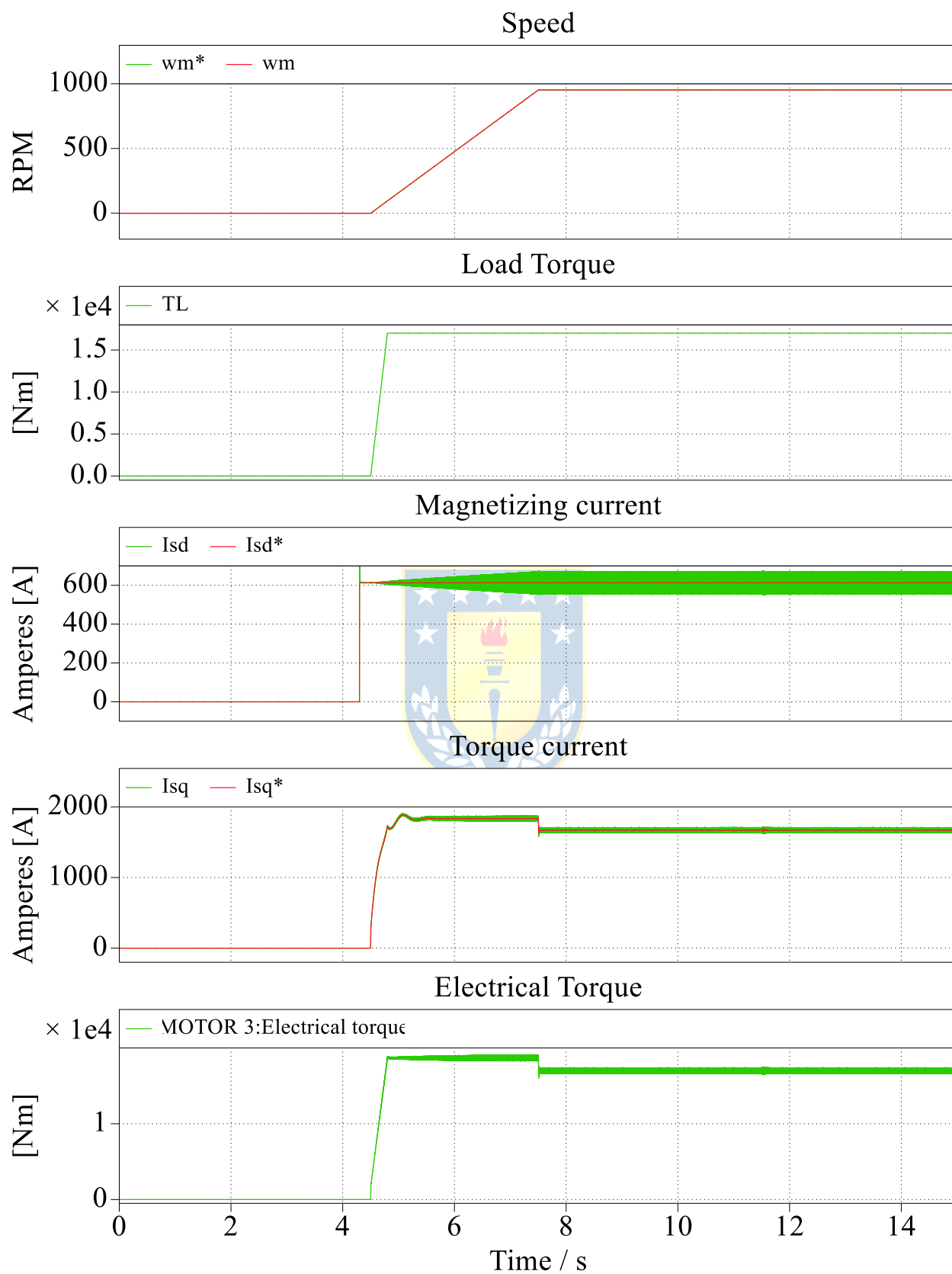


Figura 5.35 Variables motores Truck System 2 en Escenario 3

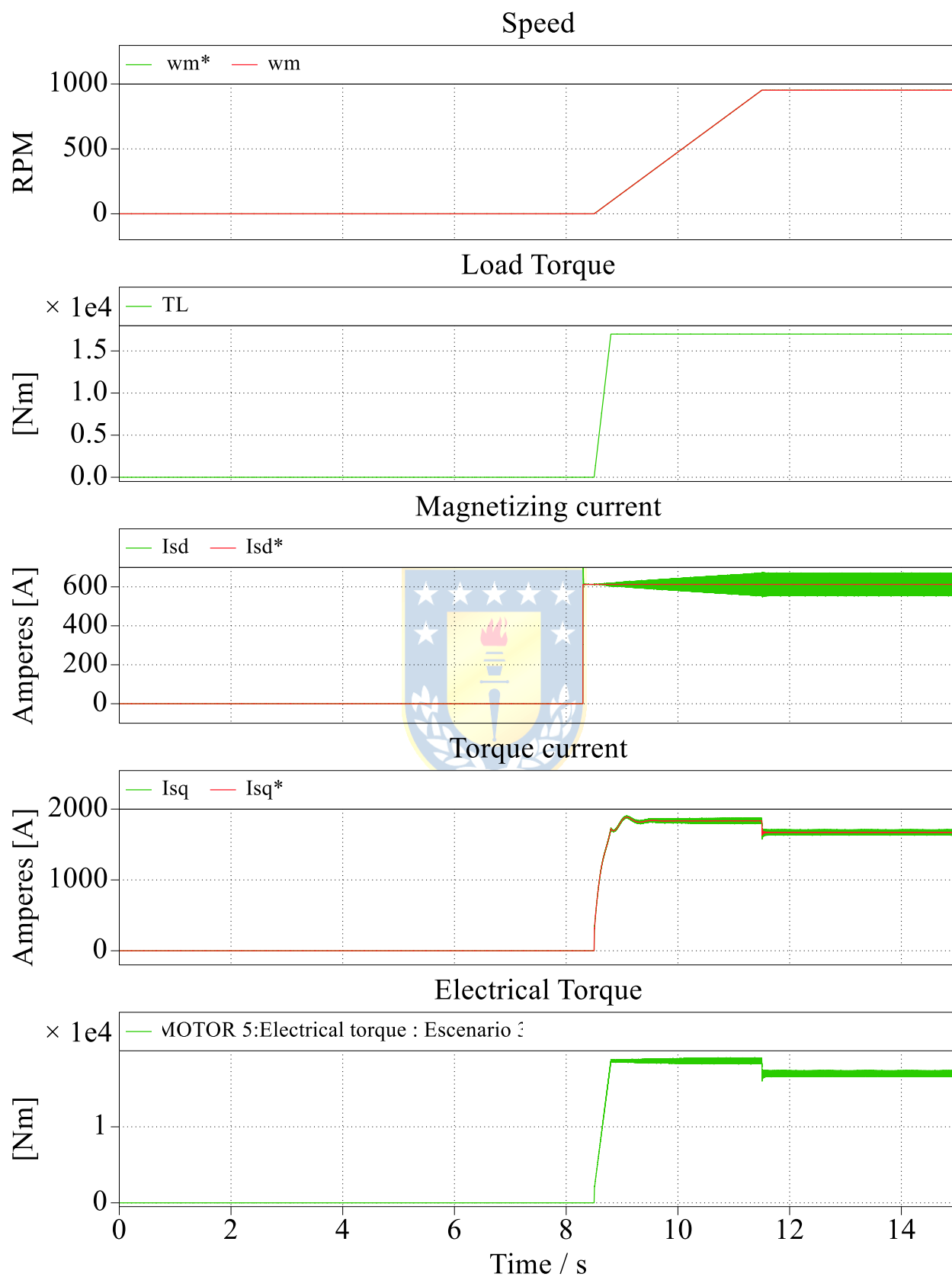


Figura 5.36 Variables motores Truck System 3 en Escenario 3

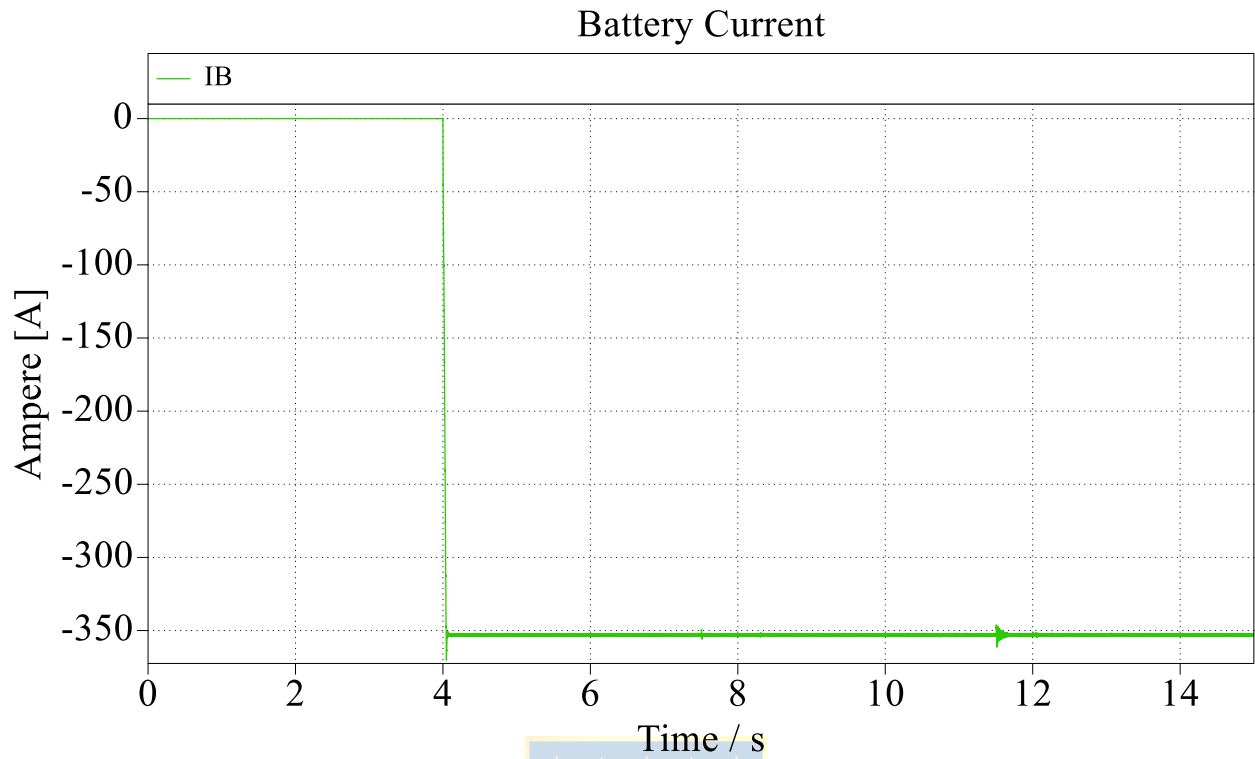


