



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA
DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO EN BOND GRAPH**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

Ing. Roberto Jaime Correa Jurado

Director de tesis:

Dr. Roberto Tapia Sánchez

Morelia, Michoacán,

México.

Agosto 2016



Dedicatoria

A Dios por permitirme concluir la presente tesis.

*A mi madre por darme el apoyo confianza y a lo largo de mi preparación
académica sino durante toda mi vida.*

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de Posgrado.

A agradezco a mi asesor de tesis, al Dr. Roberto Tapia por su enorme ayuda y apoyo brindado desde incluso antes de ser mi asesor. Sobre todo su paciencia y su constante motivación para superar cualquier traba que este proceso presentó

Y agradezco a CONACYT por brindarme su apoyo económico con el cual fue posible mis estudios de postgrado.

Resumen

En esta tesis se presenta el sistema de gestión de energía de un motor de inducción en bond graph. El sistema completo consta de un módulo de baterías eléctricas, un convertidor de electrónica de potencia, una máquina de inducción trifásica y una turbina eólica.

Se presentan los modelos de los diferentes elementos que componen el sistema completo en bond graph. Lo anterior resalta la transformación de la energía en sus diferentes etapas. En específico, la conversión electro-química que se produce en el banco de baterías y la transformación eléctrico-mecánica realizada en la máquina de inducción, así como la transformación aerodinámica-mecánica en la turbina eólica.

De cada uno de los elementos que componen el sistema completo, se exponen su modelo y análisis, con el objetivo de mostrar la conversión de la energía en cada una de las etapas.

En esta tesis, se presentan dos leyes de control aplicadas a la máquina de inducción, las cuales funcionan de manera simultánea, con el objetivo de realizar la gestión de la energía utilizada y también generada por la máquina de inducción.

Así, se muestra en la presente tesis una propuesta de un sistema de gestión de energía en un motor de inducción. Para lo anterior, se realiza su verificación por medio de simulaciones para dos casos de estudio.

Palabras Clave: Gestión de energía, control, máquina de inducción, modelado, bond graph.

Abstract

This thesis presents the induction motor management energy in bond graph.

Models of the different elements of the complete bond graph system are presented. This highlights the energy transformation in each stage. Specifically, the electro-chemical conversion that occurs in the battery bank, the electric-mechanical transformation performed in the induction machine, and the aero-mechanical processing in the wind turbine.

For each model of the complete system, their analysis is exposed in order to show the energy conversion in each stage.

In this thesis, two control laws applied to the induction machine are shown. These control laws work simultaneously in order to perform the management of the used and generated energy in the induction machine.

Some studies cases are performed in order to show the viability of the proposed structure and control management for an induction machine.

Key words: Bond graph, wind turbine, modeling, control, induction machine.

I. Índice

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VII
I. ÍNDICE	IX
II. LISTA DE FIGURAS.....	XIII
III. TABLAS	XVII
IV. LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	XIX
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Objetivo.....	3
1.2.1 Objetivos particulares.....	3
1.3 Justificación	3
1.4 Antecedentes	4
1.5 Metodología	5
1.6 Aportaciones	6
1.7 Descripción de Capítulos.....	6

CAPÍTULO 2	9
2 MODELADO EN BOND GRAPH.....	9
2.1 Introducción	9
2.2 Conceptos preliminares	9
2.3 Conceptos básicos	10
2.3.1 Puertos 1: Pasivos, Activos o Fuentes	13
2.3.2 Puertos 2: Elementos Ideales	14
2.3.3 Puertos 3: Elementos de Unión	15
2.3.4 Bond Activo	16
2.4 Causalidad	17
2.4.1 Procedimiento para la asignación de la causalidad	20
2.5 Procedimiento para el modelado de sistemas	21
2.5.1 Procedimiento para sistemas eléctricos.....	21
2.5.2 Procedimiento para sistemas mecánicos rotacionales y traslacionales	22
2.6 Matriz de Estructura de Unión	22
2.6.1 Vectores clave.....	23
2.6.2 Relaciones Constitutivas y Ecuación de Estado	24
2.7 Elementos de Conmutación en Bond Graph.....	26
2.7.1 Modelo ideal elemento interno.....	26
2.7.2 Modelo con elemento interno - unión de conmutación	27
2.8 Conclusiones.....	29
CAPÍTULO 3	31
3 COMPONENTES DEL SISTEMA DE GESTIÓN.....	31
3.1 Introducción	31
3.2 Descripción del Sistema	31
3.3 Batería.....	34
3.3.1 Reseña histórica de la batería	34
3.3.2 Funcionamiento de la batería.....	35
3.3.2.1 Problemas de las baterías de ion-litio.....	36
3.3.3 Celda eléctrica	37
3.3.4 Modelado en bond graph de la celda de ion litio	38
3.3.4.1 Simulación de la batería.....	42
3.3.4.2 Validación del modelo de la batería	46

3.4	Convertidor trifásico	49
3.4.1	Modelo de un inversor trifásico	49
3.4.2	Modelo de un inversor trifásico en bond graph	51
3.4.3	Simulación del inversor trifásico.....	52
3.5	Máquina de inducción	53
3.5.1	Análisis matemático	56
3.6	Turbina eólica	59
3.6.1	Turbina eólica en bond graph.....	61
3.6.2	Simulación de la turbina eólica.....	63
3.7	Conclusiones	65
CAPÍTULO 4		67
4	SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA	67
4.1	Introducción	67
4.2	Ley de control de la máquina de inducción como motor	67
4.2.1	Control Vectorial del motor de inducción	68
4.2.2	Simulación control de velocidad condicion de motor	71
4.3	Ley de control de la máquina de inducción como generador	73
4.3.1	Control del par en el generador de inducción	74
4.3.2	Simulación del generador de inducción	76
4.4	Sistema de Gestión de Energía – Caso de estudio 1	79
4.4.1	Simulación caso de estudio 1	80
4.3.1.1	Escenario A	83
4.3.1.2	Escenario B.....	86
4.5	Sistema de Gestión de Energía – Caso de estudio 2	87
4.5.1	Simulación caso de estudio 2	89
4.6	Conclusiones	93
CAPÍTULO 5		95
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	95
5.1	Conclusiones	95
5.2	Trabajos futuros	96

V. BIBLIOGRAFÍA.....97

II. Lista de figuras

Figura 2.1 Bond y variables generalizadas.....	10
Figura 2.2 Puerto 1 Activo, a) Fuente de esfuerzo modulada – b) Fuente de flujo modulada.	14
Figura 2.3 Puerto 2, a) Transformador ideal – b) Gyrador ideal.	14
Figura 2.4 Unión-0 para la conexión en paralelo.	15
Figura 2.5 Unión-1 para la conexión en serie.....	15
Figura 2.6 Representación de un bond activo.	16
Figura 2.7 Bond graph con un bond activo, a) variable de esfuerzo (voltaje) – b) variable de flujo (corriente).....	16
Figura 2.8 Detectores en bond graph para obtener el esfuerzo (De) o flujo (Df).....	17
Figura 2.9 Diferentes opciones para representar la causalidad en un bond.....	18
Figura 2.10 Reglas de simplificación.	21
Figura 2.11 Diagrama a bloques de la estructura de unión y sus vectores clave.....	23
Figura 2.12 Elemento MTF utilizado como interruptor.	26
Figura 2.13 Uniones SPJ – a) unión cero – b) unión 1 – (1) relaciones unión 0 – (2) relaciones unión 1. .	27
Figura 2.14 Representación de las SPJ con transformadores.	28
Figura 2.15 SPJ unión 0.	28
Figura 3.1 Diagrama de conexión de los componentes del sistema.	32
Figura 3.2 Representación de la transformación química a eléctrica.	38
Figura 3.3 Modelo en bond graph de la celda incluyendo el almacenamiento de energía.	39
Figura 3.4 Reacción química en la interfaz electrodo-electrolito.....	39
Figura 3.5 Activación de doble capa modela en bond graph.....	41
Figura 3.6 Resistencia óhmica en el modelo.	41
Figura 3.7 Modelo isotérmico de la batería ion-litio.....	42

Figura 3.8 Modelo en 20Sim de la celda de ion-litio.	43
Figura 3.9 Respuesta de la simulación de la carga y descarga de la celda eléctrica de ion-litio.	44
Figura 3.10 Modelo en 20Sim de la batería de ion-litio.	44
Figura 3.11 Respuestas de la simulación de la carga y descarga de una batería de ion litio.	45
Figura 3.12 Arreglo de 5 baterías.	45
Figura 3.13 Diagrama de simulación en Simulink de la batería.	46
Figura 3.14 Respuesta de la simulación modelo Simulink – a) Voltaje batería – b) Estado de carga – c) Corriente en la carga.	47
Figura 3.15 Respuesta de la simulación modelo bond graph – a) Voltaje batería – b) Estado de carga – c) Corriente en la carga.	48
Figura 3.16 Circuito del inversor trifásico conectado a una carga en conexión tipo estrella.	50
Figura 3.17 Inversor trifásico en bond graph.	51
Figura 3.18 Diagrama de simulación del inversor trifásico.	52
Figura 3.19 Voltajes trifásicos generador por el inversor.	53
Figura 3.20 Diagrama esquemático de la máquina asíncrona trifásica, (Krause P. C., 2002).	54
Figura 3.21 Circuito equivalente en el marco de referencia arbitrario $dq0$ para la máquina de inducción.	55
Figura 3.22 Bond graph de la máquina de inducción.	56
Figura 3.23 Curva típica del coeficiente de potencia.	60
Figura 3.24 Modelo bond graph de la turbina eólica.	61
Figura 3.25 Modelo en bond graph de la turbina eólica incluyendo el generador.	62
Figura 3.26 Respuestas de la simulación de la turbina eólica –a) Velocidad del viento –b) Potencia mecánica – c) Velocidad angular.	63
Figura 3.27 Respuestas de las simulación de la turbina eólica –a) Voltajes trifásicos –b) Corrientes i_d e i_q en estator –c) Potencia activa y reactiva generada.	64
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la condición como motor en el sistema de gestión de energía.	68
Figura 4.2 Esquema del control vectorial indirecto.	69
Figura 4.3 Diagrama a bloques del cálculo de las referencias de voltaje de campo orientado en operación de flujo constante.	70

Figura 4.4 Cálculo de las referencias de voltaje simplificado en operación a flujo constante y en estado estable.....	70
Figura 4.5 Control vectorial indirecto en campo orientado alimentado por voltaje.....	71
Figura 4.6 Diagrama de simulación de la ley de control de velocidad para la condición de motor.....	72
Figura 4.7 Velocidad del motor de inducción.....	73
Figura 4.8 Voltajes trifásicos de salida en el inversor.....	73
Figura 4.9 Diagrama de flujo de la condición como generador en el sistema de gestión de energía.....	74
Figura 4.10 Diagrama a bloques del control de par para el generador.....	76
Figura 4.11 Diagrama de simulación de la ley de control de par para la condición de generador.....	77
Figura 4.12 Respuesta de la velocidad angular en el generador.....	78
Figura 4.13 Torque presente en el generador.....	78
Figura 4.14 Voltajes trifásicos generados en las terminales de la máquina de inducción.....	78
Figura 4.15 Esquema de conexión para el caso de estudio 1.....	79
Figura 4.16 Caso de estudio 1. Esquema de simulación.....	81
Figura 4.17 Esquema de las Condiciones 2 y 3 durante la simulación.....	83
Figura 4.18 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario A – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.....	84
Figura 4.19 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario A – a) voltajes de salida del inversor – b) voltajes del generador.....	85
Figura 4.20 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario B – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.....	87
Figura 4.21 Diagrama de la configuración para el segundo caso de estudio.....	88
Figura 4.22 Caso de estudio 2. Esquema de simulación.....	89
Figura 4.23 Esquema de la Condición 4 durante la simulación.....	90
Figura 4.24 Respuestas de la simulación Caso 2 – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.....	92

III. Tablas

Tabla 2.1 Variables generalizadas para los sistemas eléctricos e hidráulicos.	11
Tabla 2.2 Variables generalizadas para los sistemas mecánicos traslacionales y rotacionales.	12
Tabla 2.3 Elementos pasivos de almacenamiento y disipación C, I y R, respectivamente.	13
Tabla 2.4 Reglas de asignación de la causalidad para los puertos básicos.	18
Tabla 2.5 Formas causales y su relación constitutiva para los elemento puerto 1.	19
Tabla 3.1 Secuencia de los interruptores y la condición del sistema.	33
Tabla 3.2 Parámetros para la simulación de la celda de ion-litio.	43
Tabla 3.3 Estados de conducción de un inversor trifásico para una modulación PWM.	50
Tabla 3.4 Valores numéricos para la simulación de la turbina eólica.	63
Tabla 4.1 Parámetros de la máquina y control para el control vectorial indirecto.	71
Tabla 4.2 Condiciones Caso de estudio 1 – escenario A.	83
Tabla 4.3 Condiciones Caso de estudio 1 – escenario B.	86
Tabla 4.4 Condiciones Caso de estudio 2.	91

IV. Lista de abreviaturas y símbolos

SPJ	Switched Power Junction
MADA	Máquina de inducción doblemente alimentada
$e(t)$	Esfuerzo
$f(t)$	Flujo
$p(t)$	Variable de momento
$q(t)$	Variable de desplazamiento
R	Resistencia
C	Capacitancia
I	Inductancia
$v(t)$	Voltaje
$i(t)$	Corriente
$F(t)$	Fuerza
$V(t)$	Velocidad
Se	Fuente de esfuerzo
Sf	Fuente de flujo
TF	Transformador
GY	Girador
L	Inductor
m	Masa
B	Constante de Damper
k	Constante de resorte
x	Vector de estado en causalidad integral
\dot{x}	Vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad integral
z	Vector de estado coenergía con causalidad integral
x_d	Vector de estado con causalidad derivativa
\dot{x}_d	Vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad derivativa
z_d	Vector de estado de coenergía con causalidad derivativa
u	Vector de la fuente de salida

D_{in}	Vector de entrada al campo R
D_{out}	Vector de salida del campo R
MIMO	Multiple-in Multiple-out
P_t	Potencia máxima generada por el viento
λ	Velocidad específica
ρ	Densidad del aire
β	Angulo de orientación de palas
C_p	Coefficiente de potencia
J	Inercia
T_{em}	Torque electromagnético
T_t	Torque aerodinámico
ω_t	Velocidad angular de la turbina
S	Superficie creada por las palas
MSf	Fuente modulada de flujo
MSe	Fuente modulada de esfuerzo
MGY	Girador modulado
Df	Sensor de flujo
De	Sensor de esfuerzo
b	Constante de amortiguación
BIL	Batería de Ion Litio
PWM	Modulación de ancho de pulsos
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa

Capítulo 1

1 Introducción

1.1 Definición del problema

Actualmente la industria del transporte está buscando nuevas formas de sustentabilidad con el manejo o incorporación de recursos renovables o energía libre como es la energía solar, energía eólica, entre otras. Una de las energías bien probadas y que ya se encuentra en funcionamiento corresponde a los conocidos como sistemas o vehículos híbridos. Dichos vehículos tienen la característica de que combinan un motor de combustión interna y otro eléctrico alimentado por baterías adicionales a la principal. Son una realidad desde hace muchos años y poco a poco empiezan a hacerse populares por la crisis ambiental, alza de combustibles, abaratamiento de la tecnología y conciencia ambiental. En función del tipo de uso para el que están diseñados, los motores de los vehículos híbridos pueden ser colocados o conectados en serie o en paralelo (Ehsani, Gao, & Emadi, 2010)

En los vehículos híbridos con una conexión en serie, el motor de combustión interna acciona un generador que suministra electricidad a un motor eléctrico, mismo que está conectado a las ruedas; es decir, el vehículo se mueve finalmente con la potencia que suministra el motor eléctrico, el cual utiliza la energía eléctrica que produce el generador, accionado por el motor de combustión interna (Franco & Baena, 2010). La ventaja de este tipo de autos es que si se necesitan prestaciones o autonomía, el motor eléctrico puede recibir a la vez energía de las baterías y del generador.

En los vehículos híbridos con conexión en paralelo, tanto el motor eléctrico como el de gasolina están conectados a las ruedas del vehículo (Cabo de Guzmán Domínguez, 2011). Son más complejos, pero también más eficaces para reducir el consumo y las emisiones sin perjudicar las prestaciones. Para el tráfico urbano, donde no hace falta mucha potencia y buscando un nivel de emisiones cero, el vehículo funciona sólo con el motor eléctrico, que toma la corriente de las baterías instaladas en el vehículo.

La industria del transporte representa un tema de suma importancia para la sociedad y los gobiernos, debido a la conservación del medio ambiente para evitar un mayor impacto en la modificación del mismo (con la adición de contaminantes). De esta manera los gobiernos de diferentes países han tratado actualmente de implementar leyes para dicho fin. Si bien una de las características o tendencias más importantes que tienen dichos vehículos es la de contar con un motor que no utilice derivados de los hidrocarburos, el motor de inducción es una de las alternativas más interesantes (Gutiérrez Gómez & Escobedo de la Cruz, 2014) (Pérez, 2002) (Meissner, 2003).

Los vehículos eléctricos han sido ampliamente estudiados frente a esquemas de gestión de manejo de energía (Hadley & Tsvetkova, 2009) y (Thounthong, Raël, & Davat, 2009). Por otra parte es sabido que las motocicletas han representado un medio de transporte alternativo, por lo tanto, los estudios realizados de los automóviles eléctricos pueden ser aplicados en este tipo de vehículo. Las motocicletas se ha popularizado, por su tamaño y facilidad de maniobrabilidad, por lo que actualmente se ha aumentado la cantidad de usuarios en todo el mundo, debido al auge en el rediseño de las mismas, para crear un medio de transporte más eficiente, barato y sin tantos contaminantes (Cherry, Weinert, & Xinmiao, 2009). Adicionado a lo anterior, el sistema de gestión de energía aplicado en una motocicleta se hace más importante, debido a que no se cuenta con las mismas dimensiones de espacio con los que cuenta un automóvil.

Si bien, es un hecho evidente (actualmente) el uso de sistemas de gestión de energía en los vehículos eléctricos o híbridos, dichos sistemas se han mantenido como un concepto manejado únicamente o principalmente por los fabricantes automotrices, sin embargo algunas mejoras y propuestas en cuanto a la manera de hacer más eficiente el sistema de gestión de energía puede ser evidente, desde el punto de vista de una investigación. Es por tal motivo que la presente tesis aborda una propuesta del diseño un sistema de gestión de energía que contempla un mayor número de componentes que permiten hacer más eficiente al sistema. Lo anterior es realizado utilizando la metodología de modelado en bond graph, debido a sus características mencionadas más adelante.

1.2 Objetivo

Realizar un esquema de gestión aplicado a un vehículo eléctrico, el cual permita realizar la distribución de la energía generada y almacenada debida a los diferentes componentes del vehículo eléctrico. Así como proponer la adición de otros elementos que permitan realizar la gestión de la energía de una mejor manera, tal es el caso del uso de un aerogenerador.

1.2.1 *Objetivos particulares*

Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Proponer una estructura diferente de conexión del sistema, lo cual se realiza con la adición de un aerogenerador, permitiendo así contar con una fuente de generación de energía que complementa al sistema completo del vehículo eléctrico.
- Realizar el esquema de gestión de energía del vehículo eléctrico, tomando en consideración la energía del banco de baterías, así como también la energía recuperada por medio del aerogenerador.

1.3 Justificación

Los sistemas de gestión de energía aplicados en los vehículos eléctricos e híbridos son ya una realidad. Sin embargo estos sistemas continúan siendo un tema interesante de investigación, debido a que su objetivo principal se encuentra centrado en ahorrar la mayor cantidad de energía posible y también el de ser un sistema auto sostenible (en cierta medida).

Por otra parte, las configuraciones utilizadas en los vehículos eléctricos e híbridos, así como también en las motocicletas eléctricas han mantenido un estándar, tal es el caso de los esquemas presentados en (Chau, 2007), (Manzano Guillen, 2011) y (Won, 2005), si bien se ha demostrado, tanto en la práctica como en la teoría, que funcionan bien, se hace necesario desarrollar nuevas configuraciones para aumentar la eficiencia del sistema, debido al aumento de componentes que permitan una mayor generación de la energía en el sistema completo.

Por tal motivo, en esta tesis se propone una estructura diferente de conexión, lo cual se realiza con la adición de un aerogenerador, permitiendo así contar con una fuente de generación de energía que complementa al sistema. Es importante mencionar que en una estructura convencional se tiene en cuenta únicamente las baterías y el motor. De esta manera, el aerogenerador servirá como complemento para alimentar al motor y así disminuir el uso de la energía presente en el banco de baterías.

