

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE
LOS MOTORES DE TRACCIÓN DEL METRO DE QUITO Y
ANÁLISIS DINÁMICO DE SU OPERACIÓN EN LA RED ELÉCTRICA
MEDIANTE CO-SIMULACIÓN ENTRE MATLAB/SIMULINK Y
POWERFACTORY DE DIGSILENT**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y CONTROL**

LUIS LAURENTINO CHIZA SEGOVIA

DIRECTOR: Dr.-Ing. JAIME CRISTÓBAL CEPEDA CAMPAÑA

CODIRECTOR: Dr.-Ing. PAÚL MARCELO POZO PALMA

Quito, agosto 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Luis Laurentino Chiza Segovia, bajo nuestra supervisión.

Dr.-Ing. JAIME CRISTÓBAL CEPEDA CAMPAÑA
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Dr.-Ing. PAÚL MARCELO POZO PALMA
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Luis Laurentino Chiza Segovia, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

LUIS LAURENTINO CHIZA SEGOVIA

DEDICATORIA

Este trabajo fue realizado en base a esfuerzo, sacrificio y dedicación, pero detrás de esto estuvieron personas importantes en mi vida que de una u otra forma fueron importantes en su desarrollo y culminación, por lo que dedico este trabajo a:

A mis padres quienes a través de su gran esfuerzo y sacrificio han sido mi guía y apoyo de manera incondicional a través de este camino. Por confiar y acompañarme en cada uno de los sueños y metas trazadas en estos primeros pasos de mi vida, mediante los valores y principios morales inculcados, y a la oportunidad de haberme brindado una educación de calidad durante toda mi etapa estudiantil. A pesar de los momentos difíciles siempre han buscado la manera de sacarnos adelante a mí y a mis hermanos, manteniendo la esperanza de mejores días.

A mis hermanos Jesús, José, Marck y Ñusta que son la fuerza que me impulsan a realizar y obrar de la mejor manera. Quienes son mi apoyo incondicional y uno de los pilares más importantes en mi vida.

A mi abuelita Luz y a mi tía Lucila, por ser las personas que me han enseñado el valor del esfuerzo, quienes son ejemplo de lucha y de cómo salir adelante frente a las adversidades.

A mis abuelitos Elena y José quienes me han acompañado y aconsejado, inculcándome principios y valores morales que han sido base en mi formación.

A la memoria de mi abuelito Antonio, que desde el lugar en que se encuentre siempre me ha brindado su luz en cada paso de mi camino.

Luis.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la bendición de una familia unida y llena de fortalezas que ha sido el pilar fundamental de mi vida.

A mis padres Luz y Luis por todo su amor, confianza y dedicación hacia mi formación espiritual y académica. Gracias a quienes he logrado llegar hasta aquí y les expreso mi mayor gratitud.

A mis hermanos Jesús, José, Marck y Ñusta por ser parte esencial en mi vida. Por todo el cariño y apoyo. Gracias por estar conmigo en todo momento

A todos y cada uno de mis amigos y compañeros con los cuales compartí esta etapa. Con quienes compartí alegrías y momentos difíciles.

A la Subgerencia Nacional de Investigación y Desarrollo del Operador Nacional de Electricidad (CENACE) por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de realizar mis primeros pasos como investigador. Por haber sido el lugar en el que me sentí como en casa.

Al Dr. Marcelo Pozo por haber sido un gran apoyo durante el desarrollo del proyecto, por haber sido parte de mi formación académica y profesional. Por brindarme su tiempo y conocimientos, y por haberme dado la oportunidad de ser parte de este proyecto.

Al Dr. Jaime Cepeda por haberme brindado la oportunidad de formar parte de este proyecto. Por los conocimientos brindados. Por la confianza brindada ante los retos presentados en la ejecución de este trabajo.

Al Ing. Augusto Riofrío, por su amistad y por todo el gran apoyo otorgado durante la ejecución de este trabajo, por los consejos, paciencia y la dedicación brindada. Además, agradezco a los Drs. Walter Vargas y Marlon Chamba, por todos los conocimientos impartidos y los consejos brindados en la ejecución de este trabajo.

Luis.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ALCANCE	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE METRO	5
2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA UNIDAD DE TREN	9
2.3. SISTEMA DE TRACCIÓN.....	10
2.4. MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO O DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE ARDILLA.....	17
2.5. CONTROL VECTORIAL PARA MOTORES DE INDUCCIÓN	24
2.5.1. CONTROL VECTORIAL FIELD ORIENTED CONTROL (FOC).....	26
2.6. OLE FOR PROCESS CONTROL (OPC).....	31
2.7. POWERFACTORY DE DlgSILENT.....	34
2.7.1. CARACTERÍSTICAS.....	34
2.7.2. DlgSILENT SIMULATION LANGUAGE (DSL).....	36
2.8. INTERFACES PARA SIMULACIÓN COORDINADA.....	39
2.8.1. MATLAB/SIMULINK [30]	39
2.8.2. OBJECT LINKING AND EMBEDDING FOR PROCESS CONTROL (OPC) DENTRO DE POWERFACTORY [26]	40
2.9. MATRIKONOPC SERVER.....	43
2.10. MATLAB OPC TOOLBOX.....	45
3. METODOLOGÍA.....	46
3.1. MODELADO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS	46
3.2. DISEÑO DE INTERFACES OPC	58
3.2.1. CONFIGURACIÓN DE TAGS EN EL SEVIDOR OPC.....	58

3.2.2.	DISEÑO DE INTERFAZ OPC EN MATLAB/SIMULINK	60
3.2.3.	DISEÑO DE INTERFAZ OPC EN POWERFACTORY.....	64
3.3.	DISEÑO DE CONTROLADOR VECTORIAL FOC	73
3.3.1.	CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS 4 MOTORES DE TRACCIÓN. MÉTODO DE AGREGACIÓN DINÁMICA.....	74
3.3.2.	DISEÑO DE CONTROLADORES DE VELOCIDAD Y CORRIENTE	85
3.3.3.	PRUEBAS DE CONTROLADOR DISEÑADO	92
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	96
4.1.	PRUEBAS DE COMUNICACIÓN	96
4.1.1.	INTERCAMBIO DE DATOS ENTRE SERVIDOR OPC Y POWERFACTORY	96
4.1.2.	INTERCAMBIO DE DATOS ENTRE SERVIDOR OPC Y SIMULINK.....	97
4.1.3.	CO-SIMULACIÓN ENTRE POWERFACTORY Y SIMULINK	98
4.2.	OPERACIÓN DINÁMICA DE LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS.....	102
4.2.1.	CAPACITOR DE BUS	102
4.2.2.	BRAKING CHOPPER.....	103
4.3.1.	SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN SOLANDA.....	109
4.3.2.	SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN UNIVERSIDAD CENTRAL	113
4.3.3.	SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN LA CAROLINA	117
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	121
5.1.	CONCLUSIONES	121
5.2.	RECOMENDACIONES	123
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124
	ANEXOS.....	128
	ANEXO A.....	128
	ANEXO B.....	129
	ANEXO C	130
	ANEXO D	131
	ANEXO E.....	132

RESUMEN

En la ciudad de Quito se implementa la primera línea del Metro, el cual se trata de un sistema de transporte netamente eléctrico. El estudio eléctrico de la operación de las unidades de tren permite conocer el comportamiento estático y dinámico con el respectivo análisis de su efecto sobre la red. El modelado del sistema de tracción está basado en la disposición de los accionamientos eléctricos, los conjuntos de motores de tracción, y del sistema de control para el manejo de los motores de inducción trifásicos. El sistema de control está basado en el control vectorial para motores de inducción trifásicos. La técnica de control empleada se trata del control vectorial por orientación de campo FOC y cuya regulación se basa en el concepto de PI óptimo basado en modelo. Adicionalmente, en el tratamiento del conjunto de motores de tracción, para el cálculo de los parámetros del circuito equivalente del conjunto necesario para la estimación de los parámetros de los controladores de corriente y de velocidad del controlador FOC, se introduce el método de agregación dinámica.

La red eléctrica del sistema de Metro se modela en PowerFactory. Para realizar la integración del control de la unidad de tren en Matlab/Simulink con el modelo de la red eléctrica se requiere una forma de simulación coordinada. Una de las maneras de simulación coordinada se trata de la implementación de comunicación OPC (OLE for Process Control).

En el presente trabajo se implementa una herramienta que permita realizar la co-simulación de un sistema de control para motores de inducción trifásico modelado en Matlab/Simulink y realizar su integración a la red eléctrica modelada en PowerFactory a través del uso de un servidor OPC, permitiéndose el análisis de sus posibles efectos dentro del entorno eléctrico.

PALABRAS CLAVE: metro de Quito, sistema de tracción eléctrica, motores de tracción, control vectorial, control por orientado de campo FOC, co-simulación, powerfactory, opc.

ABSTRACT

In the city of Quito, the first Metro line is implemented, which is a purely electric transportation system. The electrical study of the operation of the train units allows to know the static and dynamic behavior with the respective analysis of its effect on the network. The modeling of the traction system is based on the arrangement of the electric drives, the sets of traction motors, and the control system for the operation of the three-phase induction motors. The control system is based on vector control for three-phase induction motors. The control technique used is the vector control by field orientation FOC and whose regulation is based on the concept of optimal PI based on the model. Additionally, in the treatment of the traction motor set, for the calculation of the parameters of the equivalent circuit of the set necessary for the estimation of the parameters of the current and speed controllers of the FOC controller, the dynamic aggregation method is introduced.

The electrical network of the Metro system is modeled in PowerFactory. To carry out the integration of the control of the train unit in Matlab / Simulink with the model of the electrical network, a coordinated simulation form is required. One of the ways of coordinated simulation is the implementation of OPC communication (OLE for Process Control).

In the present work, a tool is implemented to allow the co-simulation of a control system for three-phase induction motors modeled in Matlab / Simulink and to be integrated into the grid modeled in PowerFactory through the use of an OPC server, allowing the analysis of its possible effects within the electrical environment.

KEYWORDS: metro de Quito, electric traction system, traction motors, vector control, field-oriented control FOC, co-simulation, powerfactory, opc

1. INTRODUCCIÓN

Para finales del año 2019, se prevé que entre en operación la primera línea de metro en la ciudad de Quito, presentándose como una nueva alternativa de transporte público mediante un sistema netamente eléctrico. El Metro de Quito (MQ), primero en su clase en Ecuador, constituye un proyecto de movilidad masiva urbana que proveerá de un sistema de transporte ágil y eficiente a los habitantes del Distrito Metropolitano de Quito. Este sistema atravesará la ciudad desde el extremo sur (Quitumbe) hasta el extremo norte (El Labrador) bajo la superficie, reduciendo sustancialmente los tiempos de movilización de sus habitantes. Entre otros factores, se constituirá en un elemento que permita modernizar y articular el sistema actual de transporte público en la ciudad, convirtiéndose en un agente catalizador del reordenamiento territorial [1].

Dentro del punto de vista técnico, los sistemas eléctricos de movilidad están compuestos por múltiples subsistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos de control que interactúan entre sí durante su funcionamiento. Para el caso puntual del MQ, los estudios previos muestran que estará conformado por: puntos de alimentación o conexión con la Empresa Eléctrica Quito – EEQ, subestaciones de tracción donde se realiza la fase de rectificación AC/DC para la alimentación de los trenes eléctricos, los sistemas de catenarias y el material rodante (vagones de los trenes) dentro de los cuales están dispuestas etapas de potencia, electrónica de potencia y electrónica digital de control para su funcionamiento.

Considerando que los trenes eléctricos del MQ presentan la característica de moverse (cargas móviles) y, que además sus motores de tracción estarán constantemente arrancando o deteniéndose durante las etapas de aceleración o frenado, generarán un efecto significativo sobre la red eléctrica debido a la exigencia de energía durante dichas etapas. Esto dará como resultado que puedan presentarse variaciones de voltaje en los buses AC y DC, además de sobrecargas temporales en equipos de conductores del sistema eléctrico del MQ e inclusive de la EEQ.

Por otro lado, cada uno de los ejes de cada vagón estarán compuestos por sistemas de tracción, mismos que son una composición de subconjuntos eléctricos integrados en diversos cofres. La disposición de los cofres dentro de cada unidad vendrá de acuerdo con un esquema predefinido, tomando en consideración las etapas de potencia, de electrónica de potencia y del control del sistema [2]. El presente trabajo estará enfocado al sistema de tracción, específicamente a los accionamientos eléctricos inmersos, a esquemas de control, al tipo y número de motores controlados por cada convertidor de tracción, y al

esquema referencial proporcionado por la Empresa Pública Metropolitana Metro de Quito (EPMMQ).

Los accionamientos eléctricos se tratan de sistemas que permiten la conversión de energía eléctrica a energía del tipo mecánica. Presentan una regulación de corriente con la finalidad de proporcionar un control de torque del motor. De esta forma, la relación torque/velocidad en el motor tiene la capacidad de igualar en estado estable a la relación característica torque/velocidad de una determinada carga mecánica, obteniéndose una eficiencia energética. Adicionalmente, durante el período transitorio, aceleración y desaceleración, el accionamiento eléctrico tendrá la capacidad de proporcionar una dinámica rápida, permitiendo de esta manera arranques y paradas de manera controlada [3].

Debido a que el motor de inducción presenta una estructura no lineal, y además existe acoplamiento entre el flujo y el torque electromagnético producido, se plantean varios métodos para su desacoplamiento, entre ellos el Control de Orientación de Campo (FOC, por sus siglas en inglés). Dentro del cual, las ecuaciones del motor se las transforma a un sistema de coordenadas arbitrario donde rota en sincronismo con el vector de flujo magnético del rotor, garantizando así un desacoplamiento entre el flujo y el torque, inclusive en la región de debilitamiento de campo [4].

Por otro lado, en la actualidad, el estudio e investigación de las redes inteligentes se presentan como un gran campo de la ingeniería eléctrica, dentro del cual los esquemas de control presentan gran utilidad para el análisis en operaciones dinámicas del sistema, incluyendo cargas móviles como las del MQ. De esta manera, al realizar las variaciones en sus condiciones de operación se podrá analizar el comportamiento del sistema en condiciones dinámicas. En este sentido, se presenta la necesidad de modelar y simular el control de los motores de cada tren del MQ para evaluar el posible impacto dinámico en la red eléctrica, principalmente en los cambios de estados operativos (arranques y paradas), lo cual será abordado en el presente trabajo.

En este contexto, se presenta la necesidad de realizar apropiados estudios del impacto estático y dinámico en la red eléctrica de la puesta en servicio del MQ. Este estudio del Sistema Eléctrico de Potencia se lo realiza en el software especializado PowerFactory de DigSILENT, donde se encuentran debidamente modelados los sistemas eléctricos de la EEQ y del MQ, por parte de la Subgerencia Nacional de Investigación y Desarrollo del Operador Nacional de Electricidad (CENACE) y que han sido utilizados en estudios previos de estado estacionario. La información obtenida acerca del sistema Metro de Quito se da de acuerdo a la cooperación interinstitucional entre CENACE y la Empresa Pública

Metropolitana Metro de Quito, además del convenio entre la Escuela Politécnica Nacional y CENACE para el acceso a dicha información de carácter confidencial. La información concedida es acerca del SEMQ y su modelo en el software especializado PowerFactory, características operativas y constructivas de las unidades de tren provistas por la empresa constructora Construcciones y Auxiliares de Ferrocarriles (CAF) [2], estudios previos acerca del sistema eléctrico realizados por la Consultora Metro de Santiago [1] y estudios previos realizados por CENACE [5][6].

Para el presente trabajo se utilizará un OLE Process Control (OPC), que constituye un estándar de comunicación ampliamente utilizado en el campo del control y supervisión de procesos industriales debido a que facilita la interacción e intercambio de datos entre dispositivos o programas provenientes de distintos fabricantes, específicamente se empleará el OPC denominado MatrikonOPC Server. De esta manera, ya que PowerFactory y Matlab/Simulink admiten el estándar OPC, se puede lograr una interacción entre las simulaciones ejecutadas en cada uno de sus entornos indicados [7].

Complementariamente, el presente trabajo ofrece una forma de simulación y evaluación dinámica para el estudio de sistemas eléctricos de movilidad donde la operación de los motores de tracción presenta un efecto significativo sobre las redes eléctricas. Para el desarrollo del proyecto se hará uso de las herramientas de simulación: PowerFactory para la simulación del sistema eléctrico de potencia del MQ y de la EEQ, Matlab/Simulink para la simulación de los accionamientos eléctricos, así como también, para el control y la operación de los ASM, mientras que MatrikonOPC Server hará la interfaz de comunicación para una o más fuentes de datos mediante el uso de sus protocolos nativos.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este Estudio Técnico es: Modelar y simular el sistema de control de los motores de tracción del Metro de Quito y realizar el análisis dinámico de su operación en la red eléctrica mediante co-simulación entre Matlab/Simulink y PowerFactory de DIgSILENT

Los objetivos específicos de este Estudio Técnico son:

- Realizar un análisis teórico del funcionamiento del sistema Metro de Quito, de las características técnicas y de operación de los motores de inducción trifásicos utilizados para su tracción y los diferentes esquemas de control de mayor uso para el control de este tipo de motores.

- Modelar y simular los accionamientos eléctricos para el control de los motores de inducción trifásicos implementando la técnica de control vectorial FOC en el entorno de Matlab/Simulink.
- Realizar una interfaz de comunicación para la co-simulación dentro de los entornos de simulación Matlab/Simulink y PowerFactory, en base a las configuraciones necesarias para la comunicación con el servidor OPC.
- Simular y analizar el modelo del Sistema Eléctrico del Metro de Quito mediante simulación dinámica (co-simulación Matlab/Simulink y PowerFactory) y bajo distintas condiciones de operación, variación de velocidad, aceleración y freno de los motores de los trenes, analizando los efectos producidos de su operación sobre la red.
- Analizar los resultados obtenidos de la simulación dinámica del modelo del sistema eléctrico del Metro de Quito y la inclusión de los esquemas de control modelados para los motores de inducción trifásicos de los trenes, bajo distintas condiciones de operación dinámica.

1.2 ALCANCE

Se realizará un estudio teórico:

- Del funcionamiento del sistema Metro de Quito, mediante un análisis de las características técnicas, constructivas, y de operación. Describiendo la electrónica de potencia, del control y el tipo de motores que se encuentran implementados en el sistema.
- De los accionamientos eléctricos empleados para el control y operación de motores de inducción trifásicos, con énfasis en los elementos necesarios para su implementación dentro del esquema de un variador de frecuencia.
- De los esquemas de control empleados para el control de motores de inducción trifásicos. Determinando las características necesarias para el diseño del control vectorial FOC para motores de inducción trifásicos.

Se realizará un análisis de las herramientas presentadas por el entorno de simulación para sistemas eléctricos de potencia PowerFactory, con énfasis en las necesidades para el desarrollo del proyecto.

Se realizará un estudio teórico de los tipos de simulación coordinada entre los entornos de simulación Matlab/Simulink y PowerFactory, para de esta manera realizar una elección de la forma más apropiada para una simulación dinámica.

Se realizará el diseño de cada una de las interfaces de comunicación en cada entorno de simulación, Matlab/Simulink y PowerFactory, mediante las configuraciones requeridas por cada una de ellas.

Se modelará y simulará en Matlab/Simulink el modelo de los accionamientos eléctricos y los esquemas de control para los motores de inducción trifásicos.

Se realizará la co-simulación entre los entornos de simulación Matlab/Simulink y PowerFactory a través del uso del servidor OPC.

- Se simulará el intercambio dinámico de datos entre el entorno de simulación Matlab/Simulink y el servidor OPC.
- Se simulará el intercambio dinámico de datos entre el entorno de simulación PowerFactory y el servidor OPC.
- Se simulará el intercambio dinámico de datos entre Matlab/Simulink y PowerFactory a través del servidor OPC.

Se simulará la inclusión de los esquemas de control para los motores de inducción trifásicos en base a la co-simulación de los modelos implementados en Matlab/Simulink y PowerFactory.

Se analizarán los resultados obtenidos de la simulación dinámica del sistema eléctrico del Metro de Quito (SEMQ) con la presencia de los esquemas de control modelados para los motores de inducción trifásicos bajo distintas condiciones de operación, variación de velocidad, aceleración y frenado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE METRO

El Metro a implementarse en la ciudad de Quito se trata de un sistema de transporte masivo de carácter netamente eléctrico. Para su operación requiere un sistema de alimentación eléctrica externa provista de la red y de un sistema de tracción eléctrico para la maniobrabilidad de sus motores.

En cuanto al sistema de alimentación, está compuesto de dos fases, la primera consta de la alimentación desde la red eléctrica provista por las subestaciones de la Empresa

Eléctrica Quito (EEQ) para posteriormente dirigirse a una fase de rectificación AC/DC para la alimentación hacia las catenarias, la misma que es provista por cada una de las subestaciones de tracción del Sistema Eléctrico del Metro de Quito (SEMQ) como un bus DC.

Fase de Alimentación AC (Red Eléctrica EEQ) [1]

Para cubrir los requerimientos de energía del SEMQ, se dispone de cuatro subestaciones de media tensión provistas por la EEQ a un nivel de voltaje de 22.8 kV.

Las subestaciones provistas para este fin son:

- S/E Eugenio Espejo, 138/22.8 kV, capacidad de 33MVA
- S/E Chilibulo, 138/22.8 kV, capacidad de 33MVA
- S/E Vicentina, 138/22.8 kV, capacidad de 33MVA
- S/E Bicentenario, 138/22.8 kV, capacidad de 33MVA

Fase de Rectificación AC/DC (Subestaciones de Tracción)

Para suministrar la energía requerida por el sistema de tracción, una serie de subestaciones de rectificación AC/DC están dispuestas para esta finalidad. Las mismas que alimentan a un sector determinado, de acuerdo a las necesidades de energía requeridas.

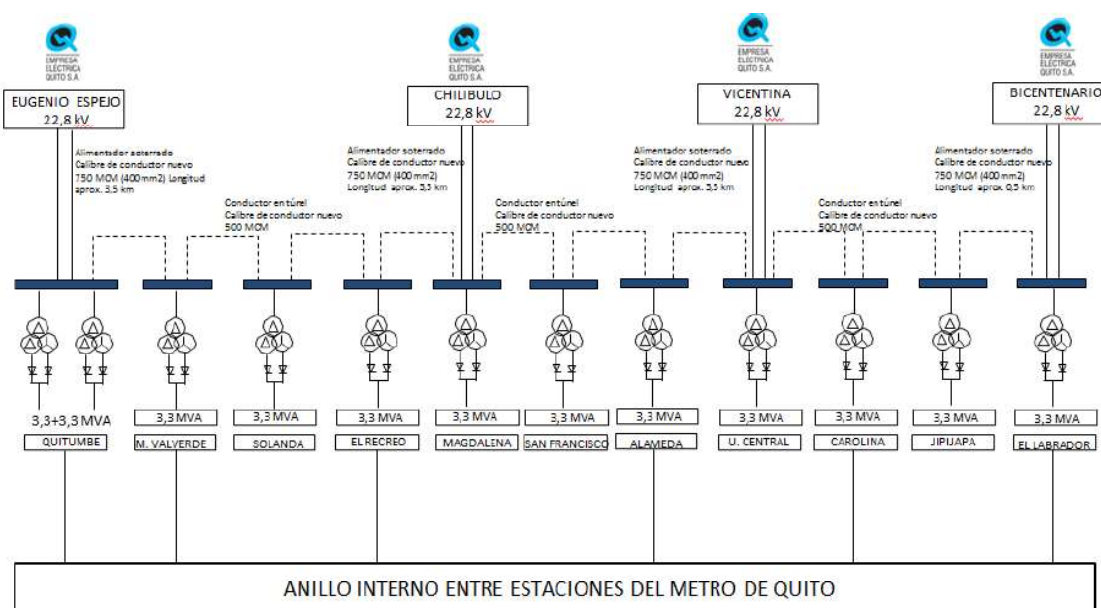


Figura 2.1. Planos de Subestaciones SEMQ [1].

En la Figura 2.1 se detallan las subestaciones provistas por la EEQ con sus niveles de voltaje (22.8 kV), además de las subestaciones de tracción a las cuales se dirige la alimentación de AC. Adicionalmente muestra los transformadores de tracción presentes en las subestaciones de tracción con los valores de potencia aparente (3.3 MVA) diseñados.

La operación de una subestación de tracción se da de la siguiente manera, primeramente, se reduce el voltaje a un nivel que sea apropiado para la operación de la fase de rectificación, en este último se obtiene un nivel de voltaje DC nominal el mismo que alimentará al sistema de catenarias y posteriormente a los motores de tracción.

Para que una subestación de tracción otorgue un suministro adecuado de energía hacia los trenes del Metro las características de potencia y tensión es necesario que posean una capacidad de sobrecarga del 150%, 300% y 450 % para los intervalos de tiempo de una hora, un minuto y diez segundos, respectivamente [8].

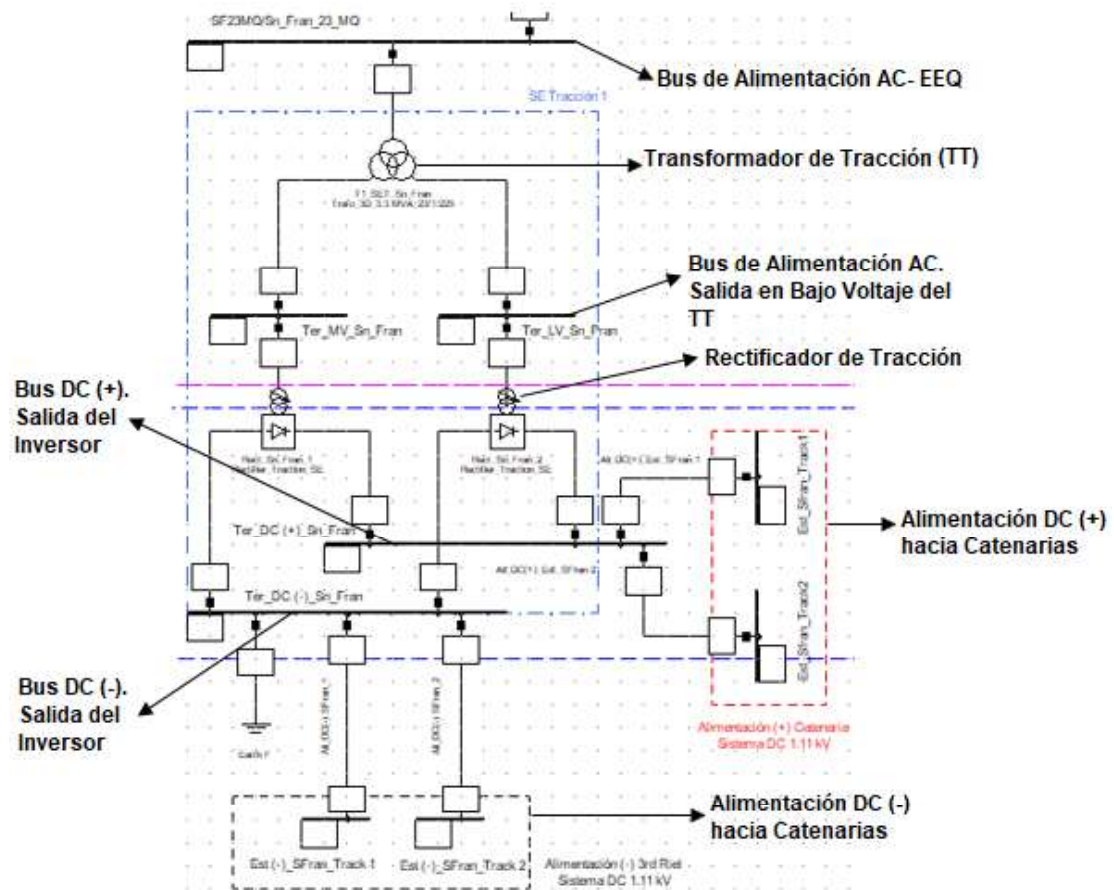


Figura 2.2. Esquema de subestación de tracción modelada en PowerFactory.

En la Figura 2.2, se detalla el esquema de una de las subestaciones de tracción modeladas en PowerFactory. Mostrando las fases de Alimentación AC, Rectificación, y alimentación DC hacia las catenarias, cada una de ellas con sus respectivos elementos tales como: transformadores de tracción, rectificadores de tracción, y buses de alimentación AC y DC.

La alimentación de tracción se dará a un valor de 1500 Vdc desde 11 subestaciones de tracción, las mismas que están detalladas de acuerdo a la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Subestaciones de Tracción [1]

1	Depósito de Quitumbe
2	Estación 2(Morán Valverde)
3	Estación 3 (Solanda)
4	Estación 5 (El Recreo)
5	Estación 6 (La Magdalena)
6	Estación 7 (San Francisco)
7	Estación 8 (La Alameda)
8	Estación 10 (Universidad Central)
9	Estación 12 (La Carolina)
10	Estación 14 (Jipijapa)
11	Estación 15 (El Labrador)

En la Figura 2.3, se detalla el esquema de alimentación hacia las unidades de tren. Mostrando los buses de alimentación DC provistas por las S/E de tracción hacia los buses de catenarias, además de los puntos de alimentación desde las catenarias hacia las unidades de tren, que se las denomina cargas móviles.

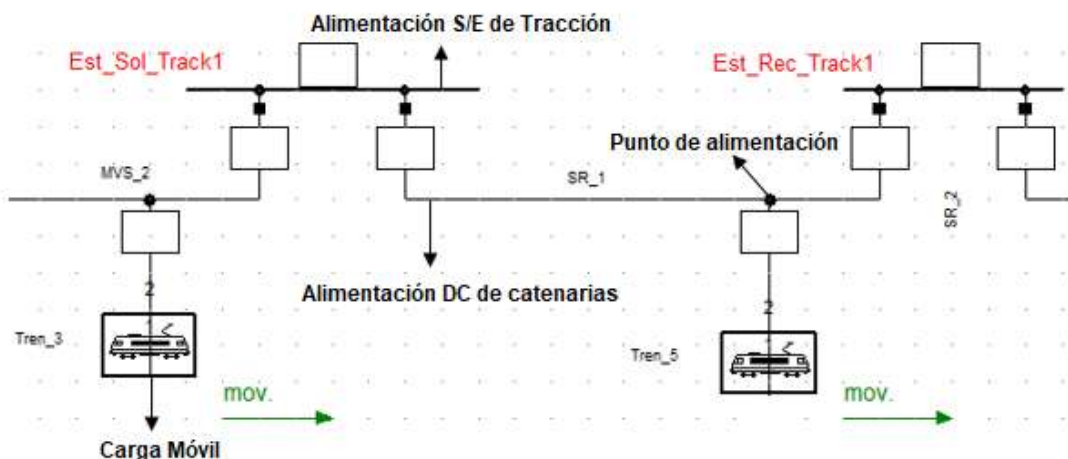


Figura 2.3. Esquema de alimentación a las unidades de tren.

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA UNIDAD DE TREN

Según la información presentada en [2]. De acuerdo al esquema de la Figura 2.4, cada una de las unidades de tren están conformadas por seis coches, los mismos que están acoplados a través de articulaciones. Presenta a cada uno sus extremos una cabina de conducción.



Figura 2.4. Esquema de una unidad de tren [2].

Donde,

RCP: vagón con cabina de conducción.

M: coches remolque intermedios.

M': vagones motor-intermedios.

Adicionalmente, se tiene que tan solo cuatro de los seis vagones son motorizados, los correspondientes a M y M'.

Estructuralmente, cada una de estas unidades estarán compuestas por:

- 4 cofres convertidores.
- 8 cofres de resistencias de frenado.
- 16 motores de tracción.

Cada uno de los cofres convertidores están compuestos por:

- 1 contactor principal.
- 1 circuito de precarga.
- 1 capacitancia de filtro.
- 2 choppers para frenado.
- 1 inversor trifásico.
- Electrónica de control.
- Sistema de refrigeración.

2.3. SISTEMA DE TRACCIÓN

El sistema de tracción es la combinación entre un convertidor de tracción y un motor. Los motores empleados en este tipo de sistemas pueden ser AC o DC. En el caso de los motores de AC, estos pueden ser de tipo síncrono o asíncrono. Para cada uno de los tipos de motor se presenta una característica de esfuerzo de tracción, para lo cual requiere de un sistema de conversión de energía apropiado.

El sistema convertidor tiene como funcionalidad la de acondicionar el voltaje de alimentación hacia los motores que maneja.

En la Figura 2.5 se muestra un esquema de la disposición del sistema de tracción considerando los elementos de alta tensión como son: pararrayos, disyuntores, y pantógrafo. Tomando en consideración tres de los seis vagones (semiunidad) de una unidad de tren.

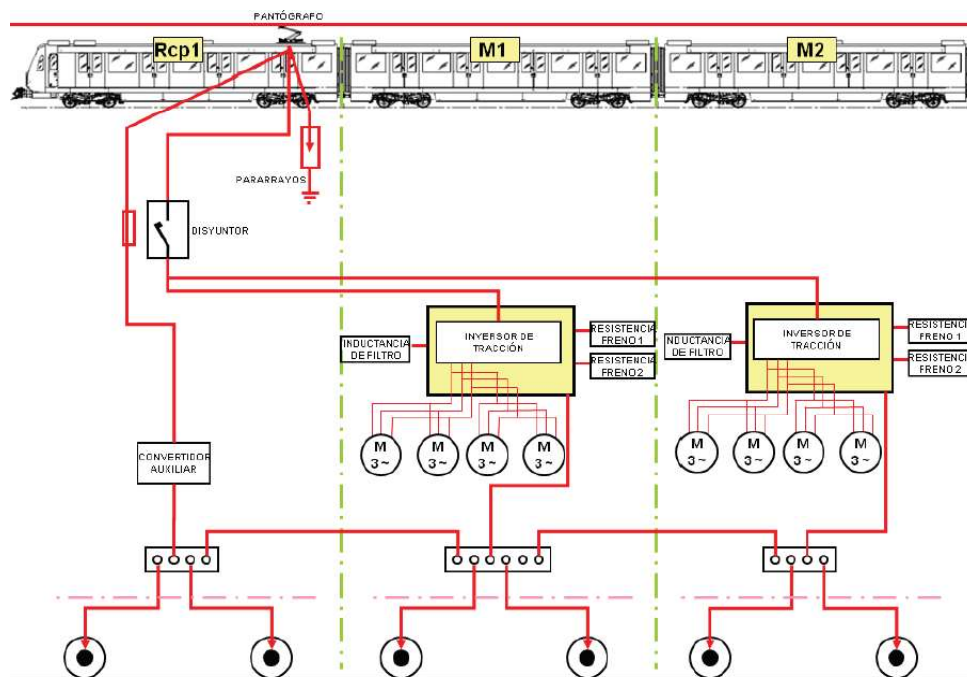


Figura 2.5. Esquema de alta tensión para una semiunidad [2].

La Figura 2.6 presenta el esquema de puesta a tierra considerando elementos tales como: disyuntor, seccionador de puesta a tierra. Considerando a una semiunidad de tren.

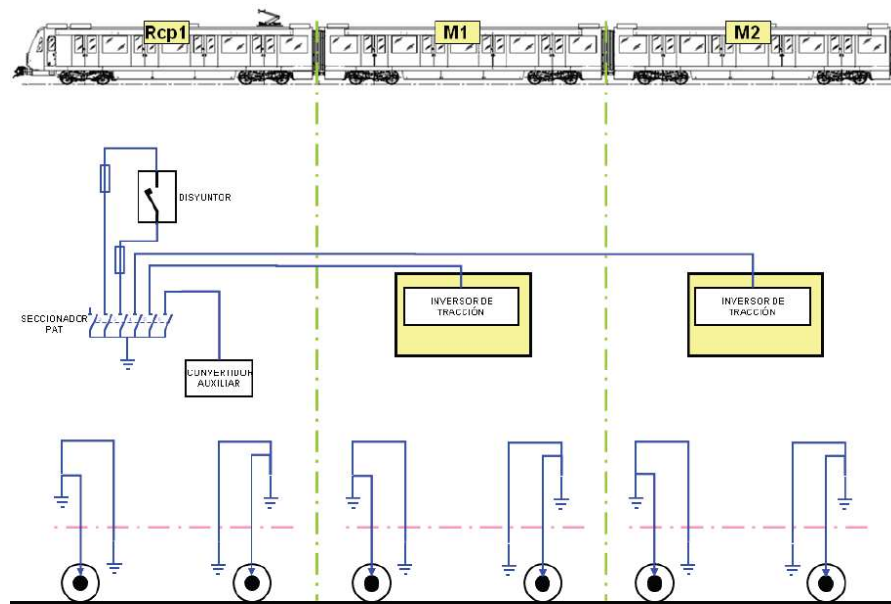


Figura 2.6. Esquema de puesta a tierra AT para una semiunidad [2].

La configuración que maneja para el suministro de energía eléctrica hacia los motores del Metro es de alimentación de tracción tipo AC hacia un motor AC, mediante un bus intermedio de tipo DC, regulado a través del uso de un variador de frecuencia mediante el cual se entrega hacia el motor un voltaje variable [9]. El esquema de esta configuración se observa en la Figura 2.7, en donde se detalla elementos de electrónica de potencia como el inversor, inductancias de filtro, resistencias de freno, motores por convertidor, y elementos de alta tensión.

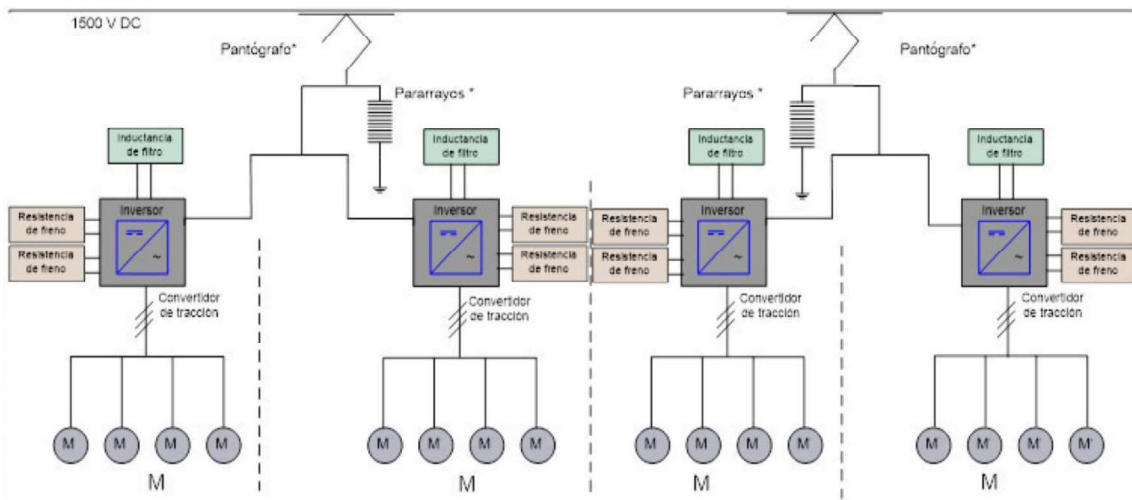


Figura 2.7. Esquema de sistema de electrónica de potencia para una unidad de tren [2].

Convertidor de Tracción [2]

De manera general un convertidor de tracción en una unidad de tren se encarga de suministrar hacia el motor de tracción el voltaje y frecuencia requeridos en las condiciones de operación en las cuales se encuentre.

Los convertidores empleados en las unidades de tren tienen la capacidad de manejar cuatro motores de tracción como conjunto.

A continuación, se detalla de manera general los elementos que constituyen el convertidor de tracción indicando su función dentro del mismo.

Contactador de línea y circuito de precarga [10]

A través de esta etapa se limita la corriente de carga que se presenta en el capacitor en el tiempo de carga. Al instante en el que se realiza energización del sistema el capacitor se encuentra previamente descargado, por lo que se produce un pico de corriente inicial por lo que para proteger a los diodos del puente rectificador y al banco de capacitores se usa un circuito de arranque o de carga inicial. El objetivo de este circuito es que el capacitor proceda a cargarse de forma lenta y suave hasta llegar al valor del voltaje en el bus DC.

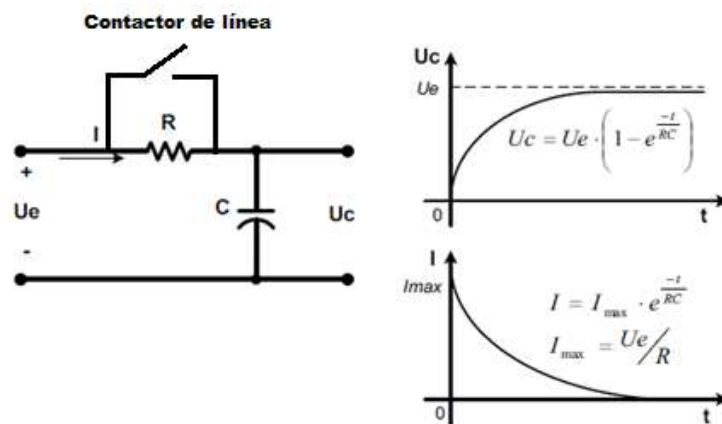


Figura 2.8. Funcionamiento del circuito de carga del capacitor [4].

La carga del capacitor se realizará a través de la resistencia R_c , por lo que el valor de esta estará de acorde al pico inicial de corriente. Entonces al instante en el que la carga comienza a ser constante el relé procede a cortocircuitar la resistencia quedando el bus DC operativo. Así, se presenta un circuito RC durante el proceso de carga, el mismo que se puede observar en la Figura 2.8, que adicionalmente muestra el comportamiento que presenta la corriente y el voltaje durante el proceso de carga.

Filtro de Entrada [2]

Este filtro permite minimizar los efectos de armónicos emitidos hacia la red eléctrica producidos por el sistema de tracción, protegiendo al sistema frente a transitorios de la red, además de limitar la impedancia de entrada. Está constituido por una inductancia en serie junto con un condensador en paralelo (Filtro LC).