Figura 5.37 Corriente inyectada por la batería de Truck System 1 en Escenario 3

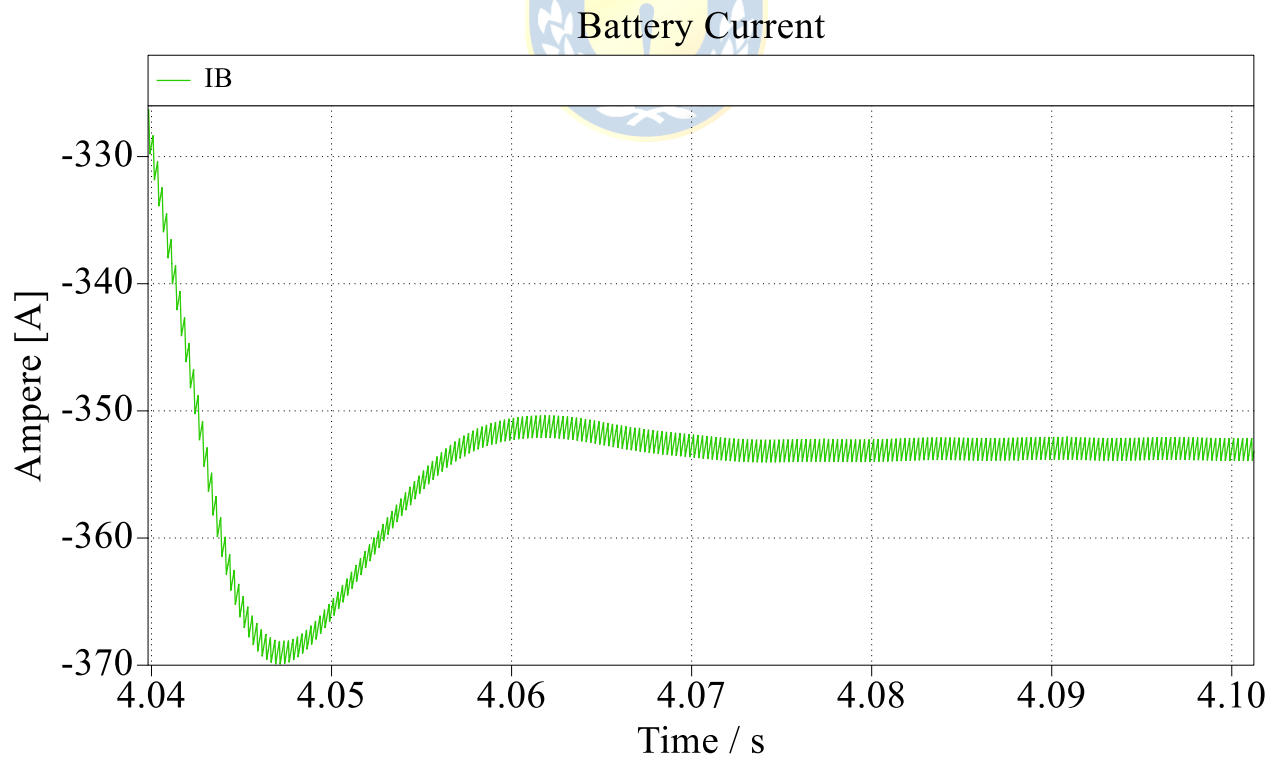


Figura 5.38 Corriente inyectada por la batería de Truck System 1 en Escenario 3 - Zoom