La metodología de bond graph permite realizar el modelado de los sistemas de diferentes dominios de la física en el mismo marco de referencia, destacando la propiedad de que gráficamente se tiene la noción del sentido y transferencia de potencia y/o energía en el sistema modelado. Adicionalmente, en el modelo en bond graph (tomado o formulado directamente de los elementos físicos que componen al sistema estudiado) se encuentran presentes las ecuaciones matemáticas que describen al sistema, las cuales pueden ser obtenidas utilizando el procedimiento adecuado.

Es debido a lo anterior, que el uso de la metodología de bond graph para modelar el sistema de gestión del vehículo eléctrico, permite observar de manera gráfica la transferencia de energía que se realiza entre cada uno de los componentes del sistema.

Es importante mencionar que el sistema de gestión de energía no solamente puede ser aplicado para autos eléctricos e híbridos y para motocicletas eléctricas, sino también para el caso de los trenes eléctricos o bien aplicados al sistema de generación de energía eléctrica (red inteligente).

1.4 Antecedentes

El primer modelo de un vehículo eléctrico fue realizado por el Profesor Stratingh en 1835, y los primeros utilitarios fueron construidos en 1842 por Thomas Davenport y Robert Davison en Estados Unidos y en Edimburgo, respectivamente.

Por otra parte, la mejora de la pila eléctrica, por parte de los franceses Gaston Planté en 1865 y Camille Faure en 1881, facilitó el camino a los vehículos eléctricos. Francia y Gran Bretaña fueron los primeros países que apoyaron el desarrollo generalizado de éste tipo de vehículos. (Menchaca Torre, 2013)

No fue hasta la crisis energética en 1970 y en los 80's cuando los vehículos eléctricos volvieron a tener interés, ya que eran independientes de las fluctuaciones del mercado del petróleo. Desde ese momento hasta hoy en día la tecnología ha ido avanzando poco a poco, sobre todo en lo relativo a las

baterías (principal limitación), siendo en los últimos años (debido nuevamente a la crisis energética del 2000) cuando más se ha notado el desarrollo de estos vehículos. La inmensa mayoría de los fabricantes de automóviles tienen ya sus propios modelos eléctricos o híbridos, entre los que destaca la empresa REVA con su modelo REVAi, que es el más vendido del mundo hasta el momento.

Así, la producción de vehículos eléctricos en diferentes países será progresiva, arrancando desde 2012, y sólo hacia 2020 empezará a representar un porcentaje significativo del parque de vehículos actual (Gerónimo, 2015) (García & Reyes, 2015), lo cual representa un campo de inversión interesante para la manufactura automotriz en general.

En lo que se refiere a trabajos de investigación recientes se tienen los siguientes: Alstom y Volvo han presentado, en el transcurso de la feria de movilidad urbana UITP, el proyecto para el desarrollo de carreteras eléctricas, como una alternativa sostenible para el transporte de mercancías de larga distancia en camiones híbridos. El programa, que cuenta con el apoyo de la Agencia Sueca de Energía, completo la fase de ensayos a finales de 2015. El trabajo consiste en desarrollar tecnología aplicada a los imanes y bobinas con el fin de mejorar su uso, además de los dispositivos de potencia para controlar los diferentes equipos que permitan manejar adecuadamente los controles tanto de los motores eléctricos, generadores, cargadores e inversores que se tendrán que implementar en los vehículos (Zayas, 2014) (Sampietro, 2015) (Amjadi & Williamson, 2010).

Si bien, el caso del vehículo eléctrico ha sido ampliamente estudiado, los retos que ha afrontado han sido considerables, y aún más, siendo un tema de interés para la industria automotriz. Éste tema presenta oportunidades interesantes en su desarrollo.

Es por tal motivo que esta tesis propone un sistema de gestión de la energía aplicado a un vehículo eléctrico usando la metodológica de bond graph, así como agregar un aerogenerador en la estructura clásica de un vehículo eléctrico, con el objetivo de hacer uso de la energía que este produce.

1.5 Metodología

La metodología aplicada en el presente trabajo, se desarrolla de la siguiente manera:

Se comienza con la investigación acerca de la metodología de bond graph, con el objetivo de obtener las bases teóricas necesarias para la concepción de los modelos que involucran diferentes dominios físicos.

Posteriormente, la metodología de bond graph es utilizada para realizar el modelo de los diferentes componentes que forman al sistema de gestión de energía del vehículo eléctrico.

Una vez obtenido el modelo del sistema de gestión de energía se realiza el análisis del mismo, considerando las características consideradas para su diseño.

El diseño del sistema de gestión se hace evidente sobre el sistema del vehículo eléctrico. Para esta última parte, se utilizan las diferentes leyes de control necesarias en cada uno de los diferentes elementos que componen al sistema completo.

1.6 Aportaciones

Las aportaciones de esta tesis, se pueden resumir en las siguientes:

- Obtención de un sistema de gestión de energía aplicado a un vehículo eléctrico.
- Propuesta de un esquema diferente de conexión de un sistema de gestión de energía aplicado en un vehículo eléctrico. Esta propuesta, se realiza con la adición de un aerogenerador, permitiendo así contar con una fuente de generación de energía que complementa al sistema.

1.7 Descripción de Capítulos

La presente tesis se ha dividido en cinco capítulos, donde se señalan los aspectos más sobresalientes para el desarrollo de la misma.

En el Capítulo 2, se explican las bases de la metodología de bond graph. En éste capítulo, también se exponen los elementos de conmutación utilizados en la metodología de bond graph, necesarios para realizar la simulación del sistema completo de gestión de energía.

En el Capítulo 3, se exponen los modelos de los diferentes elementos utilizados en el sistema completo. Se presenta también el análisis de los modelos presentados.

En el Capítulo 4, se presenta el modelo completo del sistema propuesto de regeneración de energía aplicado a un motor de inducción. Se presentan las leyes de control individuales, necesarias para cada uno de los elementos que componen al sistema. Además, se realiza la simulación del sistema de gestión de la energía y se hace un análisis de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 5, se presentan las conclusiones generales de esta tesis y se sugieren trabajos futuros de investigación.

Capítulo 2

2 Modelado en bond graph

2.1 Introducción

En éste capítulo se presentan los elementos básicos que son utilizados en la metodología de bond graph. Además, se expone un procedimiento para obtención de las ecuaciones matemáticas derivadas del modelo en bond graph. Se presenta también la formulación y obtención de las ecuaciones matemáticas de un modelo.

2.2 Conceptos preliminares

La ciencia y sus métodos proveen respuestas a las interrogantes humanas sobre los sistemas y sus propiedades. Los métodos científicos se basan en la experimentación, que consiste en la realización de ensayos sobre el sistema, en la observación de las reacciones del mismo y en la obtención de leyes dado su comportamiento, expresadas por lo general mediante el lenguaje matemático.

El método experimental no siempre es viable ya que en algunos casos existen factores que limitan o impiden su aplicación. Por ejemplo: costos, riesgos, experimento irrealizable (por inexistencia del sistema o incapacidad humana de experimentar). Una alternativa a la experimentación directa sobre los sistemas es la experimentación sobre su modelo.

No es nuevo decir que la energía es uno, por no decir el concepto esencial en la descripción de la evolución de los sistemas tecnológicos. La energía la encontramos en todos los dominios, y ella constituye la unión entre dichos dominios. Henry M. Paynter (1923-2002) introdujo el concepto de bond graph en 1961. Este concepto fue desarrollado en gran medida por los trabajos realizados por Karnopp y Rosenberg, para obtener una metodología de análisis global para los sistemas multidisciplinarios, que constituyen al día de hoy la gran mayoría de los procesos industriales. La metodología, es elegante, y su utilización sobre modelos simples puede ser rápida y eficiente. No se necesita, más que conocer los elementos básicos para poder realizar la construcción directamente sobre un programa computacional adaptado para poder mostrar los resultados directamente, sin necesidad de escribir alguna ecuación matemática (es el programa que las escribe). La metodología de bond graph es una metodología gráfica que se aplica a todos los sistemas y en todos los dominios (lineales, no lineales, continuos, discretos, numéricos, electrónicos, hidráulicos, mecánicos térmicos,...). Los bond graphs permiten tratar los canales de información de energía en el sistema analizado (Borutzky, 2011).

2.3 Conceptos básicos

Bond graph es una representación de un sistema dinámico donde una colección de componentes interactúan unos con otros a través de puertos de energía. Estos componentes colocados en el sistema describen cómo fluye la potencia a través del sistema.

El componente fundamental de un modelo en bond graph, es el llamado “bond” de energía, el cual es utilizado para acoplar los puertos de energía de los componentes del sistema.

Un bond es dibujado con una línea con un borde de media flecha como se muestra en la Figura 2.1, en la que se puede observar las dos variables generalizadas de esfuerzo y flujo, denotados como: $e(t)$ y $f(t)$ respectivamente, utilizadas en la metodología.

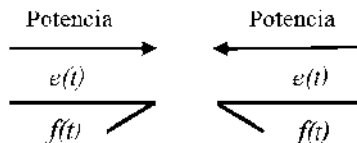


Figura 2.1 Bond y variables generalizadas.

La dirección de la media flecha indica la dirección positiva del flujo de energía. En principio, para algún componente en bond graph, las fuentes de esfuerzo o flujo siempre proporcionan una energía hacia el sistema, y los demás elementos absorben dicha energía.

Las variables generalizadas; son variables que describen la unión de dos o más puertos conectados en el sistema, y son también conocidas como: variables de flujo.

En los sistemas que almacenan energía es necesario definir variables que representen el estado del sistema; dichas variables son denominadas: momento $p(t)$ o esfuerzo acumulado $e_a(t)$ y desplazamiento $q(t)$ o flujo acumulado $f_a(t)$, y están definidas por,

$$p(t) = e_a(t) \triangleq \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{2.1}$$

$$q(t) = f_a(t) \triangleq \int_0^t f(\tau) d\tau \tag{2.2}$$

Tomando en cuenta las variables generalizadas, las variables de energía y de potencia para los diferentes dominios físicos se presentan las Tabla 2.1 y en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1 Variables generalizadas para los sistemas eléctricos e hidráulicos.

Variable	General	Eléctrico	Hidráulico
Esfuerzo	$e(t)$	$v(t)$ Voltaje	$P_e(t)$ Presión
Flujo	$f(t)$	$i(t)$ Corriente	$Q(t)$ Caudal
Momento	$p(t) = \int e(t) dt$	$\lambda(t)$ Enlace de flujo	$P_p(t)$ Integral de presión
Desplazamiento	$q(t) = \int f(t) dt$	$q(t)$ Carga	$V(t)$ Volumen
Potencia	$P(t) = e(t)f(t)$	$v(t)i(t)$	$P_e(t)V(t)$
Energía	$E(p) = \int f(p) dp$ $E(p) = \int f(p) dp$	$\int i(\lambda) d\lambda$ $\int e dq$	$\int Q(P_p) dP_p$ $\int P_e(V) dV$

En la Tabla 2.1 se muestran las variables generalizadas para sistemas eléctricos e hidráulicos y en la Tabla 2.2 se muestran las variables generalizadas para sistemas mecánicos de traslación y de rotación.

Tabla 2.2 Variables generalizadas para los sistemas mecánicos traslacionales y rotacionales.

Variable	General	Mecánica de Traslación	Mecánica de Rotación
Esfuerzo	$e(t)$	$F(t)$ Fuerza	$\tau(t)$ Par
Flujo	$f(t)$	$V(t)$ Velocidad	$\omega(t)$ Velocidad angular
Momento	$p(t) = \int e(t)dt$	$P_R(t)$ Momento rotacional	$H(t)$ Momento angular
Desplazamiento	$q(t) = \int f(t)dt$	$x(t)$ Distancia	$\theta(t)$ Angulo
Potencia	$P(t) = e(t)f(t)$	$F(t)V(t)$	$\tau(t)\omega(t)$
Energía	$E(p) = \int f(p)dp$ $E(p) = \int f(p)dp$	$\int V(P_R)dP_R$ $\int F(x)dx$	$\int \omega(H)dH$ $\int \tau(\theta) d\theta$

Como anteriormente se mencionó los sistemas se interconectan por puertos, los cuales se clasifican en:

- Puerto 1 -Pasivos, Activos o Fuentes
- Puerto 2 -Elementos Ideales
- Puerto 3 -Elementos de Unión

Dichos elementos son descritos en las siguientes subsecciones.

2.3.1 Puertos 1: Pasivos, Activos o Fuentes

Los elementos pasivos son aquellos que representan disipación de potencia y dos formas de almacenamiento de energía. Se les conoce como Puertos-1 Pasivos a todos aquellos elementos que intercambian potencia en un puerto o elemento sencillo pasivo (un solo bond conectado al elemento). Los elementos gráficos utilizados son los siguientes,

- *C*: Elemento de almacenamiento para una variable de tipo *q*, por ejemplo: condensador, resorte, etc.
- *I*: Elemento de almacenamiento para una variable de tipo *p*, por ejemplo: inductor, resorte mecánico, etc.
- *R*: Resistencia de disipación de energía libre, por ejemplo: resistencia eléctrica, la fricción mecánica, etc.
- *Se*, *Sf*: Fuentes, por ejemplo: red eléctrica (fuente de voltaje), la gravedad (fuente de vigor), la bomba (fuente de flujo).

En la Tabla 2.3 se muestran el elemento de disipación de energía *R*, de almacenamiento de flujo *C* y de almacenamiento de esfuerzo *I*, para sistemas eléctricos, sistemas mecánicos y sistemas hidráulicos; así como también sus respectivas relaciones constitutivas (matemáticas) lineales y no lineales (Dauphin-Tanguy, 2000).

Tabla 2.3 Elementos pasivos de almacenamiento y disipación *C*, *I* y *R*, respectivamente.

Elemento	Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
R	Lineal	$v(t) = Ri(t)$	$F(t) = bV(t)$	$\Delta P_r = RQ(t)$
	No-Lineal	$v(t) = \varphi(i)$	$F(t) = \varphi(V)$	$\Delta P = \varphi(Q)$
C	Lineal	$v(t) = \frac{1}{C} \int idt$	$F(t) = k \int Vdt$	$P_r(t) = C \int \Delta Qdt$
	No-Lineal	$v(t) = \varphi_c(q)$	$F(t) = \varphi_c(x)$	$P_r(t) = \varphi_c(V)$
I	Lineal	$i(t) = \frac{1}{L} \int vdt$	$V(t) = \frac{1}{M} \int F dt$	$Q(t) = I \int \Delta P_r dt$
	No-Lineal	$i(t) = \varphi_L(\lambda)$	$V(t) = \varphi_L(P)$	$Q(t) = \varphi_L(P_p)$

Por otra parte, los elementos que introducen energía al sistema son llamados fuentes. Existen dos tipos de fuentes: Fuentes de esfuerzo (moduladas o no), las cuales pueden representar una fuente de voltaje, de fuerza o presión, y que además se denota como "*Se*" cuándo no está modulada, y como "*MSe*"

cuando es modulada; y las fuentes de flujo, las cuales pueden representar una fuente de corriente, de velocidad o de caudal, y que se denotan como " Sf " cuando no es modulada, y como " MSf " cuando si esta modulada. Entendiéndose, en ambos casos, como modulada a una señal externa no constante.

La Figura 2.2 muestra la representación de las dos fuentes moduladas.



Figura 2.2 Puerto 1 Activo, a) Fuente de esfuerzo modulada – b) Fuente de flujo modulada.

2.3.2 Puertos 2: Elementos Ideales

Existen dos elementos ideales de Puerto-2 llamados: transformador (TF) y girador (GY), los cuales son elementos que cambian la relación entre las variables de flujo y esfuerzo.

Para el transformador, se tiene como ejemplo un transformador eléctrico, una palanca mecánica, un par de ruedas dentadas, etc. Mientras que para el girador se tiene como ejemplos un motor eléctrico, una bomba centrífuga, un gato hidráulico, etc.

Los elementos ideales puerto 2, que representan a un transformador TF y a un girador GY se muestra en Figura 2.3. Estos elementos juegan un papel muy importante para el modelado de la conversión de potencia de un dominio físico a otro (Dauphin-Tanguy, 2000). Es importante resaltar, que para el transformador se tiene una relación de transformación n entre los bonds de esfuerzo y de flujo. Dicha relación está ligada al esfuerzo y al flujo en la misma medida, es decir un esfuerzo de entrada provoca un esfuerzo de salida en el elemento. Por el contrario, para el girador se tiene una relación de transformación r , la cual liga el esfuerzo con un flujo, es decir que un esfuerzo de entrada provoca un flujo de salida en el elemento.



Figura 2.3 Puerto 2, a) Transformador ideal – b) Gyrador ideal.

Al igual que los elementos puerto 1 activos, tanto el transformador como el girador pueden ser elementos modulados, es decir que la relación de transformación para cada elemento es no constante. Dichos elementos se representan como *MTF* y *MGY*, respectivamente.

2.3.3 Puertos 3: Elementos de Unión

Este tipo de puertos se llaman uniones ya que sirven para interconectar tres o más puertos de energía dentro de un subsistema, los cuales representan en forma de multipuerto los dos tipos de conexiones utilizadas en circuitos eléctricos, conexión en serie y conexión en paralelo. Las cuales son extendidas a todos los dominios de la física.

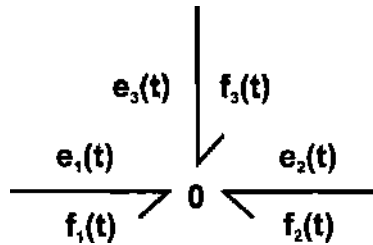


Figura 2.4 Unión-0 para la conexión en paralelo.

La unión de esfuerzo, unión-0 es utilizada para la conexión en paralelo (ver Figura 2.4). Las relaciones de interconexión que describen una unión de esfuerzo están dadas por,

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \tag{2.3}$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \tag{2.4}$$

De esta manera, se observa que los esfuerzos en todos los bonds son siempre iguales y la suma algebraica de los flujos es cero.

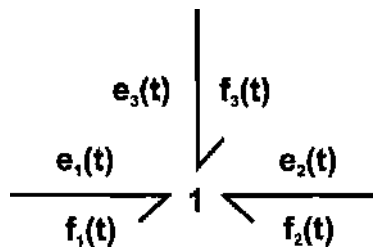


Figura 2.5 Unión-1 para la conexión en serie.

El otro elemento Puerto-3, es la unión-1 o de flujo común para la conexión en serie (ver Figura 2.5). Las relaciones de interconexión para este elemento son las siguientes,

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \tag{2.5}$$

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \tag{2.6}$$

De la misma manera, se observa que el flujo en todos los bonds es el mismo, y la suma algebraica de los esfuerzos es cero.

Finalmente, los puertos de conexión de esfuerzo y flujo pueden extenderse a más de tres puertos (Dauphin-Tanguy, 2000).

2.3.4 Bond Activo

En un bond normal se tiene dos señales o variables de información: el esfuerzo $e(t)$ y el flujo $f(t)$. A diferencia de un bond activo que comunica solo una de las dos variables posibles en una sola dirección.

Un bond activo se representa por una fecha completa como se muestra en la Figura 2.6, indicando un flujo de potencia cero.



Figura 2.6 Representación de un bond activo.

Un bond activo se utiliza cuando se requiere conectar solo una de las variables entre dos elementos, sin consumir energía, como se muestra en la Figura 2.7.

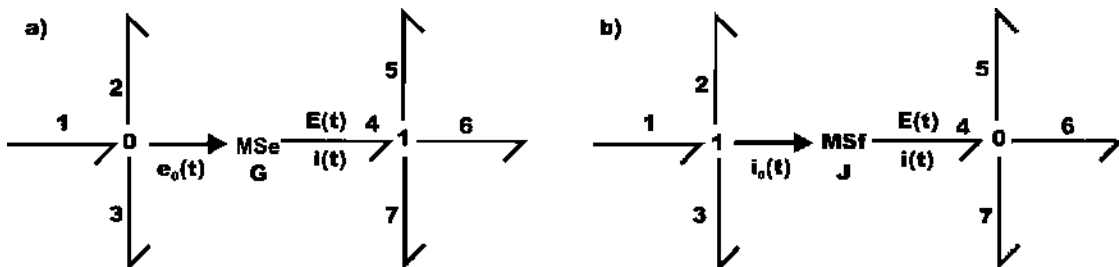


Figura 2.7 Bond graph con un bond activo, a) variable de esfuerzo (voltaje) – b) variable de flujo (corriente).