Sensado del voltaje y de la corriente [2]

Para realizar la medición de voltajes DC y corrientes tanto DC como AC se dispone de varios sensores de voltaje y corriente en varios puntos del convertidor de tracción.

Los valores obtenidos se envían al sistema de control de tracción para de esta manera realizar las acciones correspondientes sobre procesos como precarga del capacitor del bus, coordinación de protecciones, detección de fallas, control de torque, modulación, etc.

Inversor trifásico

Para un apropiado manejo y operación del motor de inducción el uso de un inversor trifásico es necesario. La funcionalidad del inversor es la de transformar el voltaje de alimentación DC, que en este caso proviene de las catenarias a un voltaje AC, el cual será la alimentación hacia los motores de tracción. Este voltaje será de amplitud y frecuencia variables.

Para que durante la operación del inversor actúe de manera adecuada y eficiente frente a la demanda de potencia por parte de la carga, es decir del motor de inducción, se hace uso de estrategias de control y técnicas de modulación. De esta manera se logra minimizar pérdidas en la carga, así como también de una reducción en la generación de ruido.

Los inversores que se emplean en su mayoría para el manejo de motores son los denominados inversores como fuente de voltaje (VSI, por sus siglas en inglés), debido a su capacidad de controlar el voltaje de salida adaptándose a las condiciones de operación en las cuales se requiere opere la máquina.

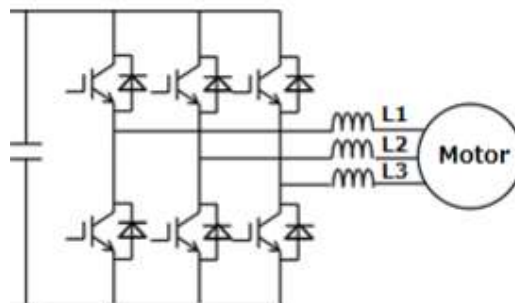


Figura 2.9. Esquema de un Inversor Binivel [11].

En la Figura 2.9 se muestra el esquema de un inversor binivel. En el cual se observa primeramente la presencia de un capacitor en paralelo a la entrada de continua del inversor cuyo valor de capacitancia tiene que ser elevado. Además, cada uno de los ramales presenta dos dispositivos semiconductores. Cada ramal alimenta a su salida a cada una de las fases del motor de inducción.

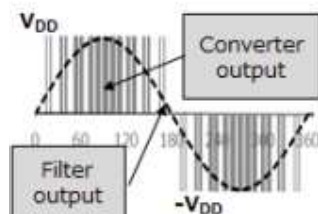


Figura 2.10. Salida de voltaje de un Inversor Binivel [11].

En la Figura 2.10, se observa la señal de voltaje a la salida del convertidor cuyos valores toman ciclos positivos y negativos ($+V_{DD}$ y $-V_{DD}$). Además, la señal a obtenerse al emplear un determinado filtro para acercarse a la forma de una senoidal.

Chopper de freno

Como resultado de la recirculación de la corriente durante la fase de frenado se tiene una corriente circulando en sentido opuesto, lo que se lo denomina también como freno regenerativo. La energía que se produce puede afectar a las etapas previas debido a sus valores altos, por lo que se vuelve necesario tener un mecanismo que permita minimizar o disipar tal energía. El principio sobre el cual se maneja esta etapa es la conversión de energía de frenado generada en energía calorífica cuando dicha energía no puede ser devuelta a la red debido a la falta de receptividad de la catenaria y la no posibilidad de operación en cuatro cuadrantes de la etapa previa de rectificación [2]. Adicionalmente, este mecanismo de chopper DC es activado también en el caso en el cual se produzcan sobretensiones en el circuito intermedio o bus DC dentro del convertidor de tracción. Para el efecto de Chopper DC se utiliza una resistencia como medio de disipación y un circuito de conmutación, el cual justamente se trata de un elemento de “choppeo” o conmutación.

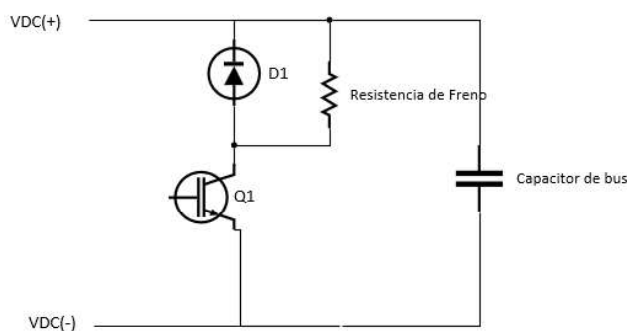


Figura 2.11. Esquema de circuito chopper.

En base a la Figura 2.11, se puede observar que la configuración de un circuito chopper está dada por un circuito de conmutación en base a un elemento de conmutación, IGBT, un diodo para la corriente recirculante, y de una resistencia de disipación.

La protección que presentan los IGBT's de manera térmica es a través de sensores de temperatura, los cuales están dispuestos en el disipador.

Las resistencias de frenado poseen un mecanismo de refrigeración natural.

El frenado regenerativo o freno eléctrico tiene como prioridad evitar la de regeneración sobre la catenaria.

Resistencia de descarga permanente [2]

Su función es la de cortocircuitar el polo positivo con el polo negativo del bus para de esta manera descargar la energía que se encuentra almacenada en los capacitores del bus durante la desenergización del inversor. Se toma en cuenta que el valor de la resistencia (ohms) es considerable, ya que el bus se descarga en menos de 10 minutos a un valor de voltaje menor que 60 V, esto en referencia al voltaje de bus nominal.

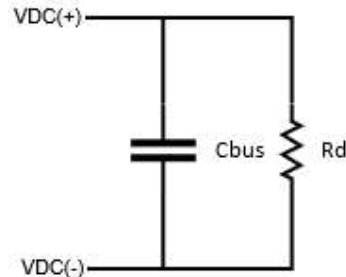


Figura 2.12. Esquema de circuito de descarga del Capacitor de bus.

En la Figura 2.12 se muestra que la resistencia de descarga se encuentra en paralelo al capacitor de bus, de esta forma se obtiene la disipación de energía del capacitor. El tiempo de descarga depende del valor de la resistencia Rd.

Busbar [2]

Se encuentra presente en el núcleo del inversor y su función es la de ser el interfaz de conexión entre el capacitor de bus y los semiconductores del inversor, es decir es el Bus DC.

Unidad de control [2]

Realiza las funciones de gestión de cada uno de los elementos constitutivos del sistema. Basado en la plataforma de control VEGA (Vehicle Electronics for Generic Applications). El cual se trata de un sistema netamente para aplicaciones de tipo ferroviario en función de cada uno de los requerimientos en cuanto a electrónica y a control de torque y velocidad.

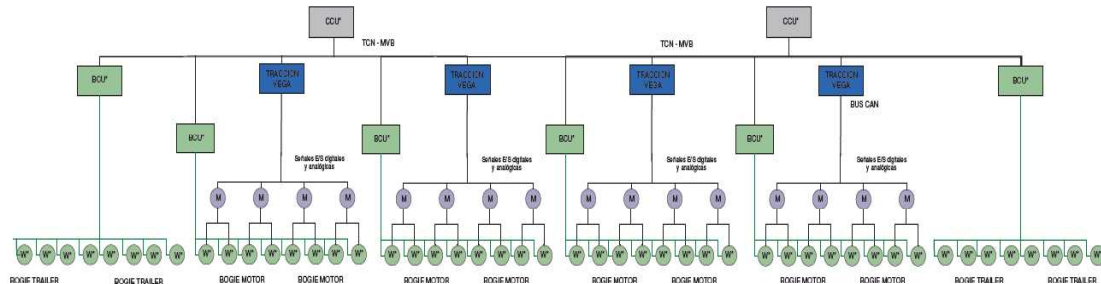


Figura 2.13. Esquema general de la arquitectura de control [2].

Por lo tanto, implementa funciones de control de par de tracción, freno, modos de conducción, lectura de sensores, control de contactores, disyuntores, IGBT's, modulación, etc., y su configuración se detalla en el esquema de la Figura 2.13.

Bogie [12]

Comprende una parte esencial de una unidad de tren en cuanto a su sistema de transmisión y mecanismo de guía. Tienen la capacidad de soportar la masa del vehículo, mediante sus ruedas y lo guía a lo largo su recorrido, proporciona en cierta forma amortiguación contra golpes transmitidos durante su movimiento a través de los rieles.

Permiten además funciones de transporte, los que se denominan bogies remolque. Tanto los bogie motor y remolque se encuentran operando bajo el control del sistema de frenos del tren.

Estructuralmente, el bogie presenta un par de ruedas fijados de manera rígida a un eje formando lo que se denomina un juego de ruedas. Estas son presionadas sobre el eje de manera que giren juntas. Por lo general un bogie está conformado por dos juegos de ruedas. El bogie está montado por debajo de un vagón de las unidades de tren de manera ordenada, con el fin de apoyar y servir de guía a lo largo de los rieles.



Figura 2.14. Estructura física de un bogie motor. Vista frontal [12].

En la Figura 2.14 se muestra un bogie motorizado, aunque se trata de una imagen referencial, se visualiza a breves rasgos sus características principales.

Motores por Coche Motriz

Una unidad de tren presenta dos motores por bogie motorizado. Se encuentran suspendidos en el bogie. El esfuerzo se transmite a través de los acoplamientos que existen entre la caja reductora y el motor.

En el esquema de la Figura 2.15 se muestra como están dispuestos los cuatro motores en los bogies motorizados, además indica como este conjunto de motores son manejados por el controlador de tracción (Tracción VEGA).

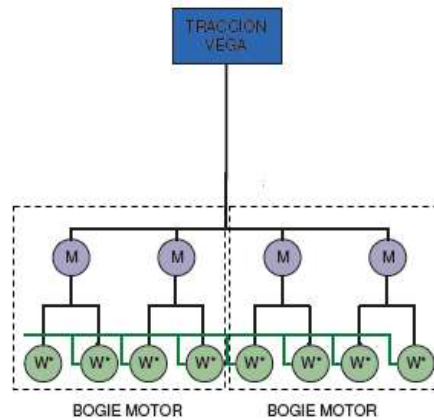


Figura 2.15. Esquema de disposición de motores por coche motriz [2].

2.4. MOTOR TRIFÁSICO ASÍNCRONO O DE INDUCCIÓN TIPO JAULA DE ARDILLA

La principal característica que presenta un motor asíncrono o de inducción es de que el rotor no llega a presentar la misma frecuencia de giro que la del campo magnético del estator.

Un motor de inducción está constituido por dos partes, las cuales son fundamentales para su operación:

- **Estator.** – se tienen chapas de acero laminadas. En la periferia de su interior están dispuestas de ranuras en donde se sitúa un devanado trifásico distribuido. Al ser alimentado por una corriente trifásica se logra obtener un flujo magnético que gira, cuya amplitud permanece constante.

- **Rotor.** – está constituido por chapas que se encuentran apiladas de manera que forman un cilindro. Presentan ranuras en la circunferencia exterior en las cuales se coloca el devanado.

La denominación de jaula de ardilla se da gracias a la disposición de sus devanados en el rotor. Presenta una serie de barras conductoras que se encuentran dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y en cortocircuito a través de anillos para el efecto en parte de uno de sus extremos [13].

Este tipo de motores presentan gran aplicabilidad en la industria y en sistemas de transporte eléctrico, debido a las ventajas que presenta frente a los motores de continua.

Circuito Equivalente

En el estudio de máquinas eléctricas el uso de esquemas simplificados y equivalentes permiten representar cada uno de los parámetros de la máquina facilitando la realización de cálculos y análisis. De manera que cálculos como de las pérdidas por Joule en el estator y rotor, pérdidas en el entrehierro pueden ser efectuados.

Para la obtención del circuito equivalente, se parte del modelo del circuito equivalente del transformador, el cual está representado en la Figura 2.16.

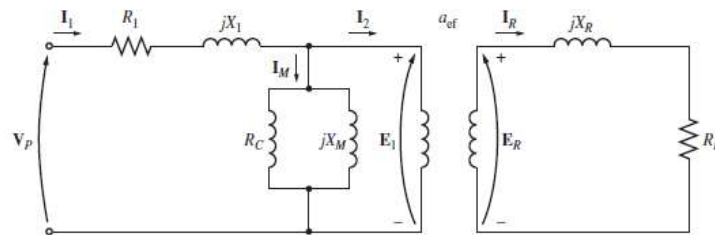


Figura 2.16. Circuito equivalente por fase modo transformador de motor de inducción [13].

Debido a que la operación del motor de inducción depende de la inducción de voltajes y corrientes desde el estator hacia el rotor, se produce un efecto de acción transformadora [13].

Dentro del circuito equivalente tipo transformador tomado por fase se puede observar parámetros como de resistencia y autoinductancia o inductancia propia en los devanados del estator.

Para obtener un esquema más simplificado se requiere referir la parte del rotor al lado del estator o viceversa, para el caso de estudio se emplea el circuito equivalente referido al

estator. Cabe recalcar que es un circuito equivalente por fase, considerando que para obtener los voltajes y corrientes de las otras fases se realiza un desplazamiento de fase de las fases ($\pm 120^\circ$) que sean consideradas.

En base a las consideraciones anteriormente mencionadas se tiene el circuito equivalente que se muestra en la Figura 2.17.

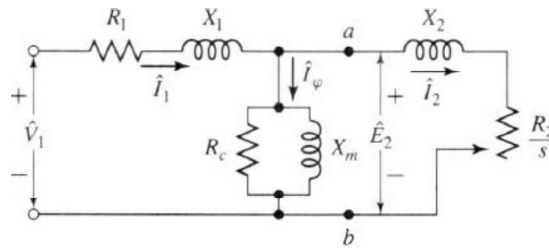


Figura 2.17. Circuito equivalente por fase de motor de inducción referido hacia el estator[14].

El voltaje (Ecuación 2.1) en los terminales del estator difiere al producido por la fuerza contraelectromotriz debido a que se produce una caída de voltaje en la impedancia de dispersión del estator. La expresión del voltaje en los terminales del estator [14] está dada por:

$$\widehat{V}_1 = \widehat{E}_2 + \widehat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (2.1)$$

Donde:

\widehat{V}_1 : Voltaje de fase en el estator.

\widehat{E}_2 : Fuerza contraelectromotriz.

\widehat{I}_1 : Corriente del estator.

R_1 : Resistencia del estator.

X_1 : Reactancia de dispersión del estator.

Torque y Momento de Inercia del motor de inducción

En el proceso de arranque el motor de inducción desarrolla un torque que supera al torque resultante de los siguientes torques resistentes: torque de carga mecánica, torque de inercia que es propio del rotor y la carga mecánica, y el torque de rozamiento.

De esta manera se tiene la expresión:

$$M_m = M_L + \frac{d}{dt} ([J + J_L] \cdot \omega) + B \cdot \omega \quad (2.2)$$

Donde:

M_m : Torque de la máquina (N.m).

M_L : Torque de carga mecánica (N.m).

J : Momento de inercia del motor (Kg.m²).

J_L : Momento de inercia de la carga mecánica (N.m).

B : Coeficiente de rozamiento.

ω : Velocidad angular en el eje (rad/s).

Para efectos de simplicidad se desprecia el valor del coeficiente de rozamiento, es decir $B=0$.

Dentro del análisis se toma el valor del momento de inercia total J_T del conjunto del accionamiento, es decir, del valor del momento de inercia del motor más el valor del momento de inercia de la carga mecánica, es decir la influencia del peso del vagón en el eje del motor, o sea $J + J_L$. Otra consideración que se realiza es que el momento de inercia es invariante en el tiempo [15]. En base a los criterios anteriormente mencionados la expresión del torque de la máquina de la Ecuación 2.2 [15] quedará como:

$$M_m - M_L = J_T \frac{d\omega}{dt} \quad (2.3)$$

Como se observa el momento de inercia está directamente relacionado con el torque de la máquina en los intervalos de aceleración y desaceleración, por ende, conocer el valor de este parámetro es necesario.

Existen diversos estudios en los cuales para el cálculo del momento de inercia emplean las características, constructivas y eléctricas, un análisis comparativo en base a estos parámetros está desarrollado en [15].

Operación en cuatro cuadrantes del motor de Inducción

La realización de la curva de operación del motor de inducción se basa en las características de torque-velocidad, tal como se muestra en la Figura 2.18. La operación del motor está de acuerdo a las exigencias de carga al eje del motor dentro de la operación en cuatro cuadrantes [16].

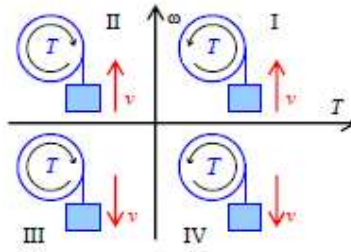


Figura 2.18. Operación en cuatro cuadrantes del motor de inducción [16].

La operación en cuatro cuadrantes brinda la capacidad de operación en aplicaciones de alta dinámica en las cuales se requiere arranques y paros de manera continua. Si dentro de la operación se requiere bajar la velocidad o detenerse, la operación recomendada es de modo generador, lo que evita que el motor se detenga de forma abrupta de su fuente de alimentación con los riesgos que conlleva esta acción. En este modo la máquina transfiere la energía cinética que almacena hacia la fuente, de esta manera se logra un ahorro de energía logrando un modo de descanso rápido y seguro. Para que la máquina pase del modo motor al modo generador se tiene que el flujo de energía requiera una inversión desde la máquina a la fuente, a este fenómeno se denomina freno regenerativo. La acción del frenado se realiza a través del proceso de regeneración, dándose lugar a un torque negativo de la máquina [17].

La operación en modo motor se da en los cuadrantes I y III. En el segundo cuadrante se da la operación de regeneración en su modo generador. Para el cuarto cuadrante se da el mismo modo de generador, pero en cambio con sentido de velocidad contrario.

En el modo de operación de motor el torque generado en la máquina está a favor del movimiento de la máquina, lo contrario a lo que ocurre en el modo generador en el cual la máquina genera torque impidiendo de esta manera el movimiento del mecanismo.

En base a las características de torque-velocidad del motor de inducción se presentan limitaciones en la operación de este considerando las características constructivas y eléctricas que presenta. En condiciones nominales de operación el torque nominal M_n se desarrolla cuando la máquina se encuentra a velocidad angular nominal ω_n y a su potencia nominal P_n de acuerdo con la expresión $M_n = \frac{P_n}{\omega_n}$. Dentro del área que se genera entre estos puntos de operación la máquina puede operar a torque constante.

Para que la máquina opere a una velocidad mayor a la nominal y que la potencia se mantenga a un valor constante en su operación el torque se disminuye en su valor, con lo que se da a lugar una operación a alta velocidad mayor a la nominal. Como restricción ante esta operación se da en cuanto a la velocidad máxima que pueda soportar de manera

mecánica la máquina, la misma que no puede exceder al doble de la velocidad nominal, según datos típicos de los fabricantes de motores.

En cuanto a las restricciones de torque dependerán de la capacidad de sobrecarga máxima que pueda soportar el motor. Otra característica de operación de un motor es que puede trabajar de manera continua dentro del rango de su corriente nominal a plena carga [16], tal como se muestra en la Figura 2.19 en color azul.

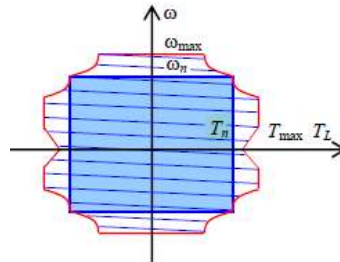


Figura 2.19. Curva de restricciones de operación torque-velocidad [16].

Modelo Matemático del motor de inducción [4][17]

El modelo matemático del motor de inducción se trata de un sistema de ecuaciones dentro del cual se asume:

- El sistema motor de inducción trifásico es simétrico.
- En cuanto a los armónicos se considera tan solo el fundamental, para el caso de la distribución especial del campo y de la fuerza magnetomotriz (fmm) en el entrehierro.
- Dentro del análisis efectos como anisotropía, saturación magnética, pérdidas en el hierro y corriente de Eddy no se los considera.
- Los parámetros resistencias y reactancias de las bobinas se toman como valores constantes, independientes de la temperatura y de la saturación magnética respectivamente.

Para la representación del modelo de la máquina de inducción se hace uso de vectores espaciales o fasores espaciales, con lo que se obtiene entre tantas ventajas la reducción del número de sus ecuaciones dinámicas, capacidad de análisis mediante cualquier forma de onda de una fuente de voltaje, además de la posibilidad de representar las ecuaciones mediante varios sistemas de coordenadas rectangulares.

Inicialmente dentro del modelado del motor de inducción se tienen las ecuaciones dinámicas de voltaje dentro del sistema de referencia síncrono rotatorio dadas por la matriz dinámica de voltajes de la Ecuación 2.4 [17].

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s & pL_m & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s + pL_s & \omega_e L_m & pL_m \\ pL_m & -\omega_{sl} L_m & R_r + pL_r & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} L_m & pL_m & \omega_{sl} L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Además, se tiene que:

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (2.5)$$

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (2.6)$$

$$\omega_{sl} = \omega_e - \frac{p}{2} \omega_r \quad (2.7)$$

En el caso del torque electromagnético y de la dinámica del rotor se siguen las siguientes expresiones:

$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}) \quad (2.8)$$

$$T_e = T_L + B\omega_r + Jp\omega_r \quad (2.9)$$

Donde

v_{ds}, v_{qs} : voltajes del estator en el sistema de referencia de ejes d-q.

i_{ds}, i_{qs} : corrientes en el estator en el sistema de referencia de ejes d-q.

i_{dr}, i_{qr} : corrientes en el rotor en el sistema de referencia de ejes d-q.

L_s, L_r, L_m : Inductancias del estator, del rotor y mutua.

L_{ls}, L_{lr} : Inductancias de fuga o de dispersión del estator y del rotor.

$\omega_r, \omega_e, \omega_{sl}$: velocidades del rotor, síncrona y de deslizamiento.

ψ_{dr}, ψ_{qr} : Flujos de acoplamiento del rotor en los ejes d-q.

T_e : Torque electromagnético.

T_L : Torque de carga.

B : Coeficiente de amortiguamiento del rotor.

J : Momento de inercia.

P: número de polos.

p : Operador diferencial.

2.5. CONTROL VECTORIAL PARA MOTORES DE INDUCCIÓN

De manera general, la implementación de controladores de tipo vectorial presenta un alto rendimiento e incurre en la necesidad de sistemas de control de alto costo computacional. El objetivo de este tipo de controladores es el de realizar control sobre el torque y la velocidad.

En base a los esquemas de control vectorial el análisis del modelo no lineal del motor de inducción se reduce hacia una estructura de control lineal.

Dentro del control vectorial los métodos de control empleados están el Control por orientación de campo (FOC) y la técnica de Control directa de torque (DTC). Para el presente estudio el enfoque está dirigido hacia el control vectorial FOC.

Analogía del modelo lineal del motor de inducción con el modelo de un motor DC [18]

Para realizar el análisis del modelo análogo del motor de inducción se parte de los parámetros constructivos del motor DC. En donde, el flujo de campo ψ_f se produce debido a una interacción perpendicular entre la corriente de campo I_f y el flujo en la armadura ψ_a . Este último, además, es producido por la corriente de armadura I_a .

Todos estos parámetros expresan los vectores de espacio de manera estacionaria en el espacio, que son dispuestos de manera ortogonal o desacoplada. Para realizar control sobre el torque mediante la corriente de armadura I_a , el flujo de campo no se verá afectado de esta formase obtiene una mejor respuesta transitoria y una alta relación torque /corriente en base al valor nominal del flujo de campo.

La ventaja que presenta el desacoplamiento es que cuando se realiza control sobre la corriente de campo su efecto tan solo se verá reflejado sobre el flujo de campo y no sobre el flujo de armadura.

En relación con lo anterior, el rendimiento que se obtiene en un motor DC debido al desacoplamiento se puede extender al estudio de un motor de inducción. Para ello se considera un sistema de referencia rotatorio sincrónico de ejes q-d, dentro del cual las variables sinusoidales se verán reflejados como cantidades DC en estado estable.

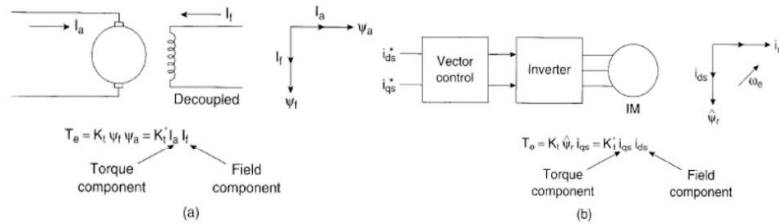


Figura 2.20. (a) Esquema de Motor DC de excitación independiente. (b) Motor de inducción con control vectorial [18].

En Figura 2.20 (b) se visualiza que la corriente del estator se representa en dos componentes que son de eje directo-d (i_{ds}) y de eje de cuadratura-q (i_{qs}). Estos ejes como ya se mencionó se trata de un sistema rotacional sincrónico.

En el marco del control vectorial cada una de estas componentes tiene su equivalente análogo a lo que el modelo del motor DC se refiere, por lo que la componente i_{ds} tiene como análogo a la corriente de campo I_f y la componente i_{qs} tiene como componente análogo a la corriente de armadura I_a . De esta manera se realiza control de torque a través de la componente i_{qs} sin que se afecte a la componente i_{ds} , de la misma manera se realiza control de flujo a través de la componente i_{ds} sin que su efecto se vea reflejado sobre i_{qs} .

Análisis del circuito Equivalente y diagrama fasorial para control vectorial [18]

Para conocer de mejor manera el concepto de orientación vectorial se hace uso del circuito equivalente y de diagramas fasoriales espaciales.

Para el efecto se toma como referencia que los valores rms de voltaje y de corriente serán ocupados por los valores picos (valores vectoriales sinusoidales).

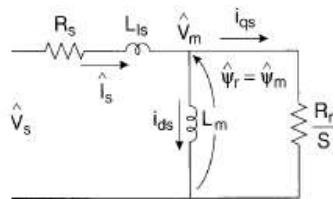


Figura 2.21. Circuito equivalente complejo (q-d) referido al estator en estado estable (sin tomar en cuenta la inductancia de fuga del rotor) [18].

La Figura 2.21 muestra la forma compleja del circuito equivalente en condiciones de estado estable relacionando las componentes d-q.

La omisión de la inductancia de fuga, lo cual se realiza por efectos de simplificación, da lugar a que el flujo de rotor $\hat{\psi}_r$ sea el mismo para el caso del flujo en el entrehierro $\hat{\psi}_m$.

Además, la magnitud de la corriente del estator \hat{I}_s expresada en función de sus componentes d-q en base a la Ecuación 2.10 [18].

$$\hat{I}_s = \sqrt{i_{ds}^2 + i_{qs}^2} \quad (2.10)$$

En donde, i_{ds} es la componente de magnetización de la corriente del estator que circula a través de la inductancia L_m y i_{qs} es la componente de torque con relación a la corriente del estator que circula en el circuito del rotor.

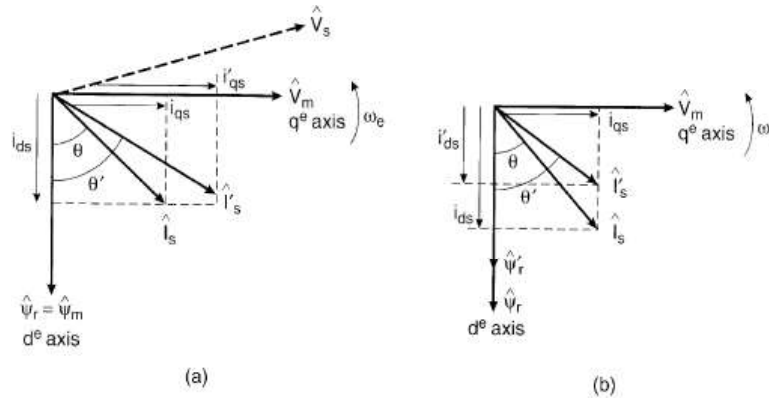


Figura 2.22. Diagramas fasoriales en términos de valores de pico. (a) Incremento de la componente vectorial de torque de la corriente del estator. (b) Incremento de la componente vectorial de flujo de la corriente del estator [18].

Tomando como referencia la Figura 2.22 (a) se observa de manera fasorial que el aumento de la componente i_{qs} del estator para un incremento de torque se lo puede realizar manteniendo el flujo constante. Para la Figura 2.22 (b) se observa que al realizar debilitamiento del flujo se reduce la componente i_{ds} de la corriente del estator.

En el análisis fasorial se dispone que la componente i_{qs} de la corriente que está relacionada al torque contribuye a la potencia activa a través del entrehierro, en cuanto a la componente i_{ds} relacionada al flujo influye en la potencia reactiva

2.5.1. CONTROL VECTORIAL FIELD ORIENTED CONTROL (FOC)

Este esquema de control se emplea en aplicaciones en las cuales se requiere un alto rendimiento y una respuesta rápida (condiciones de aceleración y desaceleración) en el motor de inducción ya que permite operar en un amplio rango de velocidades, que inclusive a velocidad cero, con un torque completo de la máquina.

El control FOC realiza control sobre el par y la velocidad basado en el estado electromagnético del motor de inducción. Además, presenta un desacoplamiento de

manera vectorial a la corriente del estator en componentes que están relacionadas con las variables de flujo y torque.

Debido que se trata de un control desacoplado, se obtiene un rendimiento apropiado a bajas velocidades ya que el estado de magnetización que se obtiene en la máquina se mantiene de manera óptima, de esta manera se logra regular la velocidad a partir del control del torque en esas condiciones [19].

Principio de operación

El esquema de control vectorial FOC realiza control sobre las corrientes del estator representándolas mediante un vector. Realiza proyecciones con el objetivo de transformar un sistema trifásico que depende del tiempo y la velocidad a un sistema que sea invariante en el tiempo representado por dos coordenadas d y q. En base a estas proyecciones se conduce la estructura análoga a la del motor DC.

A su entrada requiere de las variables de referencia del componente de torque, que se encuentra alineado a la coordenada q y la componente de flujo, que se encuentra alineada a la coordenada d.

Las variables trifásicas del motor de inducción ya sean voltajes trifásicos, corrientes y flujo se pueden analizar en forma de vectores espaciales complejos. De esta forma, las corrientes instantáneas de fase del estator i_a, i_b, i_c se representa como vector corriente del estator dada por la Ecuación 2.11.

$$\hat{i}_s = i_a + i_b e^{j2\pi/3} + i_c i_b e^{j4\pi/3} \quad (2.11)$$

A partir de la representación del vector espacial se obtiene el sistema sinusoidal trifásico. Para este efecto se realiza la transformación hacia un sistema invariante del tiempo. La transformación que se efectúa se divide en dos fases, la primera se trata en generar un sistema variante en el tiempo de dos coordenadas (a, b, c) \rightarrow (α , β) a esta fase se aplica la denominada transformación de Clarke. Para la segunda fase se obtiene un sistema invariante en el tiempo de dos coordenadas (α , β) \rightarrow (d, q) que se denomina transformación de Park [19].

Proyección (a, b, c) \rightarrow (α , β). Transformada de Clarke

Las variables trifásicas del motor de inducción de fases a, b, c, en cuanto a voltajes y corrientes que son variables en el tiempo se transforman en variables de dos fases a través de un procedimiento matemático. Las variables resultantes será variantes en el tiempo

cuyas fases son α , β que se obtienen a través de la matriz de transformación de Clarke dada por la Ecuación 2.12 [19].

$$i_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} -1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Para obtener el diagrama vectorial se toma como referencia que el eje α se encuentra en la misma dirección del eje a y que el eje β es ortogonal a ellos, lo cual se puede observar en el diagrama de la Figura 2.23. A partir de la proyección que se realiza, el sistema trifásico incurre en una modificación hacia un sistema ortogonal de dos coordenadas (α , β).

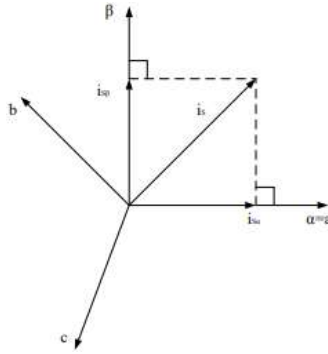


Figura 2.23. Diagrama vectorial de la corriente del estator [19].

El sistema actual tendrá dependencia del tiempo y de la velocidad. Teniéndose la componente α de corriente del estator [19] dada por la Ecuación 2.13.

$$i_{\alpha s} = i_a \quad (2.13)$$

La Ecuación 2.14 referida a la componente β de la corriente del estator [19].

$$i_{\beta s} = \frac{i_a}{\sqrt{3}} + \frac{2i_b}{\sqrt{3}} \quad (2.14)$$

Proyección (α , β) \rightarrow (d,q). Transformada de Park.

A partir del sistema ortogonal (α , β) la transformada lo modifica a un sistema de referencia rotatorio d , q , el cual se lo representa en el diagrama de la Figura 2.24. De la misma manera que la transformada anterior, la transformación se realiza a partir de la matriz de transformación de Park dada en la Ecuación 2.15.

$$i_{dq0} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

El ángulo θ es el ángulo entre los sistemas de coordenadas rotativo y fijo, además de indicar la posición del flujo magnético del rotor.

El efecto de la transformada se visualiza en base al diagrama vectorial a continuación:

Para determinar las componentes vectoriales de la corriente del estator, torque y flujo, se las determina a través de la Ecuación 2.16.

$$i_{ds} = i_{\alpha s} \cos\theta + i_{\beta s} \sin\theta \quad (2.16)$$

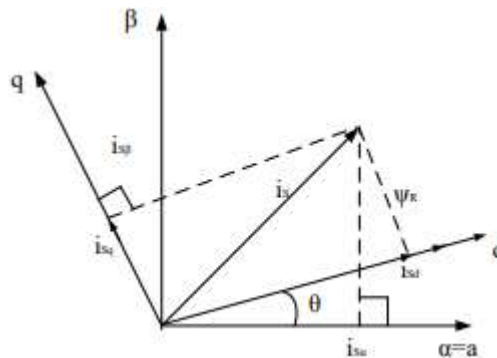


Figura 2.24. Diagrama vectorial en el sistema de coordenadas d-q de la corriente del estator [19].

Al visualizar las dos expresiones mostradas se puede indicar que, al conocerse la posición del flujo del rotor, las componentes d y q de la corriente pueden ser obtenidas. De esta forma se puede realizar control sobre el flujo de manera directa ya que la componente de flujo i_{ds} y la de torque i_{qs} no presentan dependencia en ese instante [19].

Las señales $\sin\theta_s$ y $\cos\theta_s$ útiles dentro del esquema de control se las genera a través de realimentación.

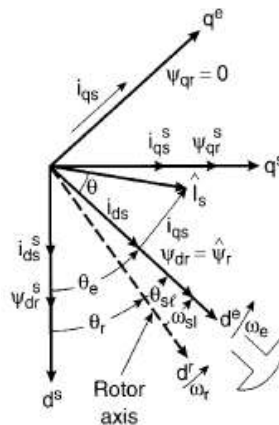


Figura 2.25. Diagrama vectorial del control FOC[18].

El esquema se basa en que los ejes $d^s - q^s$ (ejes α - β) se encuentran fijos al estator, en cambio los ejes $d^r - q^r$ serán los que están fijos al rotor, de esta manera se encuentran girando a velocidad ω , lo cual está representado en el diagrama de la Figura 2.25.

Además de los ejes mencionados, los ejes $d^e - q^e$ (ejes d-q) se presentan como ejes rotantes a velocidad sincrónica, por lo que en relación a los ejes $d^r - q^r$ se encuentran con un adelanto equivalente al ángulo θ_{sl} que es correspondiente a la frecuencia de deslizamiento ω_{sl} . El direccionamiento del eje d^e se da desde el polo del rotor, de esta forma se tiene que $\omega_s = \omega + \omega_{sl}$. Obteniéndose la Ecuación 2.17.

$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int (\omega + \omega_{sl}) dt = \theta + \theta_{sl} \quad (2.17)$$

La componente i_{ds} de la corriente del estator se encuentra alineada al eje d^e , en cuanto a la componente i_{qs} está alineada al eje q^e . Las expresiones vectoriales considerando lo anterior están dadas por [4]:

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + (\omega_r - \omega_e) \psi_{qr} \quad (2.18)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.19)$$

Dentro del control en base a desacoplamiento se emplea las ecuaciones de control derivadas con relación a los circuitos equivalentes en coordenadas d-q.

Para el caso del acoplamiento de flujo tanto en el eje d como en el q se tiene las siguientes expresiones:

$$\psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.20)$$

$$\psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.21)$$

En base a las anteriores expresiones se puede despejar los valores de i_{dr} y i_{qr} , con lo que se obtiene:

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \quad (2.22)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \quad (2.23)$$

Para las Ecuaciones 2.18 y 2.19 donde las corrientes del estator no tienen accesibilidad se las elimina con la ayuda de las Ecuaciones 2.22 y 2.23. Además, se puede simplificar la

expresión $\omega_e - \omega_r$ por ω_{sl} . Por lo cual las Ecuaciones de las corrientes en el eje d y q quedarían de la siguiente forma:

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r}\psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r}R_r i_{ds} - \omega_{sl}\psi_{qr} = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} + \frac{R_r}{L_r}\psi_{qr} - \frac{L_m}{L_r}R_r i_{qs} + \omega_{sl}\psi_{dr} = 0 \quad (2.25)$$

En relación con el control con desacoplamiento se requiere que:

$$\psi_{qr} = 0 \text{ y } \frac{d\psi_{qr}}{dt} = 0$$

De esta forma se condiciona a que el flujo total del rotor $\widehat{\psi}_r$ esté referida sobre el eje d^e . Reemplazando estas condiciones simplificando las expresiones de las Ecuaciones 2.24 y 2.25, además de sustituir $\widehat{\psi}_r$ por ψ_{dr} se obtiene las expresiones:

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d\widehat{\psi}_r}{dt} + \widehat{\psi}_r = L_m i_{ds} \quad (2.26)$$

$$\omega_{sl} = \frac{L_m R_r}{\widehat{\psi}_r L_r} i_{qs} \quad (2.27)$$

Al considerar la condición de que el flujo del rotor $\widehat{\psi}_r$ es un valor constante, la Ecuación 2.24 de manera simplificada quedaría finalmente como muestra a Ecuación 2.28.

$$\widehat{\psi}_r = L_m i_{ds} \quad (2.28)$$

Esto indica que en estado estable el flujo en el rotor tendrá una relación proporcional a la corriente i_{ds} .

Para realizar la implementación del esquema de control vectorial FOC se toma las expresiones de las Ecuaciones 2.17 y 2.28.

Para la implementación del esquema de control vectorial FOC se requiere de una realimentación de velocidad, es decir un sensor de velocidad en base al cual se obtiene la velocidad de giro del rotor del motor ω . Considerando este valor y el de la frecuencia de deslizamiento se aplica la Ecuación 2.17 que permite determinar el valor de θ_s , consecuentemente las señales de $\cos\theta_s$ y $\sin\theta_s$.

2.6. OLE FOR PROCESS CONTROL (OPC)

Es un estándar de comunicación que permite un intercambio de datos dentro de un entorno de automatización industrial. Una de las principales ventajas es que tiene una plataforma

independiente con lo que permite la integración de dispositivos de distintos fabricantes. El desarrollo y mantenimiento de OPC está a cargo de OPC Foundation [20].

Arquitectura

OPC integra un interfaz estandarizado. Las aplicaciones son de tipo cliente-servidor, lo cual permite la comunicación entre dispositivos conectados al interfaz [21].

El interfaz cliente-servidor permite la interacción y acceso a datos en tiempo real, tal como se muestra en la Figura 2.26.

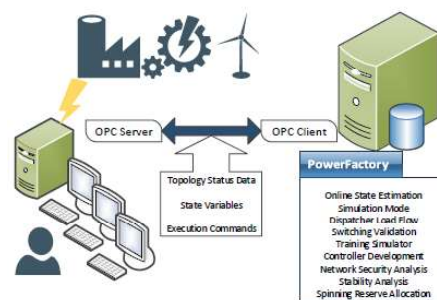


Figura 2.26. Esquema de arquitectura OPC cliente-servidor [22].

Servidor OPC

Es driver o aplicación de software basado en las especificaciones del estándar OPC. Se convierte en la interfaz de comunicación, que por un lado integra y comunica dispositivos una o varias fuentes de datos en sus protocolos nativos, por ejemplo: PLCs, DCs, IEDs, Módulos I/O, controladores, etc., por el otro lado se integra con clientes OPC, por ejemplo: SCADAs, HMIs, aplicaciones de cálculo, etc.

En la arquitectura cliente-servidor en el principio de funcionamiento se hace la analogía de la arquitectura Maestro-Esclavo, en donde el cliente OPC hace de maestro y el servidor OPC de esclavo.

La comunicación es de tipo bidireccional, por lo tanto, los clientes tienen la capacidad de lectura/escritura en los dispositivos a través del servidor [21].

En base a las especificaciones determinadas por OPC Foundation se tiene cuatro tipos de servidores:

- Servidor OPC DA (Data Access): permite el acceso de datos en tiempo real, a través de fuentes de datos independientes, es decir habilita la transferencia de datos entre el servidor y varios clientes OPC DA. La transmisión de datos se da mediante el envío de valores recientes y no de valores pasados. El acceso que brinda es de

lectura/escritura hacia y desde la fuente de datos [23]. Integra la capacidad de sondeo y reporte en la transferencia de datos, a través de comunicación de tipo sincrónica y asincrónica. Se lo denomina también como OPC Clásico [24].