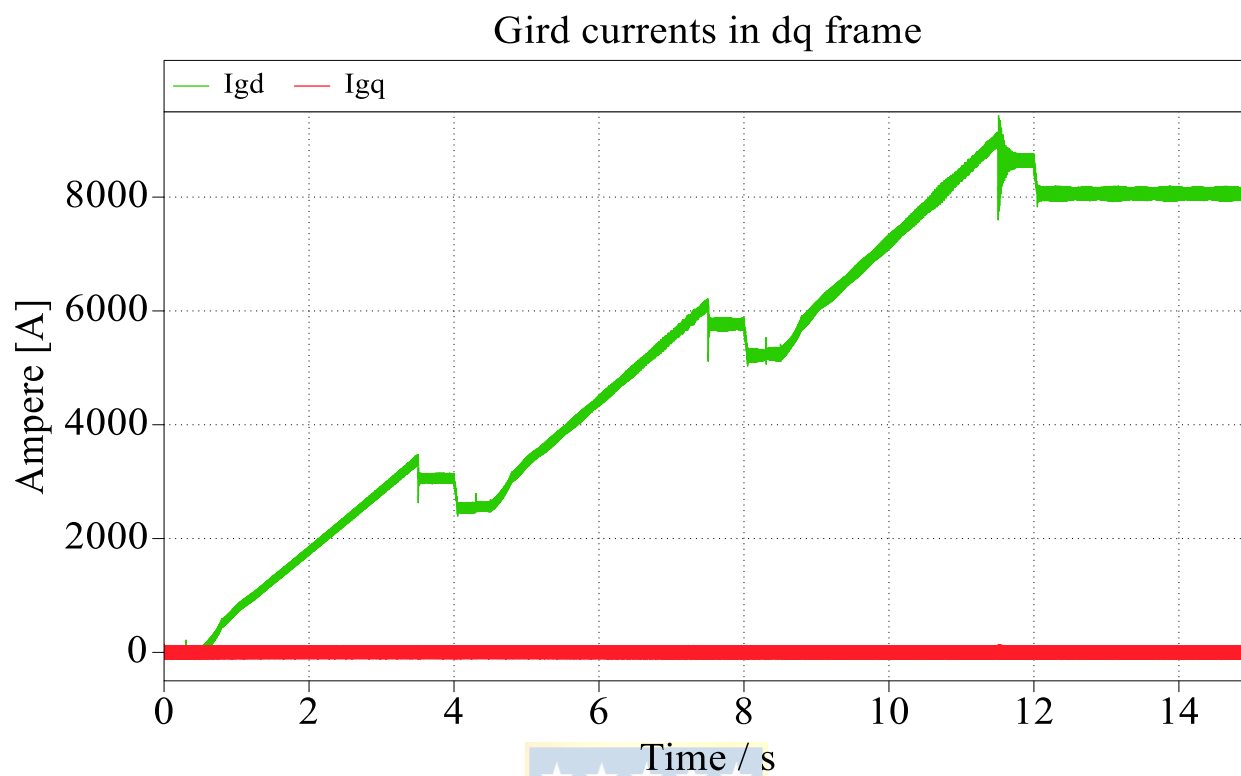


Figura 5.39 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 3

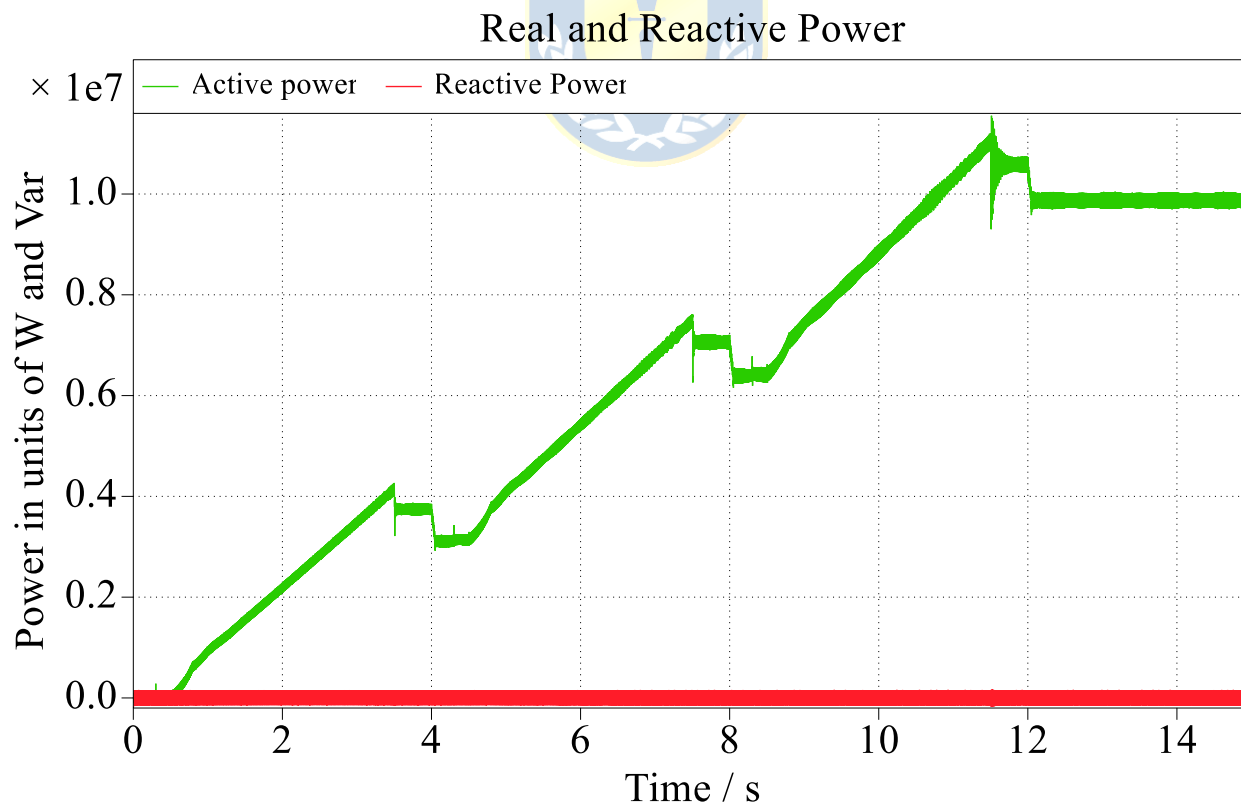


Figura 5.40 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario

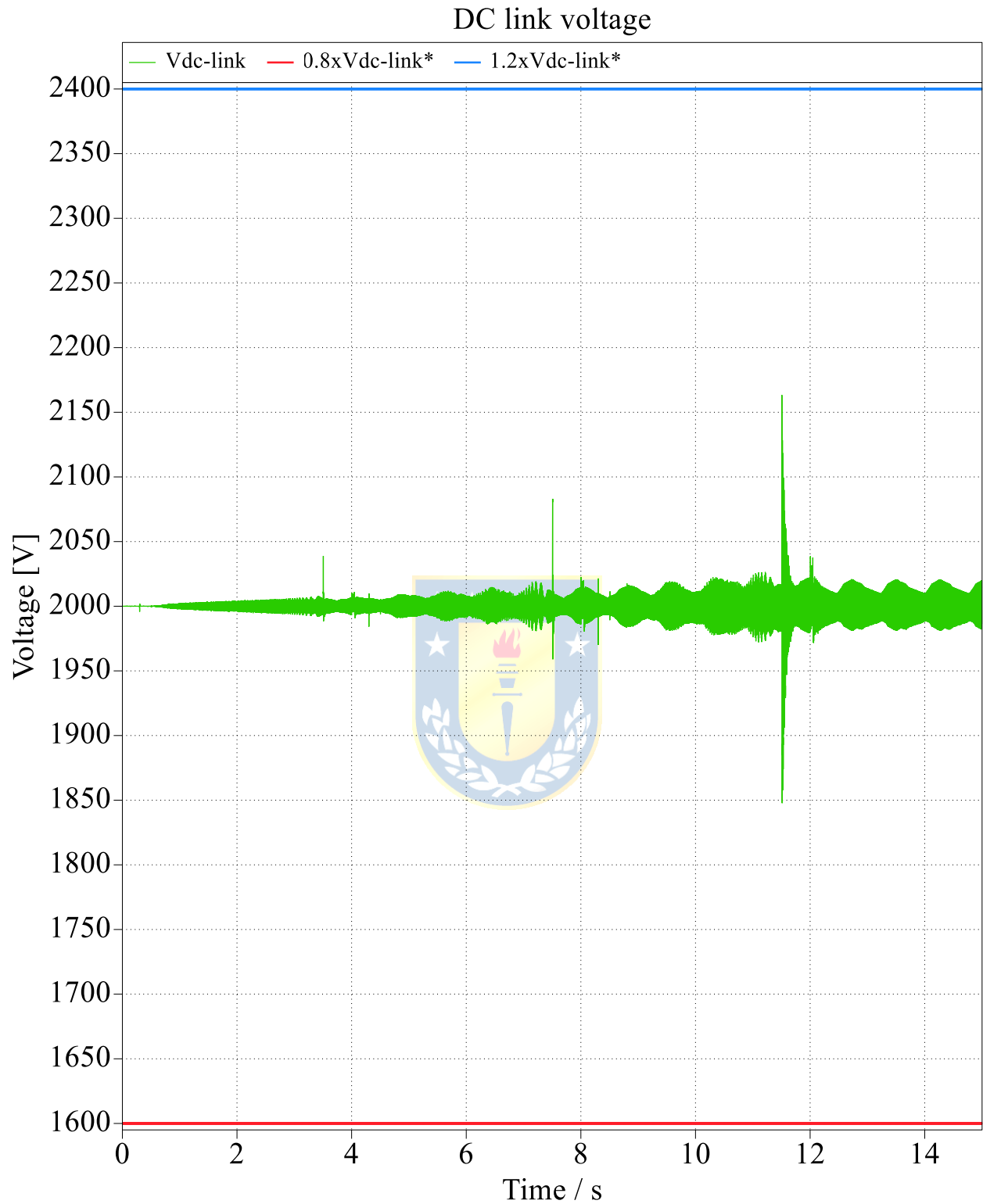