De la Figura 2.7, el bond activo que entra a la fuente MS_e (Figura 2.7a) indica que $E(t)$ es modulada por $e_0(t)$, así, $E(t)=Ge_0(t)$; donde G es la ganancia del esfuerzo (voltaje). El bond activo proviene de la

unión-0, el voltaje $e_0(t)$ es el mismo que e_1 , e_2 y e_3 . Además, el bond activo tiene potencia cero debido a que se considera que la corriente correspondiente a $e_0(t)$ es despreciable. La suma de corrientes en la unión-0, debe ser únicamente i_1 , i_2 e i_3 .

Lo mismo sucede en la Figura 2.7b, donde entra de la fuente MSf que indica que $i(t)$ es modulada por $i_0(t)$, donde, $i(t)=Ji_0(t)$, con J igual a la ganancia del flujo (corriente). En este caso el bond activo está dado por la unión-1, donde la corriente i_0 es la misma que i_1 , i_2 e i_3 . También en esta parte el bond activo tiene potencia cero debido a que se considera que el esfuerzo (voltaje) correspondiente a $i_0(t)$ es despreciable. Así, la suma de los esfuerzos (voltajes) en la unión-1, debe ser únicamente e_1 , e_2 y e_3 .

Además un bond activo es utilizado para mandar una de las variables generalizadas hacia un detector (sensor) De o Df , como se muestra en la Figura 2.8. Y dependiendo si se coloca en una unión-0 se obtiene esfuerzo o bien si se coloca en una unión-1 se obtiene el flujo (Dauphin-Tanguy, 2000).

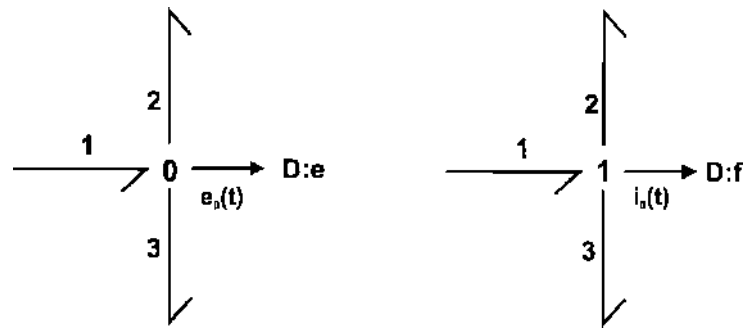


Figura 2.8 Detectores en bond graph para obtener el esfuerzo (De) o flujo (Df).

2.4 Causalidad

Una propiedad muy importante en la técnica de modelado en bond graph, es la causalidad o relación causa-efecto. Las relaciones de causa-efecto para esfuerzos y flujos son representadas en direcciones opuestas. Una marca en un bond, llamada trazo causal (línea de manera vertical al final o inicio del bond) indica cómo el esfuerzo y el flujo son simultáneamente determinados en un bond. Las diferentes maneras de expresar la causalidad en un bond se pueden representar como se observa en la Figura 2.9.

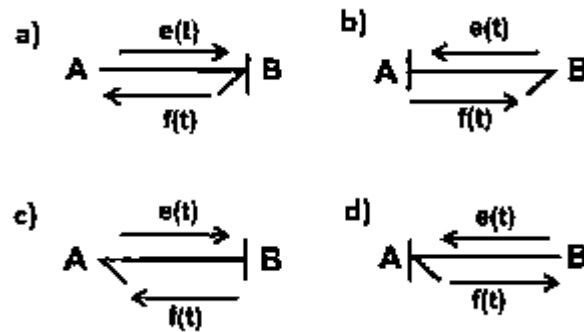


Figura 2.9 Diferentes opciones para representar la causalidad en un bond.

El trazo causal indica un sentido de entrada-salida para $e(t)$ y $f(t)$ en cada puerto. El esfuerzo entra en un bond en el mismo sentido del trazo causal, por ejemplo del elemento A al B y por consecuencia el flujo va en dirección contraria, del elemento B al A (ver Figura 2.9a). Adicionalmente, se deben cumplir las reglas mostradas en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Reglas de asignación de la causalidad para los puertos básicos.

Causalidad Restrictiva	TF	TF
	GY	GY
	0	0
	1	1
Causalidad Derivativa	I	C
Causalidad Integral	I	C
Causalidad Arbitraria	R	R

En la Tabla 2.4, se aprecian las dos diferentes causalidades asignadas a los elementos de puerto 2 (TF y GY), así como las tres opciones que se tienen para los elementos puerto 3 (uniones-0 y 1). De esta manera se puede decir, que dependiendo del número de bonds conectados a un elemento, se tienen n diferentes posibilidades de asignación de la causalidad, donde n =número de bonds conectados a un elemento. Lo anterior es válido para los elementos multipuerto.

Por otra parte, para los elementos puerto 1, se tienen siempre solamente dos opciones, colocar el trazo causal cerca o lejos del elemento. Para el caso de los elementos de almacenamiento de energía, se puede tener una asignación de causalidad derivativa e integra. La causalidad derivativa se presenta cuando en el caso del elemento I, el trazo causal se encuentra asignado lejos del elemento y para el caso del elemento C, el trazo causal se encuentra asignado cerca del elemento. Este tipo de causalidad se le nombra así, debido a que en la relación constitutiva del elemento, aparece explícitamente una acción derivativa, como se muestra en la Tabla 2.5. Para el caso de la causalidad integral únicamente se tiene el caso complementario para ambos elementos.

Tabla 2.5 Formas causales y su relación constitutiva para los elemento puerto 1.

Elemento	Forma Causal	Relación Causal
Fuente de Esfuerzo	MSe	$e(t) = E(t)$
Fuente de flujo	MSf	$f(t) = F(t)$
Resistencia		$e(t) = \Phi_R[f(t)]$
		$f(t) = \Phi_R^{-1}[e(t)]$
Capacitancia		$e(t) = \Phi_C^{-1} \left[\int_0^t f(\tau) d\tau \right]$
		$f(t) = \frac{d}{dt} [\Phi_C e(t)]$
Inductancia		$f(t) = \Phi_I^{-1} \left[\int_0^t e(\tau) d\tau \right]$
		$e(t) = \frac{d}{dt} [\Phi_I f(t)]$

En la Tabla 2.5 se muestran los elementos puerto 1 con su causalidad correspondiente y relación para cada elemento considerado.

2.4.1 Procedimiento para la asignación de la causalidad

Para realizar la asignación de causalidad en un bond graph, es necesario aplicar las relaciones de causalidad para los multipuertos básicos establecidas en la Tabla 2.4 y seguir el siguiente procedimiento en orden estricto:

1. Considerar cualquier MSe o MSf y asignar su causalidad requerida e inmediatamente extender las implicaciones causales, usando las restricciones de 0, 1, TF y GY .
2. Asignar causalidad integral a los elementos C e I respetando las restricciones de la Tabla 2.5.
3. Extender las implicaciones de la causalidad en los elementos multipuerto 0, 1, TF y GY , utilizando las restricciones de la Tabla 2.4.
4. Escoger cualquier R que no esté asignado y dar una causalidad arbitraria a R .
5. Si existe algún conflicto de causalidad (relación no respetada), regresar al paso 2 y asignar una causalidad diferente a los elementos C e I , hasta que se respeten las relaciones de la Tabla 2.5.

Se dice que un bond graph es causalmente correcto cuando no existe conflicto de causalidad entre los elementos y las uniones. Por otro lado, es necesario mencionar que la causalidad derivativa se presenta cuando un sistema contiene elementos de almacenamiento de energía que no son dinámicamente independientes, en una asignación de causalidad integral predefinida.

El número de elementos que almacenan energía en causalidad integral es igual al número de ecuaciones diferenciales linealmente independientes, y el número de elementos almacenadores en causalidad derivativa corresponde número de ecuaciones diferenciales linealmente dependientes (Dauphin-Tanguy, 2000).

2.5 Procedimiento para el modelado de sistemas

En esta sección se presenta un procedimiento general para modelar diferentes sistemas como lo son: eléctricos, mecánicos e hidráulicos, el cual se puede extenderse a otro tipo de sistemas físicos. Los pasos a seguir son los mencionados a continuación:

1. Colocar una unión-0 ó 1 para cada punto en el esquema donde las trayectorias paralelas coincidan.
2. Colocar una unión-1 ó 0 para cada componente en una trayectoria serie y conectar el componente apropiado utilizando un bond en esa unión. La dirección de la semiflecha en cada bond indica la dirección asumida del flujo de potencia, es decir, a partir de fuentes y hacia elementos almacenadores y disipadores.
3. Colocar bonds entre uniones adyacentes, nuevamente indicando la dirección de flujo de potencia.
4. Remover la unión-0 ó 1 que representa el punto de referencia y remover todos los bonds conectados a esta unión.
5. Simplificar de acuerdo a las reglas de la Figura 2.10.
6. Finalmente, se realiza la asignación de la causalidad en el modelo, respetando las reglas de asignación de causalidad.



Figura 2.10 Reglas de simplificación.

Éste procedimiento se aplica al modelado de sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos, teniendo en cuenta las consideraciones necesarias para cada dominio físico, como se menciona en las siguientes subsecciones.

2.5.1 Procedimiento para sistemas eléctricos

Para el caso de los sistemas eléctricos, se tiene que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para el paso 1, el tipo de uniones que le corresponden son las uniones-0, las cuales son asignadas a cada voltaje distinto en el circuito.

- Para el paso 2, se deben de insertar uniones-1 por cada elemento puerto-1 del sistema, entre sus correspondientes uniones-0, asignadas en el paso anterior.

- Para el paso 4, la unión que le corresponde es una unión-0 que representa el nodo de tierra, el cual tiene un voltaje de cero y es removida por ser la referencia de potencial.

2.5.2 Procedimiento para sistemas mecánicos rotacionales y traslacionales

Las consideraciones para el modelado de sistemas mecánicos traslacionales y rotacionales son las siguientes:

- Para el paso 1, el tipo de uniones que le corresponden, son las uniones-1, las cuales son asignadas para cada velocidad distinta.

- Para el paso 2, se deben de insertar uniones-0 por cada elemento puerto-1 del sistema, entre sus correspondientes uniones-1. Añadir inercias a sus respectivas uniones-1.

- Para el paso 4, el nodo particular de tierra es cualquier velocidad cero (unión-1).

2.6 Matriz de Estructura de Unión

Si se sitúa el bond graph de un sistema dinámico como un intermediario entre el sistema físico y su modelo matemático, la causalidad del modelo en bond graph permite escribir de una forma estructurada las relaciones que caracterizan la evolución dinámica del sistema y combinar las ecuaciones diferenciales y algebraicas (Dauphin-Tanguy, 2000).

Esta forma estructurada está compuesta de elementos básicos, asociados con los puertos, I , C , R , MSe , MSf . Los elementos TF , GY y las uniones 0 y 1, componen la estructura de unión, y representan el intercambio de energía entre las diferentes partes del sistema dinámico; y respeta la propiedad de conservación de la energía en el sistema.

2.6.1 Vectores clave

En un bond graph, los bonds pueden ser clasificados como externos e internos. Los externos corresponden a todos los elementos que conforman al sistema (fuentes, sensores, elementos dinámicos, elementos disipadores), y los internos a los elementos de unión (uniones 0 y 1, transformadores y giradores) En la Figura 2.11 se muestra un diagrama para la identificación de los vectores clave de las variables.

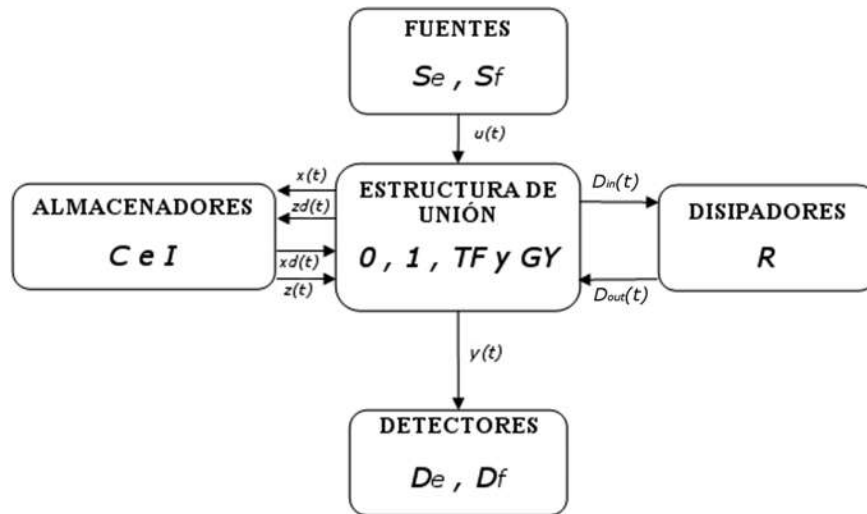


Figura 2.11 Diagrama a bloques de la estructura de unión y sus vectores clave.

En la Figura 2.11, los vectores clave se encuentran divididos de la siguiente manera: Se, Sf se refiere a las fuentes; C e I es el campo de elementos almacenadores de energía; R es el campo de elementos resistivos o disipadores; el conjunto de elementos de unión está formado por los elementos, $0, 1, TF$ y GY .

Los vectores asociados en la Figura 2.11 se definen como:

$x(t)$ es el vector de estado en causalidad integral (p en I, q en C).

$\dot{x}(t)$ es el vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad integral.

$z(t)$ es el vector de estado coenergía con causalidad integral (f en I, e en C).

$x_d(t)$ es el vector de estado con causalidad derivativa (p en I, q en C).

$\dot{x}_d(t)$ es el vector de las derivadas de x en función del tiempo con causalidad derivativa.

$z_d(t)$ es el vector de estado de coenergía con causalidad derivativa (f en I, e en C).

$u(t)$ es el vector de la fuente de salida (e en Se, f en Sf).

$D_{in}(t)$ es el vector de entrada al campo R .

$D_{out}(t)$ es el vector de salida del campo R .

Para sistemas lineales con coeficientes constantes, tanto de almacenamiento como de disipación, las limitaciones de campo pueden expresarse en forma matricial.

2.6.2 Relaciones Constitutivas y Ecuación de Estado

Las relaciones lineales (correspondientes a la Figura 2.11) de almacenamiento y de disipación son las siguientes:

$$z = Fx \tag{2.7}$$

$$z_d = F_d x_d \tag{2.8}$$

$$D_{out} = LD_{in} \tag{2.9}$$

donde,

F es una función que relaciona cada z_i con x_i para $i=1, \dots, n$. Además, es una matriz cuadrada en forma de diagonal, con dimensiones igual al número de elementos C e I. Los valores de la diagonal son los parámetros de C e I.

F_d es una función que relaciona cada z_{di} con x_{di} para $i=1, \dots, m$. Además, es una matriz cuadrada en forma de diagonal, con dimensiones igual al número de elementos C e I en causalidad derivativa. Los valores de la diagonal son los parámetros de C e I en causalidad derivativa.

L es una función que relaciona cada $D_{out i}$ con $D_{in i}$ para $i=1, \dots, r$. Además, es una matriz diagonal cuadrada de dimensión igual al número de elementos R. Los valores de la diagonal son los parámetros de los elementos R.

La llamada Matriz de estructura de unión está dada por la siguiente expresión,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ D_{in}(t) \\ y(t) \\ z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \\ S_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Los elementos que conforman la matriz S toman valores dentro del conjunto $\{0, \pm 1, \pm n, \pm r\}$, donde n y r son los módulos del transformador y girador, respectivamente.

Las submatrices S_{ij} tienen dos propiedades principales: S_{11} y S_{22} (que tienen la dimensión de z y la dimensión de D_{out}) son matrices cuadradas y S_{12} (dimensiones x) es la transpuesta negativa de S_{21} o viceversa. Estas propiedades se basan en el principio de conservación de energía.

Desarrollando la ecuación (2.10), se tiene,

$$\dot{x}(t) = S_{11}z(t) + S_{12}D_{out}(t) + S_{13}u(t) + S_{14}\dot{x}_d(t) \quad (2.11)$$

$$D_{in}(t) = S_{21}z(t) + S_{22}D_{out}(t) + S_{23}u(t) \quad (2.12)$$

$$y(t) = S_{31}z(t) + S_{32}D_{out}(t) + S_{33}u(t) \quad (2.13)$$

$$z_d(t) = S_{41}z(t) \quad (2.14)$$

De las expresiones anteriores, la expresión (2.14) es tomada en cuenta únicamente si el modelo tiene elementos en causalidad derivativa.

De esta manera, para obtener el modelo matemático en variables de estado, es necesario utilizar las expresiones anteriores y representarlas en su forma de vectores de estado (expresiones (2.15) y (2.16)).

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.15)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.16)$$

donde,

$$A = E^{-1}(S_{11} + S_{12}MS_{21})F \quad (2.17)$$

$$B = E^{-1}(S_{13} + S_{12}MS_{23}) \quad (2.18)$$

$$C = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F \quad (2.19)$$

$$D = (S_{33} + S_{32}MS_{23}) \quad (2.20)$$

con,

$$E = I + S_{14}F_d^{-1}S_{14}^T F \quad (2.21)$$

$$M = L(I - LS_{22})^{-1} \quad (2.22)$$

Así, el modelo matemático obtenido de la estructura de unión de un bond graph está representado por las expresiones (2.15) y (2.16).

2.7 Elementos de Conmutación en Bond Graph

Los elementos de conmutación son de suma importancia en varios de los sistemas físicos modelado. Tal es el caso de los elementos de electrónica de potencia. De esta manera, existen diferentes formas de considerar los elementos de conmutación en la metodología de bond graph.

2.7.1 Modelo ideal elemento interno

El modelo ideal de un interruptor o conmutador, puede realizarse utilizando un transformador modulado *MTF*, considerando como señal modulada de entrada una señal de tipo binaria (0 o 1) (Karnopp, Margolis, & Rosenberg, 2006).

Considerando la Figura 2.12, cuando la señal modulada de entrada n es cero, debido a la relación constitutiva del transformador ($e_2=ne_1$) el esfuerzo e_2 es nulo. Por otra parte para la variable de flujo se tiene la relación constitutiva $f_1=nf_2$, por lo tanto, el flujo f_1 también será nulo. Para el caso en el que la señal modulada sea unitaria, se tendrá que $e_2=e_1$ y además $f_1=f_2$.

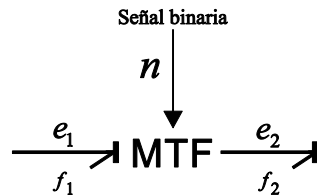


Figura 2.12 Elemento MTF utilizado como interruptor.

2.7.2 Modelo con elemento interno - unión de conmutación

Las uniones de potencia conmutadas, conocidos en el lenguaje de bond graph como Switched Power Junction (SPJ) fueron introducidas por (Umarikar, 2005) como una generalización de las uniones estructurales (0 y 1) del bond graph. Esta generalización admite para el caso de tener un bond en una unión 0 por ejemplo; que dos o más bonds le impongan un esfuerzo. En la metodología de bond graph esto es imposible debido a que se produce un conflicto de causalidad. Sin embargo, imponiendo la restricción de que la unión 0 elija uno de los enlaces que fijan el esfuerzo se resuelve el conflicto de causalidad obteniendo un nuevo elemento llamado switched power 0-junction, cuya denotación es 0s. Sólo el bond seleccionado entregará esfuerzo, en tanto el resto de los enlaces tendrán flujo cero. Las restricciones son señales de entrada a la unión conmutada, de las cuales sólo una ellas valdrá uno para cada momento. La misma seleccionará el esfuerzo correspondiente mientras que, para un mismo instante de tiempo, las señales restantes tendrán valor cero. Análogamente se define la unión 1s.

La Figura 2.13 se muestra las ecuaciones (1) y (2) que son las relaciones constitutivas que gobiernan a las SPJ, para el caso de una unión 0 y una unión 1, respectivamente. Así como también las Figura 2.13a y Figura 2.13b, las cuales muestran las asignaciones de causalidad en las SPJ de unión 0 y unión 1, respectivamente.