- Servidor OPC HDA (Historical Data Access): integra especificaciones para el acceso a datos históricos que son provistos por el cliente OPC HDA [21]. Aplicaciones de tipo base de datos o historian son donde se archivan o almacenan datos de tipo histórico [23].
- Servidor OPC A&E (Alarms & Events): la información que se transmite es de tipo alarmas y eventos desde un dispositivo hacia el cliente OPC A&E [21]. Los datos A&E que son dependientes del proveedor son convertidos a un formato estándar [23].
- Servidor OPC UA (Unified Architecture): es la arquitectura OPC más actual, en la cual brinda la capacidad a los servidores OPC de trabajar con cualquier tipo de dato [21].

Ciente OPC [21]

Un cliente OPC tiene la capacidad de lectura/escritura de datos desde un servidor OPC. Adicionalmente, un cliente OPC se trata de un software computacional empleado por una aplicación para que se efectúe la comunicación con cualquier servidor OPC que tenga compatibilidad. Dentro de la comunicación con el servidor OPC un cliente OPC es quien inicia y controla la comunicación en relación a las peticiones realizadas desde la aplicación de acuerdo al servidor.

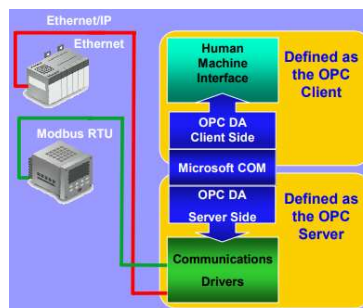


Figura 2.27. Esquema de arquitectura cliente/servidor OPC [25].

Las peticiones de comunicación realizadas por la aplicación referidas en una petición OPC son traducidas por el cliente OPC las mismas que son enviadas hacia el servidor OPC para que sean procesadas.

Cuando se da el retorno de datos OPC desde el servidor OPC hacia el cliente OPC, éste traduce el formato de origen de la aplicación, en donde el cliente OPC procesa adecuadamente los datos recibidos. En el esquema de la Figura 2.27 se observa cómo es la disposición del cliente OPC dentro de la arquitectura cliente/servidor OPC.

Tags/Item

El direccionamiento de los espacios de memoria provenientes del dispositivo de origen de datos es mostrado por el servidor OPC. Un tag permite establecer un nombre descriptivo o etiquetar y mapear a un registro de memoria del dispositivo. En la Figura 2.28 se observa un ejemplo de direccionamiento a partir de la arquitectura cliente/servidor.

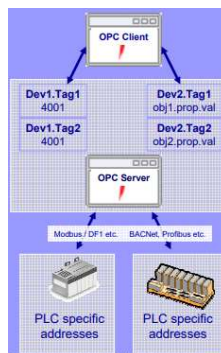


Figura 2.28. Tags dentro de la arquitectura cliente/servidor OPC [25].

2.7. POWERFACTORY DE DIgSILENT

Se trata de un software de modelación y simulación de sistemas eléctricos de potencia. Dentro de su entorno abarca áreas de la ingeniería eléctrica como son transmisión, distribución y sistemas eléctricos de potencia industriales. Presenta un entorno interactivo dedicado al análisis de sistemas eléctricos de potencia y su control de acuerdo a los objetivos de optimización para su operación y planificación [26].

La simulación de redes eléctricas dentro de esta herramienta está basada en modelos matemáticos cuyos cálculos se los realiza fundamentados en normas tales como ANSI, VDE e incluso IEC. De acuerdo con estas características a esta herramienta computacional es utilizada en educación, investigación y en el ámbito profesional-comercial [21].

2.7.1. CARACTERÍSTICAS

Entre las características más esenciales que presenta el entorno de PowerFactory están [21]:

- Integra modelos de equipos.

- Permite una gestión de datos.
- Creación de diagramas de red y características gráficas.
- Presentación de informes y resultados.
- Presenta compatibilidad dentro de la importación de formato de datos externos.
- Modos de operación: Modo estándar y modo motor.

Funciones básicas [21]

- Análisis de flujo de carga.
- Análisis de cortocircuito.
- Análisis de sensibilidad de flujos de carga.
- Identificación de parámetros de máquina asincrónica.
- Cálculo de parámetros de línea aérea y por cable.
- Análisis básico de MT/BT.

Root mean square (RMS) Simulation [27]

En este modo para que se dé lugar la simulación de estabilidad a gran escala se considera tan solo la frecuencia base (síncrona). Los parámetros de la red eléctrica se encuentran representados como fasores.

Para el modelo de la máquina síncrona las ecuaciones diferenciales son simplificadas, en cuanto a la tensión en sus terminales se lo representa como fasor. Este método se lo emplea en las ecuaciones algebraicas de la red en la resolución de las simulaciones de estabilidad.

Real-time simulation

Se refiere a una simulación con restricción en tiempo real. Cada paso de simulación se lo finaliza determinando un período de tiempo condicionando la sincronización de la simulación. De acuerdo al tipo de fenómeno que se esté analizando los tiempos que se empleen en el muestreo pueden ser desde los microsegundos hasta minutos y horas. A esta herramienta de simulación se la denomina también como emulación.

Adicionalmente, la ventaja de emplear una simulación con sincronización con el tiempo es que no se requiere de ningún otro control dentro de la simulación para sincronizar con otros simuladores individuales.

2.7.2. DigSILENT SIMULATION LANGUAGE (DSL)

El lenguaje de programación DSL se emplea para la programación de modelos de controladores eléctricos además de otros componentes que de manera común son utilizados dentro de los sistemas eléctricos de potencia [26].

Los modelos DSL integran ecuaciones que al realizar una simulación tienden a combinarse con aquellas que realizan una descripción del comportamiento dinámico de componentes de un sistema eléctrico de potencia además de sus respectivos controladores [28].

Estructura de DSL

Para el desarrollo de un modelo DSL se requieren tres componentes:

Interfaz

Dentro del interfaz se establece parámetros tales como el nombre del modelo, título, parámetros, clasificación (señales de entrada y salida) y conjunto de variables (variables de estado y variables internas) [26][28].

Señales de entrada

Son señales que se obtienen de un objeto que se encuentra dentro del modelo del sistema eléctrico o pueden provenir de señales de otro modelo DSL [28].

Señales de Salida

Se obtienen del modelo DSL creado. Estas señales pueden ser empleadas como señales de entrada hacia otros objetos o modelos [28].

Variables de estado

Se tratan de variables que dependen del tiempo. Son señales que se definen dentro del modelo. Se hace necesario el uso de estas señales cuando se emplean ecuaciones diferenciales en el modelo [28].

Parámetros

Un parámetro establece valores que permiten el ajuste del comportamiento del modelo DSL [28].

Variables internas

Dentro de un modelo DSL a estas variables se las usa y define con el objetivo de facilitar la construcción de ecuaciones [28].

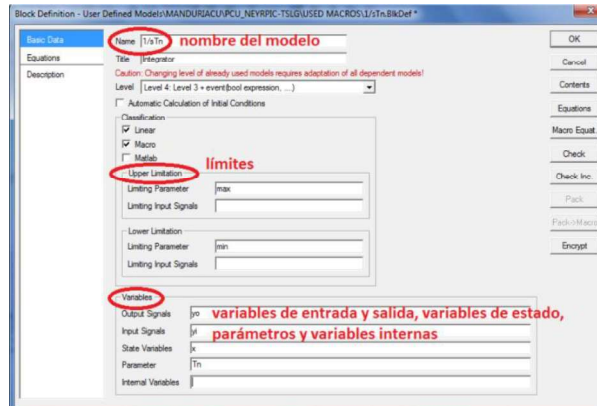


Figura 2.29. Interfaz de la estructura DSL [28].

La Figura 2.29 muestra cada uno de los elementos del interfaz DSL descritos de acuerdo a una de las ventanas de comando DSL.

Definición de variables

Contiene las propiedades de los parámetros y condiciones iniciales del modelo. Se encuentra en la parte de ecuaciones del modelo. La descripción de las propiedades está basada en las señales de entrada y salida previamente definidos en la interface [26][28].

Definición de ecuaciones y condiciones iniciales

Está compuesta por todas las ecuaciones requeridas para la construcción del modelo de simulación. Este conjunto de ecuaciones está vinculado a un conjunto de ecuaciones diferenciales acoplados que realiza la descripción de funciones de transferencia.

Las funciones de transferencia pueden ser lineales simples, funciones SISO (Single Input Single Output), funciones complejas, funciones MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Dentro de un comando DSL se realiza la descripción de las relaciones directas que se presentan entre las señales de entrada y otras variables. En las definiciones realizadas la asignación de expresiones se las realiza hacia una variable o hacia la primera derivada de una de las variables de estado [26].

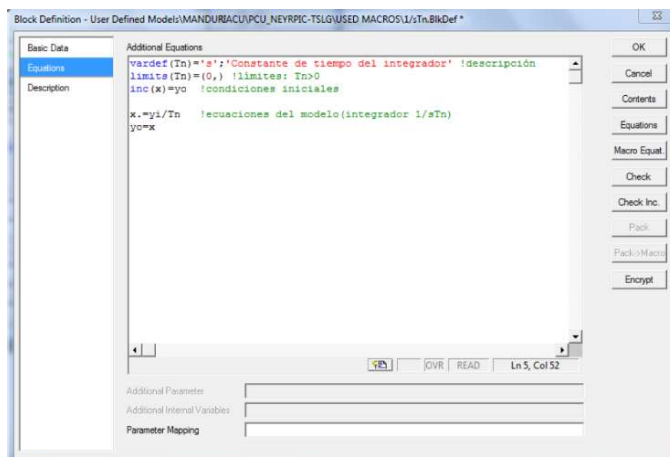


Figura 2.30. Interfaz de ecuaciones de la estructura DSL [28].

La Figura 2.30 muestra un ejemplo de definición de ecuaciones y variables dentro de una ventana de comando DSL, específicamente de un “Block Definition” que se detallará más adelante.

Modelos DSL

Composite Model (ElmComp) [28][29]

Se compone de manera específica de varios modelos matemáticos (modelo compuesto) asociados a elementos eléctricos de un sistema de potencia tales como controladores o generadores sincrónicos. Es decir, de manera dinámica representa un sistema completo dentro de una red.

Se emplea como interfaz en el cual se puede integrar y administrar modelos asociados a elementos tales como una máquina o de un sistema. Relacionando modelos (common models) y elementos que sean necesarios. Sirve de enlace de un composite frame con los elementos de la red, elementos de medición y DSL common models dentro de la red.

Common Model [29]

Teniendo en cuenta un elemento real presente en la red realiza su vinculación a partir de la definición de parámetros específicos. Tratándose como instancias físicas definidas a partir de especificaciones propias del objeto.

Composite Frame [28]

Dentro de un “frame” se realiza las definiciones de las distintas interfaces empleadas por las señales para su comunicación entre bloques o modelos que sean definidos dentro de un composite model.

Su estructura está basada en el uso de diagramas de bloques definidos por slots, señales de entrada y salida además de sus conexiones.

2.8. INTERFACES PARA SIMULACIÓN COORDINADA

2.8.1. MATLAB/SIMULINK [30]

El interfaz MATLAB/Simulink a través de comandos DSL provee una forma de simple para el manejo de códigos de control y algoritmos dentro de MATLAB y su posterior uso en un modelo de PowerFactory.

Una función o instancia de MATLAB en PowerFactory apuntar hacia el modelo de MATLAB, adicionalmente se ejecuta una función .m en MATLAB. Dentro de la función o comando DSL de PowerFactory y el .m MATLAB previamente se declaran variables globales para su comunicación.

Al ejecutarse el modelo de MATLAB como valores a retornar hacia PowerFactory están: estampas de tiempo, variables de estado y señales de salida empleadas en el comando DSL. Presenta limitaciones al momento de realizar simulaciones de modelos en Simulink Figura 2.31.

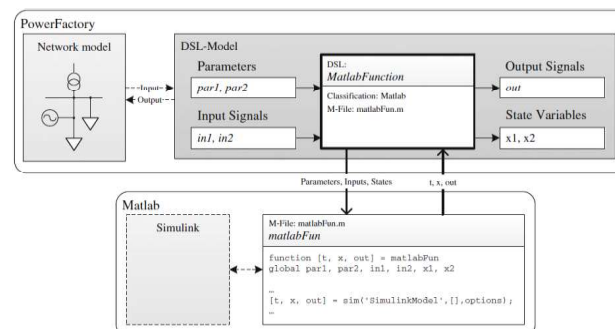


Figura 2.31. Interfaz de Matlab en Simulink [30].

Como desventajas en el uso de este interfaz están:

- La complejidad en el uso y configuración de variables globales y parámetros de función.
- Al realizarse la ejecución de un modelo de MATLAB dentro de PowerFactory la convierte en una interfaz lenta.
- La ejecución del modelo de MATLAB se realiza en cada paso de simulación de PowerFactory, es decir, PowerFactory ejecuta nuevamente el modelo de MATLAB

en cada paso de simulación, por lo que los estados internos que maneja el modelo de MATLAB se almacenan en cada ejecución.

2.8.2. OBJECT LINKING AND EMBEDDING FOR PROCESS CONTROL (OPC) DENTRO DE POWERFACTORY [26]

El interfaz OPC dentro de PowerFactory, como se muestra en la Figura 2.32, permite un intercambio de datos dentro de un entorno de comunicación basado en la arquitectura OPC cliente/servidor. El uso de este tipo de interfaz permite la interacción de sistemas y procesos aplicados en sistemas SCADA y sistemas de control.



Figura 2.32. Esquema de un interfaz OPC para PowerFactory [26].

En la implementación del interfaz OPC, PowerFactory se ejecuta como un cliente OPC. El servidor OPC puede ser empleado a través de fuentes externos.

Para implementar la interfaz de OPC en PowerFactory se toma en cuenta las siguientes características:

- Existe un intercambio bidireccional de datos y objetos (parámetros y señales) de PowerFactory.
- El modo escucha de PowerFactory le permite la recepción de cualquier datos y señales provenientes de un servidor OPC al cual esté vinculado.
- En cuanto al modo envío de PowerFactory le permite la escritura de datos y señales en un servidor OPC al cual esté vinculado.

El interfaz OPC dentro de PowerFactory le permite dos tipos de configuración para el intercambio de datos:

- **Offline:** para que se dé el intercambio bidireccional de datos se configura un comando en PowerFactory. Este comando se ejecuta cada que se requiera una actualización de datos.
- **Online:** el intercambio bidireccional se da de manera automática. Se establece una tasa de actualización de datos.

Elementos del Interfaz de comunicación OPC en PowerFactory

External Data link (ComLink)

Dentro de PowerFactory a través de la instancia de clase ComLink se establece una conexión a un servidor OPC.

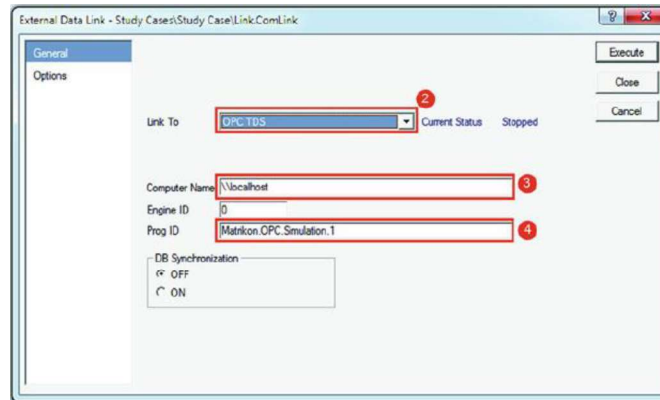


Figura 2.33. Editor de objetos de comando de enlace OPC [30].

Para que se dé lugar la comunicación entre el servidor OPC y PowerFactory se configura las propiedades del objeto de comunicación (object link). Este objeto contiene las configuraciones del cliente OPC e interviene en el intercambio de datos [31].

Un ejemplo de ventana de configuración del objeto “External Data Link” se muestra en la Figura 2.33.

Los parámetros por configurar son [30]:

- **Link to:** se trata del enlace de comunicación entre PowerFactory y el servidor OPC. Se configura el tipo de comunicación a realizarse.
- **Computer Name:** identifica al computador en el cual el servidor OPC se encuentra instalado.
- **Prog ID:** es el identificador del servidor OPC, denominado program ID. Se digita el identificador el fabricante provee.

External Measurements Objects

Son los objetos y variables OPC de comunicación.

Para su uso dentro de PowerFactory se configuran y crean en PowerFactory como una clase StaExt dentro de uno de los cubículos de un objeto a ser medido de la red eléctrica.

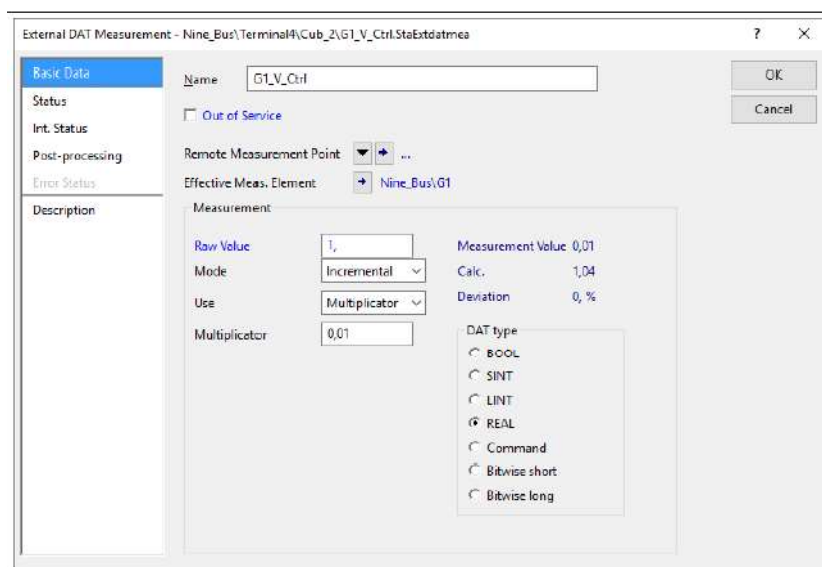


Figura 2.34. Editor de objetos de un External Measurement Object [31].

La Figura 2.34 muestra una ventana de configuración de un objeto de medida externo “External DAT Measurement”.

Para la configuración de un elemento de medición externo, se tiene los siguientes parámetros [31]:

Basic Data

De manera genérica, en este punto para todos los tipos de objetos externos se visualiza los valores medidos, el tipo de variable, etc.

Status

Referido al status del objeto de medición dentro de la comunicación OPC. Se definen dos tipos de status que se usan principalmente en OPC:

- **Read:** un objeto OPC tipo read permite leer el valor del ítem desde el servidor hacia PowerFactory (Ingreso de datos).
- **Write:** un objeto OPC tipo write permite escribir valores desde PowerFactory hacia el servidor (Salida de datos).

Post-processing

En este parámetro se configura el objeto fuente del valor medido, además del objeto hacia el cual se dirige la escritura de datos receptados. Los datos recibidos se configuran para ser dirigidos hacia un objeto en PowerFactory o hacia un controlador de un objeto.

Description

Se ingresa el nombre del tag del ítem proveniente del servidor OPC. El tag permite apuntar hacia el dato sobre el cual se realiza la lectura/escritura en el servidor. A cada tag en le corresponde tan solo un objeto de medición PowerFactory.

Tipos de objetos externos

Existe varios tipos de objetos de medición dentro de la configuración de acuerdo a los dispositivos eléctricos en la red eléctrica. Se indica a continuación los objetos que se emplean de manera común[31]:

External P, Q, V Measurement:

Para obtener valores de Potencia activa (P), Potencia reactiva (Q) y Voltaje (V). En este tipo de valores no se puede realizar la configuración de post-processing.

External DAT Measurement:

Es la forma genérica de un objeto de medida. Permite el acceso hacia cualquier objeto de PowerFactory. Para acceder al objeto de medición se configura correctamente los parámetros de post-processing, además de indicar adecuadamente el tipo de dato acorde al tipo de dato del ítem que se maneja desde el servidor OPC.

2.9. MATRIKONOPC SERVER

MatrikonOPC es un desarrollador de herramientas destinadas a la implementación de comunicación basados en el estándar OPC, dentro de las cuales se pueden encontrar clientes, servidores basados en las especificaciones del estándar OPC propuestas por OPC Foundation. Cada una de estas herramientas se basa en las necesidades de los usuarios, es decir pueden integrar ciertos protocolos industriales dedicados, la capacidad de administrar e integrarse a redes de dispositivos específicos.

MatrikonOPC Simulation Server

Es una aplicación gratuita que permite la realización de pruebas, detección y resolución de problemas de aplicaciones OPC (clientes) y los estados de conexión dentro de la comunicación. Se crea un entorno simulado, de esta forma al ocurrir algún problema no existe pérdida de datos reales de procesos.

Su uso está destinado a entornos no dedicados a producción al ser una herramienta gratuita. Adicionalmente, habilita la capacidad de comunicación e intercambio de datos con cualquier cliente OPC.

El entorno de MatrikonOPC Simulation server permite la integración de datos mediante simulación de tipo OPC DA, OPC HADA y OPC A&E, basado en las especificaciones de OPC Foundation [32]. El intercambio de datos con los clientes se realiza a través de tags o ítems de datos OPC.

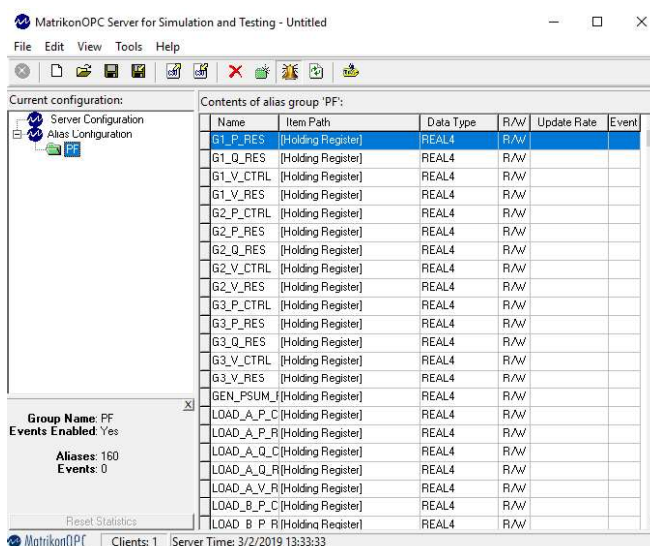


Figura 2.35. Interfaz de MatrikonOPC Simulation Server.

En la Figura 2.35 se puede visualizar el interfaz de la aplicación servidor, en la cual se puede apreciar la configuración de tags.

MatrikonOPC Explorer

Es una herramienta que hace las veces de cliente OPC DA Y A&E de uso general. MatrikonOPC incluye esta herramienta como medio que permita realizar pruebas de la capacidad y funcionamiento de los servidores OPC [33].

Los servidores que estén instalados en el mismo PC que la aplicación podrán ser detectados y visualizados en una de las pestañas de configuración dentro del interfaz.

A través de esta herramienta se consigue conectarse como cliente OPC a uno de los servidores OPC activos.

Se puede configurar los tags que están siendo utilizados por el servidor OPC y posibles clientes OPC conectados, pudiéndose determinar el estado de cada uno de los tags activos durante la comunicación.

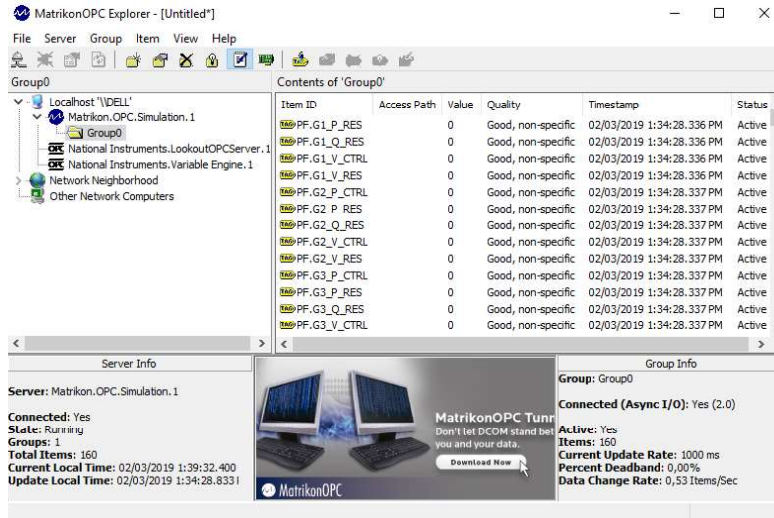


Figura 2.36. Interfaz de MatrikonOPC Explorer

La Figura 2.36 muestra el interfaz de la aplicación MatrikonOPC Explorer, en la cual se puede visualizar elementos tales como de los servidores presentes en el equipo, los tags configurados en el servidor activo, entre otras configuraciones.

2.10. MATLAB OPC TOOLBOX

OPC es una herramienta que viene incluida dentro del paquete de MATLAB conocido como OPC Toolbox. Brindando la capacidad a MATLAB a realizar comunicación e intercambio de datos a través de OPC. Integrando esta herramienta, desde MATLAB y Simulink se puede realizar el proceso de lectura/escritura y registro de datos OPC integrando dispositivos, tales como sistemas de control distribuido, control de supervisión, sistemas de adquisición de datos y PLCs.

A través del OPC Toolbox, MATLAB y Simulink pueden comunicarse con servidores OPC, permitiendo acceder a sus datos en tiempo real e historians de datos basados en las especificaciones de los estándares OPC DA, OPC HDA y OPC UA.

En el entorno de MATLAB se emplea una estructura jerárquica para la administración de las conexiones existentes entre los servidores OPC y los elementos o datos OPC que contenga. Para realizar la comunicación con el servidor OPC se crea un objeto OPC DA Client. Permitiendo la exploración y el acceso a los datos OPC dentro del servidor sin dejar de lado las propiedades de cada una ellos. En el entorno de Simulink las configuraciones del cliente OPC se las realiza a través del bloque de configuración OPC.

Dentro de las configuraciones se definen aspectos tales como de la especificación de clientes OPC DA a emplearse en el modelo, comportamiento de eventos, error de comunicación OPC y determinar el comportamiento en tiempo real.

La escritura/lectura de datos OPC en MATLAB se realiza de forma sincrónica y asincrónica hacia o desde el servidor OPC.

La configuración de los elementos de lectura y escritura se las realiza a través de los bloques OPC Read y OPC Write respectivamente [34].

3. METODOLOGÍA

A partir del estudio teórico de los principios de operación de una unidad de tren del Sistema de Metro de Quito, en el presente capítulo como primera etapa se efectúa el modelamiento de la electrónica de potencia y de los motores de tracción. El modelamiento se basa en las características constructivas, topologías y aspectos operativos provistas en las hojas técnicas de referencia provistas por la empresa fabricante de las unidades de tren [2], adicionalmente se realizan los cálculos necesarios en el caso en el cual no existe la información necesario, en base a la fundamentación técnica y teórica.

En la segunda etapa a partir del estudio del estándar de comunicación OPC se desarrolla la configuración e implementación de los interfaces de comunicación OPC. Definiendo a cada uno de los clientes OPC y al servidor OPC.

Por último, en la tercera etapa se realiza el cálculo de controladores PI dentro de lo que es el esquema de control vectorial FOC basado en las características del circuito equivalente del motor de inducción. Como estructura adicional, se emplea el cálculo de los parámetros del circuito equivalente del conjunto de cuatro motores.

3.1. MODELADO DE ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS

Los modelos realizados se basan en las librerías provistas por Simulink. El modelamiento está enfocado en el convertidor de tracción, donde se encuentra concentrado el sistema electrónico de potencia del sistema.

En la Tabla 3.1 se muestra las características generales de operación del convertidor de tracción dentro de la operación de las unidades de tren.

Tabla 3.1. Características técnicas convertidor de tracción [2]

Potencia Nominal	570 kW
Potencia máxima	1340 kW

Rendimiento del Inversor Trifásico	98%
V _{alimentación}	1500 Vdc (1000-1800 Vdc) (1950 Vdc durante 5 min)
V _{salida}	1170 V _{rms} (V _{cat} =1500 Vdc) 1404 V _{rms} (V _{cat} =1800 Vdc)
Rendimiento energético	0.98

La topología del convertidor de tracción está basada en el esquema de la Figura 3.1.

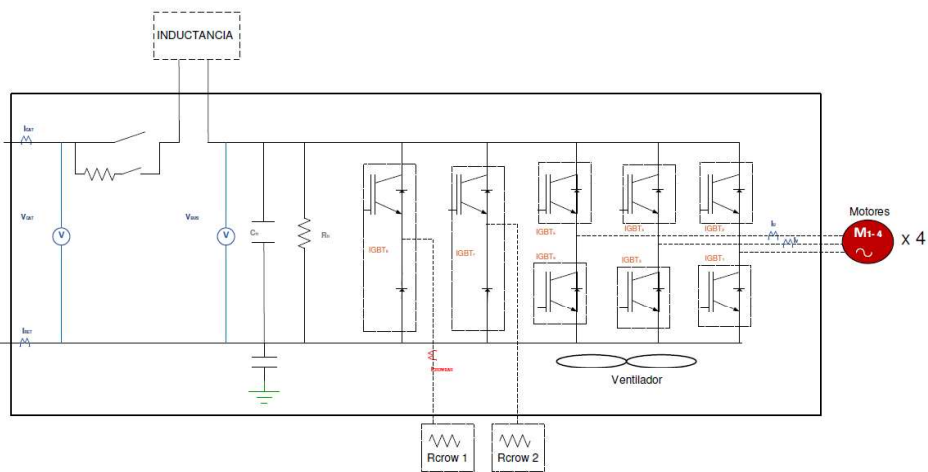


Figura 3.1. Esquema de electrónica de potencia de un convertidor de tracción [2].

Tomando como referencia el esquema de la Figura 3.1, se procede a su modelación de los accionamientos eléctricos en Simulink tal como se muestra en el esquema de la Figura 3.2. Donde se detalla elementos como el circuito de carga del capacitor, Bus DC, Inversor trifásico.

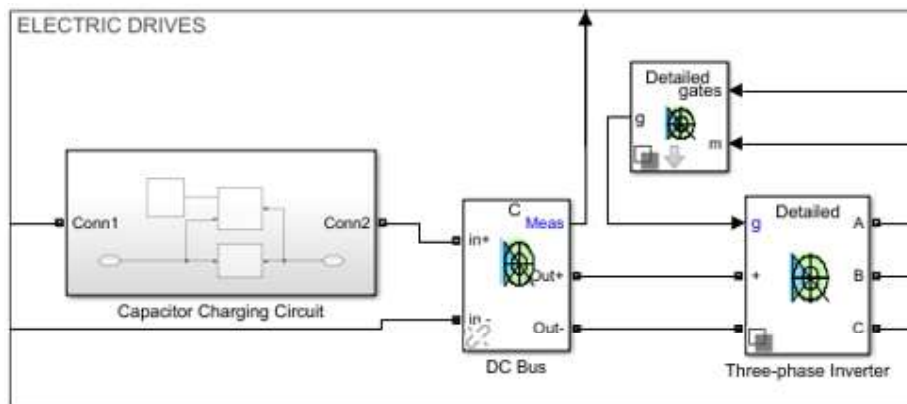


Figura 3.2. Esquema de electrónica del convertidor de tracción modelado en Simulink.

La Figura 3.3 muestra de manera detallada el bloque “DC BUS” considerando la topología y elementos que posee tales como: circuito de braking chopper, capacitor de bus y resistencia de descarga.

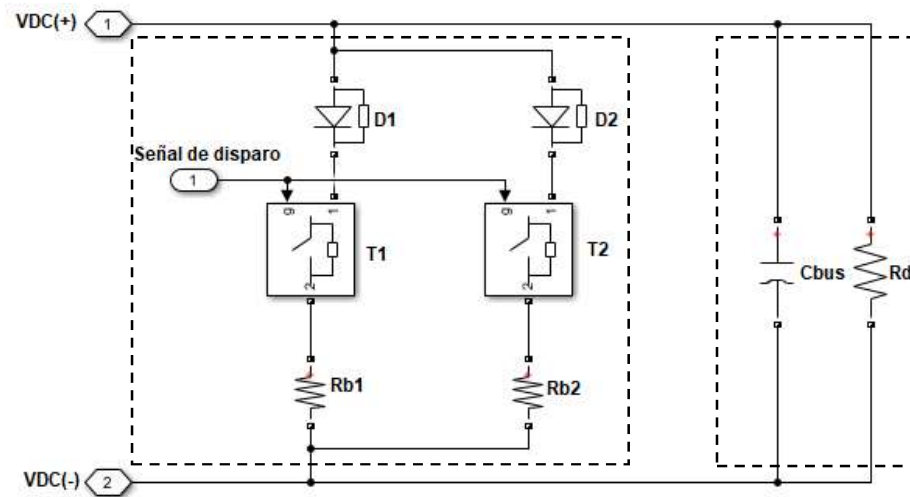


Figura 3.3. Esquema de Bus DC modelado en Simulink.

Condensador de Filtro

Realiza las funciones de estabilizar el voltaje y de proporcionar la reducción del rizado existente en la onda de voltaje DC. La Tabla 3.2 detalla las características eléctricas del condensador de filtro.

Tabla 3.2. Características del condensador de filtro [2]

Valor capacitivo	4x3.1 mF
Voltaje	1800 Vdc
Corriente nominal	160 A

El modelo del condensador de filtro se integra dentro del modelo de braking chopper. Adicionalmente, de acuerdo a la Figura 3.4, se presenta la modelación en Simulink de los circuitos tanto de carga y descarga del capacitor, con sus elementos constitutivos.

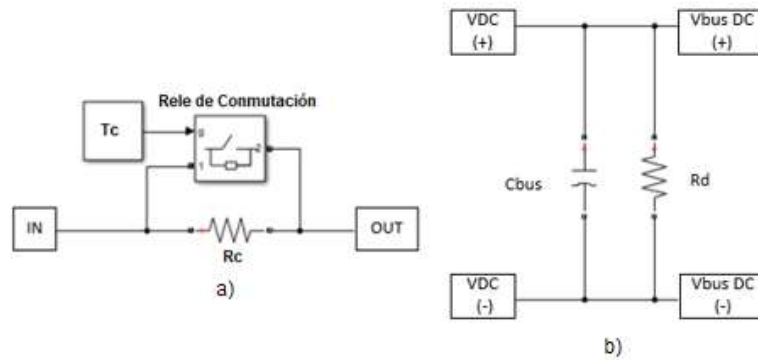


Figura 3.4. Esquema de electrónica de potencia

Circuito de carga y descarga del Capacitor de filtro.

Primeramente, se tiene que la constante de tiempo del circuito de carga representa el tiempo en el que el capacitor presenta un voltaje equivalente al 63% del voltaje de alimentación DC.

$$\tau = R_c C \quad (3.1)$$

La Ecuación 3.1 permite el cálculo de la constante de tiempo de carga del capacitor. El valor del capacitor es de 3.1 mF, por lo que se asume el valor de la resistencia R_c . La resistencia R_c tiene como objetivo de limitar la corriente pico durante el proceso de carga. Su valor se recomienda que no sea tan alto para así evitar una caída de voltaje significativa. Teniendo en cuenta el valor de la corriente nominal del capacitor se calcula el valor de la resistencia R_c . Se asume que el pico máximo de corriente será del 20% de la nominal al implementar la resistencia de carga. La Ecuación 3.2 permite el cálculo de la corriente nominal del capacitor.

$$I_{20\%} = \frac{V_{DC}}{R_c} \quad (3.2)$$

Para el cálculo de la resistencia R_c se emplea la Ecuación 3.3

$$R_c = \frac{V_{DC}}{I_{20\%}} \quad (3.3)$$

$$R_c = \frac{1500}{160 * 0.2}$$

$$R_c = 46.875 \Omega \approx 47\Omega$$

Con el valor de R_c se procede al cálculo de la constante de tiempo del circuito de carga del capacitor.

$$\tau = (47)(3.1 \times 10^{-3})$$

$$\tau = 0.1457 \text{ seg.}$$

Un dato adicional por calcular es el de la potencia a disipar por la resistencia Rc. De esta manera se tiene que:

$$P_{Rc} = I_{20\%}^2 R_c \quad (3.4)$$

$$P_{Rc} = (32)^2 (47)$$

$$P_{Rc} = 48128 \text{ W} \approx 48.128 \text{ kW}$$

Durante la operación del circuito de carga la resistencia Rc se cortocircuita por medio de un relé mecánico cuando el capacitor alcance un valor mayor o igual al 80% del voltaje de alimentación DC. Lográndose así minimizar el pico de corriente que se produce al momento de cortocircuitar la resistencia Rc. Por lo que se calcula el tiempo mínimo en el cual el relé actúa en dicho proceso. Por lo que se realiza el siguiente análisis basado en la Ecuación 3.5 de carga del capacitor.

$$V_c = V_{DC} \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad (3.5)$$

Despejando t, se tiene que:

$$t = -RC * C * \ln \left(1 - \frac{0.8 * V_{DC}}{V_{DC}}\right) \quad (3.6)$$

$$t = 0.23 \text{ seg.}$$

El tiempo de conmutación es necesario que sea mayor o igual al calculado. Como criterio que se toma para establecer este valor es el de tomar como referencia el tiempo en el cual el voltaje en el capacitor se mantiene en estado estable. De esta manera se evita que la conmutación del relé produzca un pico de corriente considerable. Esto ocurre debido a que si en el instante en el que se conmuta el relé el voltaje del bus DC está muy por debajo del valor en estado estable, es decir de manera muy brusca el voltaje en el capacitor alcanza al valor del voltaje de referencia y generando una gran exigencia de corriente de la fuente por efectos de la carga. Por lo tanto, el tiempo de conmutación del relé se lo realiza en un tiempo de 3 segundos desde la energización del sistema.

Para el cálculo de la resistencia de descarga del capacitor se parte de la Ecuación 3.7 de voltaje en un capacitor [10].

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.7)$$

Al desarrollar esta integral indefinida se tiene que:

$$V_c = K_1 + K_2 e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \quad (3.8)$$

Para poder obtener una expresión más simplificada se toma como condiciones iniciales la operación del circuito de descarga con lo que se tiene que para $t=0$ $V_c=V_{dc}$ y en $t=\infty$ $V_c=0$. Por lo que al emplear dichas condiciones en la Ecuación 3.8 se tiene finalmente que:

$$V_c = V_{DC} * e^{-\frac{t}{Rd \cdot C}} \quad (3.9)$$

De la Ecuación 3.9 se despeja el valor de Rd con lo que se obtiene:

$$Rd = -\frac{t}{C \cdot \ln\left(\frac{V_{DC}}{V_c}\right)} \quad (3.10)$$

Como dato del fabricante el valor de la resistencia Rd asegura que el capacitor se descargue a un valor inferior a los 60 V durante un tiempo de 10 min en relación al voltaje nominal del bus DC. Por lo que el cálculo será:

$$Rd = \frac{10 * 60}{3.1 * 10^{-3} * \ln\left(\frac{1510}{60}\right)}$$

$$Rd = 60005.32 \Omega \approx 60 \text{ k}\Omega$$

Con los valores calculados se procede a realizar la simulación de la operación de los circuitos de carga y descarga del capacitor para verificar su funcionamiento, lo cual se lo puede observar en la Figura 3.5.

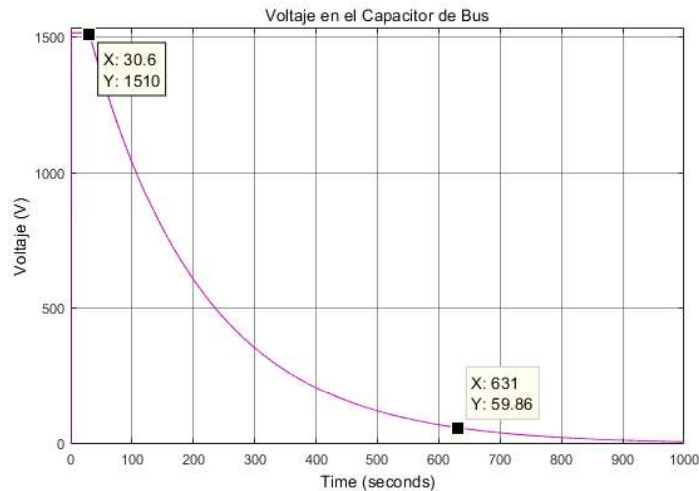


Figura 3.5. Descarga del capacitor de Bus.

Como parámetros se establece la conmutación del relé en el instante de tiempo de 3 segundos, la desconexión del sistema de la red se lo realiza en el instante de tiempo de 30 segundos.

Al observar el tiempo de descarga del capacitor que se aproxima a los 16 minutos se descarta esta operación en la simulación del modelo en general por los tiempos de simulación en los que incurre y el consumo de las capacidades de procesamiento del ordenador. Para el caso de la carga del capacitor los valores de voltaje y corriente serán visualizados y analizados de manera más detallada durante la simulación del modelo general ya que su comportamiento podría variar acoplado los demás elementos del sistema de tracción.

Braking Chopper

El circuito de freno regenerativo (braking chopper) está conformado por un IGBT, un diodo y una resistencia para disipación colocada externamente, cada una de sus características eléctricas y constructivas están detalladas en las Tablas 3.3 y 3.4 respectivamente.

Tabla 3.3. Características generales IGBT's chopper de frenado [2].

Voltaje colector-emisor máxima ($V_{CEm\acute{a}x}$)	3300 Vdc
Corriente nominal (75°C)	1000 A
Corriente máxima ($t_p=1ms$)	2000 A
Voltaje de aislamiento	6 kV (50 Hz, 60 s)
Material de la base	AlSiC
Temperatura máxima admisible	125°C

Tabla 3.4. Características de resistencias de frenado [2].

Valor resistivo	2.41 Ohm
Voltaje	2000 Vdc
Potencia nominal	105 kW
Potencia máxima	671 kW

El circuito de frenado regenerativo está compuesto por dos ramales, tal como se observa en la Figura 3.3. Cada uno de ellos contiene:

- Dispositivos de conmutación rápida (Semiconductores de potencia).
- Diodos de conmutación rápida que se disponen para evitar la recirculación de corriente hacia el bus DC.

- Resistencias de freno que se encargan de disipar energía en forma de calor en el proceso de frenado.