Figura 5.41 Tensión enlace DC en Escenario 3

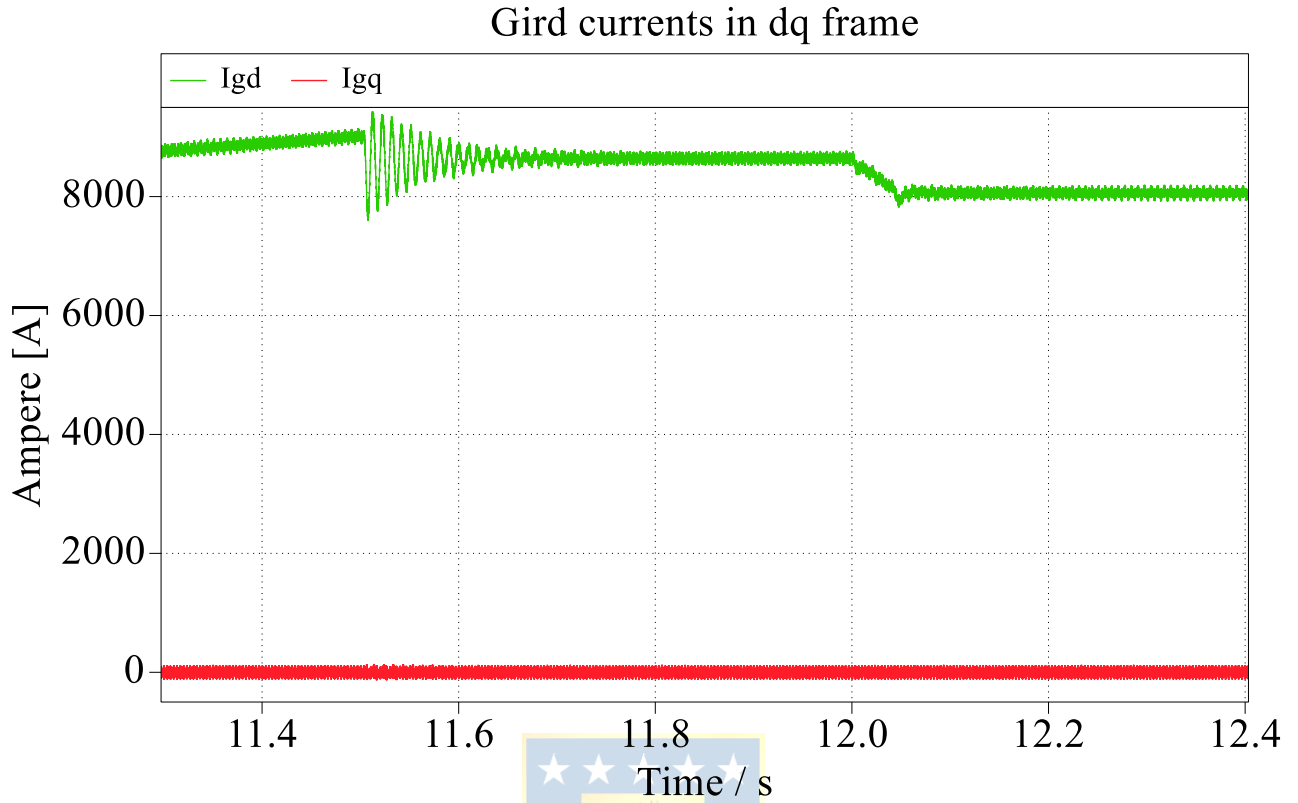


Figura 5.42 Corrientes de red en ejes estacionarios dq en Escenario 3 – Zoom

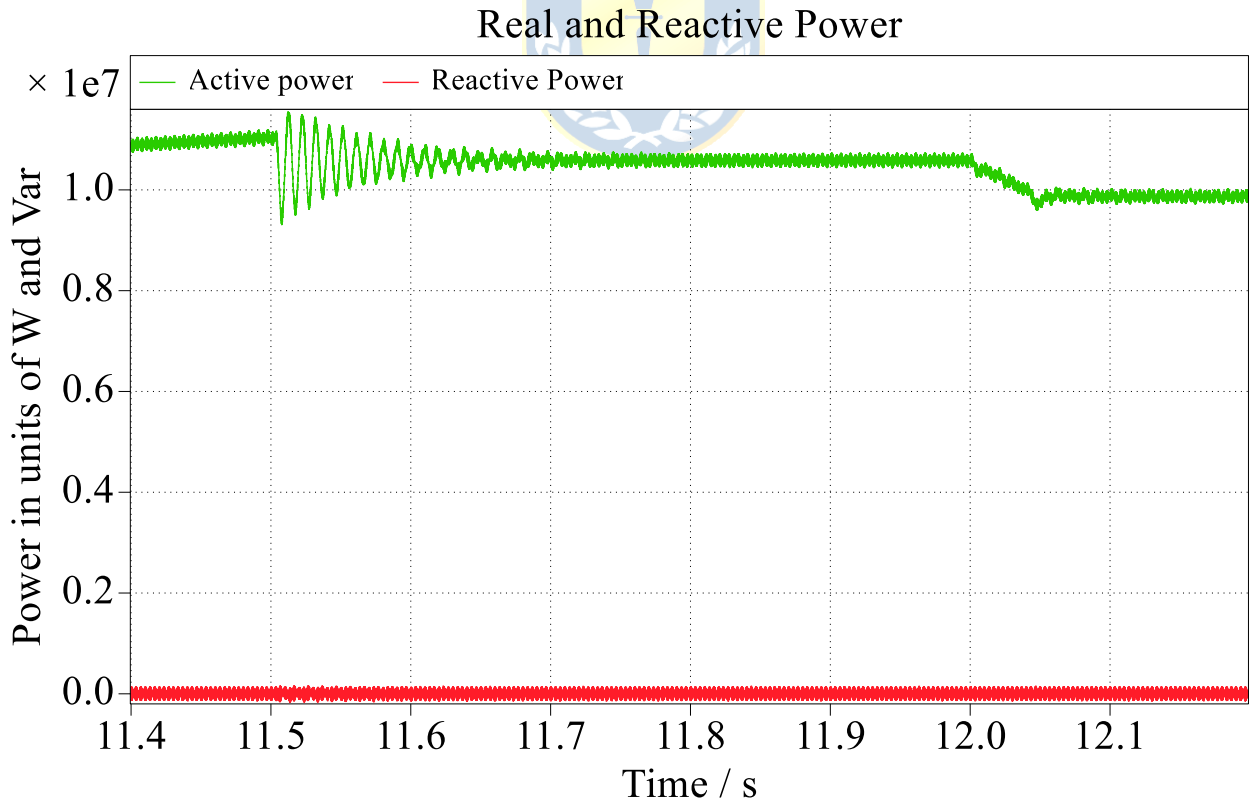


Figura 5.43 Potencia Activa y Reactiva en red en Escenario 3 – Zoom