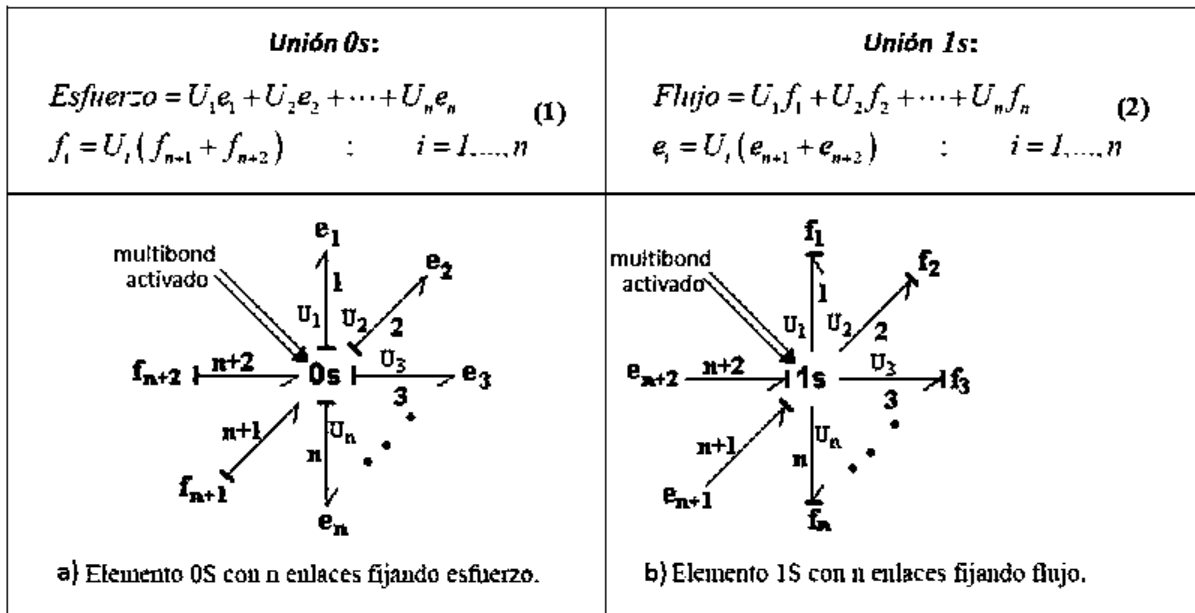


Figura 2.13 Uniones SPJ – a) unión cero – b) unión 1 – (1) relaciones unión 0 – (2) relaciones unión 1.

En la Figura 2.14 se muestra la implementación de las SPJ con componentes clásicos de la metodología, en este caso, transformadores modulados.

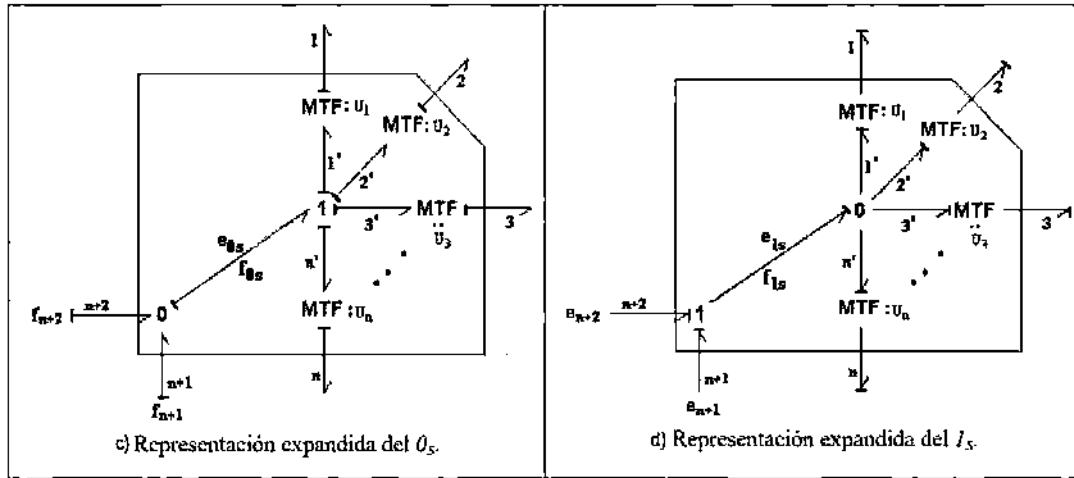


Figura 2.14 Representación de las SPJ con transformadores.

Esta representación fue propuesta por (Junco, Diéguez, & Ramírez, 2007), al igual que su versión compacta, la cual debe ser programada de acuerdo a la conmutación que se desea.

Para el uso de las relaciones constitutivas (versión compacta), estas deben ser implementadas en algún programa computacional para su simulación. En el caso de la presente tesis, el programa utilizado para la simulación de todos los modelos es el 20Sim (20Sim, 2016). De esta manera, el programa ya cuenta en su librería con el modelo de las SPJ. Así, tomando en cuenta la SPJ unión 0 de la Figura 2.15 las relaciones que se programan tienen las siguientes características,

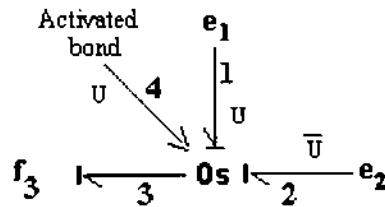


Figura 2.15 SPJ unión 0.

El bond 1 está conectado en la unión cuando la condición de $U > 0$, de esta manera $e_3=e_1$ y $e_2=0$; al mismo tiempo que $f_3=f_1$. Cuando se desconecta el bond 1 ($U=0$), se tiene que $e_1=0=f_1$, $e_3=e_2$ y además $f_3=f_2$.

Esta forma compacta de las SPJ será utilizada en la simulación de los casos de estudios presentados en el Capítulo 4.

2.8 Conclusiones

En el presente capítulo, se presentaron los elementos básicos para modelar un sistema físico utilizando la metodología de bond graph.

Se presentaron las dos características principales para la obtención del modelo: los procedimientos de formulación y el procedimiento de la asignación de la causalidad. Esta última permite obtener las expresiones matemáticas del modelo, de una manera directa o por medio de la matriz de estructura de unión, la cual se presentó en éste capítulo.

Así mismo, se describieron los elementos de conmutación utilizados en la metodología, con el fin de aplicarlos en el sistema de gestión de la energía, permitiendo que estos puedan realizar el intercambio de energía en los casos de estudios que se presentarán en el Capítulo 4.

Es importante mencionar que se pueden representar sistemas de dimensiones grandes, con la utilización de bloques que agrupan modelos. A cada bloque se le puede conocer como un submodelo, o los multibonds pueden ser utilizados para tal fin, estos últimos no son presentados en este capítulo, pero pueden ser consultados en (Dauphin-Tanguy, 2000).

Capítulo 3

3 Componentes del Sistema de gestión

3.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los diferentes elementos que conforman el sistema de gestión de energía de un motor de inducción. Los modelos son presentados desde el punto de vista del modelado tradicional (ecuaciones matemáticas) y después su correspondiente modelo en bond graph. Se realiza también un análisis de los modelos presentados.

3.2 Descripción del Sistema

En esta tesis, se propone un sistema de gestión de energía de un vehículo eléctrico. Dicho sistema es también comúnmente utilizado (sobre todo en la actualidad) en los vehículos híbridos (Pérez, 2000), (Bordons, 2015). Este sistema permite recuperar parte de la energía que se consume cuando el vehículo es utilizado, y permite aumentar la eficiencia en la utilización de la energía primaria en el sistema completo.

Si bien, el sistema tiene su principal aplicación en los vehículos eléctricos, éste podría ser aplicado en otros sistemas, como por ejemplo en un tren eléctrico, en un sistema de energía eléctrica (sistema distribuido), o en algún juego mecánico de algún parque de diversiones.

Así, el sistema de conexión que se propone en esta tesis, está conformado por un banco de baterías, de sus componentes de electrónica de potencia (convertidores), de la máquina de inducción doblemente

alimentada (MADA), y de un aerogenerador. La Figura 3.1 muestra el diagrama de los componentes utilizados en el sistema.

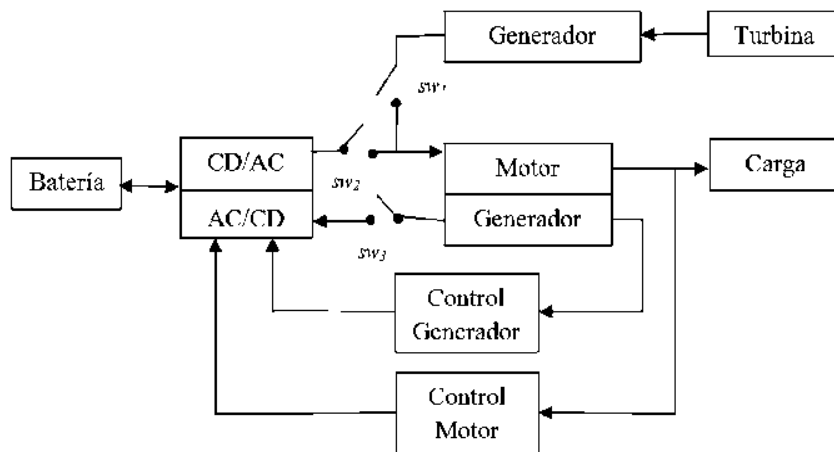


Figura 3.1 Diagrama de conexión de los componentes del sistema.

Como se observa en la Figura 3.1, la fuente de alimentación del sistema es un banco de baterías. El tipo de baterías considerado son baterías de ion-litio. Como el banco de baterías proporciona corriente directa, se requiere el uso de un inversor trifásico para proporcionarle el voltaje al motor de inducción. Es importante mencionar que en la Figura 3.1 solamente se muestran los componentes del sistema, pero se hace necesario realizar una gestión de la energía, en cuanto a la carga de las baterías y también de la energía que es recuperada por medio del motor de inducción.

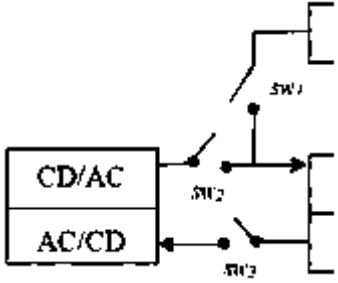
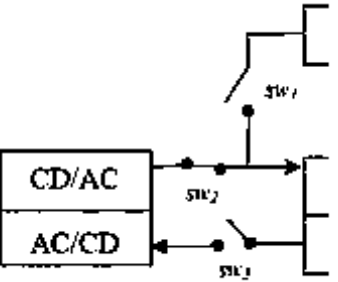
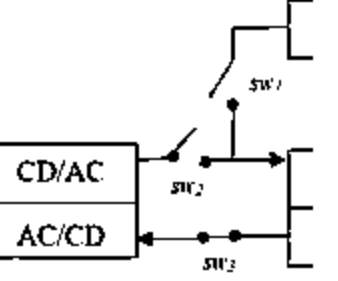
Para el sistema, se considera una MADA. En este tipo de máquina se realiza una conexión física tanto en el estator como en el rotor, permitiendo así poder cambiar su funcionamiento de motor a generador en diversos instantes. Se recupera parte de la energía utilizada al cambiar la función de la máquina de motor a generador (esto en ciertos instantes), la cual es transferida al banco de baterías.

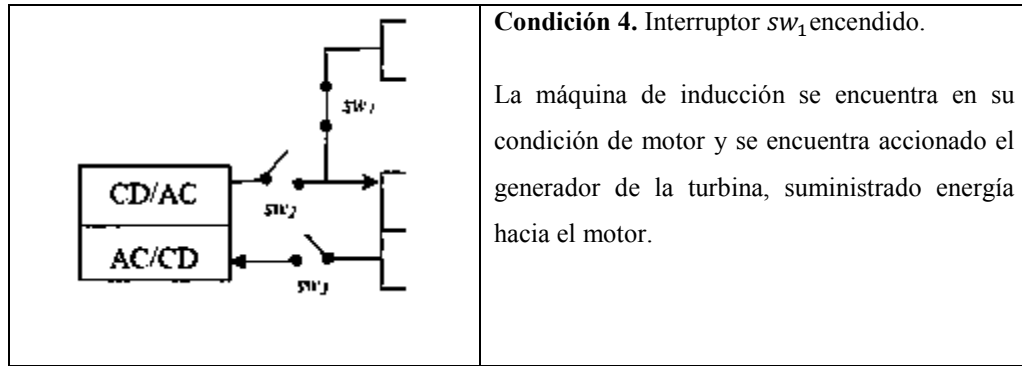
El convertidor de electrónica de potencia, es un convertidor bidireccional, es decir que dependiendo de la señal de control, ésta permite darle una función de inversor (CD/AC) cuando se tiene la condición de motor, y de rectificador controlado (AC/DC) cuando la máquina se encuentra en su condición de generador.

Adicionalmente, en el esquema de conexión, se muestra un aerogenerador. La energía eléctrica generada por la turbina eólica es utilizada directamente cuando la máquina se encuentra en su condición de motor. Esto se realiza en ciertos instantes y sobre algunas consideraciones que son explicadas a continuación.

El esquema de conexión de la Figura 3.1 muestra los interruptores que permiten realizar el cambio de condición en la máquina de motor a generador, así como la conexión del aerogenerador. Cuando $sw_1=0$, $sw_2=0$, y $sw_3=0$ (considerando al 0 como interruptor abierto), el sistema se encuentra en su condición de reposo. Para la secuencia de $sw_1=0$, $sw_2=1$, y $sw_3=0$ (considerando al 1 como interruptor cerrado), la máquina se encuentra en su condición de motor, y es alimentada por el banco de baterías. En la secuencia de $sw_1=0$, $sw_2=0$, y $sw_3=1$, la máquina se encuentra en su condición de generador, recargando a la batería. Si $sw_1=1$, $sw_2=0$, y $sw_3=0$ se tiene que condición de motor, y está siendo alimentado por medio de la turbina eólica y no por el banco de baterías, obteniéndose así un ahorro de la energía en el banco de baterías. La Tabla 3.1 resume las secuencias de las condiciones del sistema.

Tabla 3.1 Secuencia de los interruptores y la condición del sistema.

Secuencia de los interruptores	Condición del sistema
	<p>Condición 1. Interruptores apagados.</p> <p>El sistema se encuentra en reposo.</p> <p>La máquina de inducción no se encuentra alimentada por ningún elemento (batería y/o aerogenerador).</p>
	<p>Condición 2. Interruptor sw_2 encendido.</p> <p>La máquina de inducción se encuentra en su condición de motor y es alimentada por el banco de baterías a través del rectificador.</p>
	<p>Condición 3. Interruptor sw_3 encendido.</p> <p>La máquina de inducción se encuentra en su condición de generador y está suministrando energía a la batería por medio del convertidor de corriente alterna a corriente directa.</p>



Las diferentes secuencias mostradas en la Tabla 3.1 permiten realizar el sistema de la gestión de la energía.

Así, el sistema de control (presentado en el Capítulo 4) realiza una gestión de la energía utilizada por la máquina de inducción doblemente alimentada cuando se encuentra en su condición de motor y también como generador.

A continuación se presentan los modelos de cada uno de los componentes del sistema.

3.3 Batería

En esta sección se presenta el modelo de la batería, así como los principios que la rigen.

3.3.1 Reseña histórica de la batería

Se le denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente devuelve la energía almacenada casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces (Ordóñez, 2011) (Casacca, 1996). Se puede considerar a la batería como un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente, mediante lo que se denomina proceso de carga.

En 1981, Bell Labs ya habían cambiado el ánodo de litio metálico por uno de grafito y Rachid Yazimi en 1982 demostró la posibilidad de una inserción reversible de litio en grafito, a través de un mecanismo electroquímico.

A mediados de los años ochenta, se descubrió que el ciclado formaba dendritas en el ánodo de litio, lo que provoca cortocircuitos internos que aumentan la temperatura, ocasionando así la explosión de la celda. Posteriormente se empezaron a investigar las baterías de litio no metálico, basándose en el uso de iones de litio. La densidad de energía es ligeramente menor, pero es más segura.

En 1985, Akira Yoshino, creó la primera batería de ión litio (BIL), un prototipo que usaba material carbonáceo como ánodo y LiCoO_2 como cátodo, que era estable en aire. Finalmente en 1991 apareció la primera BIL comercial, fabricada por Sony y que usaba cobre como ánodo, que fue sustituido por grafito en 1997, ya que proporciona una corriente de descarga mayor.

3.3.2 *Funcionamiento de la batería*

El funcionamiento de las BIL se basa en el proceso de inserción-desinserción de iones de litio usando dos compuestos de intercalación (o inserción) como electrodos. Una reacción de inserción es una reacción de estado sólido en la que el huésped reacciona ocupando los sitios vacíos en la estructura del anfitrión. Si los cambios estructurales provocados por el huésped en el anfitrión no son muy drásticos, la reacción es reversible.

Para el caso de las BIL, el huésped son los iones de litio, que se caracterizan por su capacidad donadora de electrones, y la red anfitrión es el óxido o grafito. Además de estas características del huésped y el anfitrión, en una BIL, el material de los electrodos debe cumplir las siguientes características:

- Ser estable a la temperatura de reacción y con huecos que puedan ser ocupados por el huésped.
- Alta movilidad del huésped en el anfitrión a la temperatura de reacción.
- Propiedades conductoras que permitan la movilidad de electrones a través del circuito externo.
- Como el potencial de salida de la batería es la diferencia de potencial entre los electrodos, debe escogerse un cátodo que tenga un potencial de intercalación alto respecto al litio, y un ánodo que tenga el potencial más bajo posible.

Existen dos procesos bien definidos relacionados con las baterías, los cuales son conocidos como proceso de carga y descarga.

Para el proceso de carga, se suministra energía en forma de corriente eléctrica a la batería, de forma que los iones de litio fluyen desde el cátodo hasta el ánodo a través del electrolito. Se produce en el ánodo una reacción de reducción del anfitrión que provoca la inserción del huésped (Li^+) entre las capas de grafito. Durante este proceso el cátodo se oxida. Al mismo tiempo los electrones fluyen del cátodo al ánodo a través del circuito externo, ya que el electrolito no permite su paso. Este paso provoca un aumento de la diferencia de potencial entre los electrodos, y por tanto, del voltaje de la celda.

Por otra parte, en el proceso de descarga la batería suministra corriente eléctrica. Los electrones fluyen por el circuito externo hacia el cátodo saliendo del ánodo. Este proceso fuerza a los iones de litio a salir (desinserción) del ánodo, produciéndose su oxidación, a la vez que se insertan en el cátodo, lo que origina su reducción.

3.3.2.1 Problemas de las baterías de ion-litio

Uno de los defectos de las baterías BIL es el recubrimiento del ánodo, que ocurre cuando al cargar una celda ésta dona iones de litio más rápido de lo que puede aceptarlos el ánodo. Este problema puede aparecer a bajas temperaturas o en sobrecarga, lo que reduce la absorción e incrementa el número de iones de carbón hasta que empiezan a reaccionar con el oxígeno en el electrolito. Esto genera un calor considerable, con los riesgos que ello conlleva.

El segundo problema después del escape térmico es la vida limitada de la batería, la cual es medida en número de ciclos de carga/descarga, ya que su aplicación en automoción requiere un número elevado de ciclos durante la vida útil de la batería. Debido a que las BIL pueden sufrir un daño considerable en condiciones de sobrecarga o sobredescarga, se incluyen circuitos de control/seguridad en cada módulo, ya que el fallo en una celda se puede extender a las celdas adyacentes. El sistema de control externo básico es un circuito interruptor controlado por un microchip. Cuando la celda alcanza un determinado estado de carga (o de descarga) antes que el resto de celdas, el circuito interruptor se activa, y se para el proceso de carga (o de descarga) hasta que las celdas vuelven a estar balanceadas. El controlador de la celda mide la tensión y activa (o desactiva) del interruptor cuando la celda está próxima a la carga (o descarga) completa. Así, se mantiene el balanceado y se evita el daño a una celda individual.

3.3.3 Celda eléctrica

Como se mencionó anteriormente, existen dos procesos bien definidos en las baterías o celdas eléctricas, el de carga y el de descarga. Ambos se encuentran ligados con los procesos electroquímicos que se realizan al interior de la batería.

De esta manera, en la conversión electroquímica, que es la conversión de energía que se presenta entre los dos electrodos de la batería se le llama fuerza electromotriz, y depende del estado de la carga (la energía almacenada en la batería). La expresión (3.1) representa este proceso, el cual está basado en las leyes de electroquímica y termodinámica.

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S \tag{3.1}$$

donde: ΔH es la energía química liberada durante la conversión electroquímica y puede ser totalmente recuperada; T es el calor producido por la reacción química; y ΔS es la entropía en el proceso electroquímico. Por lo que solo ΔG (entalpía) puede ser convertida en trabajo, en un campo de energía eléctrica. Además, ΔH y ΔS son consideradas independientes de la temperatura.

La conversión de la energía instantánea electroquímica a energía eléctrica se puede modelar con las siguientes expresiones (Ménard, 2010):

$$E = -\frac{\Delta G}{nF} \tag{3.2}$$

$$I = nFJ \tag{3.3}$$

donde, E es el voltaje de la batería en circuito abierto (OCV), n es el numero electrones por mol, intercambiados por mol de iones de litio, F es la constante de Faraday, I es la corriente en la batería y J es el flujo molar de los iones litio.

Las expresiones anteriores son utilizadas en la siguiente sección para formular el modelo en bond graph de la celda eléctrica.