En lugar de los semiconductores de potencia se emplea switches ideales, los mismo que emulan la operación de los IGBTs. Esto debido a que no existe la información necesaria para el modelado de estos. Con lo que se maneja un modelo ideal del circuito de freno regenerativo o braking chopper.

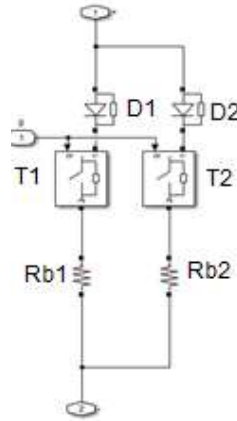


Figura 3.6. Circuito de frenado regenerativo.

La operación del circuito de frenado regenerativo requiere que se establezca los voltajes de activación y desactivación del mismo, basado en el comportamiento del voltaje del bus DC.

Ya que no existe mayor información provista por el fabricante, se establece como voltaje de activación en un 5% sobre el voltaje máximo en estado estable que equivale a un voltaje de 1560 V. Y como voltaje de desactivación a un valor de voltaje de 1530 V.

Inversor Trifásico

En los convertidores de tracción de las unidades de tren los inversores a emplearse serán de tipo bi-nivel (dos niveles), conmutados mediante IGBT's, cuyas características se detallan en la Tabla 3.5. Cada ramal está conformado por dos IGBT's.

Tabla 3.5. Características generales de los IGBT's del inversor [2].

Voltaje colector-emisor máximo ($V_{CEm\acute{a}x}$)	300 Vdc
Corriente nominal (75°C)	1500 A
Corriente máxima ($t_p=1mseg$)	3000 A
Tensión de aislamiento	6kV (50 Hz, 60s)

Material de la base	AlSiC
Temperatura máxima	125°C

En el modelo a emplearse se emplea el bloque de inversor trifásico provisto por las librerías de Simulink debido que no existe la suficiente información del modelo real. Además, el inversor se trata de un puente de tres ramales siguiendo la topología de un inversor binivel, cuyo esquema simplificado de acuerdo a la modelación de Simulink está dado por la Figura 3.7.

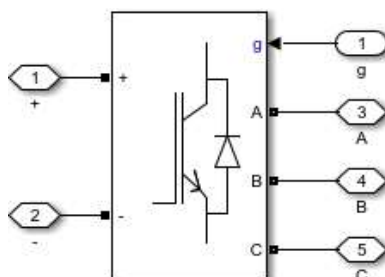


Figura 3.7. Inversor Trifásico modelado en Simulink.

Motor de tracción [2]

Los motores empleados son de tipo asíncrono abierto con rotor cortocircuitado de devanado en jaula de ardilla, adicionalmente sus características técnicas se detallan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Características de los motores de tracción.

Voltaje en catenaria	1500 [V]
Voltaje nominal	1110 [V]
Corriente nominal	208 [A]
Velocidad nominal	1677[rpm]- 175.615[rad/s]
Potencia nominal	92 kW (a 1677 rpm)
Par máximo	1510 [Nm]
cos ϕ	0.87
Frecuencia	60 Hz
Número de par de polos	2
Rendimiento motor	>0.92
Rendimiento reductor	0.97
Relación de transmisión	7.44

Peso aprox.	500 kg
Tipo de ventilación	Autoventilado Motor abierto
Rendimiento energético	0.9

En la Figura 3.8 muestra la disposición de los motores de tracción por cada convertidor de tracción, es decir, cuatro motores conectados a un convertidor de tracción. Además, de su modelación de Simulink.

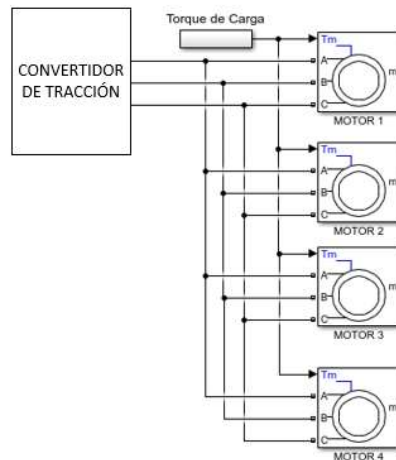


Figura 3.8. Esquema de conjunto de motores de tracción conectados a un convertidor de tracción.

Para el modelado de los motores de inducción dentro de Simulink se requiere de los parámetros del circuito equivalente que son detallados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Parámetros de circuito equivalente.

Elemento	Valor
Resistencia del Estator (R_s)	73.64 $m\Omega$
Inductancia de fuga del Estator (L_{ls})	3.5 mH
Resistencia del Rotor (R_r)	40.21 $m\Omega$
Inductancia de fuga del Rotor (L_{lr})	1.7 mH
Inductancia mutua (L_m)	112 mH

Otro de los datos necesarios para la configuración es el del momento de inercia. El fabricante no provee este valor por lo que es necesario realizar su cálculo. Para efectos de

nuestro análisis el cálculo del momento de inercia del motor se lo realiza en base a la Ecuación 3.11 de torque del motor en condiciones de vacío.

$$M_m = J_T \frac{d\omega}{dt} \quad (3.11)$$

Para realizar el cálculo las condiciones de operación del motor se toman como punto de operación, el nominal con velocidad angular ω_L , potencia P_L , y los tiempos de aceleración y desaceleración según datos de placa, de esta manera la expresión del torque a estas condiciones es:

$$M_L = \frac{P_L}{\omega_L} \quad (3.12)$$

Finalmente, el valor del momento de inercia se lo calcula mediante la Ecuación 3.13 [35].:

$$J = \frac{M_L}{s\omega} \quad (3.13)$$

Donde $s\omega = \frac{\Delta\omega_L}{\Delta t}$ que está referenciado a una variación de velocidad en un intervalo de tiempo, el cual se lo determina en la curva de aceleración o desaceleración de la máquina [35].

En el análisis se toma en cuenta los valores nominales de Potencia P_n y Velocidad angular nominal ω_n [rad/s] de los datos de placa del motor. Mediante los cuales se procede al cálculo del Torque nominal M_n en base a la Ecuación 3.12.

$$M_n = \frac{92000 \text{ W}}{175.615 \text{ rad/s}}$$

$$M_n = 523.87 \text{ Nm}$$

Para determinar el término $s\omega$ se emplea los valores de la Tabla 3.8, que detallan las prestaciones de operación y tracción de una unidad de tren.

Tabla 3.8. Prestaciones de tracción en modo normal y pendiente 0%.

Variable	Valor
Velocidad máxima en servicio	100 km/h
Aceleración máxima	1 m/s ² (12.960 km/h ²)
Aceleración media de 0 a 100 km/h	0.65 m/s ² (8.424 km/h ²)
Aceleración media de 0 a 40 km/h	0.99 m/s ² (12.830 km/h ²)

Desaceleración media de 75 km/h a 0	1.00 m/s ² (12.960 km/h ²)
Desaceleración media de 100 km/h a 0	0.96 m/s ² (12.441 km/h ²)

De esta manera considerando que en un tramo el tren tendrá movimiento rectilíneo uniforme acelerado. Como condición se da que el tren acelera de 0 a 100 km/h en un intervalo de tiempo. Adicionalmente se considera que al llegar a la velocidad de 100 km/h lo motores trabajan a velocidad angular nominal. De esta manera se tiene el siguiente procedimiento. Partiendo de la Ecuación 3.14 de velocidad en un MRUV.

$$v_1 = v_0 + at \quad (3.14)$$

La condición de velocidad inicial es:

$$v_0 = 0 \frac{Km}{h}$$

Por lo que la ecuación de velocidad quedaría como:

$$v_1 = a * t \quad (3.15)$$

De la Ecuación 3.15 se despeja la variable tiempo y se procede a su cálculo.

$$t = \frac{v_1}{a}$$

$$t = \frac{100 \frac{Km}{h}}{8424 \frac{Km}{h^2}}$$

$$t = 0.01187 \text{ horas}$$

$$t = 0.01187 \text{ horas} * \frac{3600 \text{ segundos}}{1 \text{ hora}}$$

Transformando la variable de tiempo de horas a segundos.

$$t = 42.732 \text{ segundos}$$

Con la obtención de la variable tiempo se procede al cálculo del momento de inercia en base a la Ecuación 3.13.

$$J = \frac{523.87 \text{ Nm}}{\frac{175.615 \text{ rad/s}}{42.732 \text{ seg}}}$$

$$J = 127.47 \text{ Kg.m}^2$$

3.2. DISEÑO DE INTERFACES OPC

La comunicación a realizarse para la co-simulación es de arquitectura OPC Cliente-Servidor. En donde los entornos de simulación Matlab/Simulink y PowerFactory actúan como clientes OPC y MatrikonOPC Server for Simulation será el Servidor OPC. Además, el tipo de servidor OPC a utilizarse es OPC DA. Para el diseño de las interfaces en cada uno de los entornos de simulación se determina las configuraciones requeridas para su interacción con un entorno OPC.

La escritura y lectura de datos desde y hacia el servidor OPC desde el cliente OPC puede ser de manera síncrona o asíncrona. La lectura/escritura (R/W) de forma síncrona tiene como característica de que, en el caso de Matlab, su ejecución es detenida mientras el proceso de R/W sea completada. En cuanto a la lectura/escritura asíncrona se da forma en la que Matlab mantenga sus procesos en operación continua mientras se realiza el proceso de R/W.

En este trabajo se realizará la co-simulación empleando las operaciones de lectura/escritura asíncrona y síncrona.

Para el entender de mejor manera proceso de co-simulación a implementar, se tiene el diagrama de flujo de la Figura 3.9.

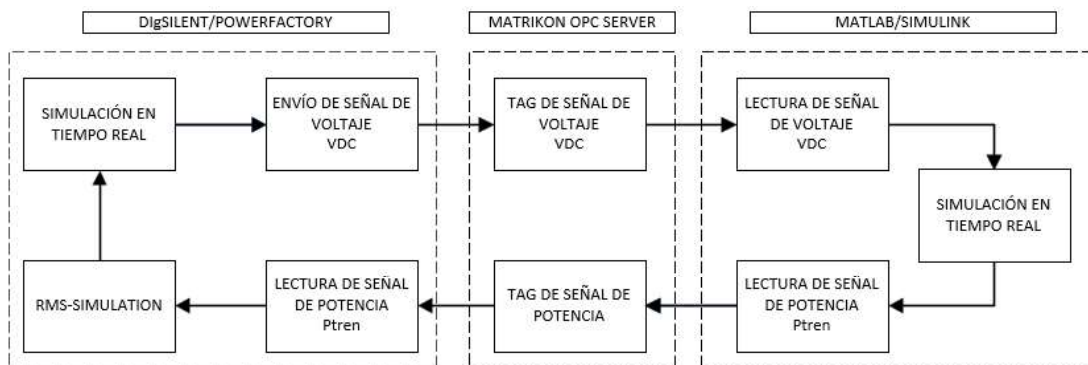


Figura 3.9. Diagrama de flujo de co-simulación.

En el diagrama de flujo se observa la interacción entre los entornos de PowerFactory y Matlab/Simulink con el servidor OPC basado en la arquitectura de comunicación cliente/servidor. En donde PowerFactory y Simulink son los clientes OPC.

3.2.1. CONFIGURACIÓN DE TAGS EN EL SEVIDOR OPC

Matrikon OPC Server for Simulation integra las configuraciones OPC por defecto, esto con el objetivo de asociar los diferentes clientes OPC con los que se realizará el intercambio de datos de una manera más accesible. Dentro de las características de la aplicación están el de la capacidad de operar con interfaces OPC de tipo DA. Adicionalmente de tener valores predeterminados tales como de los tiempos de actualización de los valores de los ítems de los grupos de tags.

En el interfaz que presenta la aplicación del servidor OPC permite visualizar parámetros como del número de clientes conectados al servidor, hora del servidor, número de grupos activos. El servidor OPC se activa en el momento en el que se realiza la ejecución de la aplicación. Para su desactivación se realiza cerrando la aplicación.

Primeramente, se crea los “alias” o grupos de tags. De esta manera dentro de la pestaña “Alias configuration” se crea el primer grupo. A continuación, dentro de cada grupo se procede a la creación de los ítems a emplearse en la comunicación.

Para la creación de los ítems se toma en consideración los siguientes parámetros:

- Nombre: se indica el nombre del tag. Preferiblemente que este asociado a la variable de la cual se va a tomar el dato. El nombre del tag va a ser el que se va a emplear en cada uno de los clientes OPC.
- Tipo de dato: dentro de la comunicación se establece el tipo de dato con el cual cada uno de los clientes envía los datos al servidor OPC.
- R/W: por defecto los ítems creados pueden ser empleados para lectura/escritura. De manera opcional dentro de la creación del ítem existe la opción de modificar este parámetro para el caso de solo lectura.
- Update Rate: este parámetro permite establecer la tasa de actualización de datos dado en milisegundos. Como tasa mínima de actualización que permite la aplicación es de 1 ms.

Los grupos de tags creados pueden ser exportados en formato .csv.

En la Tabla 3.9 se muestra el grupo de Tags y los ítems configurados en el servidor OPC.

Tabla 3.9. Grupo de Tags configurado en servidor OPC.

Nombre	Tipo de dato	Estado
VSol_Cal	Real	R/W
VUCen_Prada	Real	R/W

VCar_Iñ	Real	R/W
PSol_Cal	Real	R/W
PUCen_Prada	Real	R/W
PCar_Iñ	Real	R/W
VDC_Est1_ida	Real	R/W
Tren1_P_Ctrl	Real	R/W

3.2.2. DISEÑO DE INTERFAZ OPC EN MATLAB/SIMULINK

En primera instancia se establece que Simulink es el entorno dentro del cual se simula la carga determinada por una unidad de tren del sistema de Metro. Por lo cual, hacia el servidor se envía el consumo y/o demanda de potencia de esta carga. Y como entrada de dato desde el servidor será la alimentación de voltaje DC, suministrada por el SEMQ que es simulado en PowerFactory.

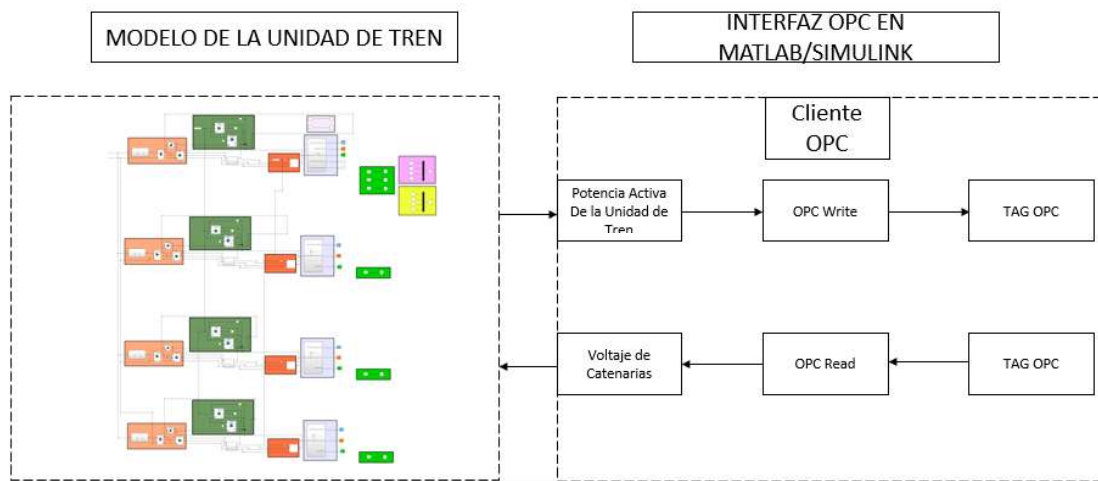


Figura 3.10. Esquema de Interfaz OPC en Matlab/Simulink.

En la Figura 3.10, se tiene la interacción entre el Interfaz OPC y el modelo de la unidad de tren en Simulink, mostrando los procesos de lectura y escritura OPC y sus señales asociadas.

Para desarrollar el interfaz OPC en Simulink se emplea el OPC Toolbox dentro de sus librerías.

Primeramente, se configura el bloque de configuración OPC, cuya ventana de configuración se muestra en la Figura 3.11. Dentro del cual el primer paso es el de la configuración del Cliente OPC.

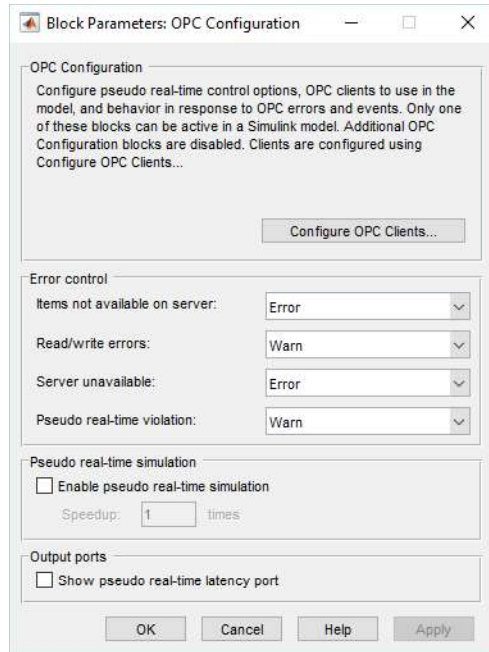


Figura 3.11. Parámetros de configuración de bloque OPC Configuration

En la configuración “Configure OPC Clients” se despliega los “OPC Clients” disponibles. Esta configuración permite a Simulink interactuar como cliente OPC.

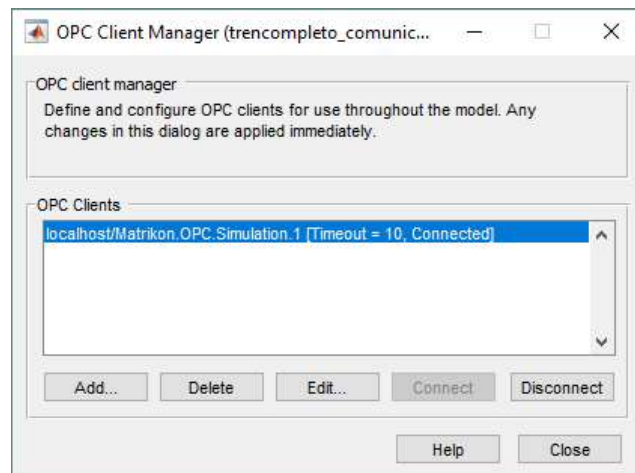


Figura 3.12. Configuración de Clientes OPC.

En la definición de los clientes OPC mostrada en la Figura 3.12, se despliega primeramente información de la dirección del dispositivo en donde se encuentra instalado el servidor OPC, que en este caso de ejemplo está presente en el mismo ordenador en donde se encuentra Matlab/Simulink por lo que toma la denominación de “localhost”. A continuación, el ID del servidor OPC (Matrikon.OPC.Simulation.1), su estado de conexión (“Connected”) y su tiempo de espera (Timeout=10).

Los ítems adicionales dentro del bloque de configuración se los deja por defecto.

Con las configuraciones del cliente OPC ya realizadas se configura los objetos de lectura y escritura OPC.

Configuración OPC Read

Se emplea el bloque OPC Read, cuya ventana de configuración se muestra en la Figura 3.13. Dentro de la ventana de configuración del bloque OPC Read se dispone por defecto un desplegable con los clientes OPC configurados, adicionalmente dispone de la pestaña de configuración de clientes OPC. En el parámetro "Item IDs" se añade cada uno de los ítems que servirán de lectura de datos provenientes del servidor OPC.

El nombre de cada uno de los ítems tiene correspondencia con el nombre de los tags predefinidos en el servidor OPC.

Los valores que son leídos desde el servidor OPC son de tipo double, por lo que para su uso tienen concordancia con la variable eléctrica a la cual sea asignada.

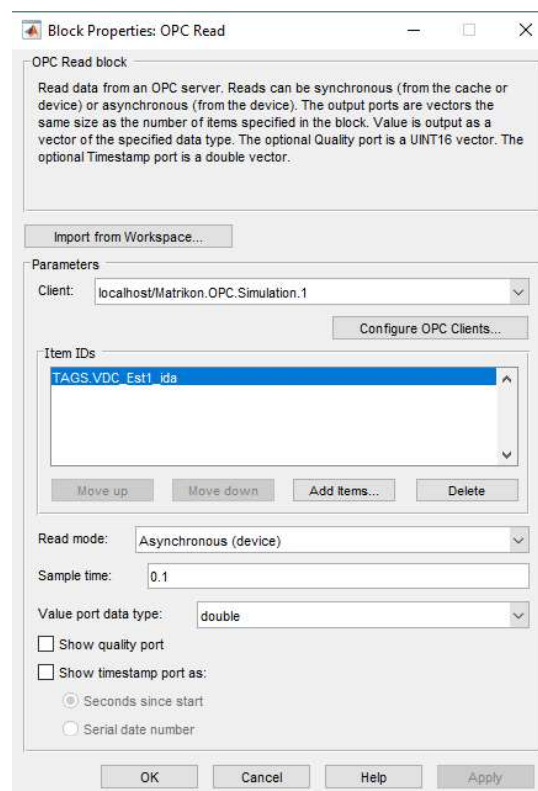


Figura 3.13. Configuración de bloque OPC Read.

Para el caso de la lectura de valores de voltaje se requiere el uso de una fuente de voltaje controlada (FVC), la misma que funciona de acuerdo a la amplitud del valor de entrada. Se

considera el voltaje inicial del voltaje en estado estable de las catenarias en su configuración. Adicionalmente, se utiliza un factor de multiplicación previo al ingreso hacia la FVC, ya que los valores en el servidor provenientes de PowerFactory están implícitamente en unidades de kV. En simulink las unidades empleadas son en unidades de voltios [V]. Como factor de multiplicación se tiene un valor de 1000.

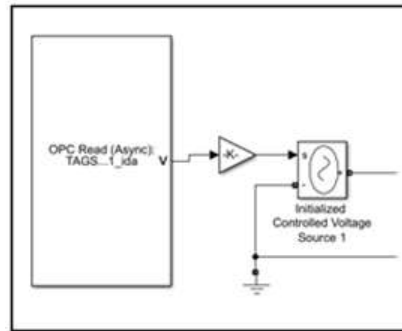


Figura 3.14. Interfaz entre bloque OPC Read y modelo de Simulink.

El interfaz de acondicionamiento de la señal de voltaje proveniente del servidor OPC y por ende de PowerFactory se muestra en la Figura 3.14.

Configuración OPC Write

La escritura de valores desde Simulink hacia PowerFactory se lo realiza a través del bloque OPC Write, cuya ventana de configuración se muestra en la Figura 3.15. Dentro del cual se configuran parámetros tales como del servidor OPC asociado al cliente OPC (Simulink).

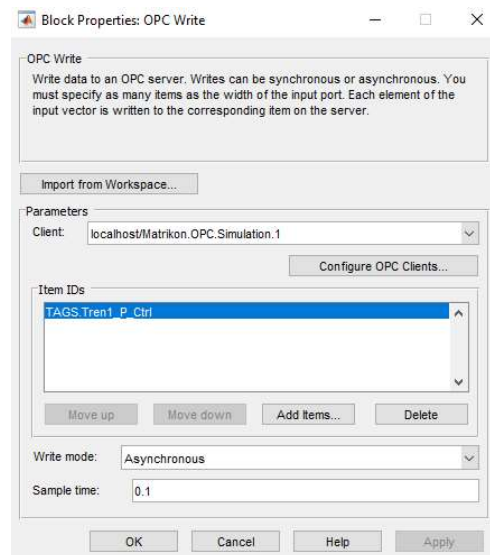


Figura 3.15. Configuración de bloque OPC Write.

Se establece la sincronía de la escritura de datos, además de configurar los ítems de escritura, cuyos nombres tienen correspondencia a los tags establecidos en el servidor OPC.

Para la escritura de datos desde el cliente Simulink se realiza de manera asíncrona. Debido a los tiempos de procesamiento que presenta el entorno al realizarse la simulación.

Los valores que se obtienen desde el servidor son de tipo double adimensional, por lo que previo al envío de datos se requiere un factor de multiplicación. Ya que en Simulink los valores de potencia se manejan en unidades de vatios [W], y el servidor los maneja unidades de MW de forma implícita, se tiene un factor de multiplicación de $1/10e6$.

3.2.3. DISEÑO DE INTERFAZ OPC EN POWERFACTORY

PowerFactory será el entorno dentro del cual está simulado el SEMQ. Por ende, los valores que van a ser enviados hacia el servidor serán del Voltaje de alimentación hacia las catenarias (Voltaje Bus DC). Además, como valor de entrada desde el servidor será la potencia activa demandada por la carga de la unidad de tren simulada en el entorno de Simulink la cual se integra a la red del SEMQ.

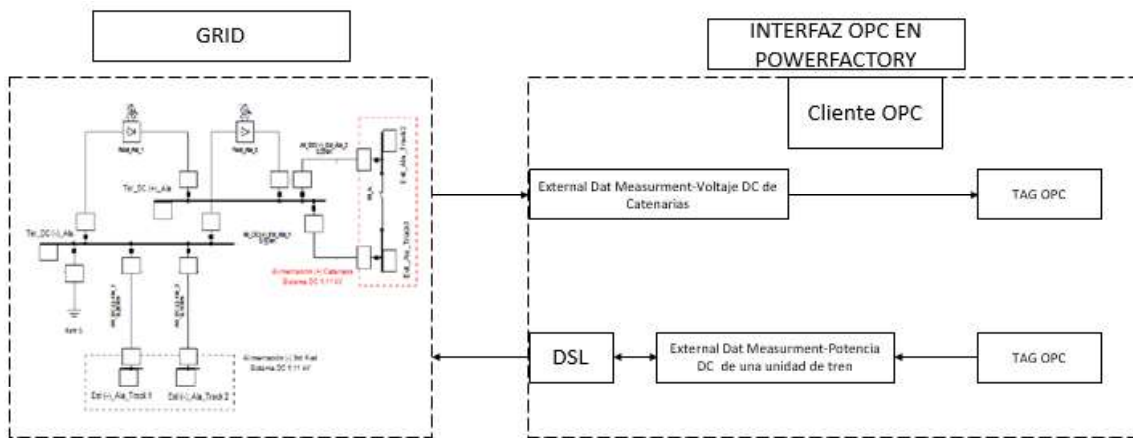


Figura 3.16. Esquema de Interfaz OPC en PowerFactory.

En el esquema de la Figura 3.16 se detalla la interacción del modelo de la red eléctrica y el Interfaz OPC en PowerFactory considerando los procesos de lectura/escritura OPC y de sus señales asociadas.

Para la configuración del cliente OPC en PowerFactory primeramente se configura el objeto de comunicación “External Data Link” (comLink). Dentro del cual se configura los parámetros OPC a emplearse por el cliente PowerFactory, adicionalmente se muestra el estado que se encuentra la comunicación (Inicializado o Detenido), la ventana de configuración de este objeto de comunicación se muestra en la Figura 3.17.

Los parámetros que se configuran en este punto son:

- Tipo de cliente OPC: OPC TDS
- Prog ID: Matrikon.OPC.Simulation.1
- Dirección en donde se ubica el servidor OPC (Computer ID): localhost (ya que están presentes en el mismo ordenador)
- De manera opcional se puede establecer una banda muerta (Dead band) para la actualización de datos. La misma que queda en su valor por defecto de 0.1.
- Otro valor que queda por defecto es el de Engine ID, cuyo valor es 0.

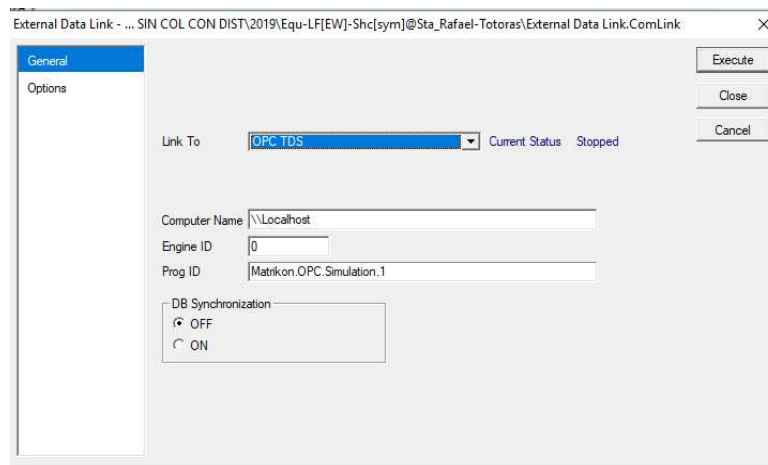


Figura 3.17. Ventana de configuración de objeto External Data Link.

Para que se lleve a cabo la inicialización de la comunicación con el servidor se realiza la ejecución del objeto de comunicación (comlink), con lo cual el cliente PowerFactory se comunique con el servidor OPC. Al realizar la inicialización se añadirán los objetos de comunicación configurados.

Las unidades de tren dentro de PowerFactory (PF) están siendo emuladas por cargas en las cuales se inyecta la potencia activa consumida por el modelo de Simulink lo cual se muestra en la Figura 3.18. Esta carga se conecta hacia un nodo o punto de conexión de una de las barras del bus DC, cuyo valor de voltaje será el que se suministre al modelo en Simulink.

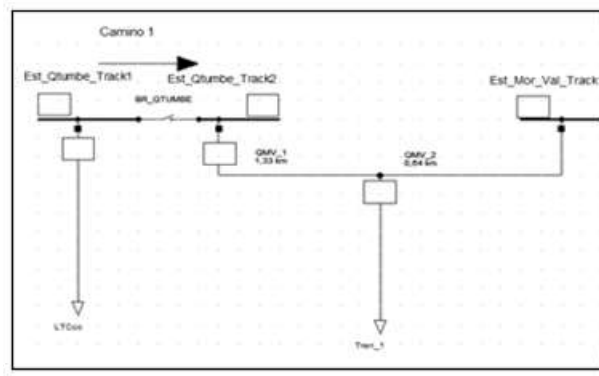


Figura 3.18. Carga de una unidad de tren modelado en PowerFactory conectada a un nodo de una barra de DC.

Para la escritura del voltaje DC y la lectura de la potencia activa de la carga de la unidad de tren se crean los objetos de comunicación OPC.

Los objetos de comunicación se asocian a cada una de las variables mediante un objeto de medición externo (external measurement) que se emplea para la lectura/escritura de datos con el servidor OPC. Estos objetos pueden tener configuración bidireccional, es decir de lectura/escritura.

Dentro de la configuración se indica el tipo de dato, el cual tiene necesariamente concordancia al tipo de dato configurado en el tag del servidor OPC. Para el caso de las variables mencionadas se emplea datos de tipo Real. Además, el modo en el que se obtienen los datos será de forma absoluta, es decir que se va a ir sobrescribiendo los valores en el tiempo sobre la variable. Para la configuración de un elemento de medida externo se tiene los siguientes parámetros:

Tag ID: Para configurar el tag de la señal de voltaje DC se le denomina “VDC_Est1_ida”, y al formar parte en el grupo de tags en el servidor OPC denominado TAGS se configura como: “TAGS. VDC_Est1_ida”. Lo mismo sucede con la señal de la potencia de carga. La pestaña de configuración del “Tag ID” se la muestra en la Figura 3.19.

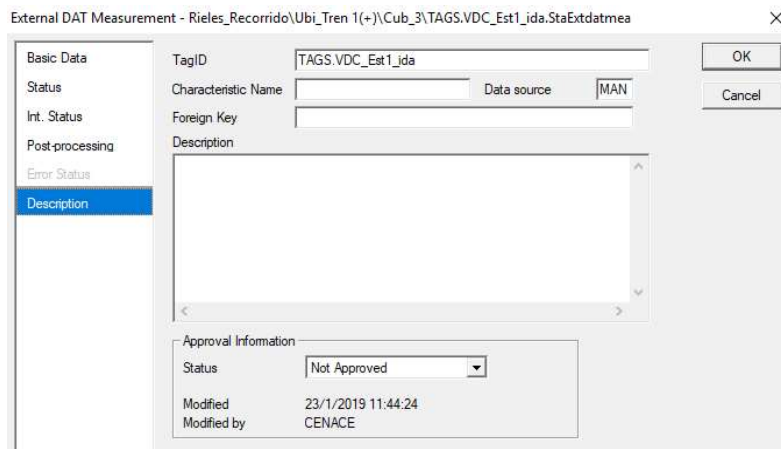


Figura 3.19. Configuración de tag OPC dentro del objeto de comunicación.

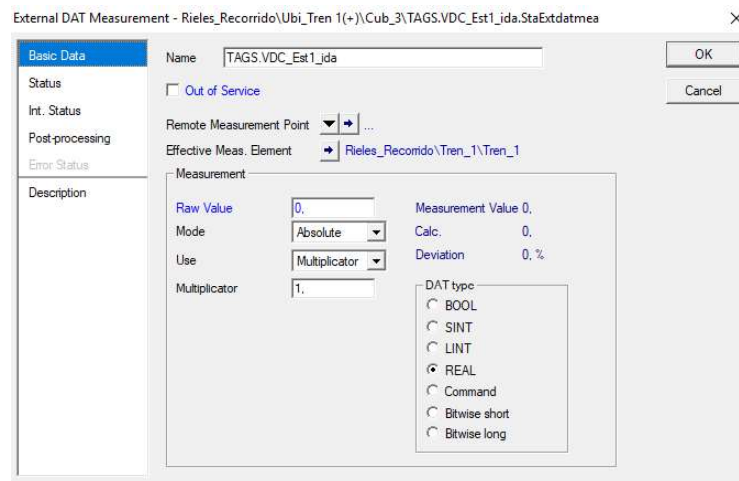


Figura 3.20. Configuración del nombre del objeto de comunicación externo.

Adicionalmente, es recomendable que se deba de emplear el ID del tag como nombre del elemento de medición externo para tener una mejor referencia del objeto utilizado, tal como se observa en la Figura 3.20 que muestra la pestaña “Basic Data” en donde se configura el ID del objeto de medida.

- **Multiplicador:** Tanto en el caso del voltaje DC (hacia el servidor OPC) como de la potencia de la carga (proveniente del servidor OPC) se manejan con sus valores en bruto, es decir el factor de multiplicación será de 1.

- **Estado R/W:** El voltaje DC se configura como objeto de escritura, en cuanto a la potencia activa se lo configura como objeto de lectura. La Figura 3.21 muestra la pestaña “Status” en donde se configura el estado de lectura/escritura del objeto de medición.

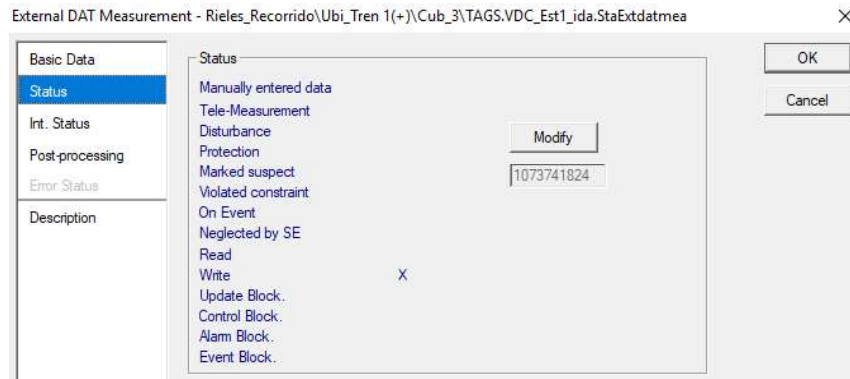


Figura 3.21. Configuración de status R/W del objeto de comunicación externo.

- **Post-procesamiento:** en este parámetro para el caso en el que el objeto de medición realiza la lectura desde el servidor se define hacia dónde (objeto en PF) se realiza la entrega del dato, en cambio cuando el objeto de medición realiza escritura sobre el servidor OPC se define en dónde (objeto en PF) se van recopilando los datos. La Figura 3.22 muestra la pestaña “Post-processing” para el caso específico de un objeto de medida “External DAT Measurement”. Adicionalmente, en la Figura 3.23 se muestra la configuración de los parámetros específicos para la variable de Potencia DC de la carga (unidad de tren).

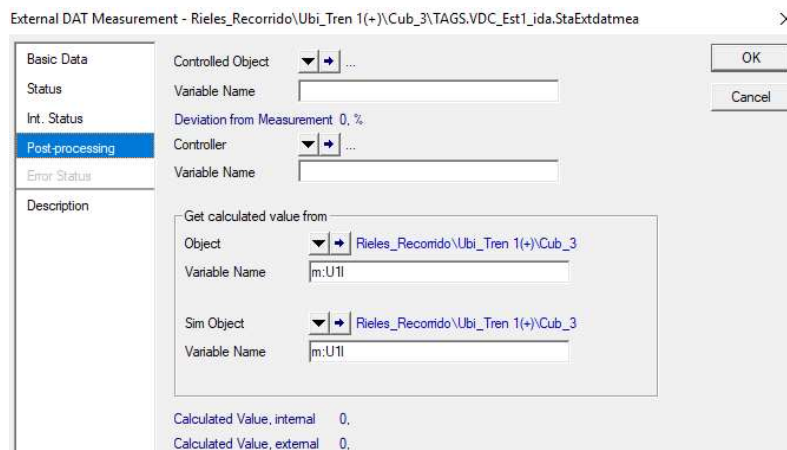


Figura 3.22. Configuración de parámetro post-processing para variable Voltaje DC.

- Se identifica los nombres con los cuales se manejan las variables tanto de potencia como de voltaje en el entorno de PowerFactory el mismo que se configurará en el

caso de un objeto de escritura dentro del parámetro “Variable name” ya que este es un punto crucial hacia el procesamiento del dato.

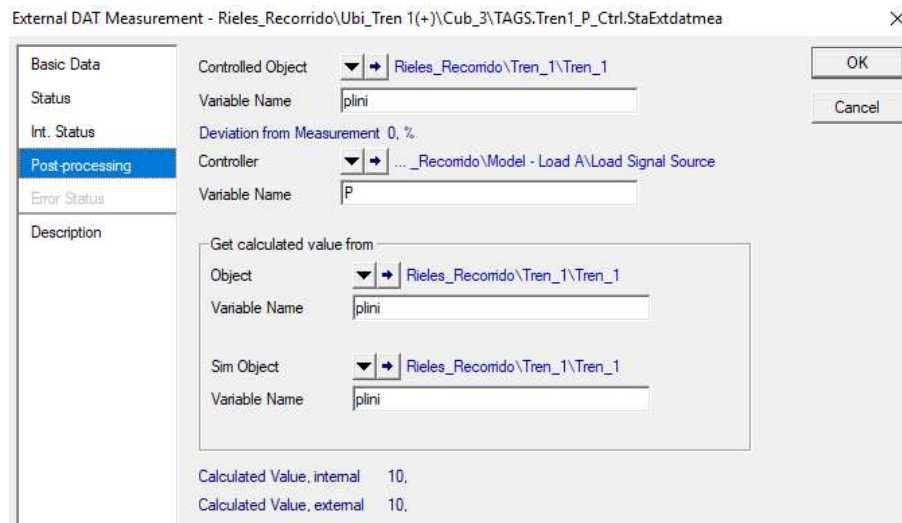


Figura 3.23. Configuración de parámetro post-processing para variable Potencia activa.

Ya configurados los objetos de comunicación en el caso de la señal de voltaje DC no requiere de ningún proceso adicional para su integración con el servidor OPC como señal de escritura. Para el caso de la señal de potencia de la carga se determina la manera en la cual se realiza la integración de este valor proveniente del servidor OPC en la carga y consecuentemente en el modelo del sistema en PowerFactory.

Para realizar la inyección de potencia en la carga se realiza un interfaz entre la señal leída desde el servidor OPC a través del objeto de medición externo y la potencia de la carga.

El interfaz requerido se realiza a través de los comandos DSL. Mediante los cuales se procesará la señal de potencia proveniente del servidor OPC y se inyectará en la carga. De esta manera se emulará la demanda de potencia activa de la carga de una unidad de tren hacia la red.

Para desarrollo del comando DSL primeramente se inicia con la creación de un Composite Model. Para ello se crea el elemento Frame al que se asocia el modelo. Este Frame se lo realiza a partir de Slots. Cada uno de los elementos de red presentan un “Class” definido, por lo que es necesario conocer este parámetro para la creación de los modelos.

Dentro de la estructura del Frame a crearse se emplearán dos slots, tal como se muestra en la Figura 3.24.

El primero, cuyo “Class name” es ElmDsl, será el que maneje la señal proveniente del servidor, que es leída por el objeto de medición externo y como variable de entrada es la señal “P” dando como señal de salida la variable “Pout”.

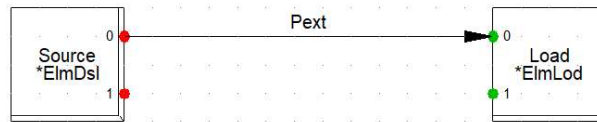


Figura 3.24. Estructura de Frame desarrollado.

El segundo slot, cuyo “Class name” es “ElmLod”, referido al elemento carga, en donde como señal de entrada está la señal procesada por el primer slot. Esta señal de entrada se denomina como “Pext” refiriéndose a que la inyección de potencia hacia el elemento carga se dará a través de un elemento externo. Este Frame se lo va a localizar en la herramienta de Librerías en la opción “User defined models”. Para que de esta forma pueda ser accedido en modelos adicionales.

Posterior a la creación del Frame se realiza la creación del Composite Model. Lo cual se lo realiza dentro de la Grid (identificador de PF referido al modelo del sistema eléctrico). Dentro de la barra de herramientas “Data Manager”, que se muestra en la Figura 3.25, se busca el parámetro “Network Model” dentro del cual se encuentra la opción “Network Data” y ahí se encuentra la Grid en la cual se está trabajando. Para el caso de estudio la grid se denomina “Rieles_Recorrido”. Aquí se realiza la creación de un nuevo elemento que será el composite model. Con lo que se mostrará la ventana de configuración de este modelo. Dentro de los parámetros a configurar están:

- Frame con el cual se va a vincular.
- Definición de los slots a emplearse, los cuales aparecerán de acuerdo a lo que esté presente en el Frame.