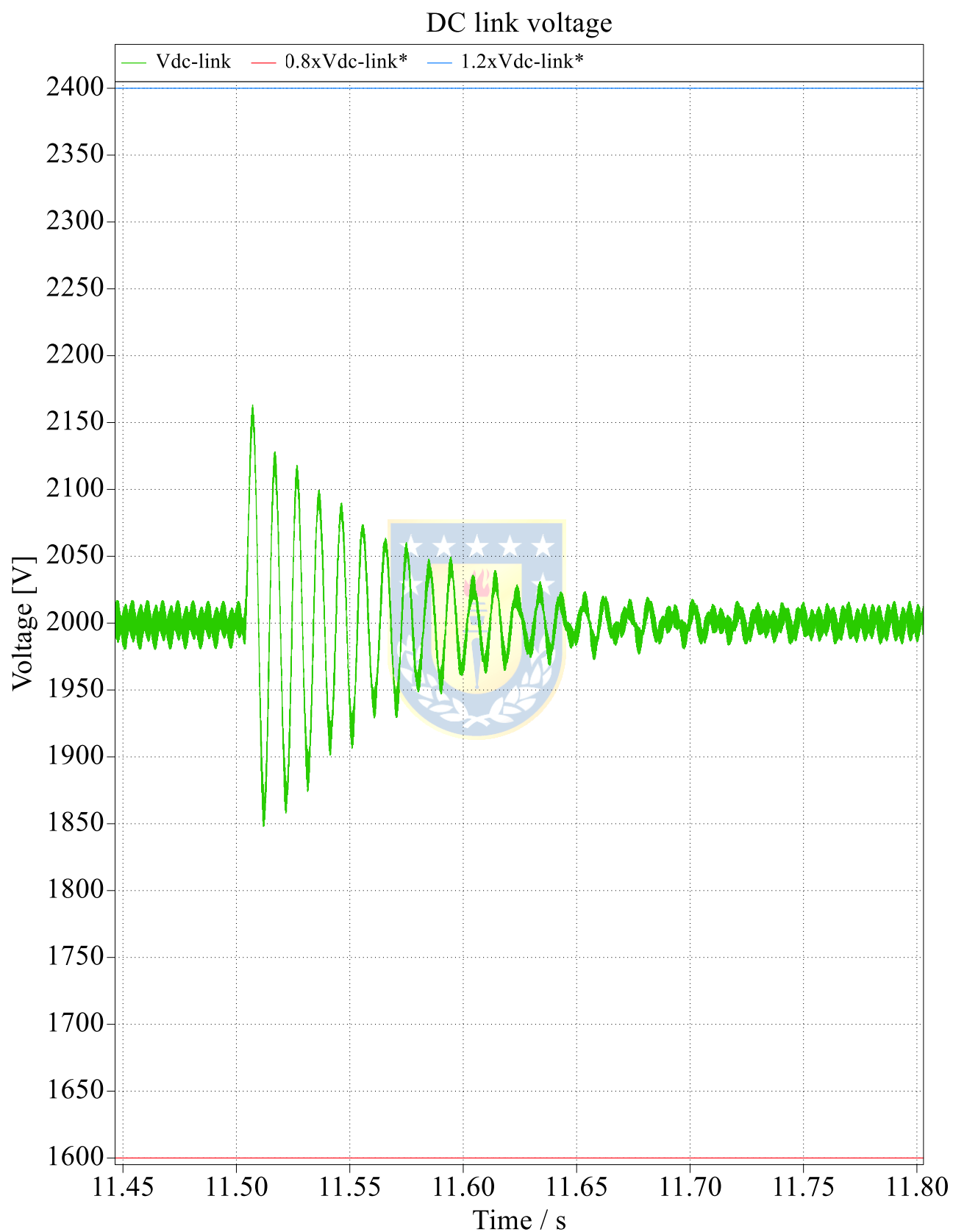


Figura 5.44 Tensión enlace DC en Escenario 3 – Zoom

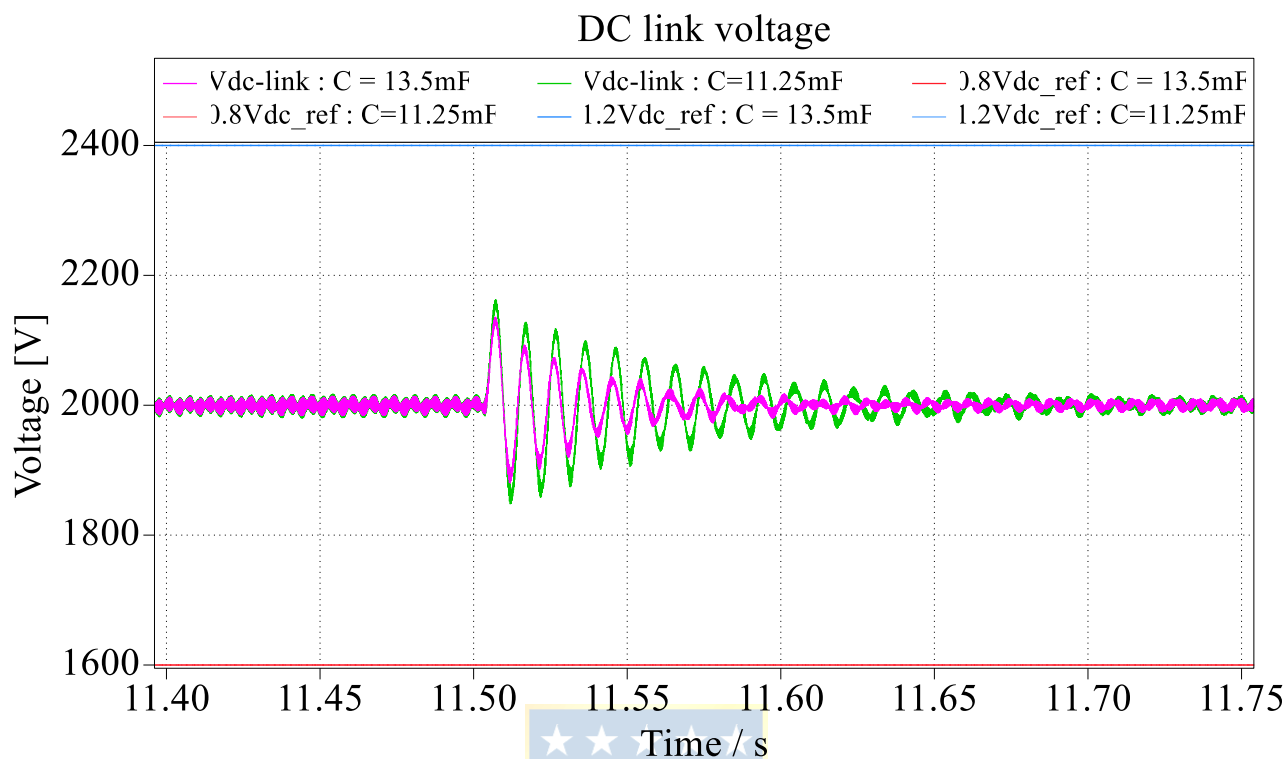


Figura 5.45 Efecto en aumento de capacitancia en tensión de enlace DC en Escenario 3