3.3.4 Modelado en bond graph de la celda de ion litio

El modelo presentado en esta sección corresponde al modelo que desarrolló Ménard en (Ménard, 2010). El modelo es un modelo completo de la celda eléctrica, en el cual está representado el proceso químico y térmico, así como el eléctrico que se realiza en la celda.

El modelo es formulado, partiendo de las expresiones (3.2) y (3.3), las cuales son representadas por medio de un transformador, como lo muestra la Figura 3.2.

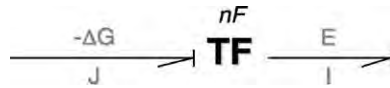


Figura 3.2 Representación de la transformación química a eléctrica.

El transformador muestra claramente que el potencial químico, ΔG , es convertido directamente en potencial eléctrico E , utilizando la relación de un transformador igual a nF .

Almacenamiento de la energía

El potencial químico de una batería depende de la energía almacenada. Por lo tanto ΔG puede expresarse por la suma de dos términos, uno referido por la variación de la entalpía y una cantidad de energía libre de producto químico.

$$\Delta G = \Delta G^0 + \Delta G_{almacenada} \quad (3.4)$$

De la expresión (3.4) ΔG^0 está dada por,

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T * \Delta S^0 \quad (3.5)$$

Además de las expresiones anteriores, $\Delta G_{almacenada}$ es el potencial químico que está relacionado con la cantidad de iones litio almacenados en los electrodos. Para expresar esta relación, se utiliza la ecuación de Nernst (3.6) (Ménard, 2010).

$$\Delta G_{almacenada} = -RT \ln \frac{(n_{tot}-n)^a}{(n+n_{el})^b} \quad (3.6)$$

donde R es la constante molar de los gases ideales; $ntot$ es la cantidad total de litio en la batería; n es la cantidad consumida; nel es la cantidad inicial de litio en el electrolito; y a y b son coeficientes empíricos para considerar la contribución de la actividad de los diferentes reactivos en la reacción.

Dado que, $\Delta G_{almacenada}$ representa un almacenamiento de litio, se considera como un elemento de almacenamiento de energía C ; mientras que la referencia de entalpía se puede considerar como una constante Se . Por lo tanto, el modelo en bond graph que incluye el almacenamiento de energía se muestra en la Figura 3.3

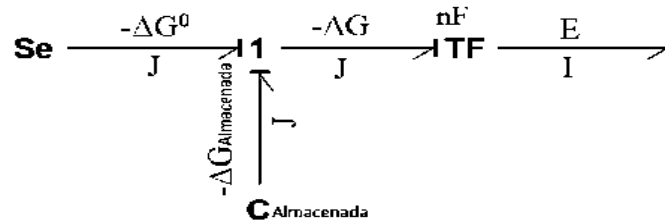


Figura 3.3 Modelo en bond graph de la celda incluyendo el almacenamiento de energía.

Fenómeno electroquímico de doble capa y activación

El fenómeno de activación tiene lugar en la interfaz entre el electrodo y el electrolito y está relacionada con la reacción electroquímica Figura 3.4

Este fenómeno es descrito por la ley de Butler-Volmer (expresión (3.7)) que vincula la caída de tensión η con la transferencia de electrones, produciendo la corriente I_t .

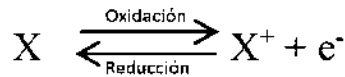


Figura 3.4 Reacción química en la interfaz electrodo-electrolito.

$$I_t = I_0^0 \frac{[X]}{[X]_0} e^{\left(\frac{\alpha F}{RT}\right)\eta} - I_0^0 \frac{[X^+]}{[X^+]_0} e^{-\left(\frac{(1-\alpha)F}{RT}\right)\eta} \quad (3.7)$$

donde I_0^0 es el cambio de densidad de corriente; α es el coeficiente de transferencia; $[X]$ y $[X^+]$ son las concentraciones de la reducción y oxidación en la difusión del respectivo lado al final; $[X]_0$ y $[X^+]_0$ son las concentraciones de oxidación y reducción al inicio, respectivamente.

Las concentraciones de oxidación y reducción en la difusión pueden ser consideradas como: $[X]_{soc}$ y $[X^+]_{soc}$. Teniendo en cuenta lo anterior, la expresión (3.7), se puede escribir como sigue,

$$I_t = I_0^0 \frac{[X][X]_{soc}}{[X]_{soc}[X]_0} e^{\left(\frac{\alpha F}{RT}\right)\eta} - I_0^0 \frac{[X^+][X^+]_{soc}}{[X^+]_{soc}[X^+]_0} e^{-\left(\frac{(1-\alpha)F}{RT}\right)\eta} \quad (3.8)$$

donde $I_0^0 \frac{[X]}{[X]_{soc}}$ y $I_0^0 \frac{[X^+]}{[X^+]_{soc}}$ están asociadas al fenómeno de activación, mientras que $\frac{[X]_{soc}}{[X]_0}$ y $\frac{[X^+]_{soc}}{[X^+]_0}$ están asociados al fenómeno de difusión.

Adicionalmente, suponiendo que el modelo es descrito por un solo electrodo no disociado como el oxidante y las reacciones de reducción son simétricas, la ley Tafel se indica cómo sigue,

$$\eta = \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{I_t}{I_0} - \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{[X]_{soc}}{[X]_0} \quad (3.9)$$

donde $I_0 = I_0^0 \left(\frac{n_{tot}-n}{n_{tot}} \right)$, y además n_{tot} es la cantidad total de iones en la batería y n es la cantidad consumida de los iones de litio en cualquier momento.

Si se consideran dos caídas de tensión, una debido al fenómeno de activación y la otra debido al fenómeno de difusión, se tiene lo siguiente,

$$\eta = \eta_{act} - \eta_{diff} \quad (3.10)$$

$$\text{Con } \eta_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{I_t}{I_0} \quad \eta_{diff} = \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{[X]_{soc}}{[X]_0}$$

Considerando que el fenómeno de la activación es lineal en función de la corriente, éste puede ser modelado como un elemento R (R_{act}).

$$R_{act} = \frac{\eta_{act}}{I_t} = \frac{RT}{\alpha F I_0} \quad (3.11)$$

Por otra parte, durante el funcionamiento de la batería, los electrones en el costado del electrodo y los iones de litio son acumulados en el electrolito. Dos conductores diferentes están en contacto, lo que crea una capa Helmholtz (lo que equivale a un capacitor eléctrico), por lo tanto se denomina capacitor electroquímico de doble capa, C_{dc} .

Como este capacitor de doble capa almacena la energía, es responsable de la dinámica rápida de la batería y el voltaje de salida dinámica esta impuesta por $E - \eta_{act}$.

La Figura 3.5 muestra el modelo de la celda que presenta la adición de los elementos R_{act} y C_{dc} , los cuales corresponden a la activación y fenómeno de doble capa, respectivamente.

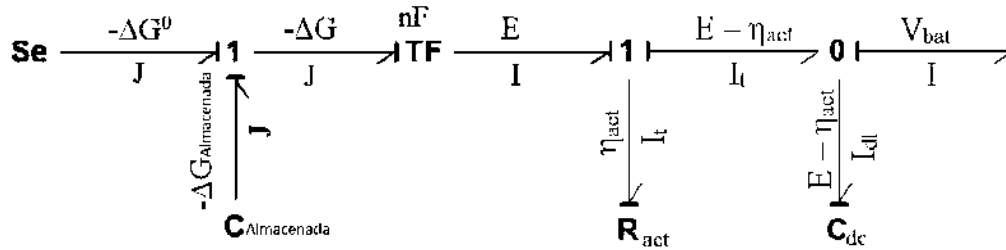


Figura 3.5 Activación de doble capa modela en bond graph.

Pérdidas óhmicas

Las pérdidas óhmicas están relacionadas con el fenómeno de conducción eléctrica, que tienen lugar en todos los conductores y contactos de conexión de la batería. Por lo general se representan como resistencias eléctricas.

La resistencia del electrolito debe tener un valor mayor al de R_{act} . Esto es debido a que los iones que fluyen a través del electrolito tienen una menor movilidad que los que fluyen en el circuito externo.

Este fenómeno provoca una caída de tensión, η_{elec} en el caso de una descarga de la batería, la cual es proporcional a la corriente. Por lo tanto, puede modelarse como un elemento disipativo R_{elec} (ver Figura 3.6).

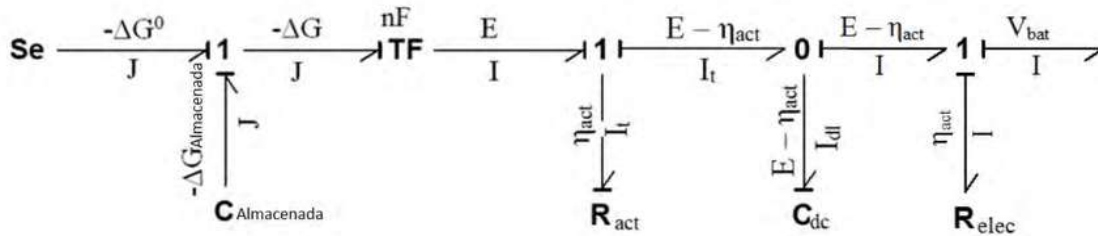


Figura 3.6 Resistencia óhmica en el modelo.

Fenómeno de difusión

Los materiales de inserción utilizados en las baterías de ion-litio son electrodos porosos en los que los iones de litio se difunden. En el caso de los iones de litio, esta difusión no es uniforme, y está representada por la expresión (3.12).

$$\frac{[X]_{soc}}{[X]_0} = 1 - \frac{It}{I_{lim}} \quad (3.12)$$

donde I_{lim} es el límite de corriente de difusión, y puede estar relacionado con las cantidades consumidas de litio, $I_{lim} = k(\eta_{tot} - \eta)$.

Suponiendo que en (3.13) que el I_{lim} es mucho mayor de lo que, la resistencia R_{diff} se puede observar que el voltaje η_{diff} decaerá la corriente It .

La dinámica de difusión lenta es modelada por un elemento C denominado C_{diff} , mientras que las pérdidas son modeladas por un elemento disipativo R , llamado R_{diff} . Debido a que estos fenómenos de difusión están relacionados a un comportamiento de acumulación de materia, estos corresponden a elementos del dominio químico en el modelo.

$$R_{diff} = \frac{\eta_{diff}}{I_t} = \frac{RT}{\alpha F I_{lim}} \quad (3.13)$$

La Figura 3.7 muestra el modelo completo, incluyendo el fenómeno de difusión de la celda de ion-litio.

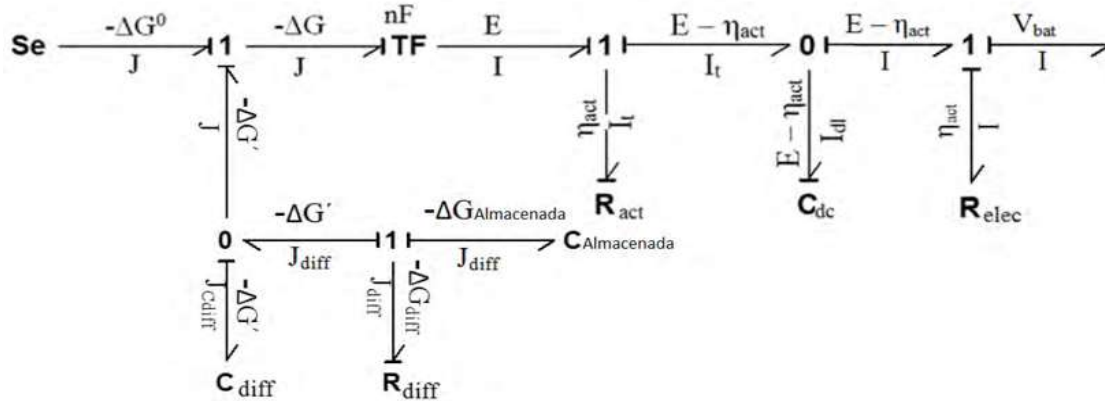


Figura 3.7 Modelo isotérmico de la batería ion-litio.

3.3.4.1 Simulación de la batería

El modelo de la celda es simulado para comprobar su funcionamiento. De esta manera, se realizan dos simulaciones diferentes, en una de ellas se simula la celda eléctrica, y en otra se simula un conjunto de celdas, con el objetivo de formar una batería eléctrica.

En la Figura 3.9b se presenta el valor del voltaje a la salida de la celda, observándose que este se mantiene en un valor mínimo de 2.5V y un valor máximo de 4.75V, los cuales corresponden a los valores límites de la descarga y la carga elegidos, respectivamente.

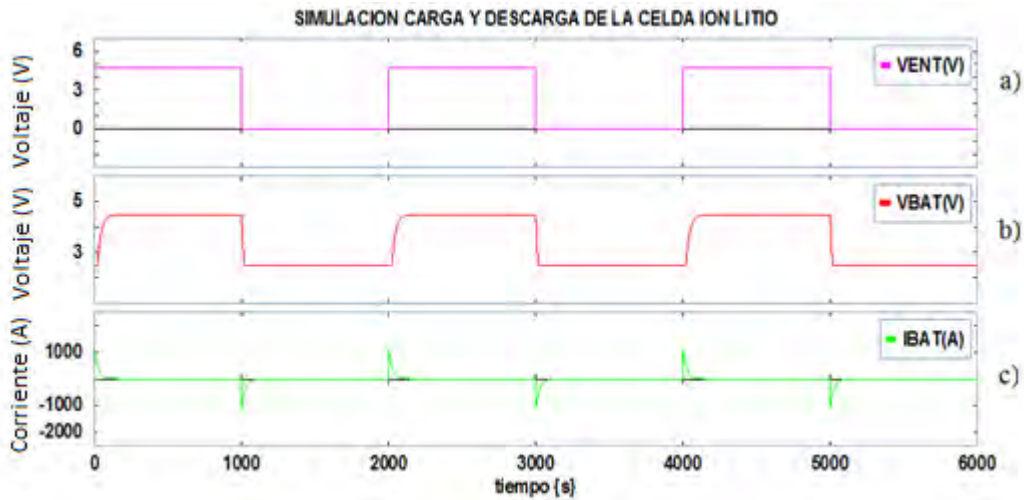


Figura 3.9 Respuesta de la simulación de la carga y descarga de la celda eléctrica de ion-litio.

Así mismo, la Figura 3.9 muestra la corriente de salida o que proporciona la celda a la carga, en la cual se puede observar que aumenta conforme se carga la batería y disminuye en su descarga.

Caso 2: Simulación de la batería de ion-litio

En este caso, para lograr que la batería proporcione el voltaje y la corriente necesaria para la cual está diseñada, se requiere un arreglo de conexión de varias celdas en serie y en paralelo. La Figura 3.10 muestra el arreglo de 10 celdas conectadas en serie para lograr obtener a la salida de la batería un voltaje de 47V.

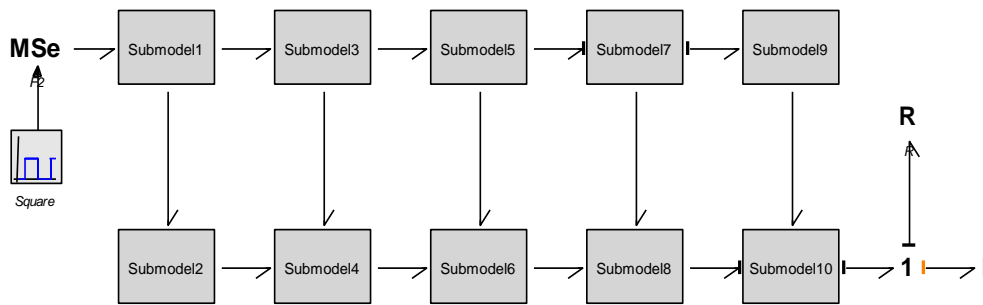


Figura 3.10 Modelo en 20Sim de la batería de ion-litio.

Los valores numéricos que corresponden a cada una de las celdas, son los mismos mostrados en la Tabla 3.2. De esta manera, la Figura 3.11 muestra los resultados obtenidos. La Figura 3.11a muestra el voltaje de salida de la batería, el cual se mantiene en 0 y 47V para cuando se encuentra descargada y cargada respectivamente. Así mismo, la Figura 3.11b muestra la corriente de salida proporcionada a la carga.

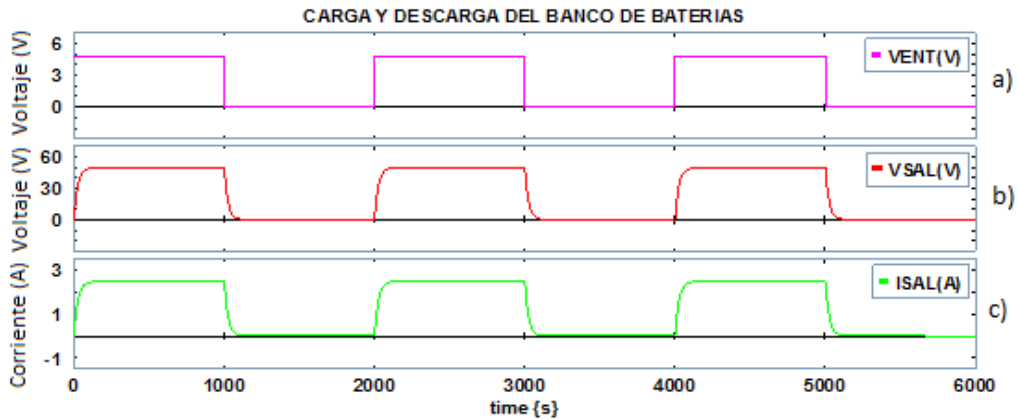


Figura 3.11 Respuestas de la simulación de la carga y descarga de una batería de ion litio.

En la Figura 3.12 se muestra un arreglo de celdas en paralelo y serie, entonces para poder aumentar el voltaje. Cinco submodelos son utilizados para así obtener a la salida un voltaje de 240V. La Figura 3.12 muestra el arreglo de 5 baterías.

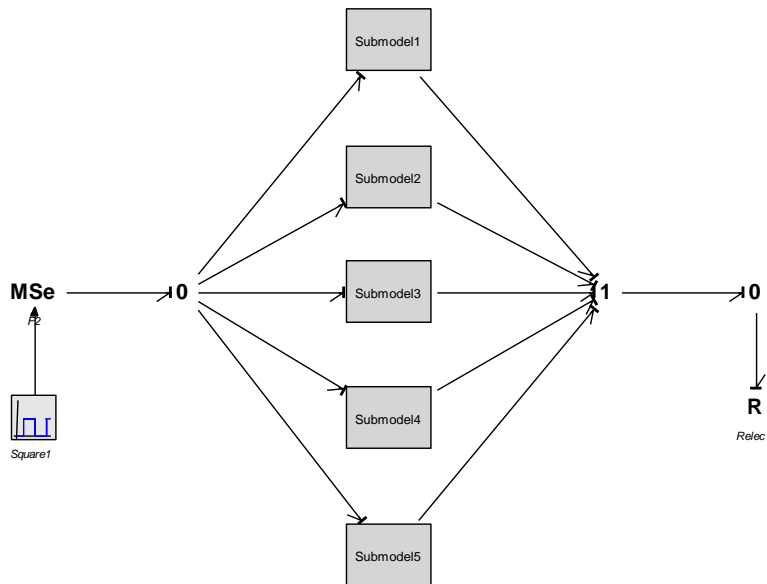


Figura 3.12 Arreglo de 5 baterías.

Con los resultados mostrados en estos 2 casos, se verifica el funcionamiento de la celda y batería. Es importante mencionar que el modelo de la batería, será incluido en el sistema completo mostrado en el siguiente capítulo.

3.3.4.2 Validación del modelo de la batería

El modelo del batería mostrado en las secciones anteriores es validado con el objetivo de mostrar que su funcionamiento y los resultados son los correctos.

La validación se realiza comparando los resultados obtenidos con el modelo de la batería en bond graph (Figura 3.12) con los que se pueden obtener usando un simulador reconocido como lo es el Simulink de Matlab (Simulink). La Figura 3.13 muestra el diagrama de simulación implementado en Simulink.