Para el caso del slot “ElmDsl” se crea un common model que permita asociar el modelo con el elemento carga. Para esto se crea primeramente un “Block definition” el cual se lo va a ubicar en la herramienta de librería junto al Frame desarrollado.

Dentro de este bloque de definición, cuya ventana de configuración se muestra en la Figura 3.26, se definen parámetros como:

- Definición de Variables: Señales de Entrada (P), Señales de Salida (Pout)
- Definición de condiciones iniciales, que se muestra en la Figura 3.22.

Cabe recalcar que la señal de entrada P será la señal que proviene de la lectura del objeto de medición externo procedente del servidor OPC.

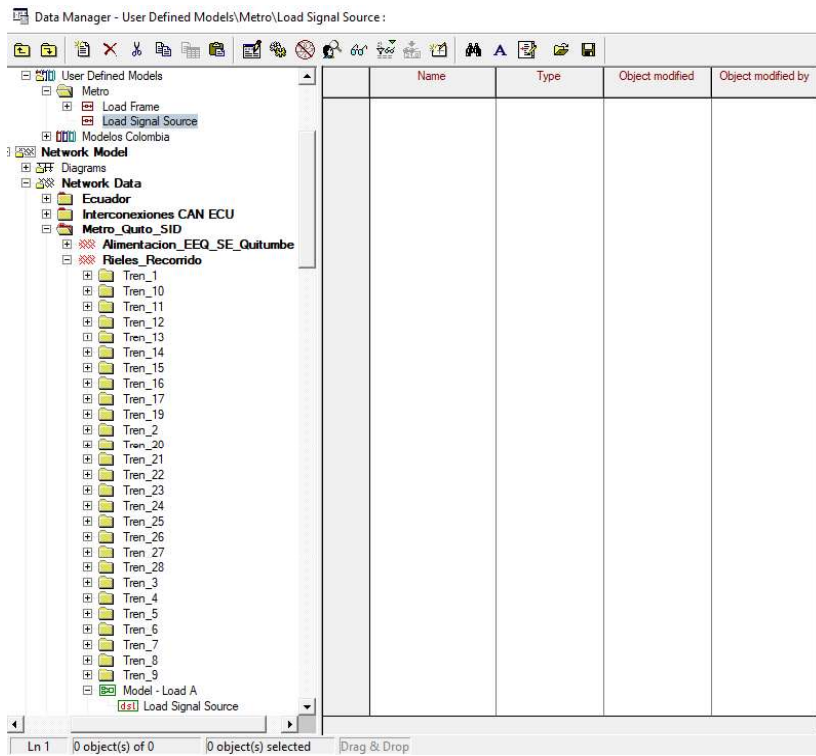


Figura 3.25. Barra de herramientas de PowerFactory en un modelo activo.

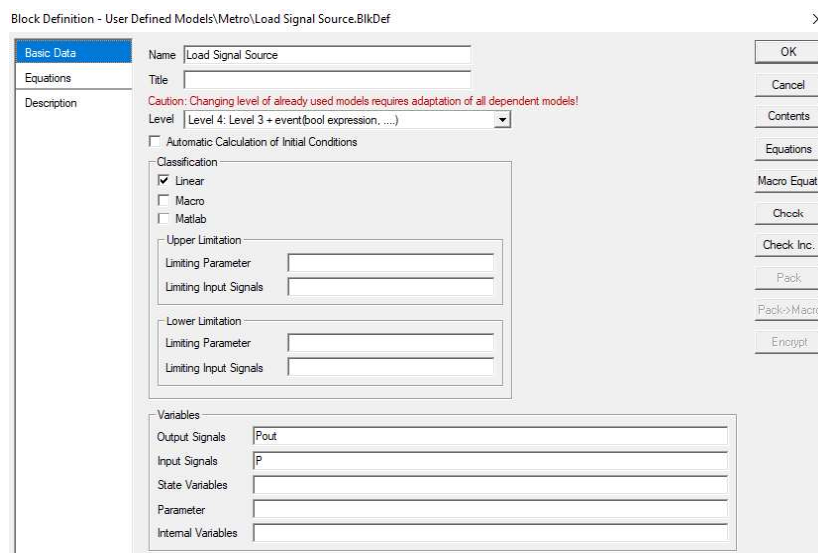


Figura 3.26. Ventana de configuración de un bloque de definición.

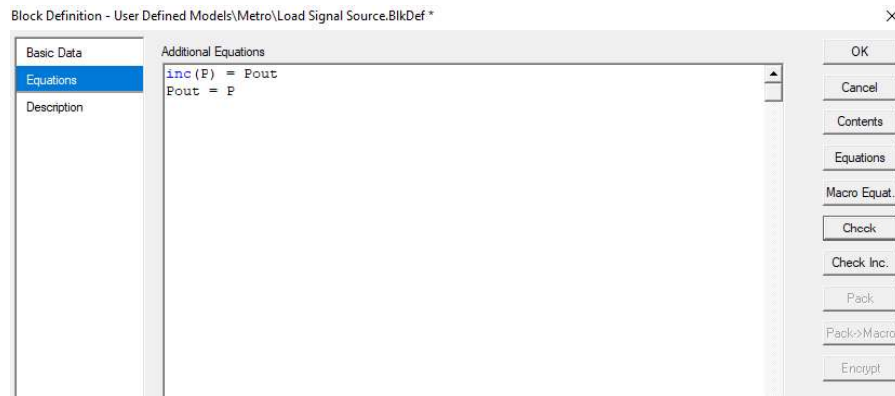


Figura 3.27. Inicialización de las variables de entrada.

Volviendo al “common model”, ventana que se muestra en la Figura 3.28, se lo crea a partir del “composite model”. En la configuración se definen como parámetros:

- Model Definition: se asocia el “block definition” creado que se denominó “Load Signal Source”.

De manera automática en una de las pestañas de este common model, específicamente en la denominada “Advanced 3”, mostrada en la Figura 3.29, se visualizan las señales de entrada y salida a emplearse, que son P y Pout respectivamente.

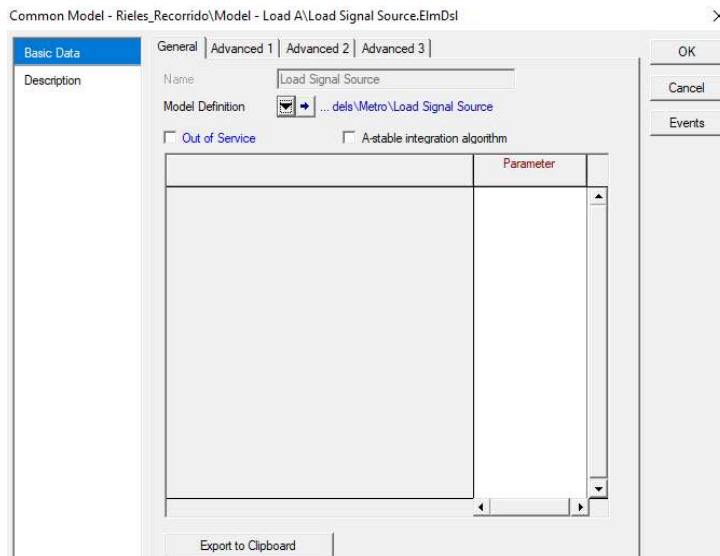


Figura 3.28. Ventana de configuración de common model. Pestaña de definición de modelo de elemento eléctrico.

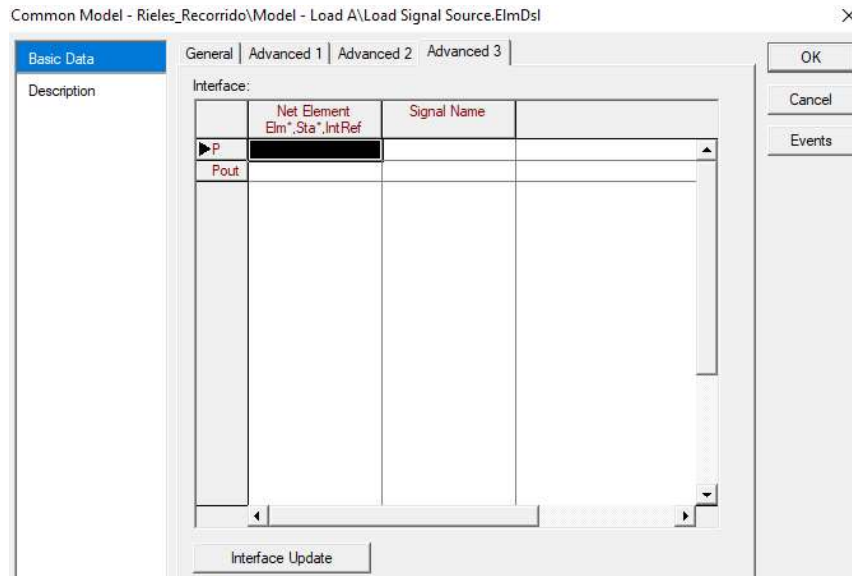


Figura 3.29. Ventana de configuración de common model. Pestaña de variables de entrada y salida.

De esta manera la señal de potencia de la carga podrá ser inyectada hacia la red a través del elemento carga.

3.3. DISEÑO DE CONTROLADOR VECTORIAL FOC

El esquema del controlador FOC a implementarse está basado en el mostrado en la Figura 3.30.

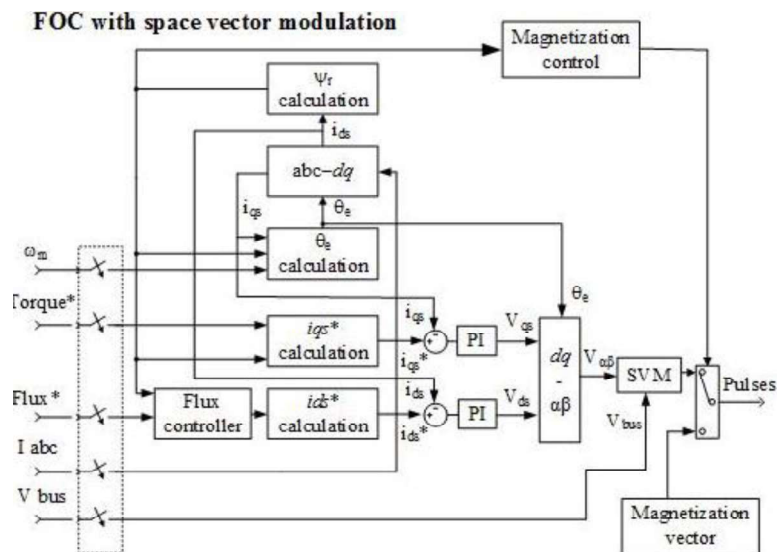


Figura 3.30. Esquema de control vectorial FOC implementado por Simulink [36].

Presenta dos controladores dentro de su lazo de control que son: Controlador de Velocidad y Controlador de corriente. Cada uno de ellos contienen un controlador de tipo PI.

El cálculo de los parámetros de los controladores PI se basan en los valores del circuito equivalente del motor de inducción. El proceso de cálculo de los controladores PI de corriente y velocidad se los realiza en concordancia con el trabajo desarrollado en [37].

3.3.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DE LOS 4 MOTORES DE TRACCIÓN. MÉTODO DE AGREGACIÓN DINÁMICA

Por lo general el cálculo de los controladores PI indicados están orientados hacia el manejo de un solo motor de inducción conectado. El sistema por implementarse está relacionado con el manejo de cuatro motores de inducción con un solo controlador. Por lo que es necesario el circuito equivalente de este conjunto de motores. Ya que la operación de este conjunto se da de forma sincronizada, es decir mantiene la misma velocidad, además de estar conectados al mismo bus y caja de engranajes, se puede asumir que su comportamiento equivale al de un solo motor de inducción de características equivalentes a las de los cuatro motores.

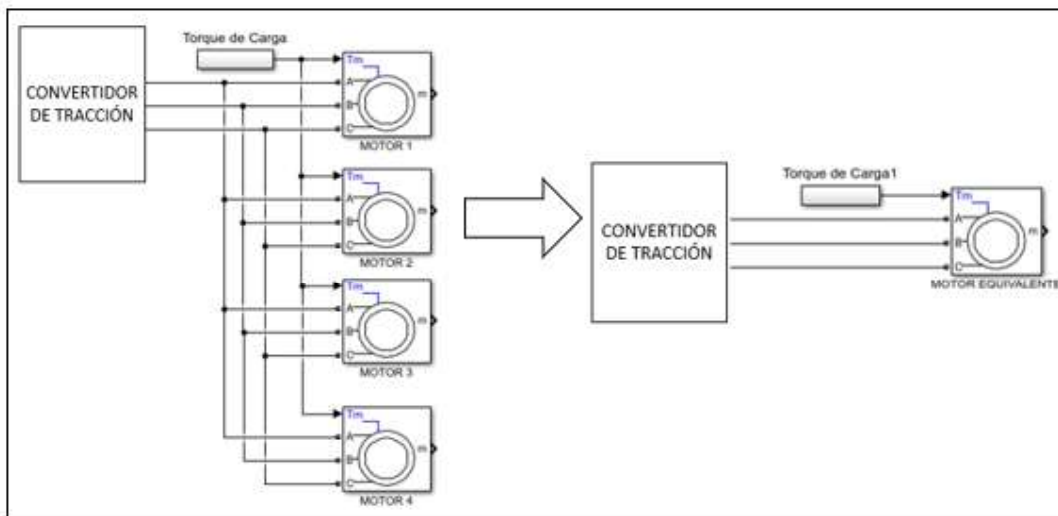


Figura 3.31. Esquema de

Para este efecto, se utiliza el método denominado Método de agregación dinámica de motores de inducción.

Este método está basado en matemática difusa, cuyo método se denomina de agrupación difusa. Toda la teoría detrás de este método se lo puede encontrar en la bibliografía [38] por lo que se realiza el estudio del método asociado al sistema de motores específicamente en lo que se refiere a la metodología de cálculo de los parámetros del circuito equivalente.

Para el caso de los motores de inducción, la agregación se la realiza en base a una simplificación de las ecuaciones del motor en un mismo grupo.

Inicialmente como punto de partida se tiene la Teoría de Northon, definiéndose el circuito equivalente transitorio de motores conectados al mismo bus como se puede observar en la Figura 3.32.

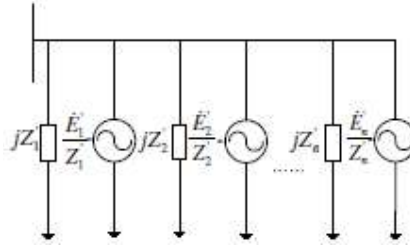


Figura 3.32. Circuito equivalente transitorio de motores de inducción conectados al mismo bus [38].

En este estudio aparece el concepto de impedancia transitoria equivalente cuya expresión está dada por que será el punto de partida para el cálculo de los demás parámetros de acuerdo al siguiente procedimiento desarrollado en [38].

$$R_{s,eq} + jX'_{eq} = 1/(\sum_{i=1}^n 1/(R_{si} + jX'_i)) \quad (3.16)$$

$$X'_{eq} = X_{s,eq} + X_{r,eq}X_{m,eq}/(X_{r,eq} + X_{m,eq}) \quad (3.17)$$

$$X = X_{sm} = X_s + X_m \quad (3.18)$$

$$X_{rm} = X_r + X_m \quad (3.19)$$

$$X_p = X_sX_m + X_rX_m + X_sX_r \quad (3.20)$$

$$R_e = \frac{R_sX_{sm}^2}{(X_p^2 + R_s^2X_{sm}^2)} \quad (3.21)$$

$$X_e = -X_pX_{rm}/(X_p^2 + R_s^2X_{sm}^2) \quad (3.22)$$

$$\frac{X_{eq} - X'_{eq}}{X_{eq}} = \frac{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X'_i)}{X_i} \right]}{n} \quad (3.23)$$

$$X_{s,eq} = X_{eq} - \sqrt{X_{eq}(X_{eq} - X'_{eq})} \quad (3.24)$$

$$X_{r,eq} = X'_{eq} - X_{s,eq} \quad (3.25)$$

$$R_{r,eq} = \frac{X_{eq}}{\omega_s T'_{0,eq}} \quad (3.26)$$

$$T'_{0,eq} = T'_0 \quad (3.27)$$

$$T'_0 = (X_r + X_m)/(\omega_s R_r) \quad (3.28)$$

$$X_{m,eq} = X_{eq} - X_{s,eq} \quad (3.29)$$

En donde:

R_s : Resistencia del devanado del estator (p.u.).

R_r : Resistencia del devanado del rotor (p.u.).

X_s : Reactancia de fuga del estator (p.u.).

X_r : Reactancia de fuga del rotor (p.u.).

X_s : Reactancia mutua (p.u.).

ω_s : Frecuencia angular del sistema de potencia (rad/s).

ω : Velocidad del rotor (p.u.).

eq: sufijo relacionado a valor equivalente.

$R_{s,eq} + jX'_{eq}$: Impedancia transitoria equivalente.

X : Reactancia de fuga del estator.

X_{rm} : Reactancia de fuga del rotor.

X_p : Reactancia de reacción de inducido.

R_e : Resistencia en estado estable.

X_e : Reactancia en estado estable.

$X_{s,eq}$: Reactancia de fuga equivalente del estator.

$R_{r,eq}$: Resistencia del devanado del rotor equivalente.

$X_{r,eq}$: Reactancia de fuga equivalente del rotor.

$X_{m,eq}$: Reactancia mutua equivalente.

T'_0 : Torque prima en estado estable.

$T'_{0,eq}$: Torque equivalente prima en estado estable.

Para el cálculo de los parámetros en base a las ecuaciones mostradas se emplea un archivo .m adjunto en el ANEXO B desarrollado para el caso del conjunto de cuatro motores, para ello los parámetros del circuito equivalente del motor individual están en por unidad (p.u.) para luego de ya obtenidos los valores del equivalente transformarlos a sus unidades respectivas.

Los valores del circuito equivalente de uno de los motores se detallan en la Tabla 3.10.

Para el caso de las Inductancias se calcula el valor de sus Reactancias, a través de la Ecuación 3.30.

$$X = 2\pi fL \quad (3.30)$$

Para realizar las transformaciones al sistema por unidad se emplea las Ecuaciones 3.31 y 3.32, basadas en las características de placa de los motores de tracción.

$$Z_{p.u.} = \frac{Z_{Real}}{Z_{Base}} \quad (3.31)$$

$$Z_{Base} = \frac{V_{in}^2}{P} \quad (3.32)$$

En donde, Z_{Real} es el valor de resistencia o reactancia del motor de inducción.

Tabla 3.10. Parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción.

Elemento	Valor	p.u.
Resistencia de devanado del estator (Rs)	0.07364 Ohms	0.0056
Resistencia de devanado del rotor (Rr)	0.04021 Ohms	0.00305
Inductancia de fuga del estator (Ls)	0.0035 H	-
Inductancia de fuga del rotor (Lr)	0.0017 H	-
Inductancia mutua (Lm)	0.1120 H	-
Reactancia de fuga del estator (Xs)	1.3194 Ohms	0.1003
Reactancia de fuga del rotor (Xr)	0.6408 Ohms	0.04873
Reactancia mutua (Xm)	42.223 Ohms	3.2108

Empleando el procedimiento indicado se obtienen los valores del circuito equivalente. Adicionalmente, se realiza el cálculo de los valores reales de resistencia y de las reactancias basado en la Ecuación 3.33. Por lo que conjuntamente se detallan en la Tabla 3.11.

$$Z_{Real} = Z_{p.u.} Z_{Base} \quad (3.33)$$

Tabla 3.11. Parámetros del circuito equivalente del conjunto de cuatro motores.

Elemento	p.u.	Ohmios
Resistencia de devanado del estator (Rs)	0.0014	0.01841
Resistencia de devanado del rotor (Rr)	0.0007745	0.01018
Reactancia de fuga del estator (Xs)	0.0188	0.24722
Reactancia de fuga del rotor (Xr)	0.0183	0.24064
Reactancia mutua (Xm)	0.8090	10.6383

Para el caso de las Reactancias es necesario obtener el valor de las Inductancias en su unidad de Henrios (H), por lo que al realizar las transformaciones necesarias en base a la Ecuación 3.30 en donde se tiene los valores de la Tabla 3.12.

Tabla 3.12. Valores de Inductancias calculadas.

Elemento	Ohmios	mH
Reactancia de fuga del estator (Ls)	0.24722	0.6557
Reactancia de fuga del rotor (Lr)	0.24064	0.6383
Reactancia mutua (Lm)	10.6383	28.2189

Adicionalmente, se calculan los valores de potencia activa nominal y momento de inercia. Para el caso de la potencia activa nominal, la potencia total del conjunto será la suma de cada una de las potencias nominales de cada motor.

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.34)$$

Como la potencia nominal individual de cada motor es de 92 kW, la potencia equivalente será de 368 kW.

En cuanto al torque total, empleando la Ecuación 3.34, y de la expresión en la cual se relaciona la potencia, torque y velocidad angular de la máquina dada en la Ecuación 3.35, el cálculo del torque total está dada por la Ecuación 3.36.

$$P = M \cdot \Omega \quad (3.35)$$

$$M_T \Omega_T = \sum_{i=1}^n M_i \cdot \Omega_i \quad (3.36)$$

Dentro de la operación del conjunto de motores la velocidad será la misma.

$$\Omega_T = \Omega_i$$

Por lo que el torque del conjunto de motores de inducción será:

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (3.37)$$

En cuanto al cálculo del momento de inercia del conjunto de motores se asume para efectos de cálculo que los momentos de inercia adicionales al de los motores son despreciables por lo que se tiene que:

$$J_T = \sum J_M + J_A + J_L \quad (3.38)$$

Si $J_A \approx 0$ y $J_L \approx 0$ finalmente se tiene el momento de inercia para el conjunto de motores:

$$J_T = \sum J_M \quad (3.39)$$

Donde,

J_M : Momento de inercia del motor.

J_L : Momento de inercia de la carga.

J_A : Momento de inercia de los acoples.

Realizando el cálculo del momento de inercia del conjunto de motores se tiene:

$$J_T = 509.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Validación del modelo de circuito equivalente del conjunto de motores.

De acuerdo a los valores calculados se realiza la validación del modelo del conjunto de motores. Para lo cual este proceso se realiza en base a lo realizado en [39], tomando como referencia los parámetros eléctricos como corrientes en el rotor y estator, además de la velocidad angular y torque electromagnético, realizando una comparación entre las señales

obtenidas entre el conjunto de motores y el motor equivalente. El modelo que se implementa para la validación es en lazo abierto, es decir no presenta realimentación ni un sistema de control para el accionamiento del motor de inducción.

La prueba a realizarse será con una referencia de velocidad igual a un 40% de la velocidad nominal. Además de operar a condiciones de vacío.

Velocidad del rotor

- Conjunto de Motores y Motor Equivalente

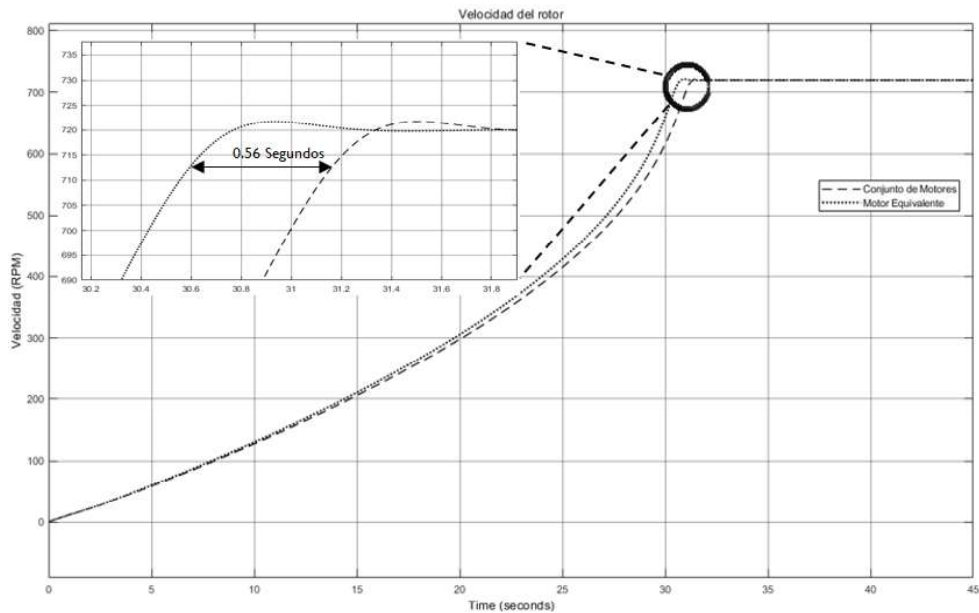


Figura 3.33. Velocidad angular del rotor. Conjunto de Motores y Motor Equivalente.

La respuesta de velocidad de angular del rotor de la Figura 3.33 muestra que a medida en que se llega a velocidad en estado estable los modelos presentan un pequeño retardo de aproximadamente 0.56 segundos. Observando que el motor equivalente presenta una dinámica relativamente más rápida en relación al conjunto de motores. Sin embargo, no existe error alguno durante la etapa de estado estable al comparar las dos señales de velocidad.

Torque electromagnético

- Conjunto de Motores

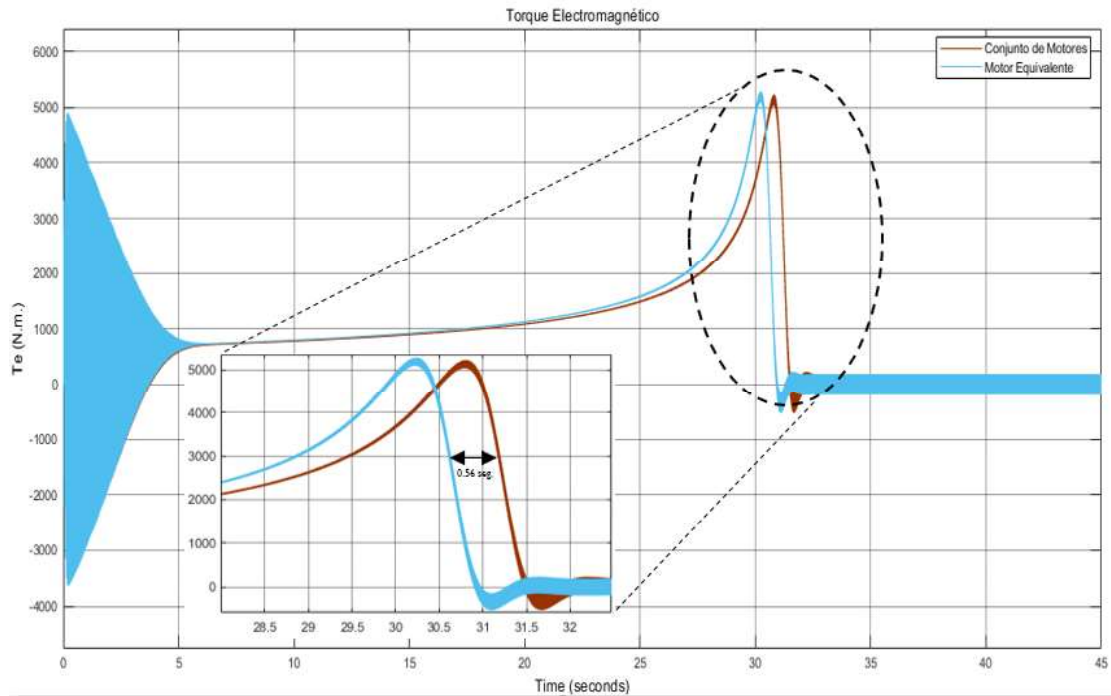


Figura 3.34. Torque electromagnético. Conjunto de motores y Motor equivalente.

En la Figura 3.35 se tiene las señales de Torque electromagnético del conjunto de motores y motor equivalente. Observándose que a medida en la que se llega a un valor de estado estable con relación a la velocidad angular, se presenta un retardo entre estas señales de aproximadamente 0.56 segundos. La dinámica del motor es relativamente más rápida con respecto a la dinámica del conjunto de motores. Durante la etapa de velocidad en estado estable no se observa un error de estado estacionario entre las señales.

Corrientes del Motor

Corriente del rotor. Fase a

En la Figura 3.35 se tiene que la corriente inicia con un ciclo negativo con un pico de aproximadamente 3000 A, para su segundo pico se tiene un valor de aproximadamente 1000 A durante el arranque. Durante el instante 30.5 segundos, se tiene un pico de 1500 A, para finalmente en su ciclo negativo alcanzar un pico de 1000 A, llegando al valor de 0 A en el instante 31.5 segundos durante la etapa de velocidad de estado estable.

- Conjunto de Motores

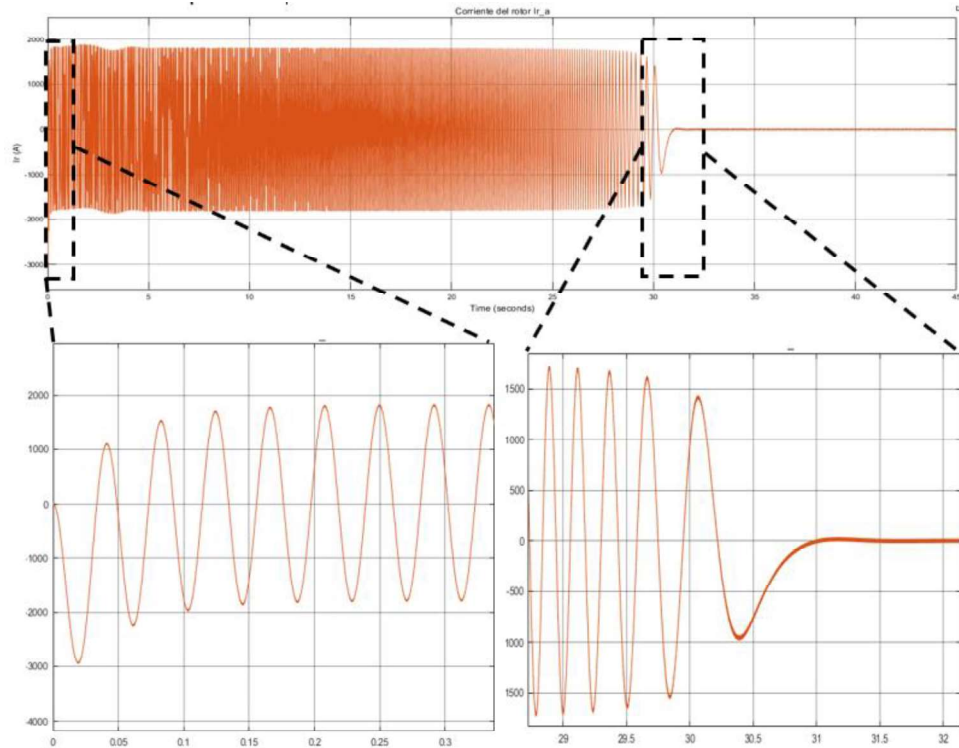


Figura 3.35. Corriente en el rotor fase a. Conjunto de motores.

- Motor Equivalente

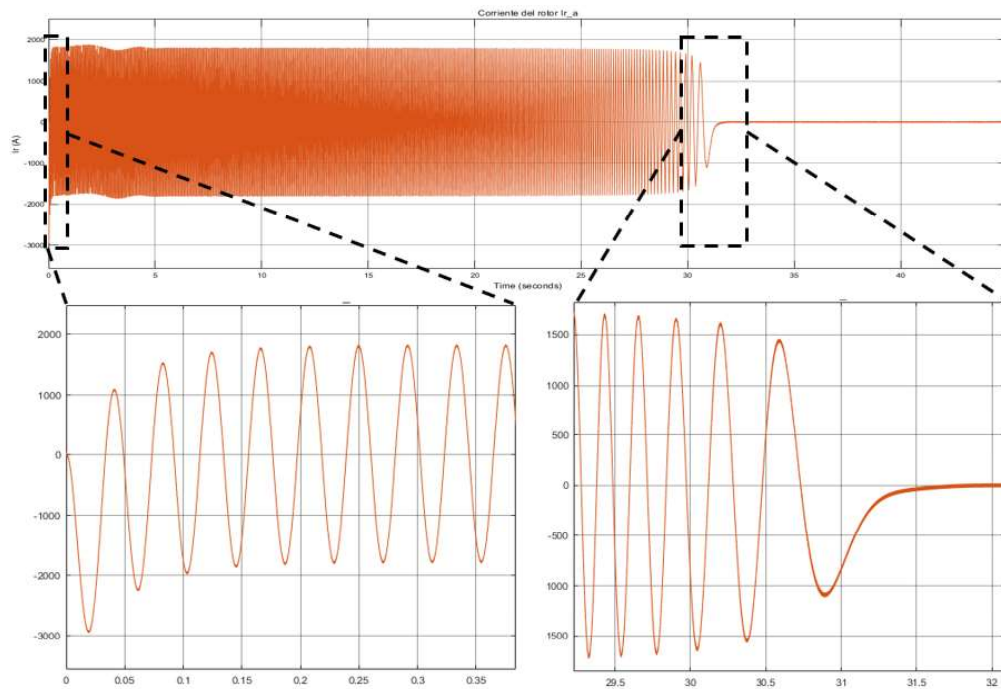


Figura 3.36. Corriente en el rotor fase a. Motor equivalente.

En la Figura 3.36 la corriente inicia con un pico de 3000 A en el ciclo negativo, su segundo pico se da en el ciclo positivo con un valor de 1000 A durante el arranque. Para la velocidad en estado estable, en el instante 29.8 segundos se tiene un pico de 1500 A para posteriormente tenerse un pico en el ciclo negativo de 1000 A, hasta llegar a un valor de 0 A en el instante de 31 segundos que se mantiene durante el estado estacionario.

Corriente del Estator. Fase a

- Conjunto de Motores

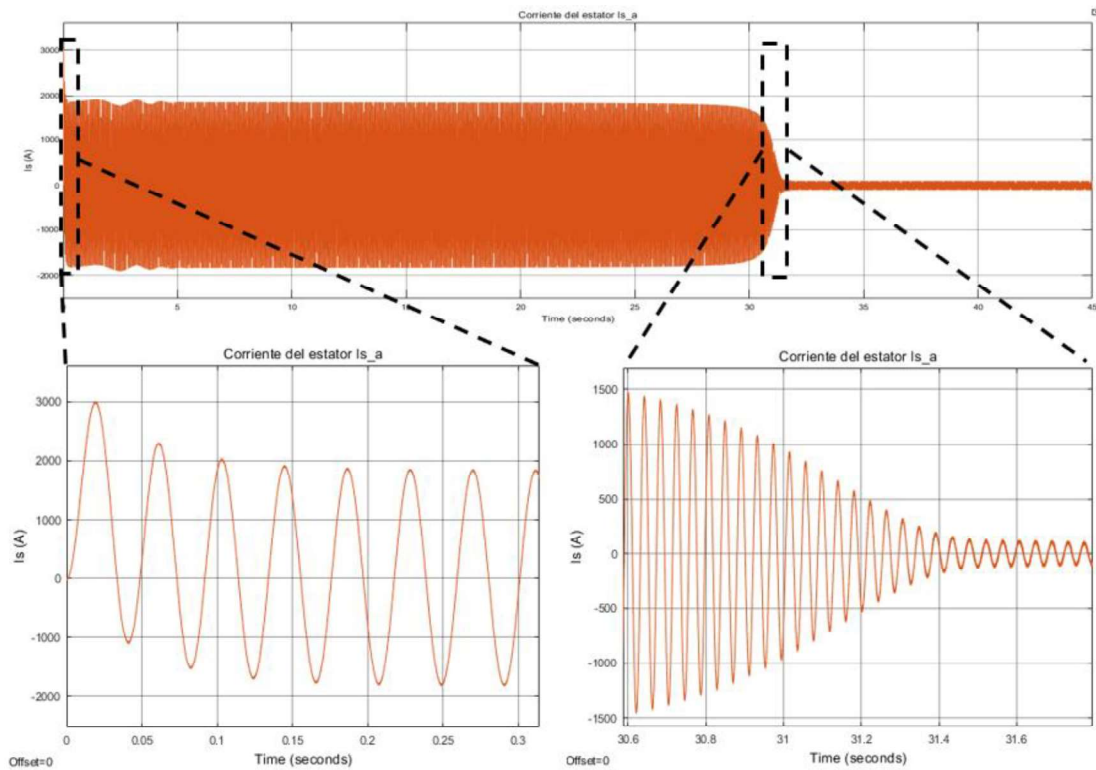


Figura 3.37. Corriente en el estator fase a.

En la Figura 3.37 la corriente inicia con un pico de 3000 A en el ciclo positivo, seguidamente su segundo pico es de 1000 A en el ciclo negativo durante el arranque. Para la velocidad en estado estable se toma como referencia el instante 30.8 segundos donde alcanza un pico de 1200 A en el ciclo positivo, hasta llegar al estado transitorio en donde su valor se mantiene con picos de 60 A tanto en el ciclo positivo como negativo.

- Motor Equivalente

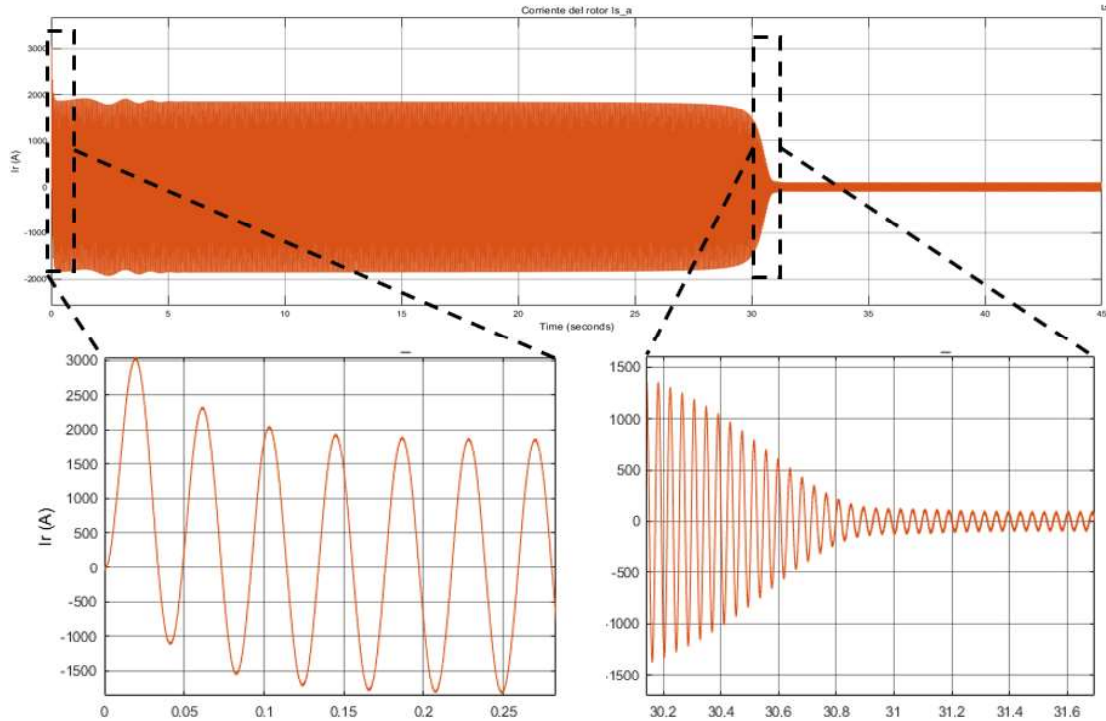


Figura 3.38. Corriente en el estator fase a.

En la Figura 3.38 la corriente inicia con un pico en el ciclo positivo cuyo valor es de 3000 A, para su segundo pico alcanza un valor de 1000 A, durante el arranque. Para cuando se alcanza la velocidad en estado estable se toma como referencia el instante 30.2 segundos en donde la corriente alcanza un pico cuyo valor es de 1200 A, para así llegar al estado transitorio donde se alcanza un valor de 60 A tanto en el ciclo positivo y negativo.

Validación

Las corrientes tanto en el estator como el rotor presentan comportamientos similares, con respecto a su fase, frecuencia y amplitud, comparando a las señales obtenidas en el conjunto de motores y en el motor equivalente. Además, como parámetro a destacar es el tiempo de estabilización, ya que se observa que en el conjunto de motores este tiempo es mínimamente mayor al del motor equivalente. En relación a parámetros como de amplitud y fase presentan concordancia, por lo que los modelos en este punto se aproximan.

En la dinámica del sistema, refiriéndonos a la velocidad y torque, se observa que la respuesta del conjunto de motores es mínimamente más lenta. Los valores de la amplitud tienen correspondencia entre ambos modelos. Basado en estos resultados se puede afirmar que los modelos son aproximados.

En conclusión, ya que cada uno de los parámetros de las señales obtenidas por ambos modelos, se verifica la aproximación entre ellos, tomando en consideración las pequeñas diferencias que se han mostrado, principalmente en la dinámica del sistema, aunque como se observó no es un parámetro tan relevante.

3.3.2. DISEÑO DE CONTROLADORES DE VELOCIDAD Y CORRIENTE

En la Figura 3.39 se tiene la modelación del controlador FOC. En donde se detallan los bloques de controlador de velocidad y controlador de flujo (FOC), además de sus respectivas señales de entrada y salida.

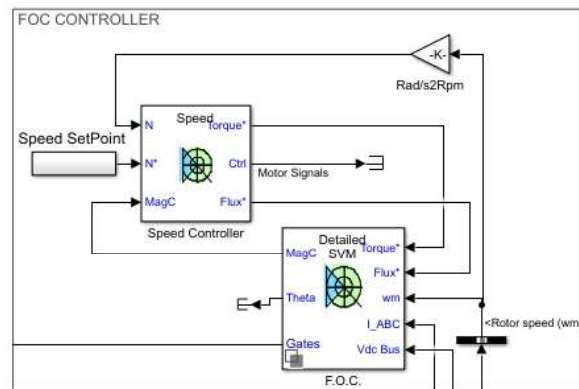


Figura 3.39. Esquema de controlador FOC modelado en Simulink.