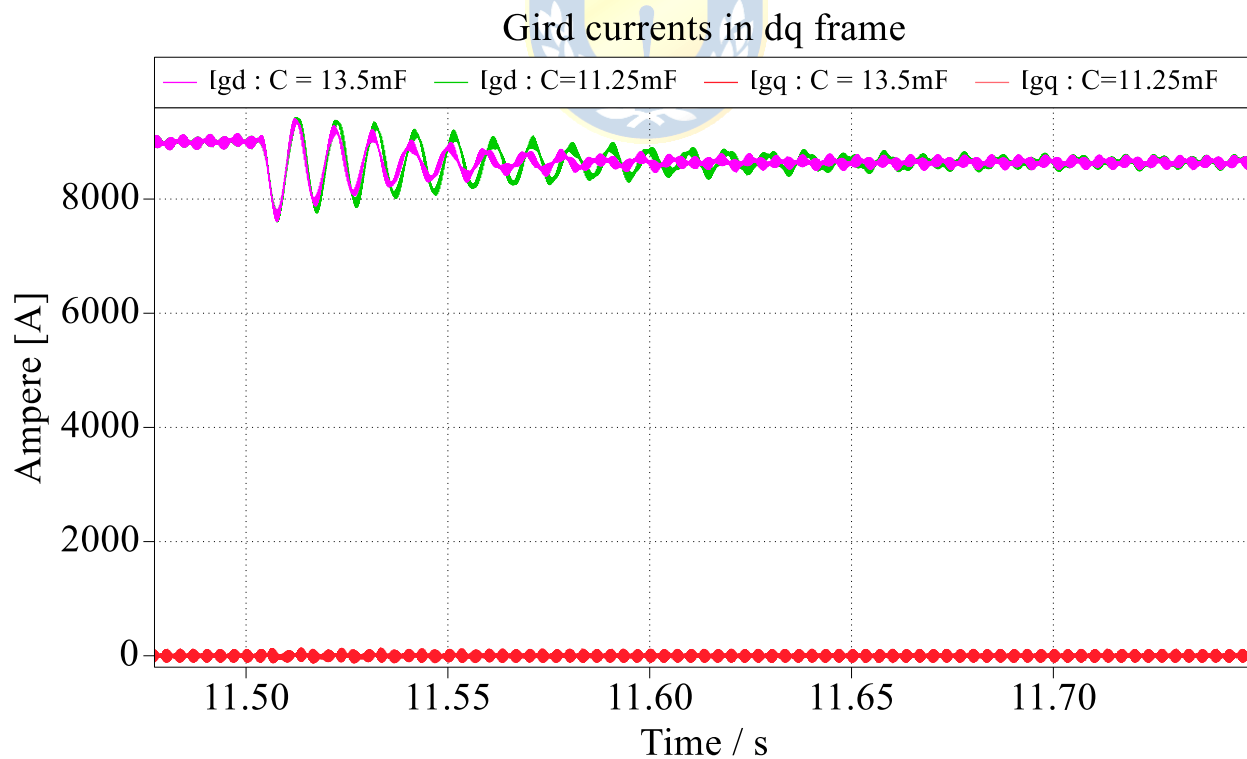


Figura 5.46 Efecto en aumento de capacitancia en  $I_{gd}$  en Escenario 3

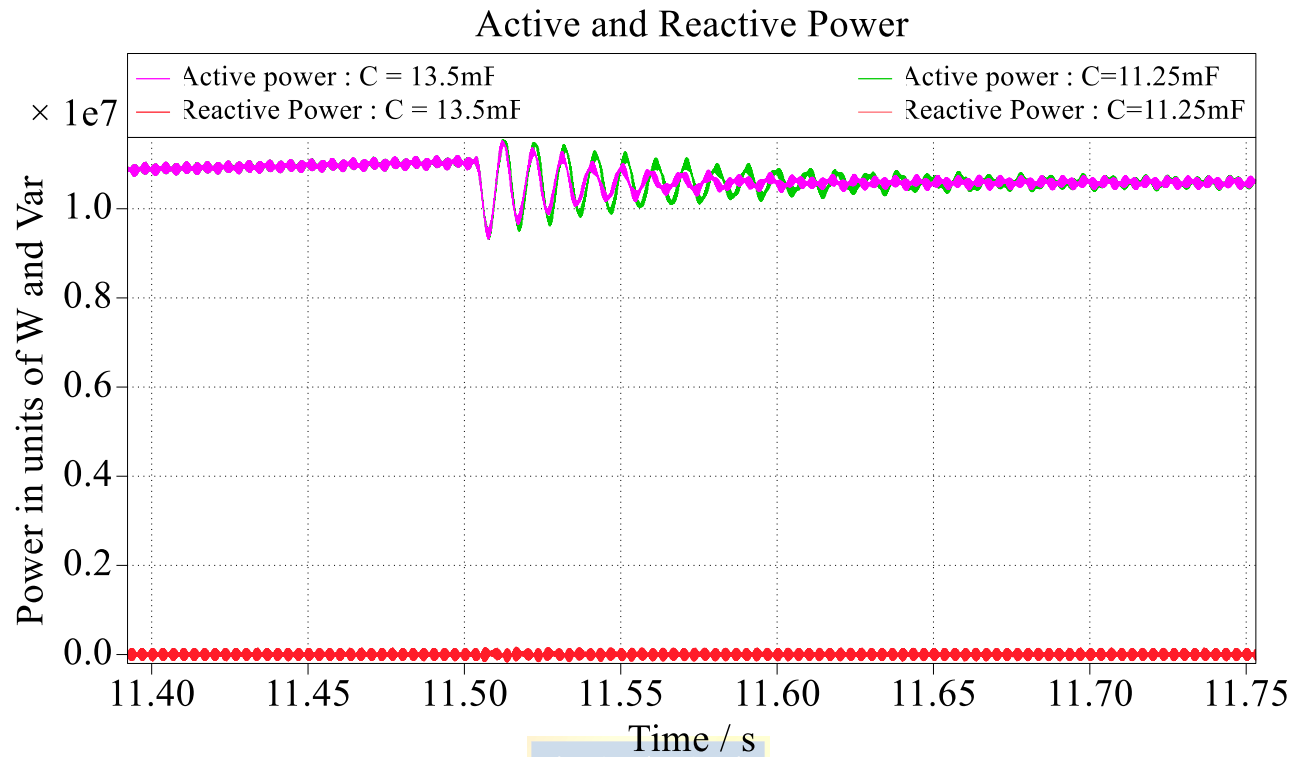


Figura 5.47 Efecto en aumento de capacitancia en Potencia Activa en Escenario 3



## Capítulo 6. Conclusiones

---

### 6.1. Conclusiones

Los sistemas de control vectorial implementados en el modelo logran generar buenos resultados de control durante la operación del modelo de los camiones mineros del sistema de catenaria. Tanto el sistema de control vectorial de frente activo como el control vectorial indirecto de las máquinas de inducción logran generar resultados esperados según las condiciones especificadas, manteniendo un factor de potencia unitario y un  $THD_i$  inferior al 3% durante la simulación en los tres escenarios propuestos, permitiendo una respuesta rápida ante las condiciones de operación.