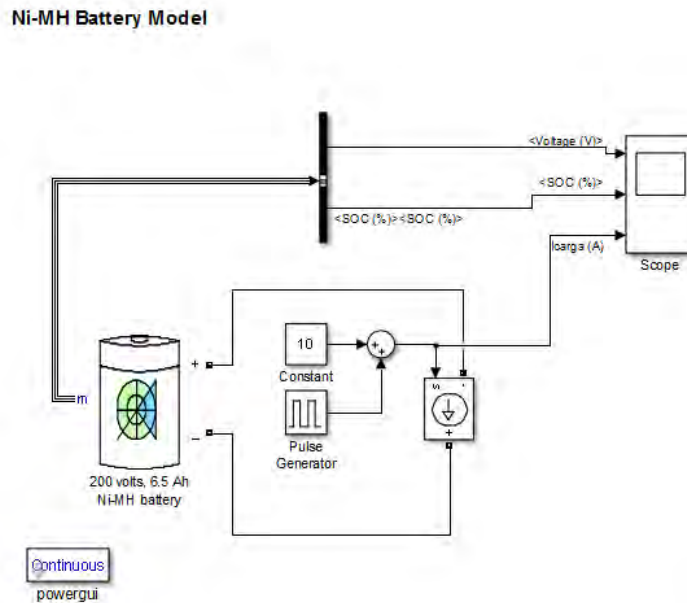


Figura 3.13 Diagrama de simulación en Simulink de la batería.

Para realizar la simulación, se considera una corrida de tiempo de 3600 segundos, así como una batería de 200V y 6.5Ah. El proceso de la carga y descarga de la batería es implementado por medio de una fuente de corriente, la cual tiene un perfil de onda cuadrada como se muestra en la Figura 3.13.

La Figura 3.14 muestra los resultados obtenidos de la simulación. La Figura 3.14a muestra el valor del voltaje de la batería. Este valor se mantiene dentro de un mínimo de 220V a un máximo de 260V. La variación del voltaje coincide con la carga y descarga que se tiene en la batería, la cual está representada por la corriente positiva (-10A) y negativa (+10A) que se muestra en la Figura 3.14c, respectivamente.

Adicionalmente, el estado de carga (SOC por sus siglas en inglés) se muestra en la Figura 3.14b.

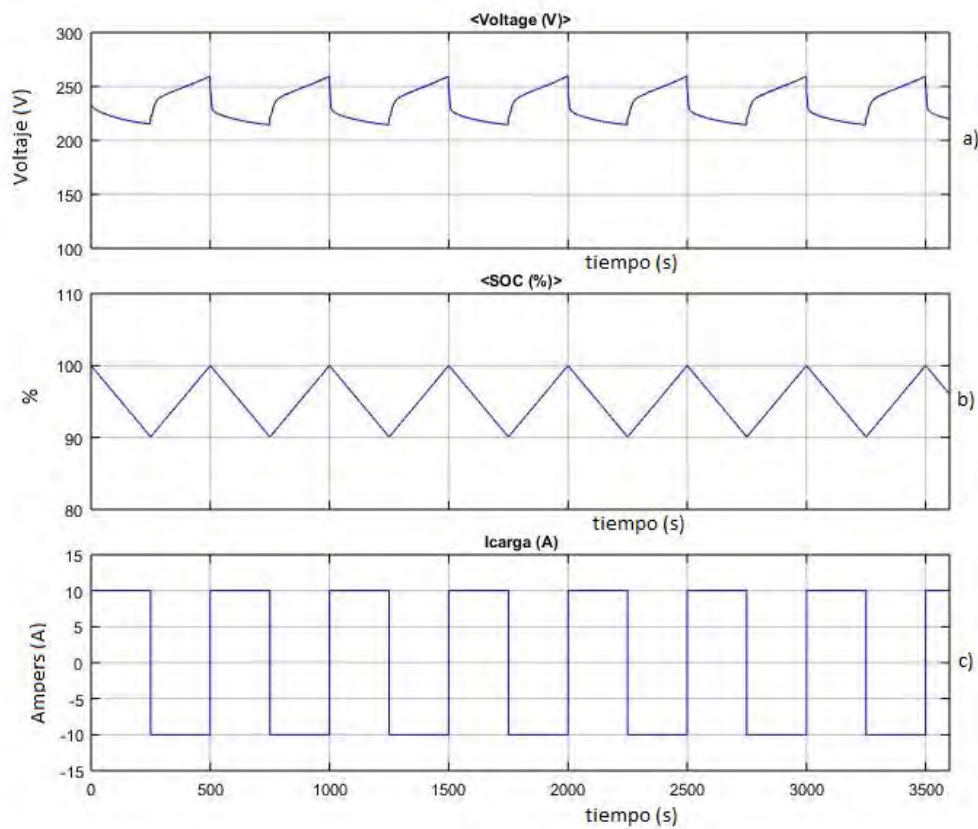


Figura 3.14 Respuesta de la simulación modelo Simulink – a) Voltaje batería – b) Estado de carga – c) Corriente en la carga.

Por otra parte, el modelo de la batería en bond graph es simulado tomando en cuenta las mismas condiciones de simulación. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.15.

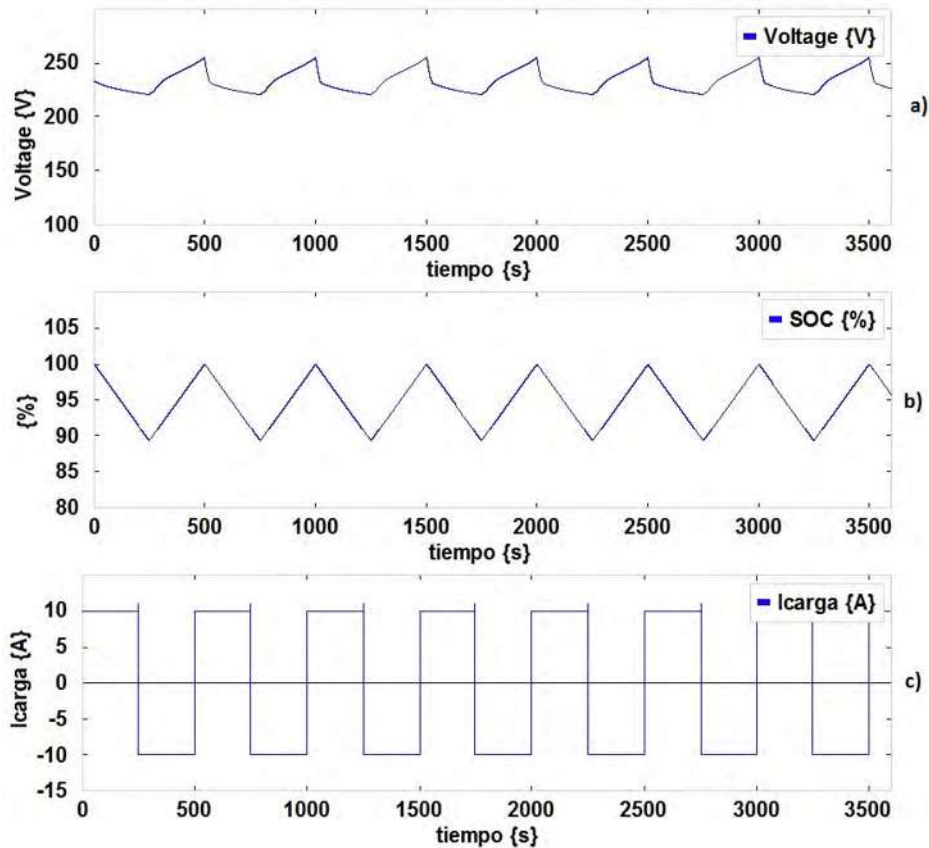


Figura 3.15 Respuesta de la simulación modelo bond graph – a) Voltaje batería – b) Estado de carga – c) Corriente en la carga

Como se puede observar, el valor del voltaje de la batería (Figura 3.15a) presenta un perfil similar al modelo de Simulink. Diferencias notables son identificadas en la curva de carga de la batería. Sin embargo los valores mínimos (221V) y máximos (255V) se mantienen muy cercanos en ambos modelos. El perfil de la corriente de carga y descarga (Figura 3.15c) es el mismo, y además se verifica el estado de carga y descarga en el modelo (Figura 3.15b).

Es importante mencionar que la diferencia entre ambos modelos, radica principalmente en que en ambos modelos no se tienen los mismos parámetros, y como consecuencia se tendrán resultados similares, pero no idénticos. Tomando en cuenta los resultados de la comparación de ambos modelos, se puede concluir que el modelo en bond graph presenta un comportamiento aproximado al ya validado por Simulink.

3.4 Convertidor trifásico

Los convertidores trifásicos son utilizados en dos configuraciones bien conocidas. En una de ellas se nombra al convertidor como inversor trifásico, debido a que la señal continua es convertida en una señal alterna trifásica con cierta magnitud y frecuencia; y en la otra configuración se le define rectificador trifásico, debido a que realiza la función contraria, es decir convertir una señal alterna trifásica a una señal continua constante (Rashid, 1995).

Básicamente, la estructura del convertidor para cualquiera de las dos configuraciones es la misma. Se puede decir, que la diferencia para saber si se está utilizando como un inversor o un rectificador depende del sentido de la potencia que se tenga en el circuito, es decir, si la corriente circula de la parte alterna hacia la de corriente directa entonces se tratará de un rectificador, para el caso de un sentido contrario de la corriente, entonces se está hablando de un inversor.

Lo anterior se diferencia principalmente dependiendo de la señal de control que se envía a los dispositivos de electrónica de potencia que componen al convertidor. Así, se puede decir que la diferencia está dada por el tipo de control aplicado al convertidor.

En la siguiente subsección se presentará solamente el modelo del inversor trifásico, debido a lo mencionado anteriormente.

3.4.1 Modelo de un inversor trifásico

Los inversores trifásicos se utilizan para aplicaciones de media y alta potencia. El principal propósito de esta topología es suministrar una fuente trifásica de voltaje cuya amplitud, fase y frecuencia sean manipulables. El inversor trifásico tiene una rama adicional (U1-U3) para completar el circuito trifásico como se muestra en la Figura 3.16. Consta de seis interruptores controlados (T_1-T_6) y seis diodos (D_1-D_6). La carga, conectada en estrella, consiste de tres impedancias.

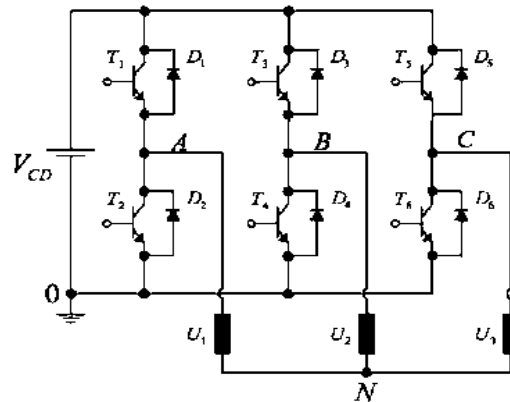


Figura 3.16 Circuito del inversor trifásico conectado a una carga en conexión tipo estrella.

A diferencia del caso monofásico, el circuito del inversor trifásico mostrado en la Figura 3.16 contiene dos nodos de conexión común, el nodo 0, representa el nodo de referencia del circuito eléctrico de potencia. Con base en él, se realizan las mediciones de voltaje de cualquiera de los seis interruptores y de la fuente trifásica generada. Por otra parte, el nodo N es un punto de conexión común de la carga y con base en él se realizan las mediciones de voltaje aplicado a cada una de las fases de la carga.

Los interruptores superiores e inferiores de una misma rama no pueden encenderse simultáneamente, debido a que esto produciría un corto circuito en la fuente V_{CD} . Los estados de conducción del inversor se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Estados de conducción de un inversor trifásico para una modulación PWM.

No.	Estado	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
1	T_1, T_4, T_6 encendidos y T_2, T_3, T_5 apagados	V_{CD}	0	$-V_{CD}$
2	T_1, T_3, T_6 encendidos y T_2, T_4, T_5 apagados	0	V_{CD}	$-V_{CD}$
3	T_2, T_3, T_6 encendidos y T_1, T_4, T_5 apagados	$-V_{CD}$	V_{CD}	0
4	T_2, T_3, T_5 encendidos y T_1, T_4, T_6 apagados	$-V_{CD}$	0	V_{CD}
5	T_1, T_4, T_5 encendidos y T_2, T_3, T_6 apagados	0	$-V_{CD}$	V_{CD}
6	T_1, T_3, T_5 encendidos y T_2, T_4, T_6 apagados	V_{CD}	$-V_{CD}$	0
7	T_2, T_4, T_6 encendidos y T_1, T_3, T_5 apagados	0	0	0
8	T_1, T_4, T_6 encendidos y T_2, T_3, T_5 apagados	0	0	0

Los estados del número 1 al 6 producen un voltaje de salida distinto de cero. Para generar un voltaje de CA los estados de conducción del inversor se mueven de un estado al otro.

La selección de los estados se realiza con alguna técnica de modulación que asegure el uso de seis estados únicamente.

3.4.2 Modelo de un inversor trifásico en bond graph

El modelo del inversor trifásico en bond graph es formulado utilizando el procedimiento mostrado en la Sección 2.5. Para modelar los elementos de conmutación (interruptores controlados) se utilizan transformadores modulados *MTF*, los cuales permiten (como ya se explicó anteriormente) introducir la señal de control y realizar una conmutación del flujo que circula por ellos.

La utilización de elementos *MTF* para modelar el mecanismo de conmutación de los transistores permite considerar el comportamiento promedio de la señal del convertidor.

La Figura 3.17 muestra el modelo del inversor trifásico en bond graph, en la cual, los tres elementos *MTF* mostrados, corresponden a cada una de las ramas del inversor. Adicionalmente, se tienen también las tres señales de control necesarias para realizar la secuencia de conmutación de la Tabla 3.3, por medio de un modulador de ancho de pulso (PWM). El PWM es generado por medio de las señales m_1 , m_2 y m_3 , que corresponden a cada una de las ramas.

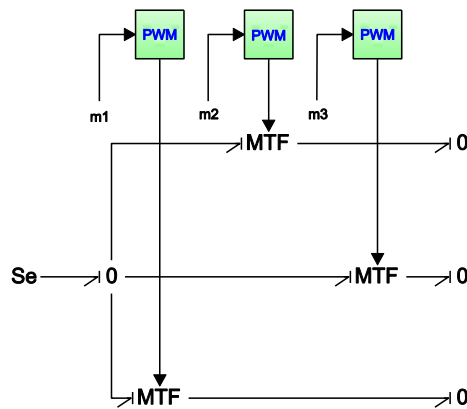


Figura 3.17 Inversor trifásico en bond graph.

La fuente Se en la Figura 3.17 representa una fuente voltaje ideal V_{CD} .

3.4.3 Simulación del inversor trifásico

El modelo del inversor de la Figura 3.17 no puede ser simulado como tal, ya que se obtendría en su salida tres señales cuadradas, debido a la conmutación generada por el PWM. Entonces, para poder realizar la simulación del inversor, es necesario adicionar un filtro a la salida del inversor.

Existen diferentes tipos de filtros que pueden ser utilizados para reducir los armónicos generados por el inversor, la elección de cada uno depende de las componentes armónicas que quieran ser eliminadas. Tal es el caso de un filtro inductivo L, en el cual solamente un inductor es colocado en serie a la salida del inversor. También existe el caso de un filtro LC, donde se tiene un inductor en serie y un capacitor en paralelo a la salida del inversor. Así, diferentes tipos de filtro pueden ser utilizados en el inversor.

Para la simulación del inversor es utilizado un filtro tipo LC, donde cada uno de los elementos tiene asociado su correspondiente parte resistiva, es decir, la inductancia se encuentra conectada en serie con una resistencia (RL) y el capacitor en paralelos con otra resistencia (RC).

La Figura 3.18 muestra el modelo de la simulación. Los valores numéricos utilizados son los siguientes: $S_e=100V$, $R_L=1.5\Omega$, $L=6.55mH$, $R_C=100\Omega$, $C=1mF$.

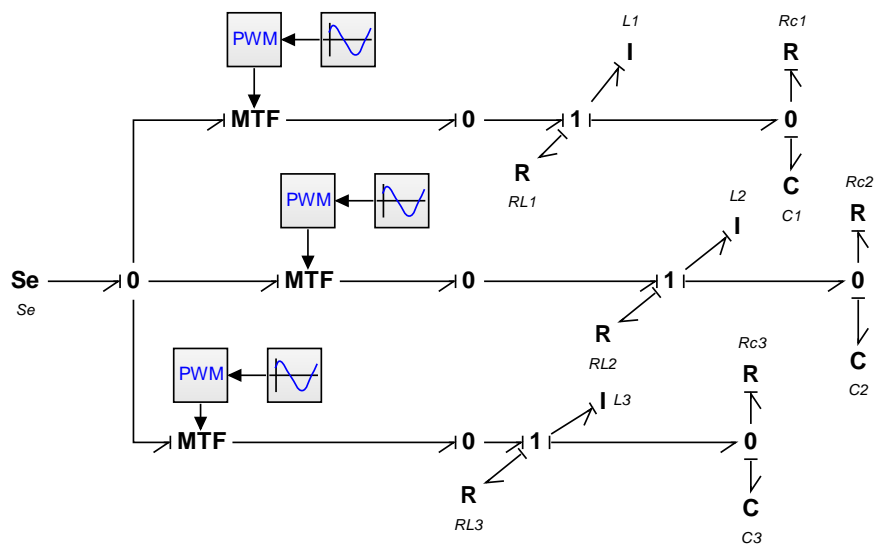


Figura 3.18 Diagrama de simulación del inversor trifásico.

En el diagrama de la simulación, se puede apreciar que las señales de control que genera el PWM son consideradas sinusoidales, en las cuales cada una tiene una amplitud de 1 y se encuentran desfasadas 120 grados entre cada una de ellas, además de tener una frecuencia de 60Hz.

Los voltajes trifásicos obtenidos a la salida del filtro son los mostrados en la Figura 3.19.

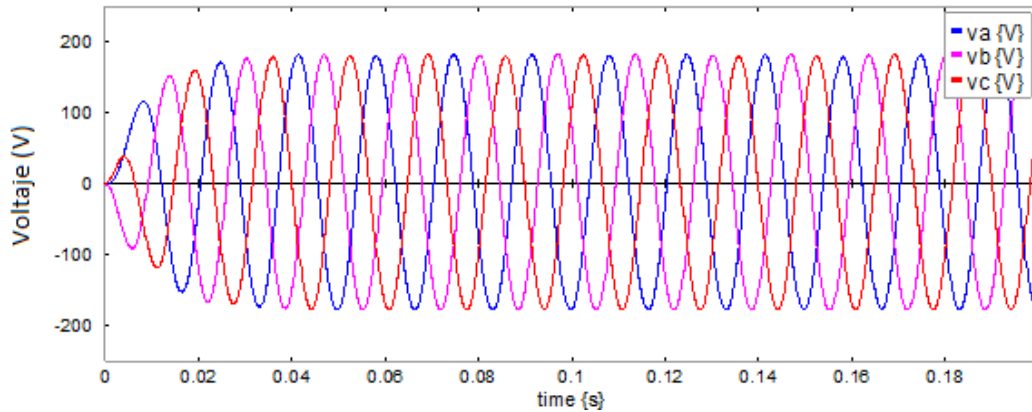


Figura 3.19 Voltajes trifásicos generador por el inversor.

Como el valor de la fuente de voltaje es constante, este se mantiene durante toda la simulación en los 100V fijados como referencia.

Con esta simulación se verifica el correcto funcionamiento del inversor.

3.5 Máquina de inducción

La máquina de inducción, es también conocida como máquina asíncrona, debido a que alcanza una menor velocidad que la velocidad síncrona. La velocidad síncrona es la velocidad de rotación del campo magnético en una máquina rotativa y depende de la frecuencia y del número de polos de la máquina.

Un motor de inducción siempre gira a menor velocidad que la velocidad síncrona porque el campo magnético giratorio que es producido en el estator generará el flujo en el rotor, el cual provocará que el motor gire. Sin embargo, debido al retraso de la corriente del flujo en el rotor con la corriente de flujo en el estator, la velocidad del rotor nunca alcanzará a la velocidad del campo magnético.

Existen dos tipos básicos de motores de inducción que dependen del tipo de alimentación de entrada que tengan: el motor de inducción de una fase y el motor de inducción trifásico. Además, la máquina de inducción no tiene un devanado de excitación independiente. La Figura 3.20 muestra el

diagrama de una máquina de inducción de dos polos con devanados trifásicos simétricos tanto en el estator como en el rotor (Krause, Wasynczuk, Sudhoff, & Pekarek, 2013).