Controlador de Corriente

Las corrientes i_d e i_q obtenidas de las transformaciones permiten que se realice control sobre la magnetización y el torque de la máquina de una forma independiente entre ellas. Para cada una de las corrientes se emplea un controlador PI cuyo esquema se basa en la Figura 3.40.

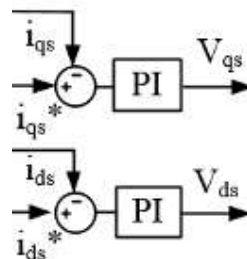


Figura 3.40. Estructura controladores de corriente PI [36].

De la estructura mostrada se observa que tanto para la corriente i_d como para la i_q se tiene un valor de referencia a la entrada (i_d^* e i_q^*). Para i_d^* su valor estará dado en base a la corriente de magnetización nominal. El valor de i_q^* proviene de la salida del controlador de velocidad.

Para mejor rendimiento del controlador en cuanto a su respuesta, además de ir mejorando la sensibilidad del esquema PI se modifica la estructura del controlador PI clásico. Implementando una etapa de preamplificación del error en base a la salida de la parte proporcional del controlador, tal como se observa en la Figura 3.41.

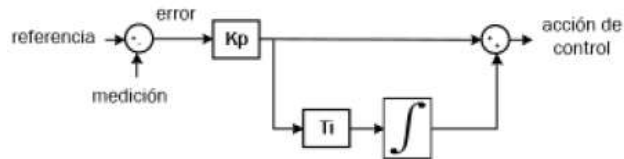


Figura 3.41. Esquema de controlador PI con etapa preamplificada [37].

Cada uno de los parámetros del controlador se basa en las características de la máquina de inducción. El criterio en el cual se basa el cálculo de estos parámetros se denomina “Criterio de Optimización de magnitud de un controlador PI” o simplemente PI óptimo [40].

Para el desarrollo, el primer punto a establecer es la función de transferencia del controlador a implementarse de acuerdo a la Ecuación 3.40.

$$G_I = K_p \frac{1+T_n \cdot s}{T_n \cdot s} \quad (3.40)$$

Se observa que dentro de la función de transferencia las constantes a calcularse son K_p (constante proporcional) y T_n (constante integral). Por lo que se tienen las siguientes ecuaciones:

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{\sigma L_1}{\sum T_i} \quad (3.41)$$

$$T_n = \tau_{1\sigma} \quad (3.42)$$

Donde,

σ : Coeficiente de dispersión.

L_1 : Inductancia del estator.

$\sum T_i$: Tiempos no considerados debido a los sistemas microprocesados.

$\tau_{1\sigma}$: Constante de tiempo del estator.

Uno de los parámetros que ha de ser revisado es el de la Inductancia, ya que el valor considerado en la Tabla 3.11 se trata de la inductancia de fuga de estator (L_s), lo cual difiere de lo que se requiere en el cálculo del controlador. Por lo que para el cálculo de la inductancia del estator se necesita no solamente la inductancia de fuga, sino que

adicionalmente interfiere el valor de la inductancia mutua (L_m). Para este efecto se utiliza la Ecuación 3.43.

$$L_1 = L_s + L_m \quad (3.43)$$

$$L_1 = 0.6557 + 28.2189$$

$$L_1 = 28.8746 \text{ mH}$$

El siguiente parámetro por calcular es el coeficiente de dispersión σ . Teniendo como referencia la Ecuación 3.44. En donde como parámetros se tiene la inductancia del estator, inductancia de fuga del estator y adicionalmente la inductancia del rotor, en cuyo caso su cálculo se realiza de la misma forma que para la inductancia del estator.

$$L_2 = L_r + L_m \quad (3.44)$$

$$L_2 = 0.6383 + 28.2189$$

$$L_2 = 28.8572 \text{ mH}$$

Y consecuentemente se calcula el valor de la constante σ en base a la Ecuación 3.45.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \quad (3.45)$$

$$\sigma = 1 - \frac{28.2189^2}{(28.8746) \cdot (28.8572)}$$

$$\sigma = 0.0443$$

El último parámetro a determinar es $\sum T_i$, cuyo valor se asume tomando en cuenta el entre 1 y 2 períodos de la señal PWM [37], adicionalmente se considera los tiempos de retardo debido al procesamiento (Sensores, conversores A/D, comunicación, etc). El tiempo se toma en base a los tiempos de procesamiento de la plataforma VEGA, la cual se encarga del sistema de control de la unidad de tren, cuyo valor es de 70 ms [2].

Por lo que la constante K_p será:

$$K_p = \frac{1 (0.0443) \cdot (28.8746 * 10^{-3})}{2 \cdot 70 * 10^{-3}}$$

$$K_p = 0.009136$$

Para el cálculo de la constante T_n se requiere determinar el valor de $\tau_{1\sigma}$ que se refiere a la constante de tiempo del estator. Por lo cual se emplea la Ecuación 3.46.

$$\tau_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R} \quad (3.46)$$

En la Ecuación 3.46 como parámetro que resta por determinar es la Resistencia total R, por lo cual se emplea la Ecuación 3.47:

$$R = R_1 + \frac{R_2}{(1+\sigma_2)^2} \quad (3.47)$$

Donde,

R_1 : Resistencia del estator.

R_2 : Resistencia del rotor.

σ_2 : Coeficiente de dispersión del rotor.

Los valores de las resistencias tanto del estator como del rotor son tomados de la Tabla 3.10. En cuanto al coeficiente de dispersión del rotor se lo calcula en base a la Ecuación 3.48.

$$\sigma_2 = \frac{L_2 - L_m}{L_m} \quad (3.48)$$

De esta manera se procede al cálculo en base a los parámetros requeridos, obteniéndose el valor de σ_2 .

$$\sigma_2 = \frac{28.8572 - 28.2189}{28.2189}$$

$$\sigma_2 = 0.02262$$

Con el valor de σ_2 calculado, se determina el valor de la resistencia total R.

$$R = 0.01841 + \frac{0.01018}{(1 + 0.02262)^2}$$

$$R = 0.02814 \Omega$$

Por último, se procede al cálculo de $\tau_{1\sigma}$, después de determinar todos sus parámetros.

$$\tau_{1\sigma} = \frac{(0.0443) \cdot (28.8746 * 10^{-3})}{0.02814}$$

$$\tau_{1\sigma} = 0.0454 \text{ seg.}$$

Con la constante de tiempo del estator calculada, por la Ecuación 3.42 se ha determinado el valor de Tn.

$$T_n = 0.0454$$

Al determinar los valores de Kp y Tn se puede emplear en la función de transferencia del controlador en base a la Ecuación 3.40.

$$G_I = (0.009136) \frac{1 + 0.0454.s}{0.0454.s}$$

Como parámetro adicional se calcula el flujo magnético del rotor en su valor nominal. El cual está relacionado con la corriente de magnetización del motor. Para efectos de cálculo se asume que el flujo magnético tanto del rotor como del estator son aproximadamente iguales basado en el principio de la máquina de inducción [37]. Para su cálculo se emplea la Ecuación 3.49.

$$|\psi_2| = \frac{|V_{in}|}{2\pi \cdot f_n \cdot p} \quad (3.49)$$

Donde,

$|\psi_2|$: Flujo magnético del rotor

$|V_{in}|$: Voltaje nominal de alimentación del motor

f_n : Frecuencia nominal

p : Número de pares de polos

Los parámetros necesarios para el cálculo del flujo están de acuerdo a las características del motor por lo que no se requiere cálculos adicionales. Partiendo de la Ecuación 3.49 se efectúa los cálculos correspondientes.

$$|\psi_2| = \frac{1100}{2\pi \cdot (60) \cdot (2)}$$

$$|\psi_2| = 1.458 \text{ Wb}$$

El valor de flujo es un parámetro necesario dentro de la configuración del bloque de controlador FOC en Simulink, ya que determina los límites de saturación a la salida del controlador de flujo (referencia i_d^*) a la entrada del controlador de corriente.

Controlador de Velocidad

Dentro del esquema de control FOC, el controlador determina la señal de referencia i_q^* para el controlador de corriente i_q . Su estructura se basa en el esquema de la Figura 3.42.

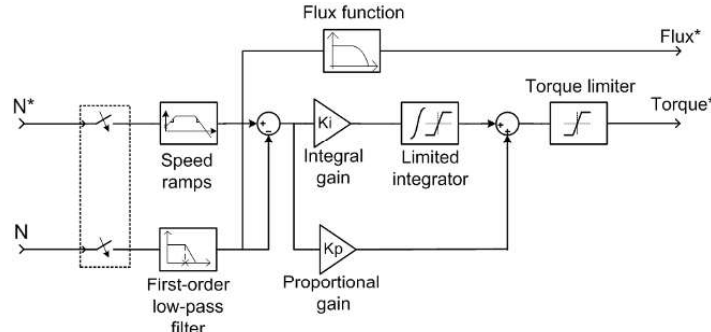


Figura 3.42. Estructura del controlador de velocidad [41].

Para el cálculo de los parámetros del controlador PI, primeramente, se define la función de transferencia del controlador de velocidad la misma que está dada en la Ecuación 3.50.

$$G_{\Omega} = V_{\Omega} \frac{1+T_{n\Omega}s}{T_{n\Omega}s} \quad (3.50)$$

Primeramente, se realiza el cálculo de la constante V_{Ω} referente a la acción proporcional en base a la Ecuación 3.51.

$$V_{\Omega} = \frac{\tau_{mech}}{2.T_s} \quad (3.51)$$

Donde,

τ_{mech} : Constante de tiempo mecánica

T_s : Tiempos que no se consideran durante el procesamiento.

Para el caso de la constante de tiempo mecánica partimos de la ecuación de torque de la máquina en condiciones de vacío mostrada en la Ecuación 3.52.

$$M_m = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.52)$$

Si $\frac{d\Omega}{dt}$ se aproxima a $\frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$ la Ecuación 3.52 se expresa como:

$$M_m = J \frac{\Delta\Omega}{\Delta t}$$

Teniendo en cuenta las características nominales del motor en cuanto a su torque y velocidades nominales.

$$\Delta t = J \frac{\Omega_N}{M_N}$$

Y por definición se tiene finalmente la ecuación de la constante de tiempo expresada en la Ecuación 3.53.

$$\tau_{mech} = J \frac{\Omega_N}{M_N} \quad (3.53)$$

Calculando el valor de la constante de tiempo se tiene el valor de V_Ω .

$$\tau_{mech} = (127.47) \frac{(175.615)}{523.87}$$

$$\tau_{mech} = 42.732 \text{ seg.}$$

$$V_\Omega = \frac{42.732}{2 \cdot (70 \cdot 10^{-3})}$$

$$V_\Omega = 305.228$$

El cálculo de la constante $T_{n\Omega}$ se calcula mediante la Ecuación 3.54.

$$T_{n\Omega} = 4T_s \quad (3.54)$$

Considerando el tiempo $T_s = 70 \text{ ms}$ se procede con el cálculo de $T_{n\Omega}$.

$$T_{n\Omega} = 4(70 \cdot 10^{-3})$$

$$T_{n\Omega} = 0.28$$

Con los valores de V_Ω y $T_{n\Omega}$ se los reemplaza en la Ecuación 3.50.

$$G_\Omega = (305.228) \frac{1 + 0.28.s}{0.28.s}$$

Para la saturación de la salida del controlador, en la configuración del bloque de controlador de velocidad en Simulink se ingresa los límites de salida de torque. Estos límites se darán en función del torque máximo de conjunto de motores cuyo cálculo se realiza basado en la Ecuación 3.36, en función del valor individual de torque máximo (Tabla 3.6).

$$M_{\max.Total} = \sum_{i=1}^4 M_{\max.i}$$

$$M_{\max.Total} = M_{\max.1} + M_{\max.2} + M_{\max.3} + M_{\max.4}$$

$$M_{\max.Total} = 4(1510)$$

$$M_{\max.Total} = 6040 \text{ N.m.}$$

Los límites de saturación en cuanto a la salida de torque (relacionando la corriente i_{qs}^*) hacia el controlador de corriente será: $[-M_{\max.Total}, M_{\max.Total}]$. Adicionalmente, se emplea

un margen de seguridad para la saturación, que puede ir por encima de un 10%, el cual se lo ajusta conforme a las pruebas de operación y a las respuestas de torque obtenidas.

Un parámetro importante dentro de la implementación del controlador de velocidad es la determinación de las rampas de aceleración y desaceleración, las mismas que permiten establecer la tasa de variación de la velocidad del motor. El cálculo se lo realiza en base a la Ecuación 3.55.

$$Rampa (rpm/s) = 30 * \frac{T_{accel}}{\pi * J} \quad (3.55)$$

Como punto nominal del valor de la rampa será para un Torque de aceleración igual al nominal. Por lo que se tiene lo siguiente:

$$Rampa (rpm/s) = 30 * \frac{523.87}{\pi * (127.47)}$$

$$Rampa (rpm/s) = 39.245 rpm/s$$

El valor calculado de la rampa se la puede emplear como rampa de aceleración y desaceleración. En la operación dinámica del conjunto de motores el valor de la rampa está relacionada con el torque requerido por la misma.

3.3.3. PRUEBAS DE CONTROLADOR DISEÑO

Para comprobar el funcionamiento de los controladores diseñados se una prueba de velocidad con perturbaciones de carga al rotor de los motores. Como señales a obtenerse serán la velocidad de los motores y el torque electromagnético ejercido por la máquina. En base a los resultados que se obtiene en caso de que sea necesario se realiza un ajuste de los parámetros de los controladores en función de las respuestas obtenidas.

La velocidad de referencia para la prueba se la realiza a una velocidad de 500rpm. Se lo realiza a una baja velocidad debido a que se puede constatar de mejor manera condiciones tales como del sobrepico que presenta la respuesta.

Prueba con perturbaciones de carga

Para el caso de perturbaciones de carga se toma como referencia el torque nominal de la máquina. De manera arbitraria se toma un torque de carga de aproximadamente el 60% del torque nominal, teniéndose como valor de 300 N.m. para cada uno de los motores. Como parámetros que permitan verificar el adecuado funcionamiento del controlador FOC diseñado se toma como referencia los valores de máximo sobrepico y del tiempo de estabilización, además del error en estado estable si se dará el caso.

Velocidad del Rotor

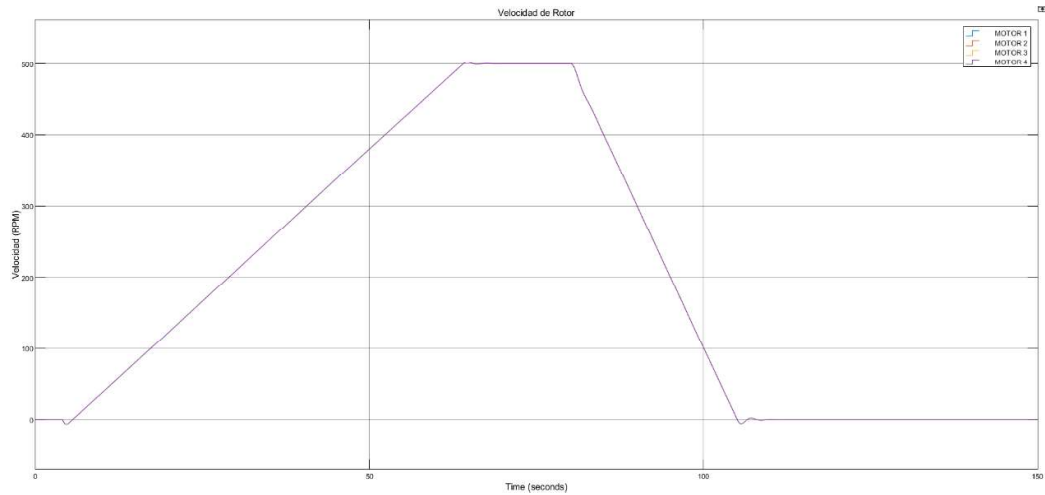


Figura 3.43. Respuesta de velocidad del rotor con perturbación de carga.

Torque electromagnético

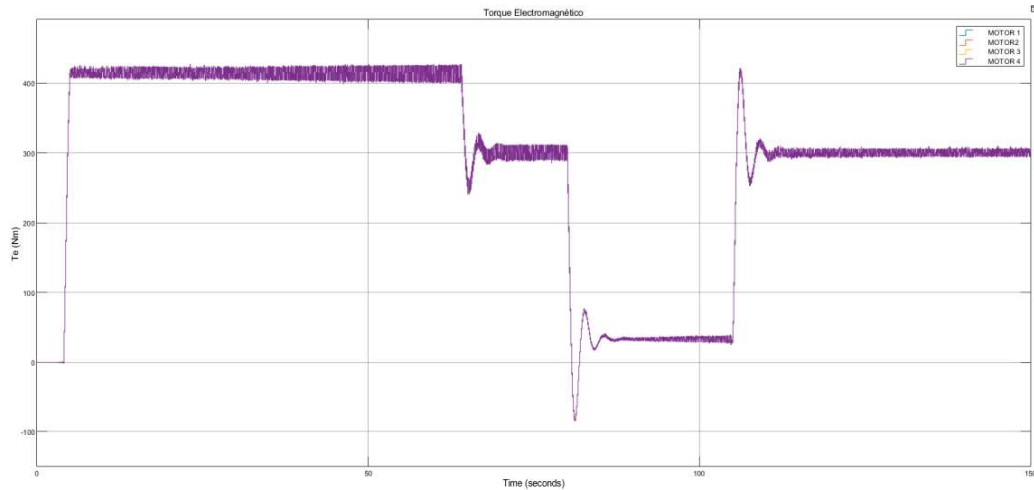


Figura 3.44. Respuesta de torque electromagnético con perturbación de carga.

Al existir una perturbación de carga en el rotor del motor existe un cambio en la operación dinámica del motor. En la respuesta de velocidad, visualizada en la Figura 3.43, durante la aceleración se vuelve lenta, esto se da debido a la carga en su rotor, además de que su sobrepico es de un valor relativamente no determinante en la operación. Durante el proceso de desaceleración la respuesta de velocidad es mucho más rápida. Para obtener una mejor respuesta de velocidad se realiza un ajuste en las rampas de velocidad, tomando en consideración el valor de la perturbación de carga. Se observa que no es necesario realizar un mayor ajuste en cuanto al controlador de velocidad ya que el sobrepico y el tiempo de estabilización presenta respuestas aceptables esto debido a que las pruebas a realizarse

serán con perturbación de carga al rotor. Además de no presentarse un error en estado estable que sea significativo, por lo que no es necesario cuantificarlo.

La respuesta de torque electromagnético del motor, visualizada en la Figura 3.44, durante el arranque no presenta sobrepico. Al momento en el cual llega a la velocidad en estado estable, el valor de torque durante el estado transitorio presenta sobrepico con pequeñas oscilaciones estabilizándose de manera rápida. Como valor más alto que presenta es de un sobrepico de 410 N.m. lo equivale a un 36.66%. En base a los valores en estado transitorio indicados se observa que se realiza un ajuste del controlador de velocidad y de corriente que influye en la respuesta de torque (i_q).

Pruebas con controlador sintonizado

Para comprobar el funcionamiento del controlador sintonizado solo se toma en consideración la prueba de los motores con perturbaciones de carga en el rotor. Con el objetivo de mejorar el estado transitorio de la respuesta de torque electromagnético. Para el caso de la respuesta de velocidad se tomaría en cuenta el estado transitorio y de estado estable, pero como se observa respuestas aceptables, posiblemente se obtendrá un mejor rendimiento del controlador.

Velocidad del rotor

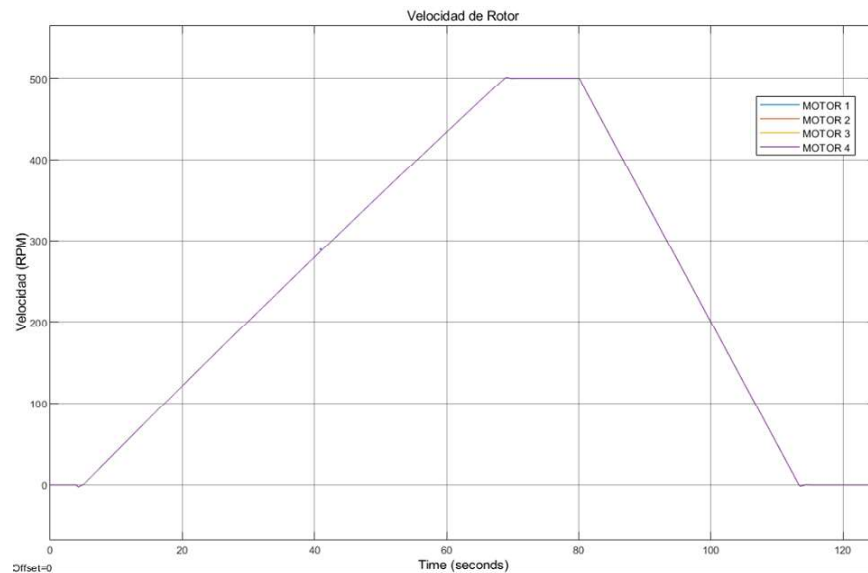


Figura 3.45. Respuesta de velocidad del rotor con perturbación de carga con controlador Sintonizado.

En la Figura 3.45 se tiene que la respuesta de velocidad mejora en cuanto a la reducción de los sobre picos durante los transitorios.

Torque electromagnético

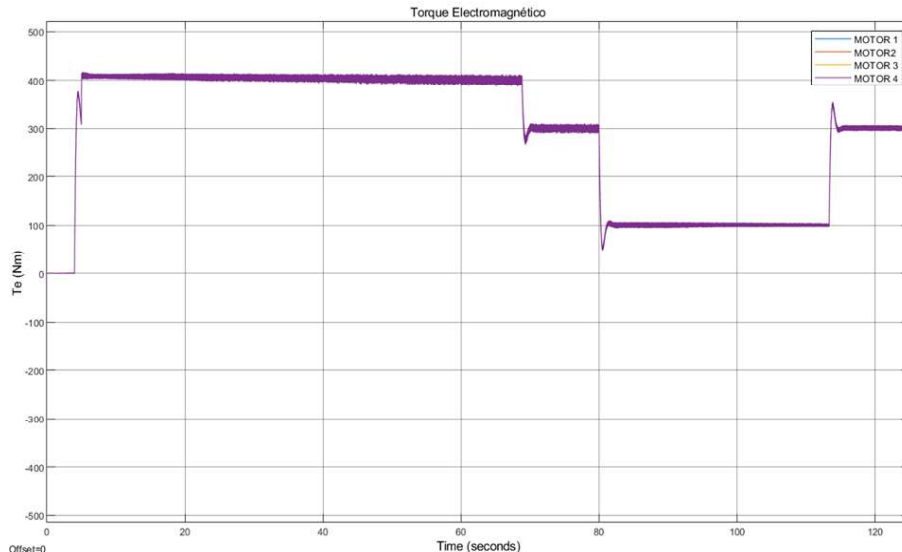


Figura 3.46. Respuesta de torque electromagnético con perturbación de carga con controlador sintonizado.

Dentro de la sintonización del controlador se llegó hasta la respuesta obtenida de torque de la Figura 3.46. Minimizando notablemente los sobrepicos que se producen durante las transiciones de torque que se producen durante el estado transitorio y estable de la operación de los motores. Se llega a esa respuesta por el motivo de que en cuanto más se acerca a la respuesta de operación óptima, es decir sin sobrepico, la acción de control de control tiende a ser más brusca. Lo cual en operación a altas velocidades o de alto torque de carga al rotor se evidenciaría de mayor forma, cuyo efecto se reflejaría en las corrientes del rotor, debido a su relación directa con el torque. En cuanto a la velocidad, su respuesta prácticamente no presenta sobrepico durante los estados transitorios, por lo que se ha mejorado su respuesta. Lo que sí es recomendable y se puede evidenciar es de que se realiza una variación de las rampas de velocidad, de acuerdo al torque de carga que se vaya introduciendo como perturbación. Finalmente, los parámetros del controlador PI tanto de velocidad como de corriente se los visualiza en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Parámetros Kp y Ki de los controladores de velocidad y corriente.

Parámetro	Velocidad	Corriente
Kp	1220.912	0.009136
Ki	4360.4	0.201233

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRUEBAS DE COMUNICACIÓN

Para realizar las pruebas de comunicación se emplea los clientes PowerFactory, Simulink y Matrikon OPC Server Explorer desde el cual se realiza el envío de las referencias de voltaje y potencia, hacia el servidor OPC Matrikon OPC Server for Simulation. El intercambio de datos se lo realiza de forma síncrona para de esta forma no perder la fiabilidad de las respuestas a obtenerse en cuanto a los tiempos de comunicación, cuyo mayor efecto se visualiza dentro de la co-simulación.

4.1.1. INTERCAMBIO DE DATOS ENTRE SERVIDOR OPC Y POWERFACTORY

Las pruebas se las realiza enviando desde el servidor varios pasos de Potencia (Set point). Lo cual se puede visualizar en el entorno gráfico de PowerFactory. Los pasos de potencia se dan de 0.6 MW, tal como se muestra en la Figura 4.1.

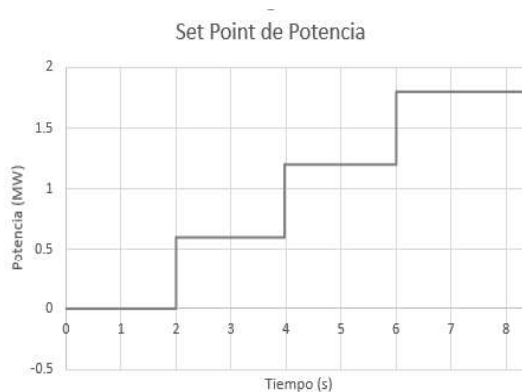


Figura 4.1. Referencia de potencia desde el servidor OPC.

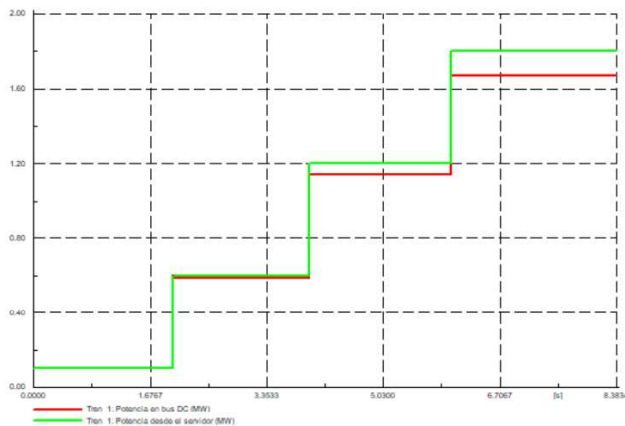


Figura 4.2. Potencia en el bus DC en PowerFactory.

El intercambio de datos entre el servidor OPC y PowerFactory como se puede observar se da de manera directa. De acuerdo a la arquitectura cliente/servidor, PowerFactory al ser un cliente OPC obtiene los datos desde el servidor de acuerdo al tiempo de muestreo que esté fijado lo cual se puede verificar al comparar las Figuras 4.1 y 4.2. Adicionalmente, dentro de la Figura 4.2 se tienen que las señales de la Potencia en el Bus DC y de la Potencia leída desde el servidor se sobreponen, lo cual corrobora a la afirmación indicada. Cabe mencionar que existe una pequeña variación entre las señales en cuanto a la amplitud de potencia, esto está relacionado con la potencia y condición inicial del punto de alimentación de la carga asociada.

4.1.2. INTERCAMBIO DE DATOS ENTRE SERVIDOR OPC Y SIMULINK

El intercambio de datos se lo realiza enviando un set point de voltaje DC variable desde el servidor OPC, tal como se muestra en la Figura 4.3. El valor de voltaje que se maneja en el servidor OPC es adimensional.

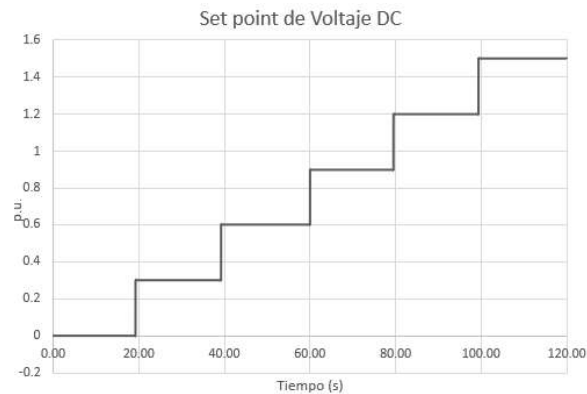


Figura 4.3. Set point de voltaje DC en el servidor OPC

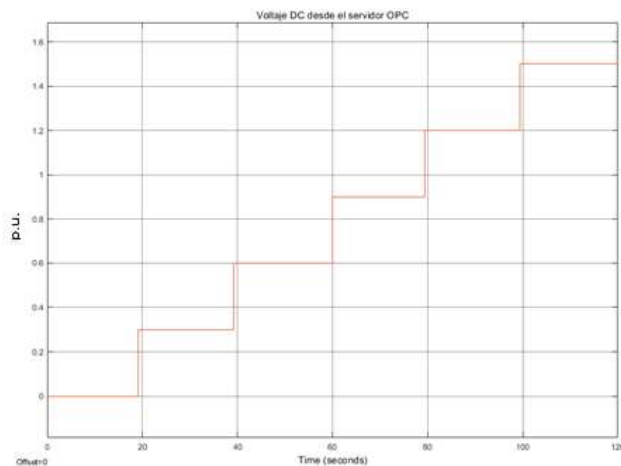


Figura 4.4. Set point de voltaje DC leído en Simulink.

Primeramente, en la Figura 4.4 se tiene la lectura de voltaje desde el servidor OPC, esta señal de voltaje es adimensional, en el orden de las unidades. En referencia a la señal enviada por PowerFactory, en donde se maneja la potencia en unidades de kV. Al comparar esta señal con la de referencia de voltaje de la Figura 4.3 se tienen que existe gran concordancia, tal vez con pequeños retardos que no son observables a simple vista, pero que no son influyentes en el intercambio de datos.

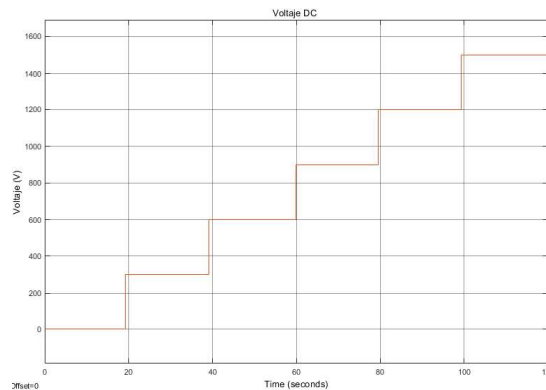


Figura 4.5. Voltaje DC acondicionado en Simulink.

La Figura 4.5 muestra el voltaje DC acondicionado, es decir, se encuentra en las unidades manejadas por el modelo de Simulink, que serían unidades de V. Mantiene además las mismas características de la señal de la Figura 4.4.

El intercambio de datos entre el servidor OPC y Simulink se realiza de manera directa, en el sentido en que no presenta un retardo significativo dentro de la comunicación con el servidor. Esto se da debido a que Simulink se comporta como cliente OPC dentro de la arquitectura cliente/servidor OPC, realiza su escritura/lectura de datos de acuerdo a su tiempo de muestreo, el cual está de acorde a la tasa de actualización presente en el servidor OPC.

4.1.3. CO-SIMULACIÓN ENTRE POWERFACTORY Y SIMULINK

Al realizar el intercambio individual entre uno de los clientes OPC y el servidor OPC no se puede visualizar la sincronía en la cual se da el intercambio de datos. Durante la co-simulación se emplean los modelos implementados tanto en Simulink como en PowerFactory, por lo que uno de los parámetros que influyen durante este proceso será la complejidad del modelo, los tiempos y capacidad de procesamiento, y de los recursos computacionales que consumen cada uno de los entornos de simulación. Por lo que cada uno de estos factores se analizan para determinar el entorno óptimo para este tipo de co-simulación.

Prueba de co-simulación

La co-simulación se desarrolla de manera asíncrona entre PowerFactory y Simulink. Para que se dé lugar la co-simulación los tiempos de simulación tanto en PowerFactory como de Simulink tienen correspondencia.

Para ello basado en el modelo de Simulink, se realiza la simulación con una referencia de velocidad del 50% de la nominal, elegido de manera aleatoria, la misma que se acerca a la operación en su valor promedio de operación en uno de los tramos.

Potencia en Simulink

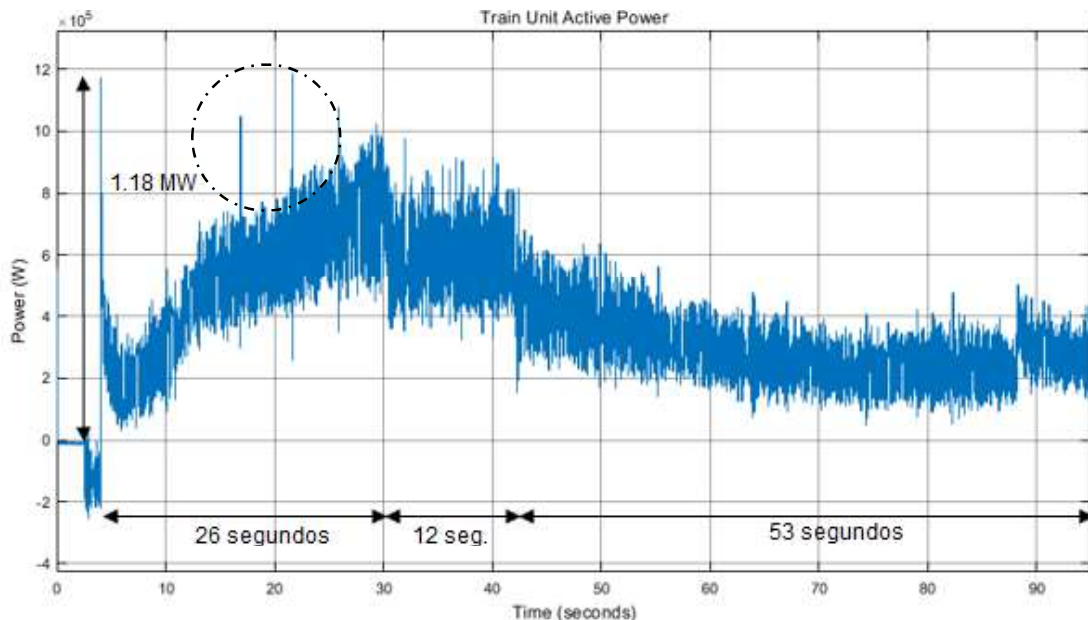


Figura 4.6. Potencia consumida por la unidad de tren en Simulink.

Primeramente, se tiene la señal de potencia de la unidad de tren simulada en Simulink, como se puede observar en la Figura 4.6, se trata de la simulación de un trayecto completo, es decir, arranque, velocidad en estado estable, y frenado. Con un tiempo de simulación de aproximadamente 93 segundos. Como parámetros importantes a recalcar y que sirven como indicadores para conocer la fiabilidad del intercambio de datos están: pico de potencia en el arranque cuyo valor es de 1.18 MW, además, de los tiempos entre cada una de las fases de operación, que serán para el arranque y aceleración de 26 segundos, velocidad en estado estable de 12 segundos, y frenado de 53 segundos.

Potencia en PowerFactory

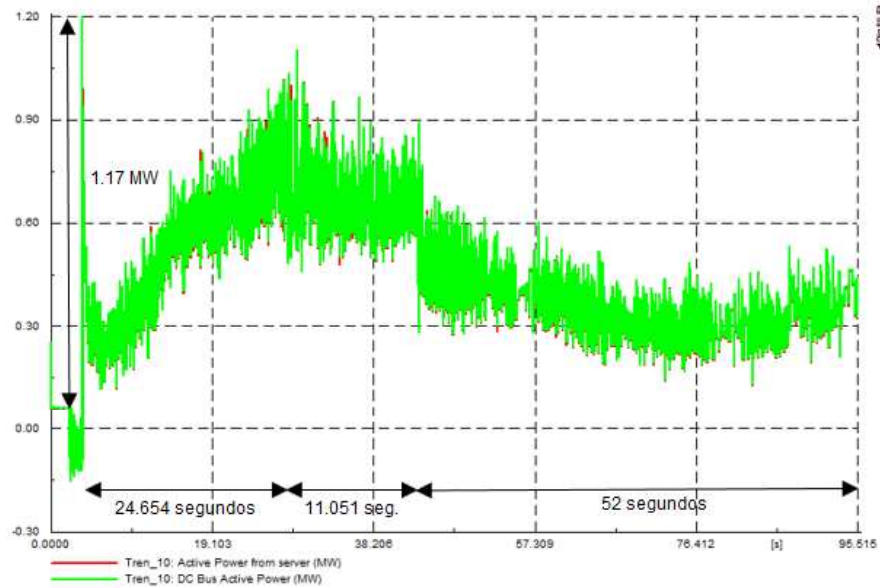


Figura 4.7. Potencia en el bus de catenarias en PowerFactory.

De la Figura 4.7 como parámetros se tiene un pico de potencia de 1.2 MW durante el arranque, tiempo de aceleración de 24.654 segundos, tiempo en velocidad de estado estable de 11.051 segundos, y un intervalo de frenado de 52 segundos.

Al realizar una comparación entre las Figuras 4.6 y 4.7, se tiene primeramente que La potencia entre cada uno de los entornos de simulación se da de manera que se mantienen los tiempos de simulación, no similares, pero muy cercanos, de acuerdo con la asincronía de la co-simulación.

Al comparar el primer indicador que es el pico de potencia en el arranque, se tiene un error de 0.02 MW de acuerdo a lo obtenido en Simulink y la lectura realizada por PowerFactory.

El segundo indicador, que se trata de los intervalos de tiempo durante las fases de operación se tiene que durante la fase de aceleración se tiene un retardo de 1.346 segundos, velocidad en estado estable con un retardo de 0.949 segundos, y finalmente el retardo en la fase de frenado se tuvo de 1 segundo.

En la Figura 4.6 se observa encerrado en un círculo dos transitorios, los cuales no se ven reflejados en la señal de lectura de PowerFactory, lo cual se da por la pequeña variación entre los tiempos de muestreo entre cada uno de los entornos de simulación.

Voltaje en PowerFactory

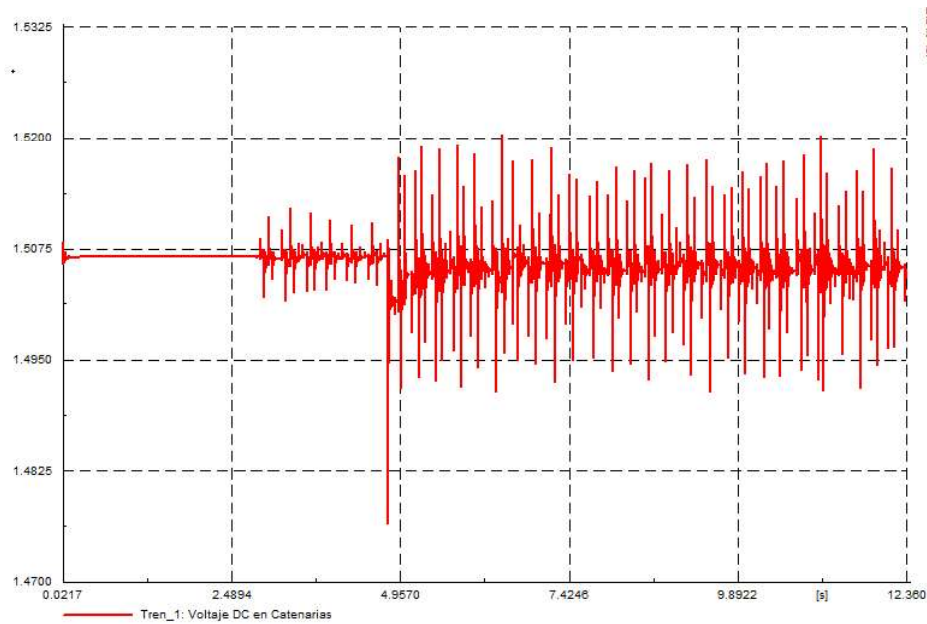


Figura 4.8. Voltaje DC en el bus de Catenarias en PowerFactory.

La señal de voltaje mostrada en la Figura 4.8 se muestra afectada por picos debido a transitorios, los cuales se los hace visibles debido a los tiempos de muestreo empleados para la co-simulación. Muchos de ellos no sobrepasan los 200 V, a excepción del ocurrido durante el arranque. El comportamiento del voltaje se da de acuerdo a la inyección de potencia por parte de la carga móvil a la red. Para este análisis se ha tomado 12.36 segundos de simulación, que correspondería a la etapa de aceleración.

Voltaje en Simulink

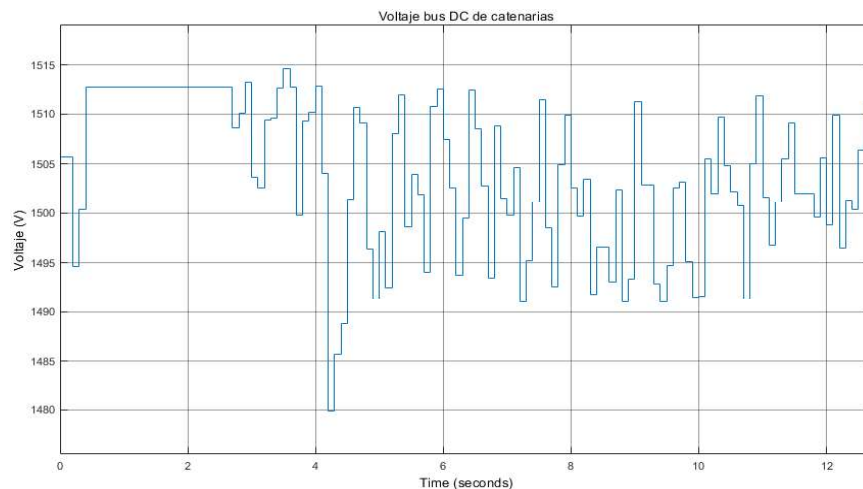


Figura 4.9. Voltaje DC en el bus de catenarias en Simulink.