El diseño del convertidor DC-DC, en conjunto con el modelo simplificado de la batería, logran suministrar energía al sistema durante su operación designada. Este suministro de energía reduce la carga energética a la que se ve sometido el sistema debido a la operación de los camiones.

La selección de la capacitancia de enlace DC es un parámetro crítico y fundamental para asegurar el correcto funcionamiento del modelo del sistema de catenaria. Al aumentar la capacitancia de enlace se demuestra la disminución de las fluctuaciones y el valores peak en el enlace DC durante el régimen transiente en conjunto con menor tiempo de estabilización a su valor referencial, mejorando la estabilidad del sistema.

La transferencia de potencia en el sistema es está estrechamente vinculada con la capacidad de almacenamiento energético temporal en el enlace DC. Si bien el condensador actúa como amortiguador de energía entre los convertidores, la sincronización de los sistemas de controles es otro aspecto crucial en el diseño del modelo. Según las condiciones operacionales, para asegurar esta sincronización, el control de frente activo deberá ser más rápido.

Por lo tanto, de acuerdo con los parámetros de diseño especificados y los resultados de las simulaciones, mediante el uso de PLECS, se logra desarrollar un modelo representativo de un sistema de asistencia trolley con capacidad regenerativa, posicionando a esta como una herramienta de simulación alternativa para el análisis de los sistemas trolley.

## 6.2. Trabajo Futuro

- Diseño de un Sistema de Gestión de Baterías (BMS) para la operación de un camión minero en un sistema de asistencia trolley con capacidad regenerativa

El trabajo realizado en la presente memoria de título establece la construcción base del sistema de catenaria que opera con BEV durante diferentes escenarios. El objetivo del trabajo consistirá en desarrollar un BMS eficiente para su implementación en el modelo del sistema TA diseñado en PLECS, definiendo una ruta operativa para su implementación y construcción.



## Referencias

---

- [1] C. Leonida, “Go With the Flow: Electrics for Futureproof Mines”, [En línea]. Disponible: [https://library.e.abb.com/public/c49a833a4a404916ae4d53c769cd0ebb/Mine%20Power%20Systems%20EMJ\\_June-23.pdf](https://library.e.abb.com/public/c49a833a4a404916ae4d53c769cd0ebb/Mine%20Power%20Systems%20EMJ_June-23.pdf)
- [2] “El Acuerdo de París | CMNUCC” [En línea]. Disponible: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [3] Cochilco, “Emisiones GEI en la minería del cobre al 2021 y análisis del contexto actual”, Diciembre de 2022, [En línea], Disponible: [Informe GEI Directos e Indirectos 2021 Final con rpi.pdf \(cochilco.cl\)](#)
- [4] M. Ashnagaran, “The journey to the all-electric mine”, Copper Worldwide. vol. 10, no. 4, pp. 19, Diciembre 2020, [En línea], Disponible: [ABB Library - 9AKK107991A6836](#)
- [5] “Ingredients for integrating battery electric vehicles”. Global Mining Review, vol. 4, no. 5, pp 44-46, Julio 2021, [En línea], Disponible: [Global Mining Review July/August 2021 by PalladianPublications - Issuu](#)
- [6] “CAT Trolley Assist System for Ultra-Class Electric Drive Mining Trucks”. Mayo 2021. [En línea]. Disponible: [CM20200930-dba70-c067f \(scene7.com\)](#)
- [7] T. Adams. “Trolley-assisted haul trucks – benefits and challenges”. GRT. [En línea]. Disponible: [Trolley-assisted haul trucks - benefits and challenges \(globalroadtechnology.com\)](#)
- [8] A. Brodkob “Truck Trolley System”. SIEMENS. [En línea]. Disponible: [https://www.svemin.se/?file\\_download&file=1101](https://www.svemin.se/?file_download&file=1101)
- [9] Bao, H.; Knights, P.; Kizil, M.; Nehring, M. Electrification Alternatives for Open Pit Mine Haulage. *Mining* 2023, 3, 1-25. <https://doi.org/10.3390/mining3010001>

- [10] Recommended Practices for Battery Electric Vehicles in Underground Mining — Version 3 (GMG07-EM-2022). Global Mining Guidelines Group (2022).
- [11] “ABB eMine™. For your world, and mine.” Mining. [En línea]. Disponible: <https://new.abb.com/mining/emine>
- [12] W. G. Koellner, G. M. Brown, J. Rodriguez, J. Pontt, P. Cortes and H. Miranda, "Recent advances in mining haul trucks," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 2, pp. 321-329, April 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.825263.
- [13] J. Valenzuela Cruzat and M. A. Valenzuela, "Modeling and Evaluation of Benefits of Trolley Assist System for Mining Trucks," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, pp. 3971-3981, July-Aug. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2823261.
- [14] E. Wiechmann. “PWM Vectores Espaciales SVC”. Universidad de Concepción. Junio 2021.
- [15] J. Schönberger. “Space Vector Control of a Three-Phase Rectifier using PLECS® “. [En línea]. Disponible: [https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs\\_svm.pdf](https://www.plexim.com/sites/default/files/plecs_svm.pdf)
- [16] Y. Solbakken. “Space Vector PWM Intro — Switchcraft”. Switchcraft. [En línea]. Disponible: <https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>
- [17] L. Jawdat. “Study of Switching Techniques and Switching Patterns of the Z-Source Inverter.” Technology Reports of Kansai University. 62. 1905-1921.
- [18] N. Mohan. “Space Vector Pulse Width-Modulated (SV-PWM) Inverters,” en *Advance Electric Drives*. Wiley, 2014. 119-129.
- [19] J. Zhang. “Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling, and Control”, Enero 2008.
- [20] M. Jasinski, S. Stynski, P. Mlodzikowski and M. Malinowski. “AC-DC-AC Converters for Distributed Power Generation Systems” en *Power Electronics for Renewable Energy Systems Transportation and Industrial Applications*, Primera edición. Wiley, 2014, 319-364.

- [21] J. Mazumdar, "Performance improvement of mining haul trucks operating on trolley systems," *2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Orlando, FL, USA, 2011, pp. 1-6, doi: 10.1109/IAS.2011.6074352.
- [22] PLEXIM GmbH. (2023). PLECS User Manual, Version 4.7. [En línea]. Disponible: [Documentation | Plexim](#)
- [23] J. V. Cruzat and M. A. Valenzuela, "Integrated modeling and evaluation of electric mining trucks during propel and retarding modes," *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Portland, OR, USA, 2016, pp. 1-10, doi: 10.1109/IAS.2016.7731925.
- [24] J. Robles, "Modelación Simulación y Análisis del VDF SD 700 con frenado regenerativo", Tesis Pregrado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, [En línea], Disponible: [http://opac.pucv.cl/pucv\\_txt/txt-1500/UCC1552\\_01.pdf](http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-1500/UCC1552_01.pdf)
- [25] J. Prasad., T. Bhavsar, R. Ghosh, G. Narayanan, "Vector control of three-phase AC/DC front-end converter". *Sadhana*. vol. 33, no. 5, pp 591-613, Octubre 2008, [En línea], Disponible: <https://www.ias.ac.in/article/fulltext/sadh/033/05/0591-0613>
- [26] P. Pandit, "Modeling and Analysis of Active Front-End Induction Motor Drive for Reactive Power Compensation", Tesis Magister, University of Tennessee, 2005. [En línea], Disponible: [https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/2301](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/2301)
- [27] Jih-Sheng Lai, H. Kouns and J. Bond, "A low-inductance DC bus capacitor for high power traction motor drive inverters," *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, Pittsburgh, PA, USA, 2002, pp. 955-962 vol.2, doi: 10.1109/IAS.2002.1042673.
- [28] P. Concha. "curvas". MÁQUINAS ELÉCTRICAS: APUNTES. [En línea]. Disponible: <http://patricioconcha.ubb.cl/maquinas/paginas/mom.vel.materia.html>
- [29] G. Hunter, I. Andrade, J. Riedemann, R. Blasco-Gimenez and R. Peña, "Active and reactive power control during unbalanced grid voltage in PV systems," *IECON 2016 - 42nd Annual*

*Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 3012-3017, doi: 10.1109/IECON.2016.7793525.