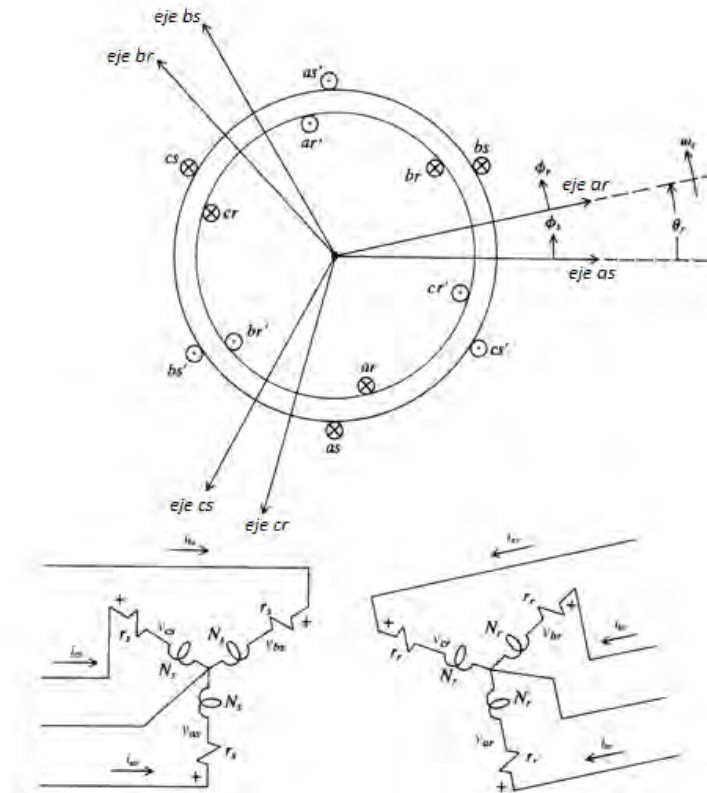


Figura 3.20 Diagrama esquemático de la máquina asíncrona trifásica, (Krause P. C., 2002).

En el modelo de la maquina asíncrona trifásica, la mayoría de las ocasiones puede ser transformado en un marco de referencia diferente, en el cual no se hagan presentes las señales trifásicas alternas y el ángulo de alineación del rotor con el eje de la máquina. Obteniéndose así un modelo matemático en un marco diferente (estacionario) donde las señales alternas son manejadas como señales continuas que no varían con la posición del rotor, esto debido a que se encuentra alineado el eje del marco transformado con una de las fases de la máquina.

El circuito equivalente en el sistema de coordenadas $dq0$ usando la transformación de Park (expresión (3.14)) para convertir las variables del estator y del rotor a un marco de referencia $dq0$ se muestra en la Figura 3.21.

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) & \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) & \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

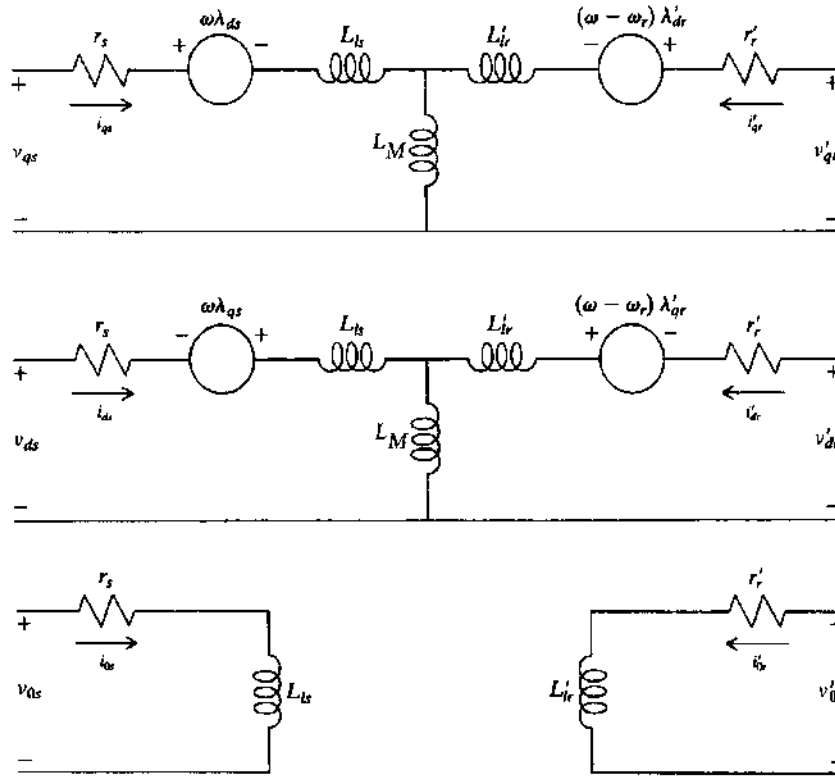


Figura 3.21 Circuito equivalente en el marco de referencia arbitrario $dq0$ para la máquina de inducción.

La Figura 3.21 muestra las terminales (v_{qs} , v_{ds} , v'_{qr} , v'_{dr}) para conectarse a cualquier sistema eléctrico, tanto para el estator como para el rotor. Debido a la uniformidad del entrehierro, existe una única inductancia trifásica de magnetización o mutua L_m que es común para los dos ejes d y q . El superíndice denota que los parámetros y las variables del estator están referidas al rotor.

El modelo en bond graph de la máquina de inducción puede ser fácilmente obtenido a partir del diagrama del circuito equivalente. Sin embargo éste ya ha sido formulado y publicado previamente en (Borutzky, 2011), por lo tanto la Figura 3.22 muestra el modelo en bond graph de la máquina de inducción en el marco de referencia $dq0$.

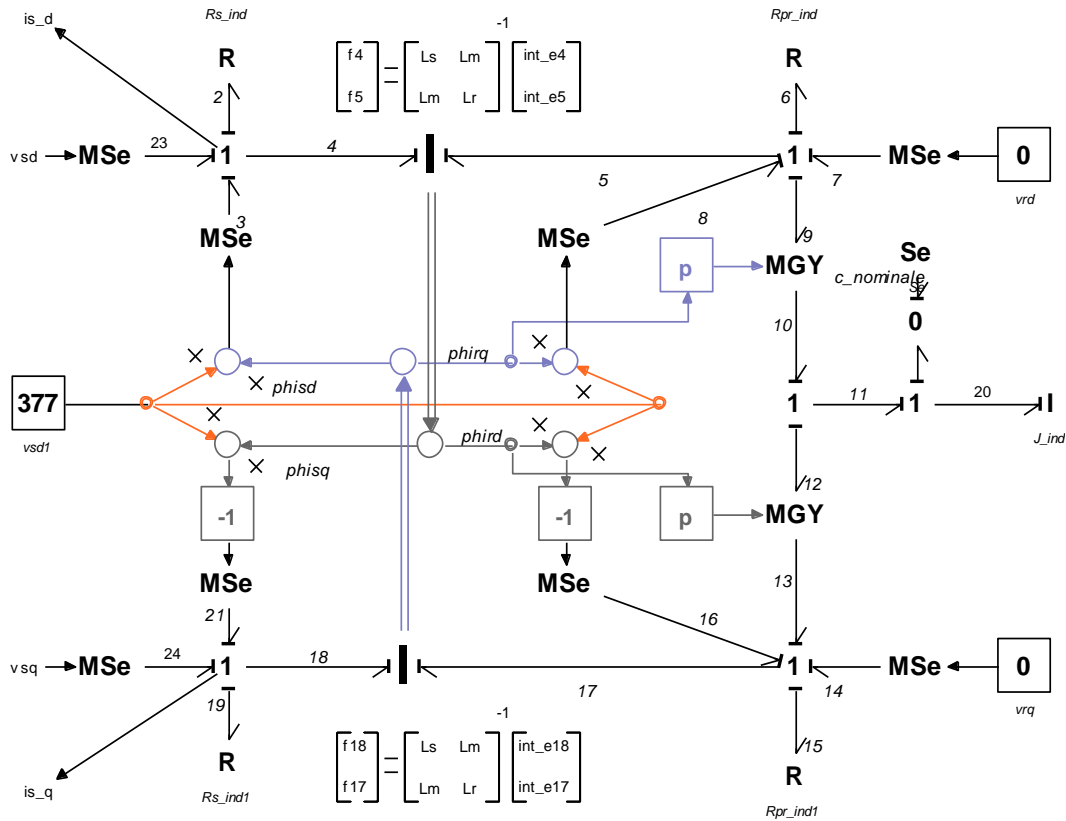


Figura 3.22 Bond graph de la máquina de inducción.

Del modelo, se pueden observar claramente las cuatro entradas de voltajes de la máquina, las dos para el estator v_{sd} y v_{sq} (fuentes *MSe* izquierda de la figura), como para el rotor v_{rd} y v_{rq} (fuentes *MSe* parte derecha de la figura). Los elementos I en el centro del modelo, corresponden a elementos multipuerto, en los cuales a su interior se encuentra la relación matricial mostrada en la ecuación de la figura. Estos elementos representan el acoplamiento de las inductancias propias tanto del estator, como del rotor con la inductancia mutua de la máquina. Finalmente el elemento J_{ind} corresponde a la inercia mecánica o fleje de la máquina de inducción.

Para obtener el modelo matemático del bond graph de la máquina, es necesario aplicar el procedimiento descrito en la Sección 2.6.2.

3.5.1 Análisis matemático

Del modelo de la Figura 3.22, se obtienen los siguientes vectores clave:

$$x_1 = \begin{bmatrix} p_4 \\ p_5 \\ p_{17} \\ p_{18} \\ p_{20} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \\ e_{17} \\ e_{18} \\ e_{20} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_{17} \\ f_{18} \\ f_{20} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$D_{in} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \\ f_{15} \\ f_{19} \end{bmatrix}; \quad D_{out} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \\ e_{15} \\ e_{19} \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} e_{23} \\ e_{24} \\ e_7 \\ e_{14} \\ e_3 \\ e_8 \\ e_{16} \\ e_{21} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Además de las siguientes relaciones constitutivas en los elementos I.

$$\begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} f_{18} \\ f_{17} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e_{18} \\ e_{17} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Donde ambas expresiones pueden corresponden a,

$$F = \begin{bmatrix} L_s & L_m & 0 & 0 & 0 \\ L_m & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Considerando también las relaciones de los elementos disipativos.

$$L = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_r} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Entonces, una vez definidos los vectores clave, así como también las relaciones constitutivas de los elementos, se tiene que formular la matriz de estructura de unión, la cual tiene la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ Din(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{13} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out}(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Entonces, los vectores sustituyendo los vectores adecuados, se tiene,

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \\ e_{17} \\ e_{18} \\ e_{20} \\ f_2 \\ f_6 \\ f_{15} \\ f_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & -r_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_{17} \\ f_{18} \\ f_{20} \\ e_2 \\ e_6 \\ e_{15} \\ e_{19} \\ e_{23} \\ e_{24} \\ e_7 \\ e_{14} \\ e_3 \\ e_8 \\ e_{16} \\ e_{21} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

De la estructura de unión (3.22) por comparación con (3.21) se tiene que,

$$S_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & -r_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad S_{12} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad S_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad S_{21} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; S_{22} = 0; S_{23} = 0; \quad (3.23)$$

Entonces la representación en variables de estado del modelo, es formulada utilizando las expresiones de (2.17) a (2.20). Por lo que las matrices A, B, y C de la representación en variables de estado son,

$$A = \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_1 & -r_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \right) * \begin{bmatrix} L_s & L_m & 0 & 0 & 0 \\ L_m & L_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_m & L_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Realizando las opresiones se tiene,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-L_s}{R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & 0 \\ \frac{-L_m}{R_s} & \frac{-L_r}{R_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-L_s}{R_s} - \frac{L_m}{R_s} \\ 0 & 0 & \frac{-L_m}{R_s} - \frac{L_r}{R_r} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Por otra parte, el vector que relaciona las entradas con los estados es,

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Esto es debido a que $S_{23}=0$.

Por otra parte, tanto el vector C, como el D son cero, debido a que no se consideró ninguna salida. Así, la representación en variables de estado es,

$$\begin{bmatrix} e_4 \\ e_5 \\ e_{17} \\ e_{18} \\ e_{20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-L_s}{R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-L_m}{R_r} & \frac{-L_s}{R_r} & 0 & 0 & -Jr_1 \\ 0 & 0 & \frac{-L_s}{R_s} & \frac{-L_m}{R_s} & Jr_2 \\ 0 & 0 & \frac{-L_m}{R_r} & \frac{-L_s}{R_r} & 0 \\ L_m r_1 & L_r r_1 & -L_s r_2 & -L_m r_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_{17} \\ f_{18} \\ f_{20} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{23} \\ e_{24} \\ e_7 \\ e_{14} \\ e_3 \\ e_8 \\ e_{16} \\ e_{21} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Si se considera una máquina de inducción jaula de ardilla, es decir que $e_7=e_{14}=0$, como es el caso del modelo mostrado en la Figura 3.22, y además considerando que,

$$\begin{aligned} e_3 &= \omega \phi_{sd} \\ e_8 &= \omega \phi_{rq} \\ e_{16} &= -\omega \phi_{rd} \\ e_{21} &= -\omega \phi_{sq} \\ r_1 &= p \phi_{rq} \\ r_2 &= p \phi_{rd} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Entonces se tendría la representación de la máquina de inducción jaula de ardilla.

3.6 Turbina eólica

El modelo matemático de una turbina eólica de eje horizontal puede ser consultado en (Ackermann, 2005), o también las turbinas de eje vertical en (Howell, Qin, Edwards, & Durrani, 2010).

En lo que respecta al modelado tradicional de una turbina eólica, éste puede ser resumido con la ecuación (3.29). Donde se hace referencia a la potencia total que puede ser extraída de la incidencia del viento en la parte mecánica de la turbina eólica.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (3.29)$$

donde: P_T representa la potencia mecánica generada por el viento expresada en Watts, R es el radio de las palas de la turbina (expresado en metros), λ es la velocidad específica, ρ es la densidad del aire (Kg/m³), β es el ángulo de orientación de las palas (en grados), v es la velocidad del viento (m/s) y C_p es el coeficiente de potencia.

La velocidad específica λ es la relación que existe entre la velocidad del viento y la velocidad angular de la turbina ω , este es un parámetro adimensional y se representa por medio de la ecuación (3.30).

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (3.30)$$

El coeficiente de potencia C_p está relacionado directamente con las propiedades aerodinámicas de las palas y depende directamente de la relación entre la velocidad específica λ y el ángulo de orientación de las palas β . En términos generales, su valor está dado por la curva típica mostrada en la Figura 3.23.

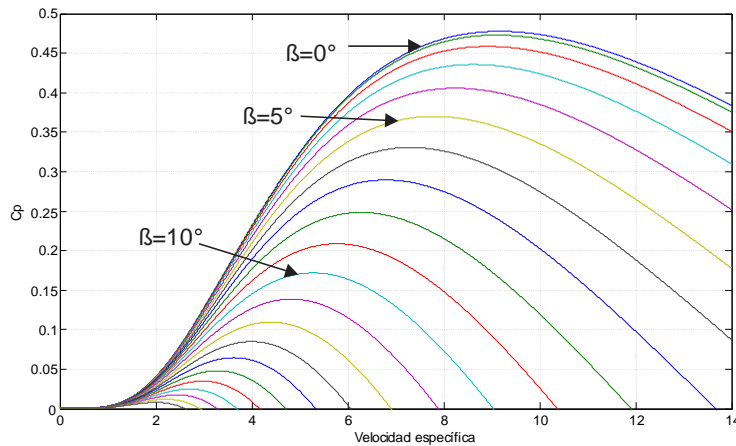


Figura 3.23 Curva típica del coeficiente de potencia.

Existen expresiones matemáticas que permiten calcular el valor del coeficiente de potencia, tal como la desarrollada en (Marín, 2009).

Por otra parte, existen diferentes tipos de modelos dinámicos que han sido desarrollados para el análisis de las turbinas eólicas, tal es el caso de un modelo de una masa (una sola inercia) presentado en (Tapia, Tapia, Zubia, Ostolaza, & Saenz, 2001), de otro que considera dos masas (Petru & Thiringer, 2002), y uno de seis masas (Muyeen, y otros, 2007); cada uno de estos modelos ha sido desarrollado para las condiciones específicas del estudio presentado.

En lo que respecta al modelo de la turbina eólica en bond graph, el modelo que es utilizado en esta tesis es tomado de (Patiño, Tapia, Medina, & Fuerte, 2014). Esto es debido a que se trata de un modelo en bond graph que considera una sola masa y esto permite contar, además también se utilizan las leyes de control presentadas en la referencia.

Es importante destacar que el modelo y sus leyes de control son tomadas de la referencia (Patiño, Tapia, Medina, & Fuerte, 2014), debido a que solo se requiere conocer el impacto que tiene la generación

de energía eléctrica por medio de la turbina eólica en el sistema de gestión propuesto, y no el desarrollo del mismo. Sin embargo, el modelo debe ser completado en esta tesis, debido a que solo se modela la parte mecánica de la turbina eólica, es decir, que el generador debe ser incluido en el modelo con el fin de obtener la energía eléctrica generada por la turbina eólica. En la siguiente subsección se presenta el modelo de la turbina eólica en bond graph.

3.6.1 Turbina eólica en bond graph

Tomando como referencia el modelo presentado en (Patiño, Tapia, Medina, & Fuerte, 2014), las características que presenta el modelo son:

- Se considera un elemento *MGY* (girador modulado), para representar el acoplamiento o cambio de variables en la conversión de la velocidad del viento en fuerza aerodinámica. El *MGY* incluye en su interior la relación constitutiva presentada en la expresión (3.29).
- La velocidad del viento es representada por medio de una fuente de flujo modulada *MSf*.
- La consideración de la caja de engranes está representada por un elemento *TF*.
- El modelo considera una sola masa (*J*) en su parte mecánica, la cual representa la inercia totalizada (turbina y generador) vista por la máquina de inducción.

La Figura 3.24 muestra el modelo en bond graph del aerogenerador considerando una sola masa.

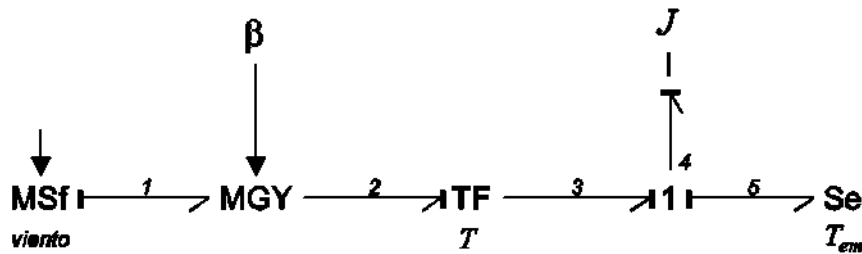


Figura 3.24 Modelo bond graph de la turbina eólica.

El análisis matemático del modelo es obtenido aplicando el procedimiento mostrado en la sección 2.6.2. Así, la única ecuación dinámica o variable de estado que representa al bond graph de la Figura 3.24 está dada por,

$$e_4 = r * T * f_1 \tag{3.31}$$

donde: T corresponde a la relación de transformación de la caja de engranes; f_i es el flujo de entrada, para este caso, la velocidad de viento; e_4 corresponde al par de la inercia J ; y r es la relación constitutiva del MGY , la cual está dada por la expresión (3.32).

$$r = \frac{1}{2} * \frac{C_p}{\lambda} * \rho * \pi * R^2 \tag{3.32}$$

Para más detalles del modelo de la Figura 3.24, favor de consultar la referencia (Patiño, Tapia, Medina, & Fuerte, 2014) o (Patiño, Diseño de una turbina de levitación magnética en el dominio físico, 2016).

Debido a que el modelo de la Figura 3.24 solo presenta la parte mecánica del aerogenerador, es necesario adicionar la parte correspondiente al generador de inducción. Un generador jaula de ardilla es utilizado, contrario al motor doblemente alimentado presentado anteriormente.

Prácticamente el modelo del generador adicionado en la turbina eólica, es igual al mostrado en la Figura 3.22, la diferencia radica en que para este modelo los voltajes de entrada en el estator v_{dr} y v_{qr} son fijados con un valor nulo. Así, la Figura 3.25 muestra el modelo en bond graph completo de la turbina eólica.