La Figura 4.9 muestra la señal de voltaje DC leída por parte de Simulink procedente de PowerFactory. En este punto, se puede observar que de acuerdo al tiempo de muestreo efectuado en Simulink la señal de voltaje no presenta de manera excesiva transitorios, lo cual permite observar de mejor manera el comportamiento de la señal de voltaje, caídas de tensión, picos de voltaje y estado estable.

La co-simulación empleada tiene un buen rendimiento en cuanto a los tiempos de retardo son mínimos, en el sentido en que no existe mayor pérdida de información. Aunque, además, está relacionado con los tiempos de actualización.

En las señales de potencia de las Figuras 4.6 y 4.7 se observa que los tiempos de actualización están muy aproximados, aunque la pérdida de información se observa mínimamente en algunos picos, pero no es un aspecto significativo.

Para la señal de voltaje que proviene desde PowerFactory de la Figura 4.8, se ve reflejada en Simulink con un efecto de mayor pérdida de datos, tal como se observa en la Figura 4.9. Esto debido a que en Simulink se toma un menor tiempo de actualización, por la saturación de la memoria y su posterior procesamiento.

4.2. OPERACIÓN DINÁMICA DE LOS ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS

Para determinar el comportamiento del convertidor de tracción, se realiza el análisis de los componentes más determinantes dentro de su operación, por lo que se va a enfocar a los resultados obtenidos en el capacitor de bus y en el circuito de braking chopper en función de sus características de operación. El escenario de operación se da en función de que se asume la operación de las demás unidades de tren en cada uno de los puntos del trayecto. Es decir, cada una de las unidades disponen de una demanda de potencia. Por lo que se va a observar el funcionamiento a condiciones de operación críticas.

4.2.1. CAPACITOR DE BUS

En el análisis de la operación del capacitor de bus se verifica el proceso de su carga, en base al circuito de precarga diseñado. Para efectos de simulación se redujo el valor de la resistencia R_c a 16 Ohmios para que no exista mayor caída de voltaje. Se simula tan solo el proceso de carga del capacitor.

Voltaje del Capacitor

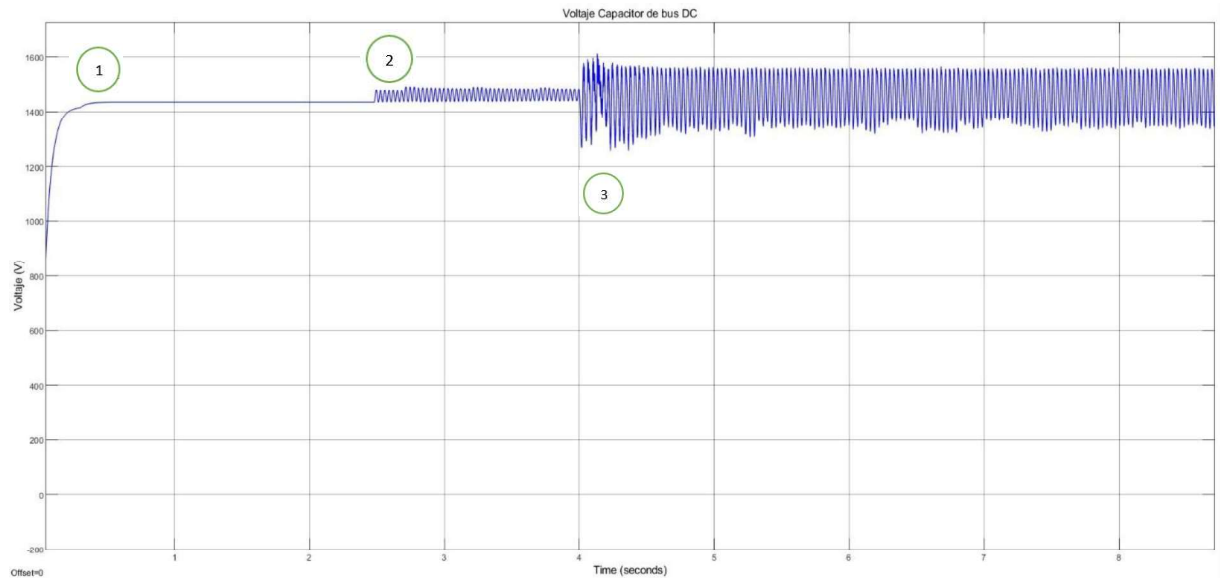


Figura 4.10. Voltaje DC en el Capacitor de bus.

En base a la Figura 4.10, se puede ver la operación del voltaje DC en el capacitor de bus, la cual se divide en tres fases.

- 1. La primera etapa, se trata del proceso de carga del capacitor, como se observa se da en aproximadamente un tiempo de 0.3 segundos.
- 2. La segunda etapa se trata del momento en el cual se cortocircuita la resistencia de carga del capacitor a los 2.48 segundos. Se observa que de acuerdo a la resistencia seleccionada no existe una mayor caída de voltaje, por lo que se estabiliza en 0.2 segundos.
- 3. La tercera etapa está relacionada con el arranque y operación de los motores de inducción conectados al convertidor de tracción. Se observa que ese instante la demanda de voltaje se eleva, teniéndose un sobrepico durante el proceso de arranque.

4.2.2. BRAKING CHOPPER

El funcionamiento del circuito de braking chopper se verifica en función del voltaje y corriente que atraviesa la resistencia de freno, tomando en consideración que su operación se da en condiciones ideales.

En relación al voltaje en el bus se observa el rizado presente durante la operación del motor.

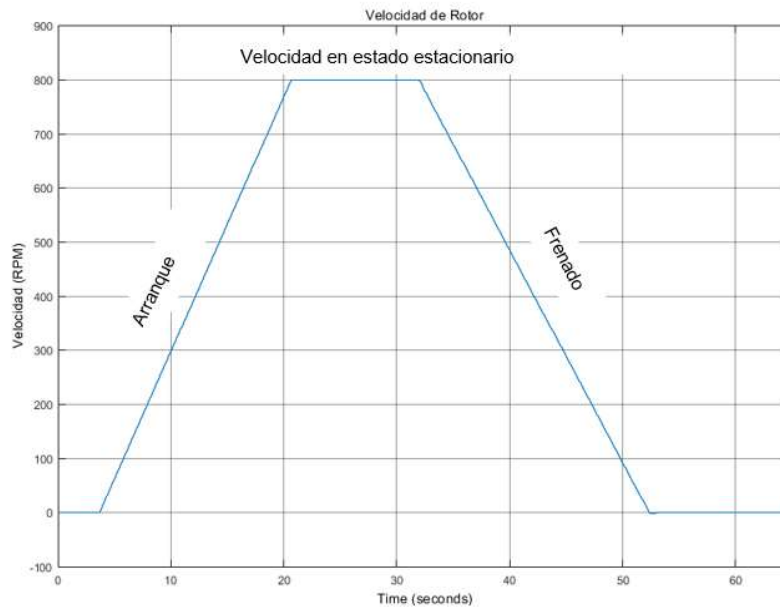


Figura 4.11. Voltaje en el bus DC.

Para el análisis del funcionamiento del circuito de braking chopper se efectúa la simulación de la operación de los motores con cada una de sus fases: arranque, aceleración, velocidad en estado estable, y frenado. Para lo cual, la Figura 4.11 muestra el perfil de velocidad señalando cada una de estas etapas. Considerando un setpoint de velocidad de 800 rpm, que representa casi el 50% de la velocidad nominal.

Voltaje en el bus DC

La señal de voltaje se obtiene del bus DC, para lo cual se considera la Figura 4.12. Para la Figura 4.12 a. se muestra el comportamiento del voltaje durante cada una de las etapas. En primera instancia, durante la etapa de aceleración se observa que el comportamiento del voltaje se vuelve más crítico conforme va llegando a la velocidad en estado estable, lo cual se corrobora con la Figura 4.12 b. Durante la etapa de velocidad en estado estable, se tiene que el voltaje comienza a estabilizarse, de manera que se va reduciendo el rizado de voltaje mientras se va acercando a la transición a velocidad cero, lo cual se observa con más detalle en la Figura 4.12 c. Finalmente, en la etapa de frenado, se tiene que el voltaje disminuye sustancialmente el rizado, estabilizándose de manera que

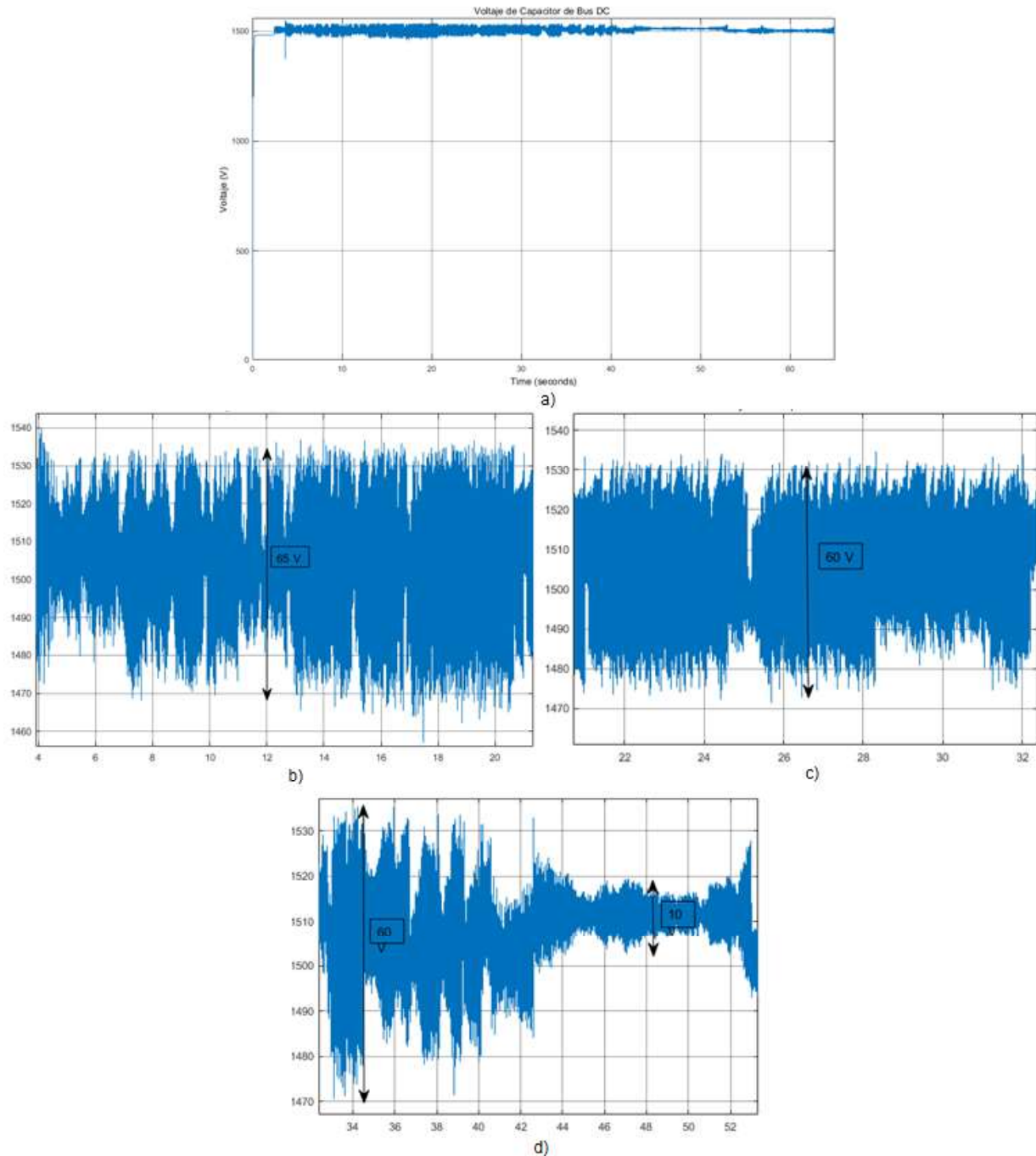


Figura 4.12. Voltaje en el bus DC. a) Voltaje durante el trayecto total. b) Voltaje durante la etapa de arranque. c) Voltaje durante la etapa de velocidad en estado estable. d) Voltaje durante la etapa de frenado.

Corriente en la resistencia de chopper

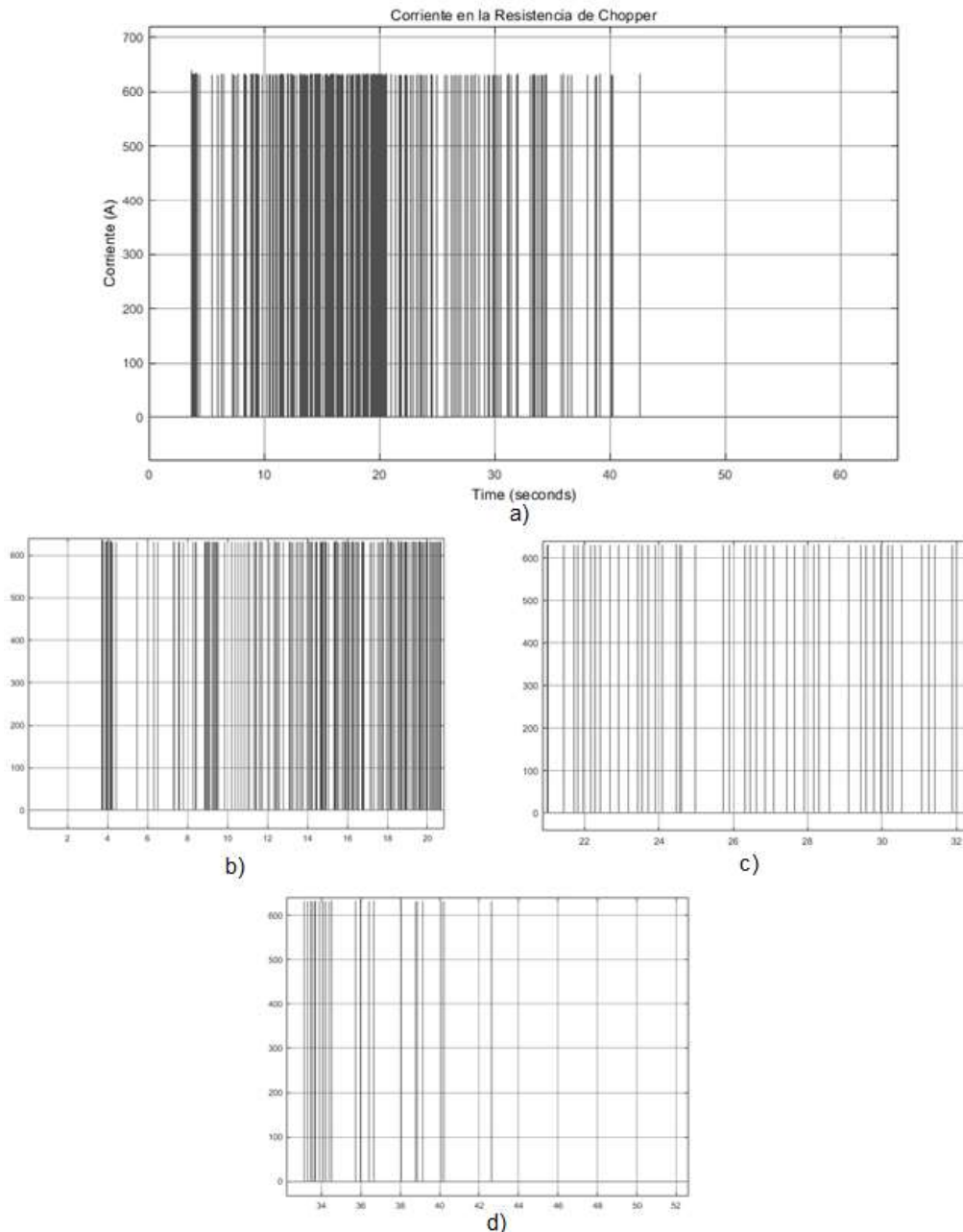


Figura 4.13. Corriente en la resistencia de chopper. a) Corriente durante todas las etapas de operación. b) Corriente durante la etapa de arranque. c) Corriente durante la etapa de velocidad en estado estable. d) Corriente durante la etapa de frenado.

Basado en el bajo valor de la resistencia de frenado, se observa que la corriente que circula a través de ella es muy alta, por lo tanto, dentro de la simulación se considera que el circuito de braking chopper tiene un comportamiento ideal. A través de la Figura 4.13 a. se puede observar la operación del circuito de chopper en base a la corriente de la resistencia de

chopper. Teniendo en cuenta a las condiciones de operación de la unidad de tren durante los procesos de aceleración, velocidad en estado estable y desaceleración.

En base a la Figura 4.13 b. se tiene que el circuito de chopper permanece apagado durante la fase de carga del capacitor, para proceder con su activación durante las fases de arranque y aceleración, aumentando considerablemente mientras se acerca a la velocidad de estado estable.

En la Figura 4.13 c. se tiene que la corriente y por ende la activación del circuito se da de manera que el ciclo de trabajo del chopper se reduce, durante toda la etapa.

La Figura 4.13 d. la corriente es disipada de manera que se reduce el ciclo de trabajo del chopper, además llega al punto en el cual se desactiva totalmente el circuito hasta llegar a la velocidad cero.

Se observa que, ante la operación a condiciones cercanas a las nominales, el circuito de chopper trata de mantener el voltaje dentro del rango preestablecido manteniendo un rizado de casi constante en instantes en donde la operación del sistema se mantiene estable. Aunque de manera muy instantánea, se tiene el apagado del circuito de chopper durante la fase de velocidad en estado estable durante la transición hacia la fase de desaceleración.

4.3. EFECTOS DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE UNA UNIDAD DE TREN SOBRE LA RED

El análisis a desarrollar se enfoca en las respuestas obtenidas en el modelo de la red eléctrica provista en PowerFactory.

El efecto de la operación dinámica de los motores de tracción de una unidad de tren se lo va a observar en los transformadores de tracción ubicada aguas arriba al punto de alimentación en el cual se encuentra conectado. Como casos de estudio se tienen los transformadores de mayor demanda de carga, es decir que mayor porcentaje del nivel de carga que presentan. Estos valores se los obtiene en base al estudio realizado en [5]. En donde se realiza un estudio en estado estacionario de la operación del sistema de trenes del Metro de Quito.

En la Tabla 4.1 se muestra los escenarios de demanda de potencia que presenta un tren eléctrico. Estos valores serán referenciales para determinar el punto de operación de los motores.

Tabla 4.1. Escenarios de demanda de potencia de una unidad de tren [5].

Escenario de demanda	Potencia Máxima [kW]	Potencia Promedio [kW]
Mínima	958.56	692.43
Media	1597.61	1154.05
Máxima	2236.66	1615.68

En el caso de los transformadores de tracción, el porcentaje del nivel de carga se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Escenarios de nivel de carga de los transformadores de tracción [5].

Transformador de tracción	Escenario mínimo	Escenario medio	Escenario máximo
SET Quitumbe 1	29.674	48.182	69.921
SET Quitumbe 2	29.674	48.182	69.921
SET Mor. Valverde	83.319	137.458	196.641
SET Solanda	113.836	187.304	274.771
SET Magdalena	80.899	133.645	197.637
SET Recreo	110.058	184.069	267.131
SET Alameda	106.286	179.831	261.218
SET San Francisco	83.986	134.790	201.348
SET Carolina	148.922	268.013	373.297
SET U. Central	158.038	270.522	381.845
SET Jipijapa	102.799	167.214	241.369
SET Labrador	58.821	99.870	145.038

En base a estos valores se puede deducir que los transformadores que mayor nivel de carga son el de la subestación de tracción de Solanda, de la subestación de tracción de la Universidad Central y de la subestación de tracción de la Carolina, los cuales serán el punto de referencia para el análisis a desarrollar. Los esquemas de las subestaciones de tracción se encuentran en los Anexos D y E.

En base a la velocidad estimada en cada tramo, se estima la potencia activa demandada por la unidad de tren, y su efecto sobre el nivel de carga del transformador de tracción representado en porcentaje.

Para el caso de los transformadores de tracción se toma en cuenta el nivel de carga. De acuerdo a los criterios señalados en [6]. En donde se detalla que:

- En relación a la Tabla 4.2, la mayoría de los transformadores presentan un nivel de carga superior al 100%. Estos valores en su mayoría representan estados temporales, debido a procesos de operación de los motores de tracción tal como de su arranque, por ejemplo.
- El diseño de los transformadores permite que soporten altas sobrecargas durante cortos intervalos de tiempo.

- Las sobrecargas que puede soportar son del 50% de su potencia nominal durante 15 minutos por cada hora, hasta valores del 200% como máximo durante 5 minutos cada hora.

El escenario que se toma está basado al esquema del Anexo C, en donde están dispuestos las 16 unidades de tren en cada uno de los tramos del recorrido las mismas que son modeladas como cargas. Como referencia de esta disposición se tiene la Figura 4.14. A cada una de estas cargas se las asigna un valor de potencia de acuerdo al criterio de su operación. Es decir, si está activo o no se encuentra en funcionamiento.

Para el caso práctico los valores propuestos serán en base a la velocidad promedio en cada tramo del recorrido. Como potencias para las demás cargas se emplea los valores de las potencias de escenario de demanda en base a los valores de la Tabla 4.1.

Para el análisis de las variaciones de voltaje que se presentan en cada uno de los escenarios se toma como referencia el estándar europeo para aplicaciones ferroviarias (EN 50163) [42]. Como primer parámetro que establece es que la caída más baja de voltaje permanente admitida no debe superar el 20% del voltaje nominal.

El valor más alto de voltaje admitido de forma permanente es de 1800 V y como voltaje mínimo admitido es de 1000 V.

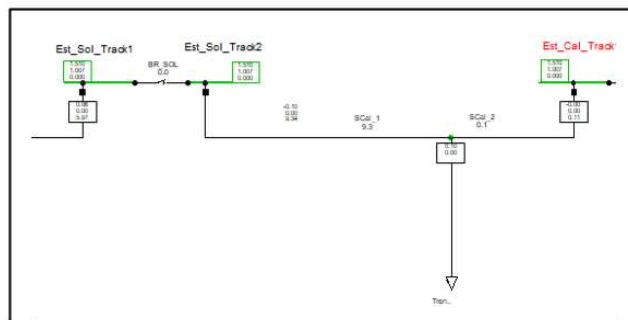


Figura 4.14. Disposición de una unidad de tren en el modelo de PowerFactory.

4.3.1. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN SOLANDA

La subestación de tracción de Solanda alimenta al tramo Solanda-El Calzado. Dentro de ese trayecto la unidad de tren alcanza una velocidad de 80 km/h. Para la operación de los motores esto equivale a una velocidad del 80% de la velocidad nominal. Como condiciones de operación se emplea una rampa de aceleración que demanda un torque de arranque equivalente a la nominal. Para los escenarios de demanda de potencia se toma los valores de potencia media, es decir la demanda de potencia para las demás unidades de tren será de 1154.05 kW.

Velocidad del rotor

La operación de los motores presenta tres etapas, de acuerdo al perfil de velocidad de la Figura 4.15:

1. Aceleración.
2. Velocidad en estado estable.
3. Desaceleración

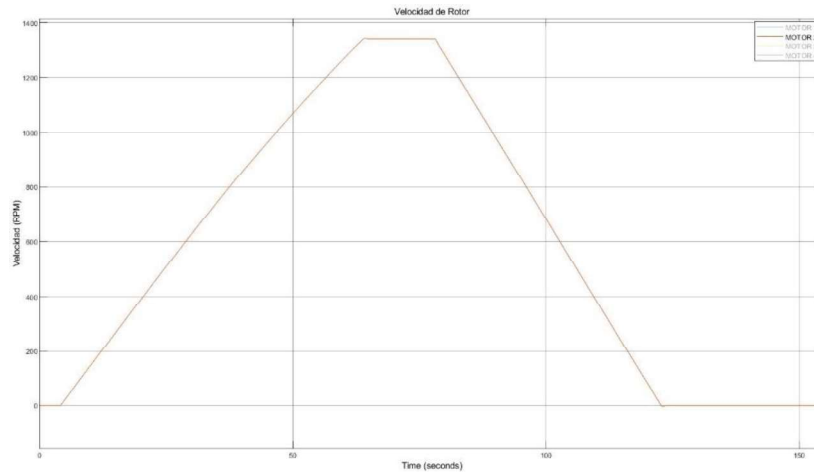


Figura 4.15. Velocidad del rotor de un conjunto de motores.

Potencia consumida

1. Aceleración.
2. Velocidad en estado estable.
3. Desaceleración

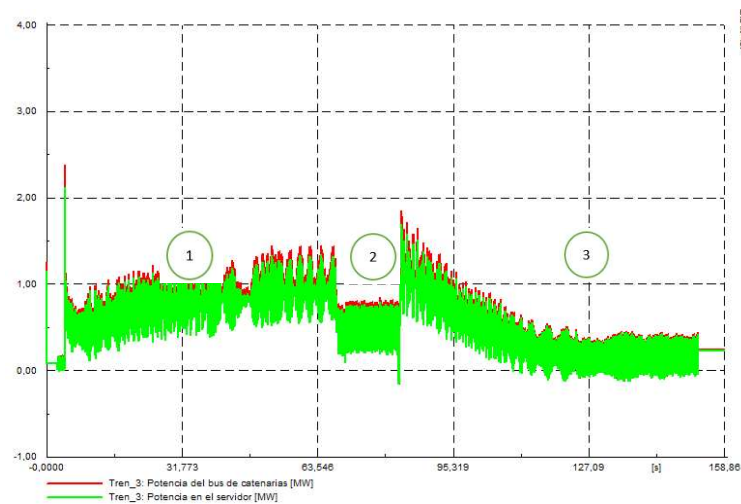


Figura 4.16. Demanda de potencia de una unidad de tren trayecto Solanda-Calzado

En base a la Figura 4.16, se observa que durante el arranque de los motores ocurre la mayor demanda de potencia, esto está relacionado con la inercia que se vence durante el arranque, además depende de la rampa de aceleración que se emplee.

La demanda de potencia se vuelve incremental, debido a la demanda de energía hacia la red por parte de la unidad de tren, durante la etapa de arranque del motor hasta el instante en el que los motores toman una velocidad en estado estable.

Durante la etapa de velocidad en estado estable la demanda de potencia hacia la red disminuye notablemente, hasta un 45% aproximadamente. Además, este valor depende del porcentaje de carga hacia los rotores. Por lo que se puede reflejar el porcentaje de carga al rotor y su demanda de energía. Por lo que mantenerse operando a velocidades en estado estable genera una mayor eficiencia energética en el sentido de la demanda de potencia.

En la etapa de frenado se inicia con un pico alto de 1.8 MW, lo que significa que ocurre un frenado rápido que se incide de acuerdo a la rampa de desaceleración establecida. En el intervalo de frenado se ve observa cómo va reduciendo la demanda energética hacia la red.

Se puede observar que la unidad de tren opera dentro del rango de su potencia media a lo largo de sus etapas de operación, basados en los parámetros de la Tabla 4.1

Voltaje de Catenaria

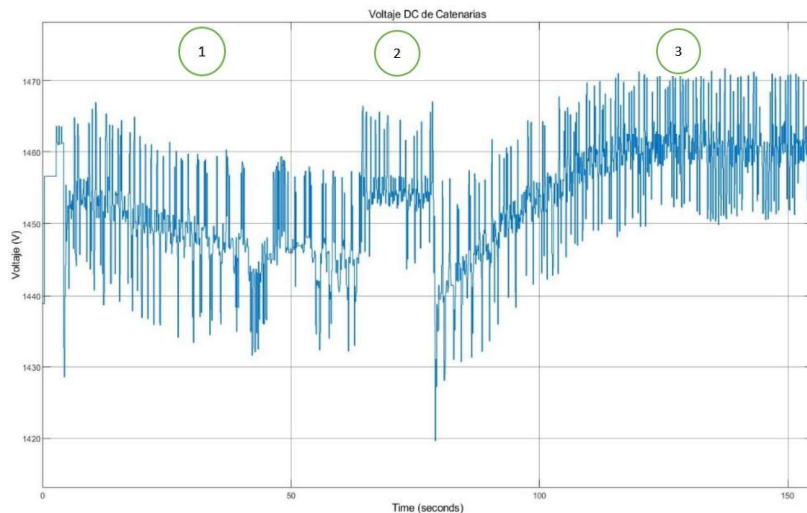


Figura 4.17. Voltaje en catenarias. Trayecto Solanda-Calzado

En la Figura 4.17, el comportamiento del voltaje DC del bus de catenarias varía de acuerdo a la etapa de operación. En la etapa de aceleración se observa que se tiene un transitorio de caída de voltaje que llega hasta un valor de 1428 V, se toma en cuenta a que debido a que las demás unidades están operativas se tiene cargas activas, por lo que el voltaje que provee el bus de catenarias es inferior al valor normal de operación que es de 1500 V, por

lo que el valor que se tiene es de 1456 V aproximadamente, este voltaje será en estado estable.

En el arranque de los motores se tiene una caída de voltaje de aproximadamente 1430 V de manera instantánea, debido a la demanda energética requerida para vencer la inercia del sistema.

Durante el proceso de aceleración se tiene que el voltaje va presentando una caída de voltaje que se desarrolla de manera gradual hasta el punto en el que se llega a velocidad de estado estable. El intervalo en el cual se desarrolla esta etapa está acorde a la rampa de velocidad.

En la etapa de velocidad en estado estable, el voltaje tiende a recuperarse hasta el punto de transición a la etapa de desaceleración. En la etapa de desaceleración, se tiene una caída de voltaje más significativa, a un valor de 1420, esto se debe a que como parámetro de operación se dio a que los motores frenen a condiciones nominales, volviendo este proceso más rápido. De esta manera el voltaje se estabiliza de manera que la demanda de energía hacia la red se ve minimizada. El voltaje en esta etapa se estabiliza de manera gradual hasta el punto de llegar a voltaje en estado estable ya que no existe demanda de energía hacia la red.

El voltaje en cada una de las etapas se mantiene dentro de los valores admitidos dentro de la norma EN 50163 [42].

Nivel de carga del Transformador de tracción Solanda

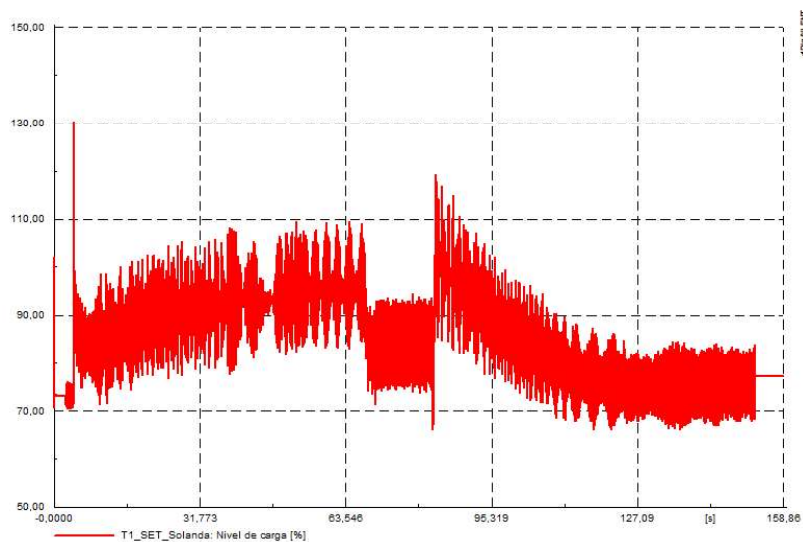


Figura 4.18. Nivel de carga del transformador de tracción Solanda.

En la Figura 4.18 se tiene en los primeros segundos el nivel de carga inicial del transformador cuyo valor es de 74%. Durante el arranque se produce el mayor porcentaje de carga del transformador, con un valor de 130%, esto se da de manera instantánea.

Durante la etapa de aceleración el nivel de carga oscila entre el 90% a un 110% en donde se produce la etapa de transición. En la etapa de velocidad en estado estable se mantiene en un valor del 90% hasta el instante de transición. Finalmente, en la etapa de desaceleración el nivel de carga inicia en un valor de 120%, de forma instantánea, hasta llegar a un valor de aproximadamente el 80% cuando la unidad de tren deja de estar operativa.

Relacionando los tiempos de sobrecarga los picos altos de carga se dan de manera instantánea. Adicionalmente, en el intervalo de mayor demanda de potencia durante la etapa de aceleración y por ende de mayor nivel porcentaje de carga no supera los 60 segundos, lo cual está dentro de los límites de sobrecarga para el transformador tanto en tiempo como en el nivel de sobrecarga.

En promedio durante la operación dinámica de la unidad de tren, es decir, aceleración y desaceleración, el nivel de carga del transformador se encuentra dentro del escenario de demanda media de acuerdo a la Tabla 4.2.

4.3.2. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN UNIVERSIDAD CENTRAL

La subestación de tracción de la Universidad Central alimenta el tramo Universidad Central-La Pradera. Dentro de este tramo la velocidad de operación se emplea al 90% de la velocidad nominal, aunque para este caso se modifican las condiciones de operación. En cuanto a las cargas, su valor oscila entre el valor mínimo y medio, para que de esta forma no afectar de mayor manera a la red de suministro hacia el sistema de tracción. Por lo que es preciso conocer su comportamiento dinámico a estas condiciones.

Velocidad del rotor

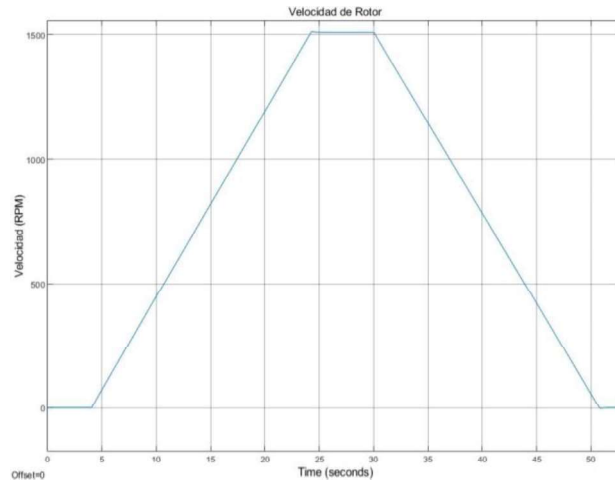


Figura 4.19. Perfil de velocidad del rotor de los motores de tracción.

En la Figura 4.19 se tiene el perfil de velocidad empleado para este escenario. Para este caso, se mejora la dinámica de la máquina, es decir empleando una mayor rampa de aceleración. Para que de esta forma se puede ver reflejado de mejor manera la operación de los motores.

Voltaje en catenarias

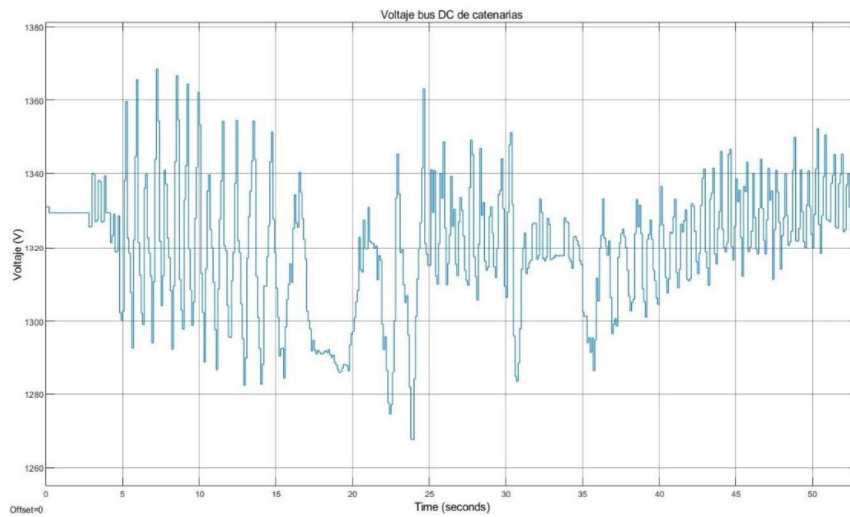


Figura 4.20 Voltaje en el bus DC de catenarias.

En la Figura 4.20 en los primeros segundos se tiene el voltaje en condiciones iniciales cuyo valor es de 1332 V verificándose la presencia de mayor carga hacia la red. Además, el voltaje presenta mayores componentes de alta frecuencia durante la etapa de arranque de los motores.

Durante la etapa de arranque y aceleración el voltaje se tiene una caída de voltaje que llega hasta un pico mínimo de 1270 V en el instante en el que se llega a velocidad en estado estable.

En la etapa de velocidad en estado estable, el voltaje tiende a volver a su estado estable durante ese intervalo de operación.

En la etapa de frenado se comienza con un pico de voltaje, debido a que se frena de manera rápida por lo que se ve reflejada en el pico de voltaje en ese instante que no es un valor tan considerable.

En la etapa de desaceleración, el voltaje tiende a volver a su condición normal de manera gradual en cuanto la unidad de tren va deteniéndose. Observándose una menor exigencia de energía hacia la red.

Los valores de voltaje durante el perfil de operación de los motores de tracción presentado están dentro del rango permitido basados en el estándar EN 50163 [42].

Potencia consumida

En la Figura 4.21 en los primeros segundos se muestra la potencia en condiciones iniciales. La potencia que demanda la unidad de tren se da a un porcentaje de carga al rotor de los motores del 45%. Presenta un comportamiento gradual durante las etapas de aceleración y desaceleración. En cuanto al estado de velocidad estable, se tiene que la potencia tiene un valor medio de 0.5 MW, por lo que no realiza un consumo excesivo de potencia desde la red, el mismo que estará de acuerdo a la exigencia de carga hacia los rotores de los motores de tracción.

Durante el arranque y el instante en el que llega a velocidad en estado estable se tienen los picos máximos de potencia, con valores de aproximadamente 2.3 MW.

En el instante en el que inicia el proceso de frenado existe un pico de potencia de 1.9 MW, el cual es significativo que además nos indica que el proceso de frenado se da de manera rápida. Durante el proceso de frenado la potencia va reduciendo su valor de manera gradual hasta que la unidad de tren se haya detenido completamente y no exista demanda de potencia hacia la red.

La presencia de componentes de alta frecuencia en el voltaje DC, se ve reflejado en la señal de Potencia.

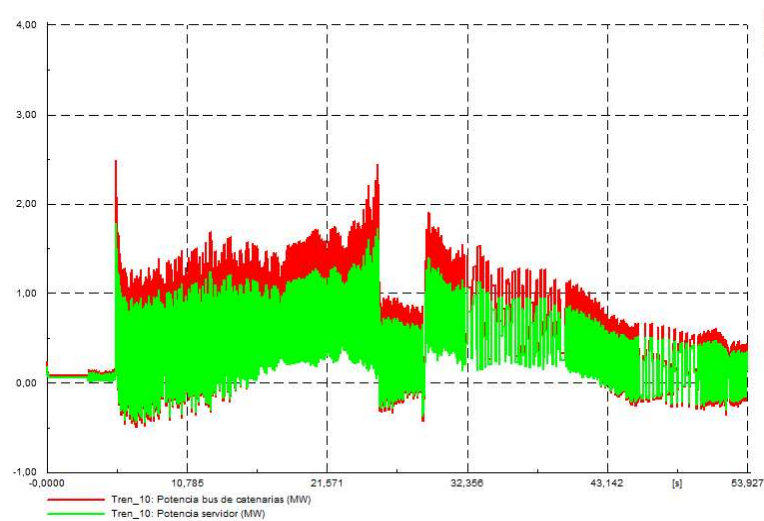


Figura 4.21. Potencia consumida por la unidad de tren.

Nivel de carga del Transformador de tracción Universidad Central

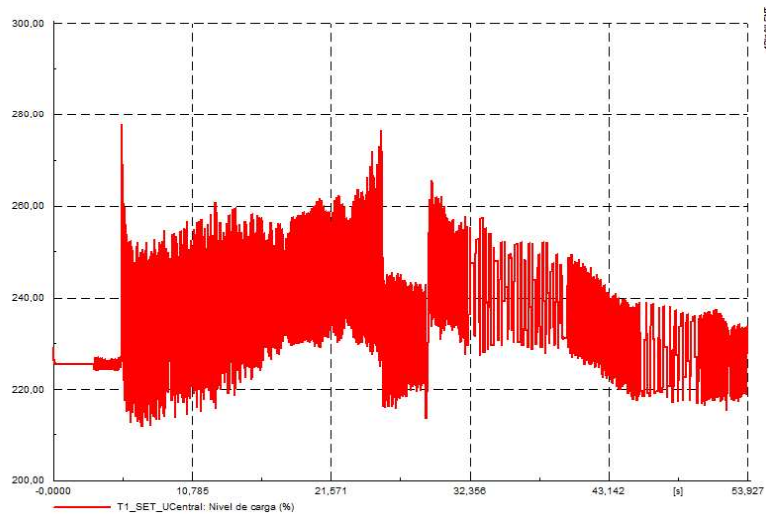


Figura 4.22 Nivel de carga transformador U. Central.

En la Figura 4.22 se tiene primeramente en los primeros segundos el nivel de carga inicial de 225%, lo cual indica una existencia de cargas de alto valor en los buses de alimentación asociados al transformador. Durante el arranque y el instante en el cual llega a velocidad en estado estable se tiene el mayor porcentaje de nivel de carga con un valor de 278% de manera instantánea.