- [30] R. Peña, “Control de accionamiento Eléctricos”, Presentado en Control de Accionamientos Eléctricos, Universidad de Concepción.



## Anexo A. Códigos

---

### A.1 PLECS: “Model initialization commands”

```

%%% Parámetros Sistema %%%

%% Fuente de tensión %%
Vgrid_pk = (1000)*sqrt(2/3); % grid voltage (V, line-to-neutral)
fgrid = 50; % grid frequency (Hz)
offset = pi/2; % grid phase offset (rad)
fs=4e3;
fst=4e3;

L= 0.25e-3;
X = 100*pi*L
R = X /10;
Tsc=1/(1*fs);

%% DC-LINK %%
Vc0 = 2000;
Vdc_ref = 2000; % DC-bus reference voltage (V)
cap = 1.25*9e-3; % DC-bus capacitance (F)

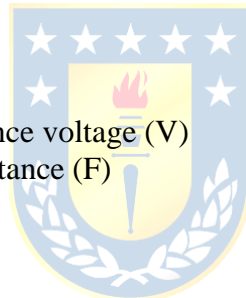
%%% Parámetros MIJA %%%

Isnom = 1355.6045*sqrt(2) % Corriente RMS a Valor pk (Se obtuvo en prueba a Tnom)
idnom = 433.092*sqrt(2) % Corriente RMS a Valor pk (Se obtuvo en prueba vacío)
iqnom = sqrt(Isnom^2-idnom^2);
Tnom = 17e3; % T = 17000 Nm
TL = 1*Tnom
Pnom = 1.659e6; % 1.659 [MW] a Tnom = 17e3 Nm
Wnom = 952; % 952 RPM
Wnom_rad = Wnom*(pi/30) %

Rs = 0.0323/3 % Resistencia estator [ $\Omega$ ]
Xls = 0.1885/3; % Reactancia inductiva estator [ $\Omega$ ]
Rr = 0.05882/3 % Resistencia rotor referida al estator [ $\Omega$ ]
Xlr = 0.3142/3; % Reactancia inductiva rotor referida al estator [ $\Omega$ ]
Xmag = 3.7699/3; % Reactancia magnética [ $\Omega$ ]

L0 = Xmag/(100*pi); % Inductancia magnética
Lm = L0;
Lls = Xls/(100*pi); % Inductancia fuga estator
Llr = Xlr/(100*pi); % Inductancia fuga rotor

```



```

Ls = Lm + Lls; % Inductancia estator
Lr = Lm + Llr; % Inductancia rotor
o = (Ls*Lr-L0^2)/(Ls*Lr);
B = 0.147
p = 3; % Numero pares de polos -> Motor 6 polos
J = 50*1;
wm0 = 0; % Velocidad inicial rotor
wm0_2 = 0;
thm0 = 0; % Posición inicial rotor
Tr=Lr/Rr;

%%% Control AFE %%%

% Controlador DC-LINK

kp_c = 1.1229 % (fn=20Hz amortiguamiento de 0.8) C=1.25*9e-3
ki_c = kp_c * 79.17

%Controladores corrientes

kp_i = 0.49584 % (fn=200Hz amortiguamiento de 0.8) L = 0.25e-3 R =0.0079
ki_i = kp_i *800.4

%%% Control MIJA %%%

%% Control PI Velocidad %%

Kp_wm = 3503.3| % (fn=7Hz amortiguamiento de 0.8)
Kp_wm = 3503.3
Ki_wm = Kp_wm * 27.42

iqmax = 1.1*iqnom; %Límites de corrientes
iqmin = -1.1*iqnom;

idmax = 1.1*idnom;
idmin = -1.1*idnom;

%% Controlador PI corrientes %%

Kp_idq = 0.33676; % (fn=70Hz amortiguamiento de 0.8)
Ki_idq = Kp_idq *282.4

Udmax = 1.2*Vgrid_pk; % Limites saturación PI Id
Udmin =-1.2*Vgrid_pk;

```



```
Uqmax = 1.2*Vgrid_pk; % Limites saturación PI Iq
Uqmin = -1.2*Vgrid_pk;
```

```
%% Control corriente batería
```

```
kp_b = 0.0035721
ki_b = kp_b * 82.67
```

## A.2 Matlab

```
clear all
clc

%% Parámetros motor %%
Pnom = 1.659e6; % 1659 [kW] a Tnom = 17e3 [Nm]
Vnom = 1400/sqrt(3);
Wnom = 952; % 952 RPM
Wnom_rad = Wnom * (pi/30); % rad/s

Rs = 0.0323/3; % Resistencia estator [Ω]
Xls = 0.1885/3; % Reactancia inductiva estator [Ω]
Rr = 0.05882/3; % Resistencia rotor referida al estator [Ω]
Xlr = 0.3142/3; % Reactancia inductiva rotor referida al estator [Ω]
Xmag = 3.7699/3; % Reactancia magnética [Ω]

Lo = Xmag/(100*pi); % Inductancia magnética
Lm = Lo;
Lls = Xls/(100*pi); % Inductancia fuga estator
Llr = Xlr/(100*pi); % Inductancia fuga rotor

Ls = Lm + Lls; % Inductancia estator
Lr = Lm + Llr; % Inductancia rotor
sigma = (Ls*Lr-Lo^2)/(Ls*Lr);

Isnom = 1355.6045*sqrt(2); % Corriente RMS a Valor pk (Se obtuvo en ensayo a Tnom)
idnom = 433.092*sqrt(2); % Corriente RMS a Valor pk (Se obtuvo en ensayo vacío)
iqnom = sqrt(Isnom^2-idnom^2);

%% Parámetros de control %%

% Control PI Velocidad IFOC
J = 50;
B = 0.147;
% Control AFE

L= 0.25e-3;
X = 100*pi*L;
R = X/10;
C = 11.25e-3 % 13.5e-3;
```

```

% Control Corrientes MIJA
Rs = 0.0323/3;           % Resistencia estator [ $\Omega$ ]
Ls = Lm + Lls;          % Inductancia estator
sigma = (Ls*Lr-Lo^2)/(Ls*Lr);

% Control corriente batería

Lb = 36e-3;
Rb = 0.005;
Vdc = 2000;

%% Plantas sistema de control --> Diseño en sisotool(<Nombre Planta>)

C_Vdc = tf([1],[C/2 0]); % Planta control tensión DC-LINK
W_MIJA = tf([1],[J B]); % Planta control velocidad MIJA
I_AFE = tf([1],[L R]); % Planta control corriente AFE
I_MIJA = tf([1],[sigma*Ls Rs]); % Planta control corriente MIJA
C_Ib = tf([Vdc],[Lb Rb]) % Planta control corriente batería

```