Durante la etapa de aceleración el nivel de carga va incrementando desde el valor en condiciones normales hasta el valor máximo. Ya en la etapa de velocidad en estado estable se ve reducido el nivel de carga conforme se minimiza la demanda de potencia de la unidad de tren.

Finalmente, en la etapa de desaceleración el nivel de carga va reduciendo su valor desde su valor máximo producido en el proceso de frenado rápido. Durante este intervalo de tiempo se ve reflejado como se minimiza la exigencia de energía hacia la red conforme la unidad de tren va deteniéndose.

El transformador presenta valores de sobre carga, sus picos máximos se producen de forma instantánea. Los tiempos en los cuales

El comportamiento de la Potencia incide en gran medida al comportamiento del nivel de carga de los transformadores. El tiempo que se mantiene sobre cargado debido al proceso de aceleración es de 22 segundos, y de 21 segundos durante el proceso de frenado. Lo cual está muy por debajo de los límites de tiempo máximos de sobrecarga establecidos para el transformador de tracción, lo cual permite un adecuado rendimiento operativo para el transformador.

4.3.3. SUBESTACIÓN DE TRACCIÓN LA CAROLINA

La subestación de tracción de la Carolina alimenta el tramo La Carolina-Iñaquito. En este tramo la velocidad de la unidad se emplea el 90% de la velocidad nominal. Tal como en el escenario anterior, se requiere conocer el porcentaje de carga que ejerce sobre el transformador de tracción en función de la operación de una unidad de tren, por lo que para las demás cargas se disminuye el valor de las mismas.

Velocidad del rotor

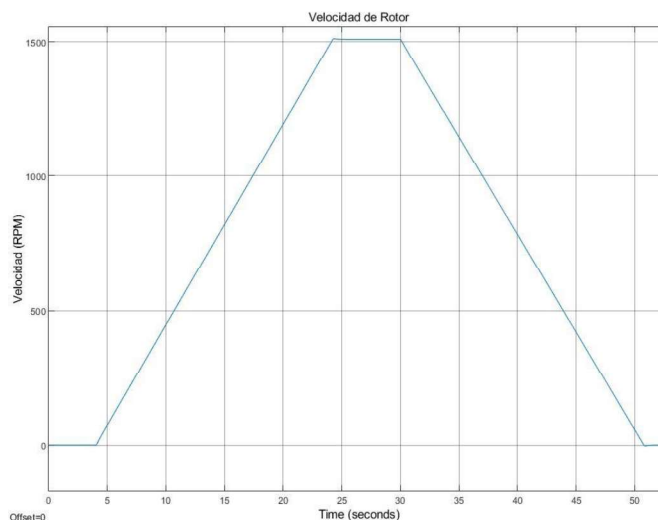


Figura 4.23. Velocidad del rotor de los motores de tracción.

Para este escenario, se maneja el mismo perfil de velocidad como se muestra en la Figura 4.23, por lo que la dinámica de los motores es la misma.

Voltaje en catenarias

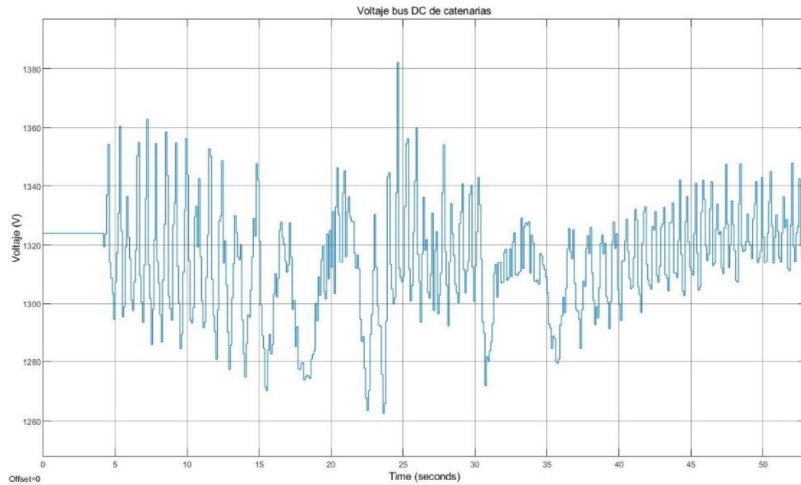


Figura 4.24. Voltaje DC en el bus de catenarias.

En la Figura 4.24, primeramente, en los primeros segundos se puede observar el voltaje en condiciones iniciales cuyo valor es de 1322 V. Lo cual representa la presencia de cargas de alto valor en los puntos de alimentación aledaños al de la carga dinámica de la unidad de tren.

Durante el arranque y aceleración de los motores se tiene una caída de voltaje que llega hasta un valor de 1262 V. Denotándose la exigencia de energía hacia la red por parte de la carga del tren y de las cargas estáticas. En el instante en el que se llega a velocidad en estado estable se tiene un valor máximo de voltaje lo cual está relacionado a que el sistema minimiza su demanda de energía hacia la red en gran porcentaje estabilizándose en el valor de condiciones normales de operación.

En la etapa de desaceleración se tiene una caída de voltaje que llega a un valor de 1270 debido al proceso de frenado rápido. En este intervalo de tiempo el voltaje tiende a estabilizarse de manera rápida consecuente con la exigencia de potencia hacia la red y de cuán rápido es el proceso de desaceleración.

Los valores de voltaje tanto de caídas como de sobrevoltajes se mantienen dentro de los rangos establecidos bajo el estándar EN 50163.

El voltaje presenta un comportamiento similar a los anteriores escenarios. Aunque se visualiza que presenta un comportamiento con mayor presencia de componentes de alta frecuencia. Estas componentes se vuelven cada vez más perjudiciales al comportamiento del voltaje en la red.

Potencia consumida por la unidad de tren

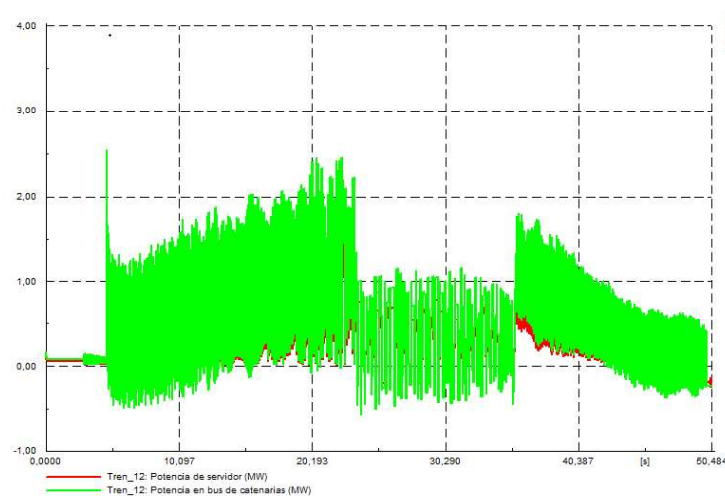


Figura 4.25. Demanda de potencia por la unidad de tren.

En la Figura 4.25, como en cada uno de los escenarios anteriores se tiene en los primeros instantes la potencia en condiciones iniciales.

Durante el arranque de los motores se tiene un pico máximo de potencia de 2.5 MW de manera instantánea. En la etapa de aceleración el incremento de la demanda de potencia se da hasta llegar al valor de la potencia máxima en el instante en el que llega a velocidad en estado estable.

En la etapa de velocidad en estado estable la demanda de potencia se reduce hasta un porcentaje proporcional al de la exigencia de carga a los rotores de los motores.

Durante la etapa de desaceleración se inicia primeramente con un valor alto de potencia de 1.7 MW, indicando que el proceso de frenado es rápido. En este intervalo de tiempo la demanda de potencia se reduce en cuanto la unidad de tren va deteniéndose.

Como se observa la potencia presenta un comportamiento con gran presencia de componentes de alta frecuencia, sin embargo, no pierde la característica de incremento o decremento gradual, además de la potencia que consume en estado estable.

Nivel de carga del transformador de tracción La Carolina

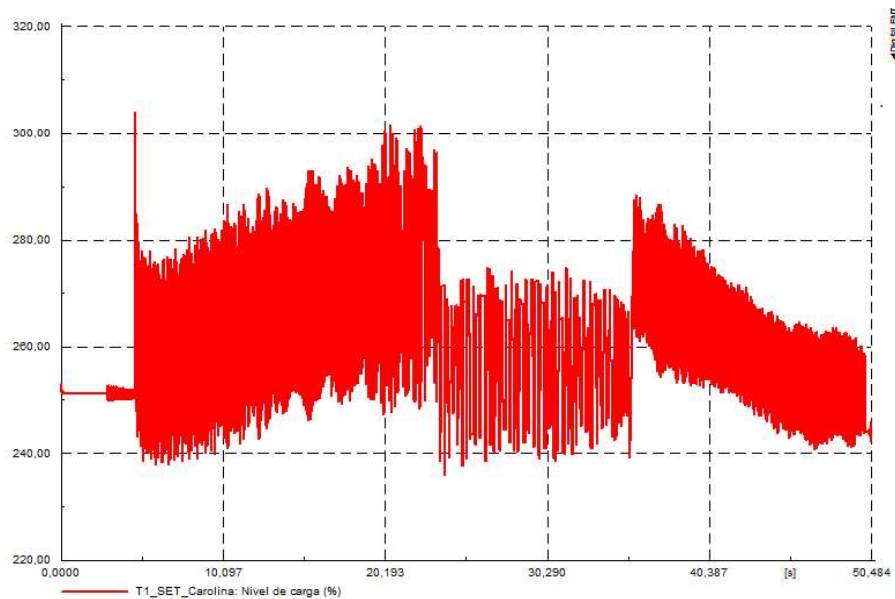


Figura 4.26. Nivel de carga del transformador de tracción La Carolina.

En la Figura 4.26 muestra que se tiene como valor inicial de nivel de carga de aprox. 255%. La operación de los motores en su etapa de arranque lleva al transformador a cargarse hasta un valor máximo de 300% aproximadamente, por lo cual el incremento se da en un 45%.

Durante la etapa de aceleración se tiene que el nivel de carga se incrementa desde el valor en condiciones iniciales hasta el valor máximo.

En la etapa de velocidad en estado estable el nivel de carga se reduce en proporción a la demanda de potencia y la exigencia de carga hacia los rotores de los motores.

Finalmente, durante la etapa de frenado se inicia con un nivel de carga alto de casi 290% referido al proceso de frenado rápido. Consecuentemente este valor va reduciéndose progresivamente hasta llegar al valor en condiciones normales.

Los niveles de sobrecarga máximos son instantáneos. Durante la etapa de aceleración se tiene un tiempo de sobrecarga de 22 segundos, y en la etapa de desaceleración un tiempo de sobrecarga 21 segundos, lo cual se ubica muy por debajo de los límites máximos para la operación en sobrecarga de los transformadores.

Se observa que las componentes de alta frecuencia tienen alta incidencia, de mayor manera durante la etapa de aceleración, en la cual se requiere de mayor rendimiento energético y las caídas de voltaje son más significativas.

De manera general, el voltaje presenta componentes de alta frecuencia, esto debido a la operación del circuito de chopper. La carga tanto de la operación dinámica como de las cargas estáticas inciden en una mayor caída de tensión, el modelo del circuito chopper es estático, es decir se basa en un valor preestablecido. De esta forma, al aumentar el valor de la caída de voltaje, el circuito chopper trata de mantener el voltaje DC a un valor próximo preestablecido. Realizando su activación de manera continua, lo cual tiene incidencia en el voltaje DC, que se ve reflejado en la calidad de la señal de potencia y por ende en la señal del nivel de carga de los transformadores. Aunque no presenta incidencia en los límites de voltaje admitidos de acuerdo al estándar EN50163, además, de los escenarios de nivel de carga de los transformadores de tracción acorde a la Tabla 4.2.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- En la actualidad, el uso de transporte masivo de carácter eléctrico presenta una gran alternativa de movilidad. Por lo que el estudio de sistemas de control enfocado a movilidad eléctrica se vuelve necesario para conocer el funcionamiento de los mismos, efectuando un estudio complementario entre lo que es sistemas de control y el área de ingeniería eléctrica. Tal es el caso del sistema de Metro de Quito en donde se pudo determinar sus características constructivas, enfocándonos a las áreas de sistemas de control y accionamientos eléctricos.
- El estudio de los accionamientos eléctricos con control vectorial presentes en sistemas de transporte eléctricos como de las unidades de tren del sistema de Metro permiten determinar y conocer el comportamiento dinámico de su sistema de tracción. En el presente trabajo se pudo observar en elementos prioritarios como son el capacitor de bus y el circuito de braking chopper el comportamiento que presenta ante las condiciones de operación efectuadas por la red eléctrica que suministra al sistema de tracción.
- Parámetros tales como del momento de inercia de los motores de inducción son relevantes al momento de la operación dinámica de los mismos, ya que de esto dependerá el par de arranque que efectúa. Adicionalmente, se trata de un parámetro que permite establecer los límites de las rampas de aceleración y desaceleración.
- El manejo de n-número de motores conectados a un convertidor de tracción se convierte en un tema de estudio complejo, en el sentido de implementar un

esquema de control tal como del control vectorial FOC. En el cual, se implementa como método de cálculo de los controladores PI tanto de corriente como de velocidad en base al criterio de PI óptimo, el cual se basa en los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción conectados. En este sentido como alternativa para el cálculo de los parámetros de circuito equivalente de todo el conjunto de motores se propuso el método de agregación dinámica de motores de inducción conectados al mismo bus.

- Se realizó el interfaz en cada uno de los entornos de simulación, Simulink y PowerFactory. En cada uno de ellos se presenta sus propias consideraciones al momento del tratamiento de la señal, es decir, de los valores y variables que interactúan con el servidor OPC.
- La co-simulación entre Simulink y PowerFactory a través de comunicación OPC se convierte en una herramienta de gran utilidad para el análisis de sistemas de control dentro del área de ingeniería eléctrica. Ya que de esta forma se puede observar de manera dinámica el comportamiento del sistema de control y de modelos eléctricos de manera paralela.
- Para efectuar entornos de co-simulación, primeramente, se hace necesario conocer la complejidad de los modelos a implementar. Ya que los tiempos de procesamiento del entorno de simulación influyen en los tiempos de sincronización. Para el tipo de co-simulación presentada se observa que debido a la complejidad del modelo de Simulink, no se puede obtener una co-simulación sincrónica por lo que siempre existe un pequeño retardo de tiempo, que para el caso práctico fue de entre 3 a 6 segundos. Este tiempo se recomienda que no sea muy elevado para que no se pierda la fidelidad de los resultados.
- La operación dinámica de los motores conectados a la red a través de co-simulación permite determinar cómo se comporta la red a través de la operación dinámica de aceleración, velocidad en estado estable y desaceleración. Además de determinar la manera en que influye la exigencia de torque de los motores en función de su demanda energética. Con lo que se puede estimar el comportamiento de la red eléctrica del SMQ ante las variaciones de carga y comportamiento dinámico de una de las unidades de tren.
- El sistema de control para el manejo de los motores de inducción es control vectorial FOC. Dentro de los resultados obtenidos se pudo observar como mejora el rendimiento energético durante la etapa de velocidad en estado estable debido al

control de flujo y la magnetización de la máquina. Además, el valor de la demanda de potencia de la unidad de tren a velocidad en estado estable depende de la carga manejada por el rotor de los motores de inducción y de la magnetización presente.

- Las condiciones de operación de los motores dependen de los escenarios en los cuales se encuentre la red. Tal es el caso para el escenario de demanda de potencia media presentado en la subestación de tracción de Solanda. El comportamiento que presenta la potencia se da de manera gradual en función de la etapa en la que se encuentre, ya sea aceleración o desaceleración. En cuanto a los escenarios críticos, el comportamiento de la red es oscilante, lo cual se ve reflejado en la demanda de potencia, por la presencia de caídas de voltaje más significativas.
- El presente trabajo además de dar a conocer el comportamiento dinámico de motores de inducción conectados a la red a través de una unidad de tren presenta una perspectiva acerca del estudio de sistemas de control vectorial para el manejo de n-motores conectados a la red, además, de una herramienta de estudio dinámico de sistemas de control, accionamientos eléctricos y motores de inducción conectados a la red a través de la co-simulación.
- Al realizar el cálculo de un modelo equivalente, es decir, una aproximación de todo el conjunto de motores en cuanto al circuito equivalente, se presenta un error en cuanto a la respuesta en comparación al modelo extenso de cuatro motores. Pero esto se ve reflejado en la dinámica del sistema, es decir, se observa que la respuesta del modelo equivalente se vuelve mínimamente lenta en relación al modelo de cuatro motores, lo cual es un factor favorable para la implementación del sistema.

5.2. RECOMENDACIONES

- Para implementar una co-simulación entre dos entornos de simulación, se determina las capacidades de procesamiento y la complejidad del modelo con el cual se va a trabajar. Ya que como en el caso de este trabajo, se realizó una co-simulación de tipo asincrónica. En donde los tiempos de simulación están de acuerdo a la capacidad de procesamiento, de esta manera incurre en los tiempos de muestreo de los datos escritor y leídos por parte del servidor OPC.
- Para optimizar el rendimiento de los entornos de simulación, se emplea un ordenador para cada uno de ellos, además del servidor OPC. De esta forma se evita la saturación de la memoria RAM de los ordenadores.

- El uso de modelos equivalentes permite optimizar el modelo, aunque como se trata de una aproximación, se puede evidenciar un margen de error, el cual se toma en cuenta para determinar si posiblemente puede ser influyente dentro de la operación del sistema.
- El diseño de circuitos de braking chopper para este tipo de aplicaciones se vuelve necesario ya que se requiere de modelos dinámicos que se adapten a las condiciones de simulación y operación de sistemas motrices como lo son el sistema de Metro de Quito.
- Para mejorar las condiciones de simulación, y tal vez de las condiciones de operación real se requiere de la implementación de filtros con el objetivo de minimizar la incidencia de componentes de alta frecuencia que afectan en gran manera a los resultados obtenidos.
- El presente trabajo presenta una primera etapa. La misma que posteriormente puede ser contrastada con los datos operativos reales del Metro de Quito, que deben incluir pruebas de campo, obteniéndose una validación del modelo implementado. Esto se limita ya que el Metro de Quito aún no entra en etapa de operación experimental. Por lo que es recomendable tomar en cuenta estos criterios para futuros trabajos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Metro de Santiago Consultorías, “Análisis comparativo de demanda proyectada de consumos de energía y potencia eléctrica para la primera línea del metro de Quito,” pp. 1–74, 2016.
- [2] Construcciones y Auxiliares de Ferrocarriles-CAF, “Descripción Técnica Equipo de tracción. Metro de Quito.” Quito, pp. 1–162, 2018.
- [3] Hydro-Québec, “SimPowerSystems User’s Guide.” The Mathworks, Inc., 2013.
- [4] A. Ron and D. Barba, “Contrucción E Implementación Del Sistema De Control Vectorial De Orientación De Campo Directo (DFOC) Para Un Motor Trifásico De Inducción,” Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- [5] A. Riofrío, M. S. Chamba, J. Cepeda, Y. Lecaro, F. Chimarro, and M. Mora, “Probabilistic Assessment and Risk Management of Grid Loadability due to the Quito City Subway Commissioning considering Electric Trains Stochastic Movement Evaluación Probabilística y Gestión del Riesgo de la Cargabilidad de la

- Red por la Puesta en Servic,” *Rev. Técnica"energía"*, vol. 15, no. II, pp. 1–11, 2019.
- [6] A. J. Riofrio, M. S. Chamba, J. C. Cepeda, F. Chimarro, and M. A. Mora, “Probabilistic Assessment of Underground Railway Systems Impact Over Distribution Grids,” *ISGT LA 2019*, pp. 1–6, 2019.
- [7] A. Latif, M. Shahzad, P. Palensky, and W. Gawlik, “An alternate PowerFactory Matlab coupling approach,” *2015 Int. Symp. Smart Electr. Distrib. Syst. Technol.*, no. SEPTEMBER, pp. 486–491, 2015.
- [8] C. Pacheco and E. Paredes, “Alternativas de alimentación eléctrica para el Metro de Quito,” EPN, Quito, 2014.
- [9] S. Hillmansen, “Electric Railway Traction Systems and Techniques for Energy saving,” *IET Professional Development Course on Electric Traction Systems (2012)*, no. 1. IET, London, pp. 1–5, 2012.
- [10] V. Espinoza, “Inversor trifásico con IGBT’s aplicando técnica PWM,” Escuela Politécnica Nacional, 2000.
- [11] Toshiba, “DC-AC Inverter Circuit.” TOSHIBA Electronic Devices & Storage Corporation, pp. 1–29, 2018.
- [12] “BOGIES,” *The Railway Technical Website*, 2018. [Online]. Available: <http://www.railway-technical.com/trains/rolling-stock-index-l/bogies.html>. [Accessed: 17-Dec-2018].
- [13] S. Chapman, *Máquinas Eléctricas*, Quinta edi. México, 2012.
- [14] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Máquinas Eléctricas*, Sexta Edic. .
- [15] M. Cereijo, “Método para la estimación del momento de inercia de máquinas de inducción trifásicas a partir de su peso y altura de eje.,” Universitat Rovira i Virgili, 2011.
- [16] V. Vodovozov, *Electric Drive Systems and Operation*. 2012.
- [17] C. U. Ogbuka, C. M. Nwosu, and M. U. Agu, “A New Four Quadrant Field Orientation-Controlled Three-Phase Induction Induction Motor Drive Based on Hysteresis Current Comparison,” *Adv. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, pp. 1–9, 2017.
- [18] B. K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, 2002.


- [19] K. Kalaiselvan, "Controlling Techniques of Multilevel Inverter for Direct Torque Control of Induction Motor," Anna University, 2016.
- [20] "What is OPC?," *OPC Foundation*, 2019. [Online]. Available: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>. [Accessed: 30-Jan-2019].
- [21] D. A. Piña Silva, "Interconexión entre Scada Wonderware System Platform y Software de Simulación Power Factory," Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2017.
- [22] D. Martinez, D. Celeita, D. Clavijo, and G. Ramos, "Hardware and Software Integration as a Realist SCADA Environment to Test Protective Relaying Control," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, pp. 1–10, 2017.
- [23] "Matrikon OPC Classic OPC Workshop." Matrikon International, Edmonton, Canadá, pp. 1–114, 2014.
- [24] F. Andrén, M. Stifter, T. Strasser, and D. Burnier De Castro, "Framework for Co-Ordinated Simulation of Power Networks and Components in Smart Grids Using Common Communication Protocols," *IECON 2011 - 37a Conf. Anu. la IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 1–6, 2011.
- [25] C. Winchester and N. Pocock, "Understanding OPC : Basic Overview." Software Toolbox, pp. 1–33, 2008.
- [26] DlgSILENT, *DlgSILENT PowerFactory 15. User Manual*, 15.1. Gomarigen: DlgSILENT, 2013.
- [27] M. Stifter, R. Schwalbe, F. Andrén, and T. Strasser, "Steady-State Co-Simulation with PowerFactory," *2013 Work. Model. Simul. Cyber-Physical Energy Syst.*, no. 20 May, pp. 1–6, 2013.
- [28] H. Arcos, "Curso Avanzado de DlgSILENT PowerFactory. Lenguaje de simulación digital DSL." CENACE, Quito, pp. 1–146, 2014.
- [29] PowerFactory, "Dynamic Modelling (DSL)," in *DlgSILENT PowerFactory Advanced Tutorial.*, Third Edit., DlgSILENT GmbH, 2017, pp. 1–47.
- [30] F. M. Gonzalez-Longatt and J. L. Rueda, Eds., *PowerFactory Applications for Power System Analysis*. Springer, 2014.
- [31] DlgSILENT, "Advanced Tutorial. PowerFactory OPC Example," 1st ed., Gomarigen: DlgSILENT GmbH, 2017, pp. 1–42.

- [32] MatrikonOPC, "MatrikonOPC Simulation Server," 2019. [Online]. Available: <https://www.matrikonopc.com/products/opc-drivers/opc-simulation-server.aspx>. [Accessed: 03-Feb-2019].
- [33] MatrikonOPC, "MatrikonOPC Explorer. User's Manual." Matrikon International, Edmonton, Canadá, pp. 1–79, 2018.
- [34] Mathworks, "OPC Toolbox," 2019. [Online]. Available: https://la.mathworks.com/products/opc.html?fbclid=IwAR3_z9ixZBPqkBB-CnPH2RBwwPLdNtZmzmUdjgg_d2Ek_yyj0VgS-viAbGI. [Accessed: 03-Feb-2011].
- [35] V. Vodovozov, *Electric Drive Dimensioning and Tuning*. 2012.
- [36] Mathworks, "Field-Oriented Control," 2015. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fieldorientedcontroller.html>.
- [37] M. F. Pallo, "Diseño e Implementación de un sistema de control vectorial por orientación de campo con realimentación de velocidad para un motor trifásico de inducción.," Escuela Politécnica Nacional, 2019.
- [38] J. Zhou, J. Zhang, Y. Yang, and Y. Ju, "Dynamic Aggregation Method of Induction Motors Based on Coherent Characteristics," in *Instrumentation, Measurements, Circuits and Systems*, T. Zhang, Ed. Springer, 2012, pp. 441–455.
- [39] J. J. López, "Implementación de una Herramienta Computacional que simule la Máquina de Inducción Trifásica en el Lenguaje de Python," Escuela Politécnica Nacional, 2018.
- [40] K. G. Papadopoulos, *PID Controller Tuning Using the Magnitude Optimum Criterion*. Springer, 2015.
- [41] Mathworks, "Speed Controller (AC)," 2015. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/speedcontrollerac.html>.
- [42] CENELEC, "EN 50163: Railway applications - Supply voltages of traction systems." 2015.

ANEXOS

ANEXO A.

Datasheet de un motor de tracción.

Motor Data							
Project:		TSA016691					
Type:		TME 46-17-4		Values at sinusoidal supply for:		BRAKING	
# of motors/car:	pcs.	16	# of poles	4			
gearbox-eff.	%	97%	∅ new	860			
gearbox-ratio	1:...	7,44	∅ worn	790			
<i>Not relevant for thermal considerations!</i>							
remark		Start	U/f	1/v	vmax	nmax	test speed 120 km/h
power mech/mot	kW	71	297	390	390	390	390
voltage LL	V	324	1403	1403	1403	1403	1403
current / motor	A	139	142	174	175	177	181
connection		Y	Y	Y	Y	Y	Y
power factor		0,78	0,81	0,86	0,85	0,84	0,82
frequency	Hz	20,0	86,6	113,3	150,9	164,2	180,8
slip	%	-3,84%	-0,98%	-1,31%	-1,39%	-1,44%	-1,52%
speed	1/min	623	2624	3444	4590	4997	5506
torque/mot.shaft	Nm	1082	1082	1082	812	745	676
max.torque	Nm	5321	3897	2187	1194	1001	822
∑ losses	kW	10,1	18,1	24,6	27,1	28,8	31,4
efficiency	%	85,7%	93,9%	93,7%	93,0%	92,6%	91,9%
current, slip=0	A	62	62	42	28	25	22
X1h constant							
vehicle data							
wheel ∅	mm	860	860	860	860	790	860
traction effort	kN	309	309	309	232	232	193
velocity	km/h	13,6	57,2	75,0	100,0	100,0	120,0
power	kW	1164	4906	6437	6435	6434	6433
Reactances and Resistances (per phase), saturated							
R1 @ 20°C	mΩ	73,64	73,64	73,64	73,64	73,64	73,64
R2' @ 20°C	mΩ	40,21	40,21	40,21	40,21	40,21	40,21
X1σ	mΩ	133	574	762	1031	1128	1248
X2σvar	mΩ	36	156	204	271	295	324
X2σkon	mΩ	59	255	348	486	536	600
X1h	mΩ	2896	12542	18568	28227	31936	36762
Lσ	μH	1809	1809	1846	1886	1898	1912
Dep: EB	Date:	20.07.2017 09:13			in charge:		W.Sollinger
File:	TSA016739_A_motordata_CAF PA Metro Quito					V2.6_4	

ANEXO B

Script de Matlab para el cálculo de los parámetros del circuito equivalente del conjunto de 4 motores.

```
clc
clear all

%%Parámetros de circuito equivalente
Rs=0.0056; %Resistencia del devanado del estator (p.u)
Xs=0.1003; %Reactancia de fuga del estator (p.u)
Xm=3.2108; %Reactancia de magnetización (p.u)
Rr=0.00305; %Resistencia del rotor (p.u)
Xr=0.04874; %Reactancia de fuga (p.u)
f=60; %Frecuencia del sistema de potencia (Hz)
Ws=2*pi*f; %Frecuencia angular del sistema de potencia (rad/s)
V=1100; %Voltaje de alimentación del motor de inducción.
n=4; %Numero de motores conectados

% Circuito equivalente de un Motor de inducción en estado estable

X_prim=Xs+(Xr*Xm)/(Xr+Xm);
X=Xs+Xm; %Reactancia de fuga del estator
Xsm=X; %Reactancia de fuga del estator
Xrm=Xr+Xm; %Reactancia de fuga del rotor
Xp=Xs*Xm+Xr*Xm+Xs*Xr; %Reactancia de reacción de inducido
Re=(Rs*(Xsm)^2)/((Xp)^2+((Rs)^2)*((Xsm)^2));
Xe=(-Xp*Xrm)/((Xp)^2+((Rs)^2)*((Xsm)^2));

% Cálculo de parámetros del circuito equivalente de los motores en
paralelo
Xeq1=1/((1/(Rs+X_prim*1))+1/(Rs+X_prim*1))+1/(Rs+X_prim*1)); %Ec. 28
Xeq_prim=imag(Xeq1);
Rs_eq=real(Xeq1)

Xeq=Xeq_prim/(1-(((X-X_prim)/X)+((X-X_prim)/X)+((X-X_prim)/X)+((X-X_prim)/X))/n); %Ec.23

Xe_eq=Xeq-sqrt(Xeq*(Xeq-Xeq_prim)) %Ec. 32
Xr_eq=Xeq_prim-Xs_eq %Ec. 33

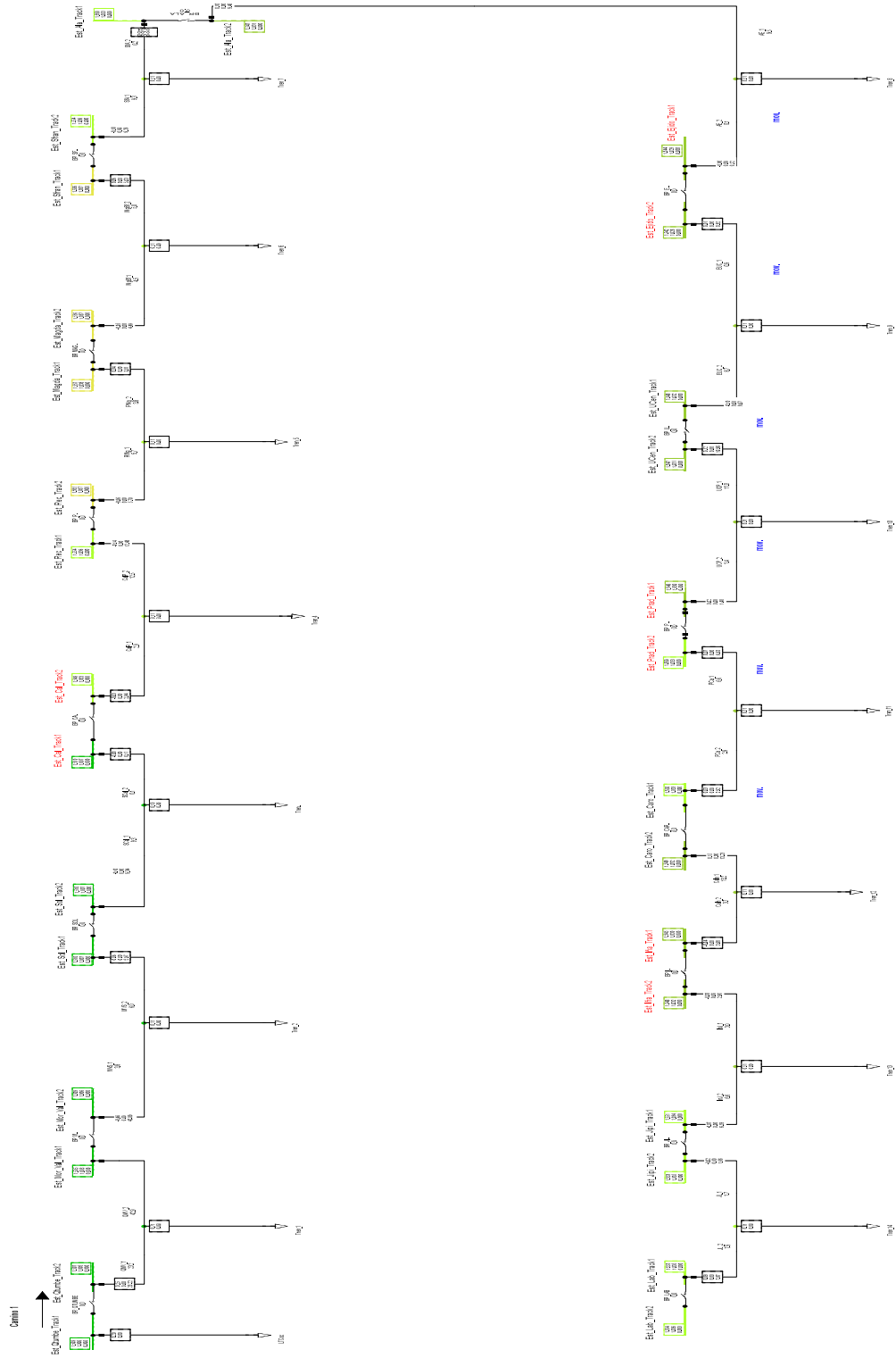
Xm_eq=Xeq-Xs_eq %Ec. 30
To_prim=(Xr+Xm)/(Ws*Rr);

Toeq_prim=(n*To_prim)/n;

Rr_eq=Xeq/(Ws*Toeq_prim) %Ec.34
```

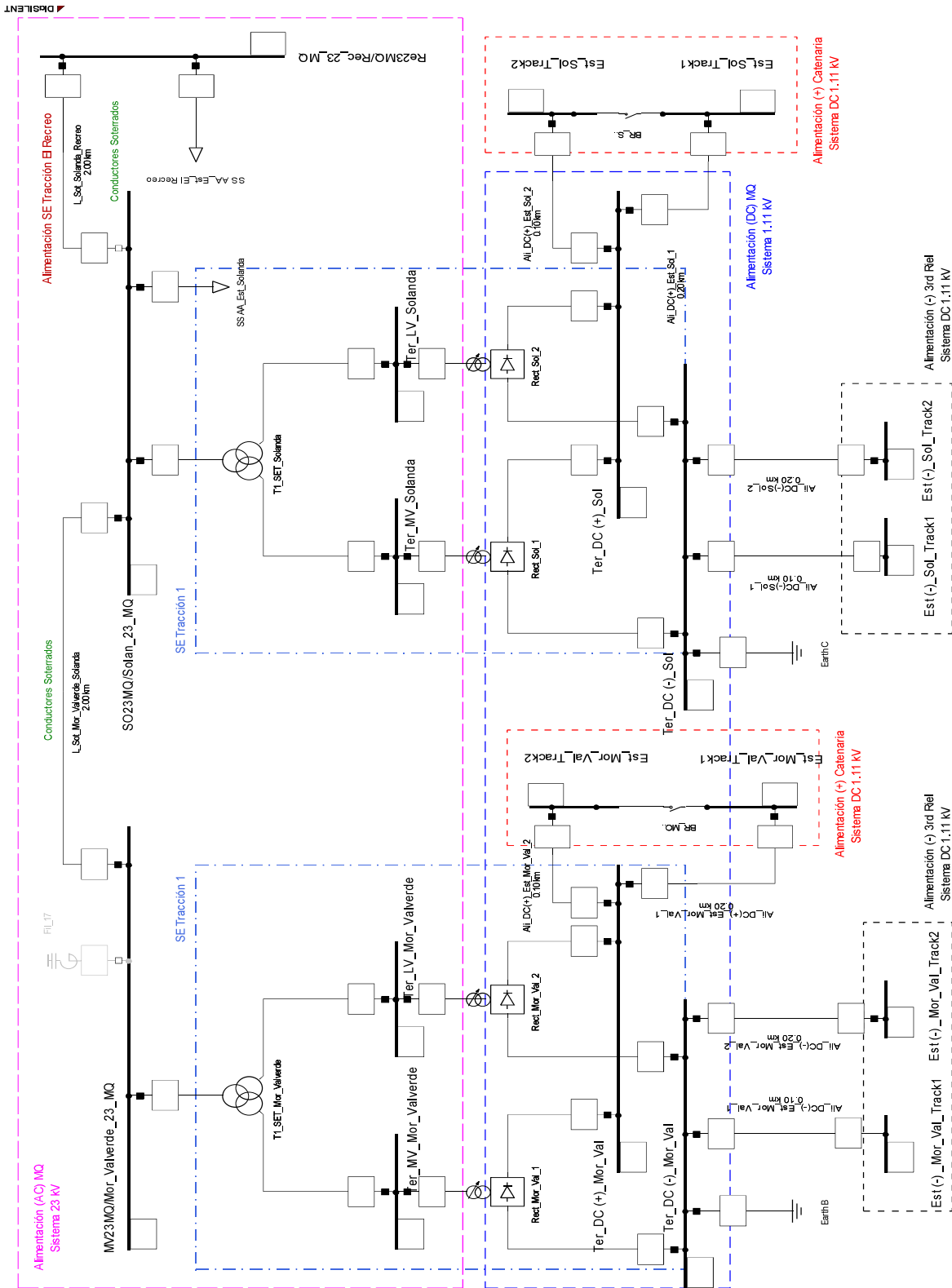
ANEXO C

Esquema de recorrido de las unidades de tren en PowerFactory.



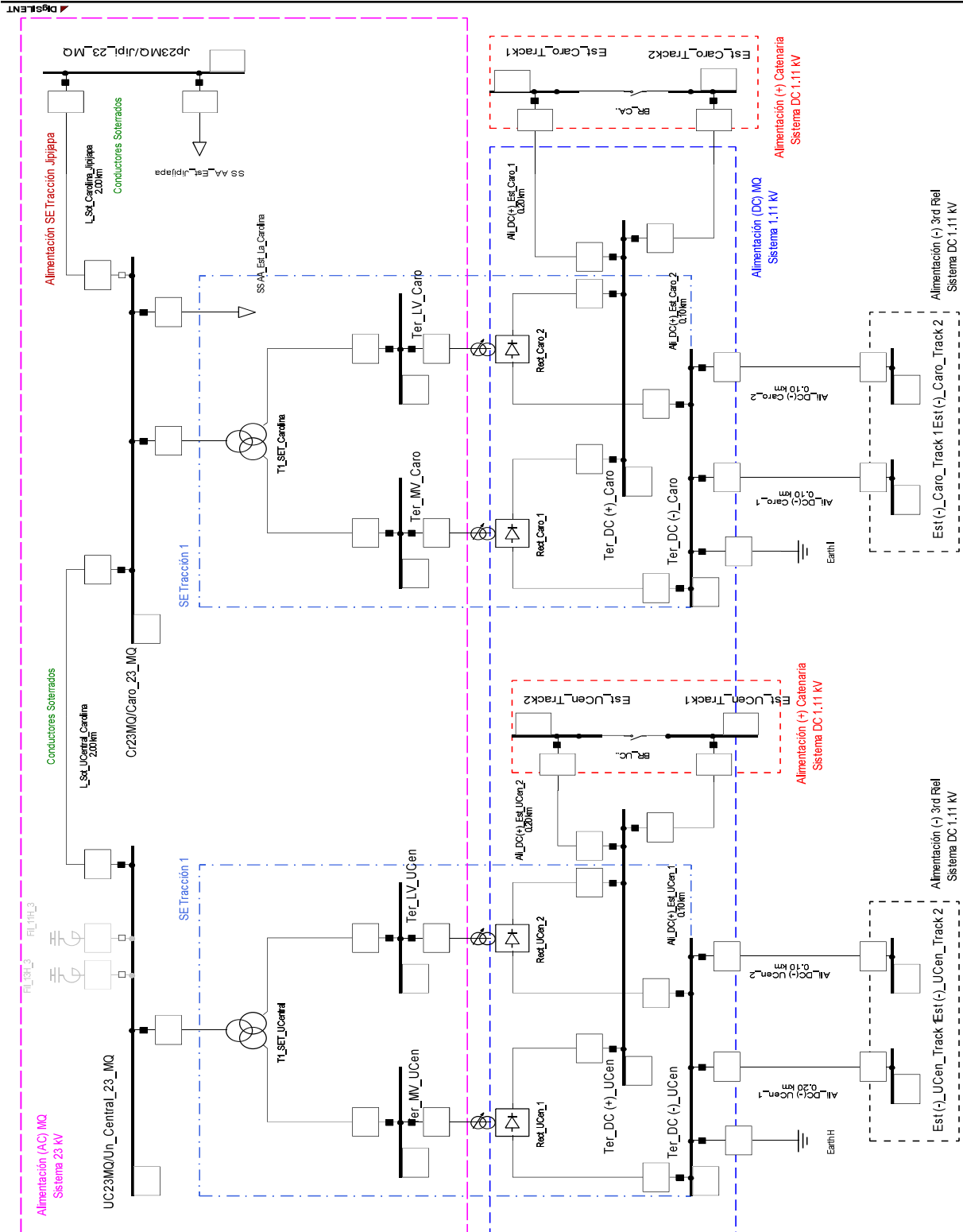
ANEXO D

Esquema de la Subestación de tracción Solanda en PowerFactory



ANEXO E

Esquema de la Subestación de tracción U. Central-Carolina en PowerFactory.



ORDEN DE EMPASTADO