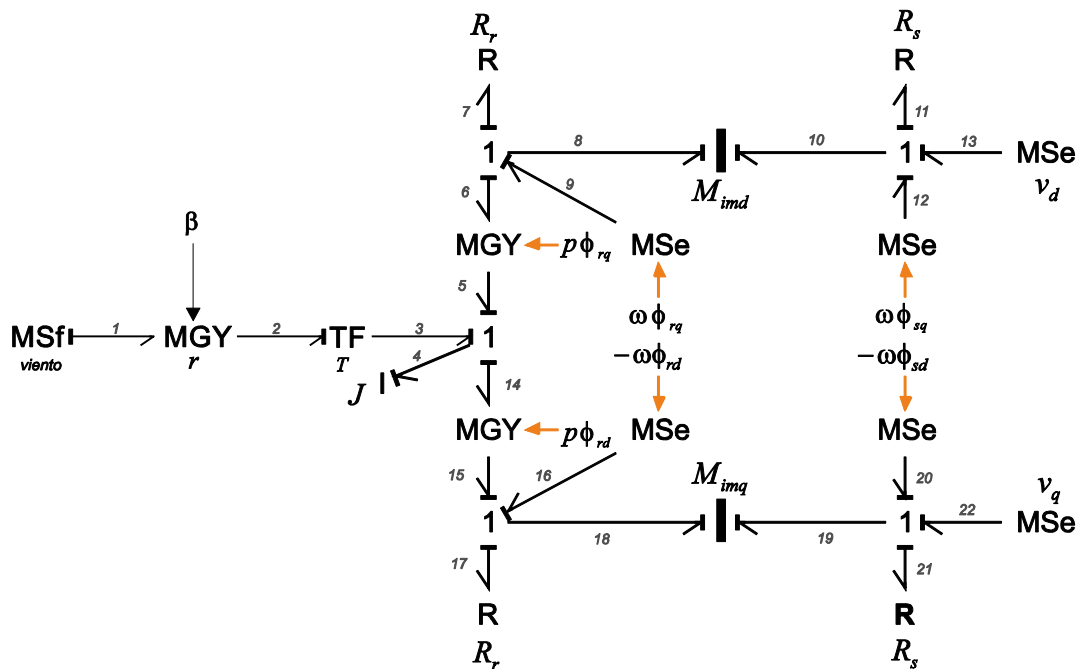


Figura 3.25 Modelo en bond graph de la turbina eólica incluyendo el generador.

En la siguiente subsección se presenta la simulación de la turbina eólica.

3.6.2 Simulación de la turbina eólica

Para la simulación de la turbina eólica, se considera una turbina de pequeña escala, es decir, que la generación de potencia activa es pequeña, debido a que el generador es de 250W. La Tabla 3.4 muestra los parámetros de la turbina eólica y del generador.

Tabla 3.4 Valores numéricos para la simulación de la turbina eólica.

Turbina	Generador
$R = 0.3 \text{ m}$	$R_s = 0.0352 \Omega$
$T = 92.5$	$R_r = 0.0816 \Omega$
$\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$	$L_s = 0.07 \text{ H}$
$J = 0.156 \text{ kg.m}^2$	$L_m = 0.069 \text{ H}$
	$L_r = 0.07 \text{ H}$
	$\omega_s = 2\pi 60$

Tomando en consideración los valores numéricos de la Tabla 3.4, y considerando que se tiene un perfil de viento constante con un incremento tipo rampa que comienza en el instante de $t=10\text{s}$ con una velocidad de 5m/s y termina en $t=30\text{s}$ a 15 m/s . La Figura 3.26 muestra los resultados obtenidos.

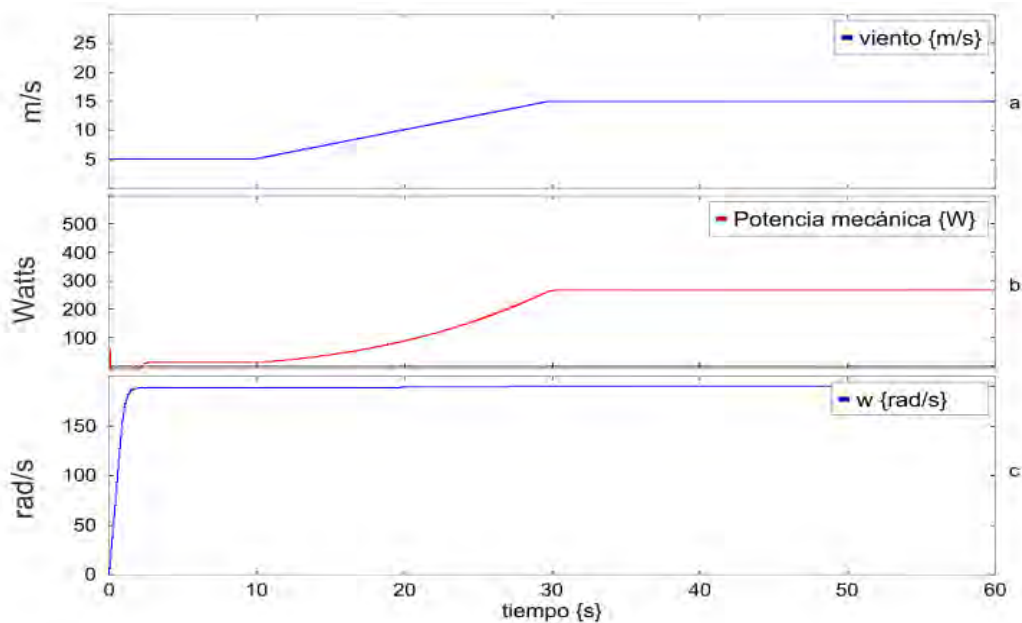


Figura 3.26 Respuestas de la simulación de la turbina eólica –a) Velocidad del viento –b) Potencia mecánica – c) Velocidad angular.

Como se puede observar, la velocidad del viento (Figura 3.26a) muestra el perfil indicado de la velocidad considerada. En la misma medida en que el perfil del viento varia, la potencia mecánica generada en la turbina varia también, manteniéndose en un valor constante de 267W cuando el viento tienen una velocidad de 15m/s (Figura 3.26b). Además, en la Figura 3.26c se muestra como la velocidad angular en la turbina se mantiene constante. Es importante mencionar que los elementos dinámicos del generador no tienen asignado una condición inicial, debido a esto, se presenta el efecto transitorio al inicio de la simulación.

Adicionalmente, es importante verificar que los voltajes y corrientes del generador son los apropiados. Así, la Figura 3.27a muestra los voltajes trifásicos en terminales del generador, estos se encuentran ubicados a las salida de la transformación de Park. Las corrientes del estator para el eje d y q , son mostradas en la Figura 3.27b, y la potencia activa y reactiva en la Figura 3.27c. Es importante mencionar que la potencia activa varia en la misma proporción que la potencia mecánica, y su valor es de 259.6W. Se tiene también una potencia reactiva generada por la turbina eólica constante de 850VA.

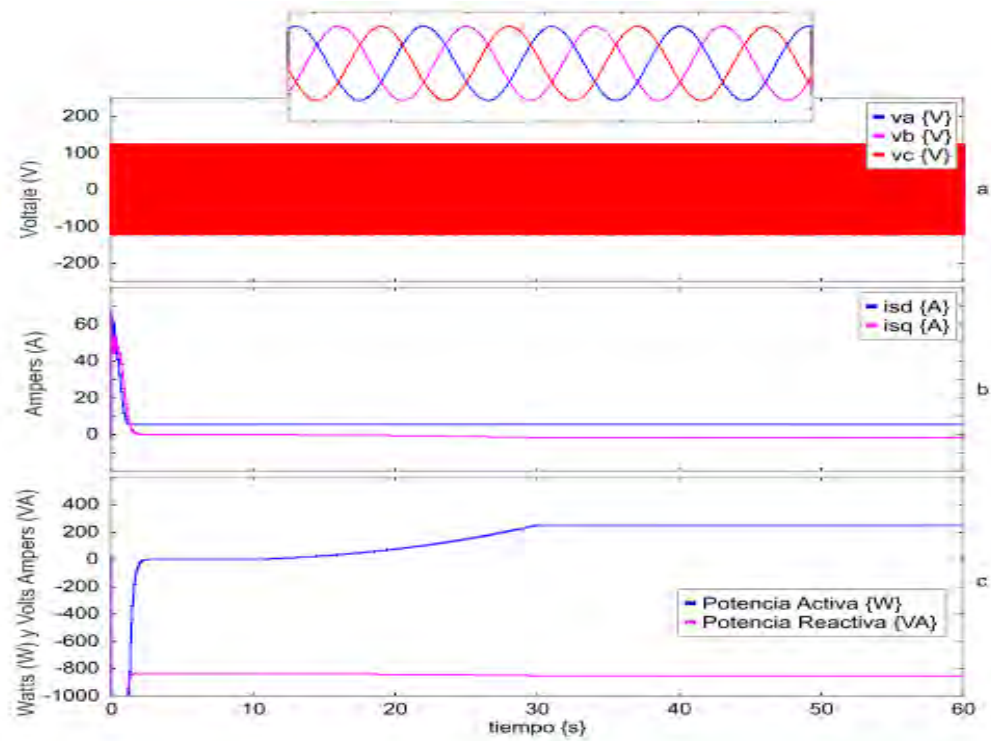


Figura 3.27 Respuestas de las simulación de la turbina eólica –a) Voltajes trifásicos –b) Corrientes i_d e i_q en estator –c) Potencia activa y reactiva generada.

3.7 Conclusiones

En este capítulo se describió la configuración del sistema de gestión de energía que es tratado en esta tesis, Se propuso un esquema de conexión diferente del tradicional y se presentaron cada uno de los elementos que lo componen.

Además, se explicó a detalle el funcionamiento del sistema de gestión de la energía. Esto se realizó por medio de un esquema en el cual se representan los elementos de conmutación (interruptores) necesarios para realizar la conexión y desconexión de las diferentes fuentes involucradas en la configuración. Lo anterior permite realizar una combinación de diferentes condiciones de uso del sistema. Estas condiciones están dadas directamente (en este caso) por el usuario.

La obtención del modelo de la batería fue explicado a detalle. En dicho modelo se destaca la conversión electro-química que se produce en la batería. Se mostró como la unión de un número considerado de celdas permite obtener el modelo completo de la batería y/o banco de baterías.

Se describió el modelo de la máquina de inducción, el cual es el elemento principal del esquema de conexión. Este modelo es un modelo estándar y puede ser utilizado como una máquina de inducción de rotor devanado (que es el caso del presentado en este capítulo), o bien una máquina doblemente alimentada. Desde el punto de vista del modelo, la diferencia está presente en si se tiene un voltaje aplicado en el rotor o no.

Finalmente, se presentó también el modelo de la turbina eólica, el cual considera un generador de inducción de rotor devanado.

Se realizaron simulaciones para cada modelo con el fin de comprobar el funcionamiento y características que presenta cada dispositivo de manera individual.

Capítulo 4

4 Sistema de Gestión de Energía

4.1 Introducción

En el presente capítulo se exponen las leyes de control necesarias para realizar la gestión de la energía en la máquina de inducción. Se presentan las dos estructuras de control, necesarias para que la máquina de inducción opere en su condición de motor y generador. La validación de la configuración del sistema propuesto es verificada a través de simulaciones utilizando el programa 20Sim. Se presentan los resultados obtenidos para dos casos de estudio, así como también, los resultados de las condiciones individuales en cada uno de los diferentes casos presentes en la configuración del sistema de gestión de energía

4.2 Ley de control de la máquina de inducción como motor

En esta Sección se presenta la ley de control utilizada para controlar la velocidad en la máquina de inducción, cuando se encuentra en su condición de motor.

La Figura 4.1 muestra el diagrama a bloques de la configuración cuando el sistema de gestión de energía se encuentra en la denominada Condición 2, mostrada en la Tabla 3.1 de la Sección 3.2.

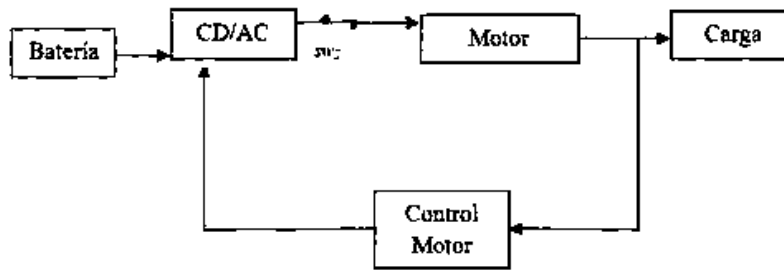


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la condición como motor en el sistema de gestión de energía.

De la Figura 4.1 se puede observar que la Condición 2, considera que la energía la proporciona el banco de baterías, el convertidor se encuentra en su configuración de inversor y que además se usa la condición de motor en la máquina de inducción.

El tipo de control que se elige para esta condición, es el control vectorial, descrito a continuación. Es importante mencionar, que el control vectorial utilizado no es un desarrollo ni aporte de la presente tesis. Este control es tomado de (Flórez, 2006), y simplemente es implementado y utilizado como parte del sistema de gestión de energía.

4.2.1 Control Vectorial del motor de inducción

Un método de control de la máquina de inducción muy utilizado en la práctica debido a su facilidad de implantación es el control vectorial indirecto. En este tipo de control, tanto el flujo de rotor como el par son controlados en lazo abierto, existiendo sólo un lazo de control cerrado para la velocidad de giro de la máquina.

En este control no es preciso estimar el vector de flujo del rotor. En su lugar se estima sólo la posición de dicho vector, lo cual se hace integrando su velocidad de giro, que se calcula a partir de la velocidad del rotor y la de deslizamiento (Sánchez, 2008).

La Figura 4.2 representa la idea básica del control vectorial indirecto en lazo cerrado. Esta estructura de control, se encuentra integrada por un controlador tipo proporcional+integral+derivativo (PID) convencional para regular la respuesta, un control por voltaje donde se determinan las corrientes de referencia, y el modelo matemático que simula el comportamiento de un motor de inducción.

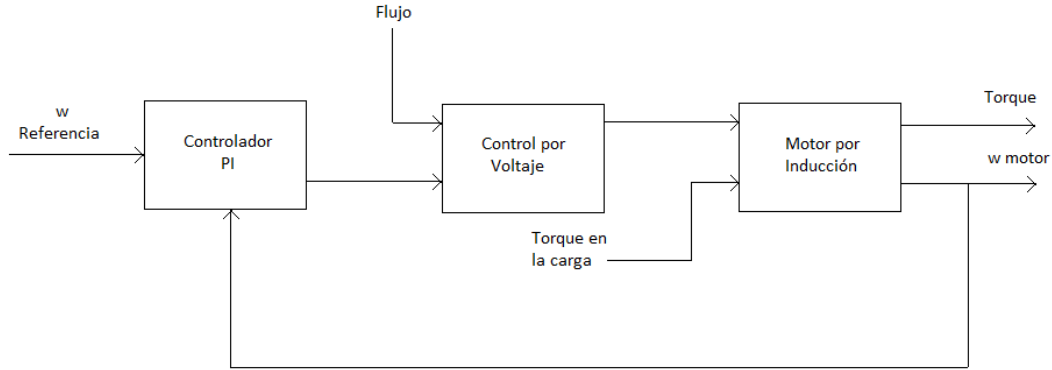


Figura 4.2 Esquema del control vectorial indirecto.

Las corrientes del estator son las variables por las cuales debe ser controlado el motor de inducción para implementar el campo orientado. Esto es posible también empleando las ecuaciones del voltaje en el estator e indirectamente controlar las corrientes a través del voltaje. Para lograr lo anterior, es necesario desacoplar las ecuaciones de voltaje de forma tal que se logre un control independiente de las dos componentes de corriente del estator.

Para la condición de flujo constante (sin debilitamiento de campo), las ecuaciones de voltaje se simplifican aún más. A flujo constante, la relación en estado estable está dada por,

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (4.1)$$

Además, para las expresiones del voltaje en el estator, se tiene lo siguiente,

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - w_{mr} L_\sigma i_{qs} \quad (4.2)$$

O bien,

$$V_{qs} = (R_s + L_\sigma s) i_{qs} + w_{mr} \left(L_\sigma + \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{ds} \quad (4.3)$$

Por otra parte, v_{qs} está dado por,

$$V_{qs} = (R_s + L_\sigma s) i_{qs} + w_{mr} L_s i_{ds} = R_s (\sigma \tau_s s + 1) i_{qs} + w_{mr} L_s i_{ds} \quad (4.4)$$

Considerando que $\tau_s = \frac{L_s}{R_s}$, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$; y $\sigma L_s = L_\sigma$, resulta el diagrama a bloques de la Figura 4.3.

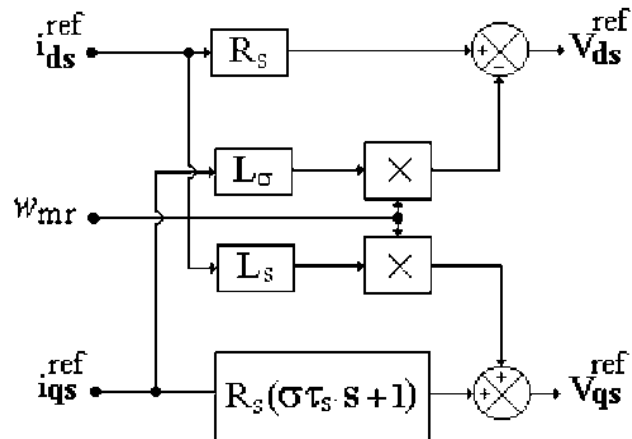


Figura 4.3 Diagrama a bloques del cálculo de las referencias de voltaje de campo orientado en operación de flujo constante.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas el término derivativo "S" no se toma en cuenta, debido a que se generarían señales con mucho ruido, esto es debido a que la acción derivativa tiene que ser aproximada como por ejemplo con alguna función de transferencia o con un filtro, de esta forma se simplifica más la estructura de control. La Figura 4.4 muestra el esquema para el cálculo de las referencias de voltaje simplificado.

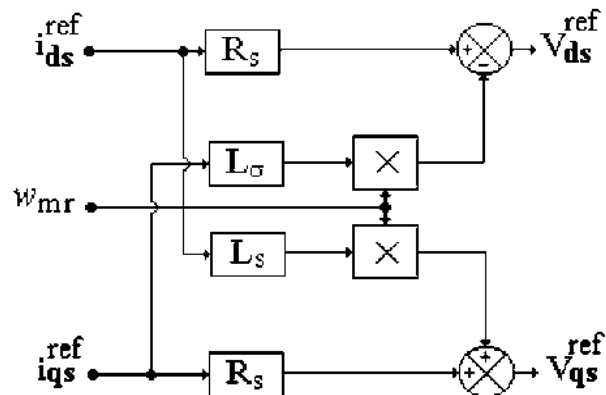


Figura 4.4 Cálculo de las referencias de voltaje simplificado en operación a flujo constante y en estado estable.

De esta manera, el diagrama mostrado en la Figura 4.4 permite representar el cálculo de las referencias de voltaje en el control. El sistema de control completo es mostrado en la Figura 4.5.

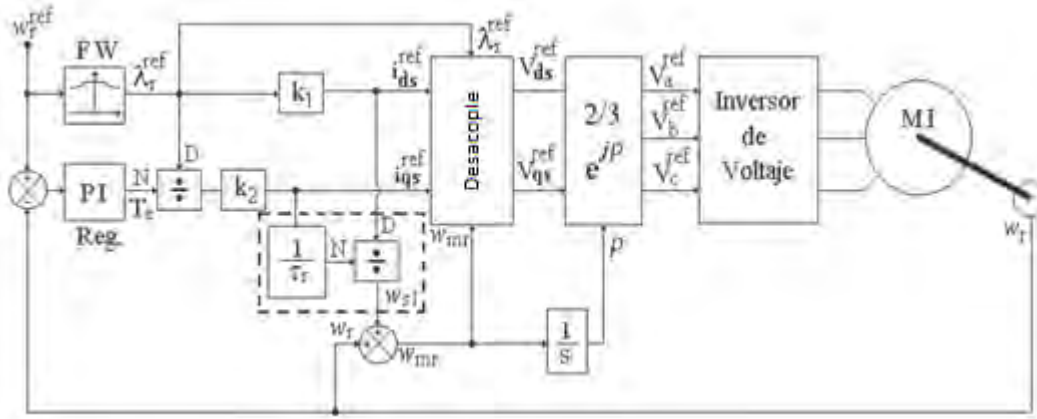


Figura 4.5 Control vectorial indirecto en campo orientado alimentado por voltaje.

La Figura 4.5 muestra todos los componentes necesarios para implementar el control vectorial indirecto. Es importante destacar que los valores de k_1 y k_2 están dados por $\frac{1}{L_m}$ y $\frac{2}{3} \frac{L_r}{L_m}$, respectivamente. Estos valores son dados para el caso en estado estable. También se puede apreciar el bloque FW , a que tiene la función de filtrar la señal.

Entonces el diagrama de control es implementado en el simulado 20Sim.

4.2.2 Simulación control de velocidad condicion de motor

Al igual y como se realizó anteriormente, se realiza una simulación para verificar que la ley de control cumple con su función.

Para lo anterior, se toman en cuenta los valores numéricos de la Tabla 4.1, tanto para el control como para el generador.

Tabla 4.1 Parámetros de la máquina y control para el control vectorial indirecto.

Parámetros control	Máquina de Inducción	
$k_p = 5.1$	$R_s = 0.4 \Omega$	$P = 2234W$
$k_i = 1.2$	$L_s = L_r = 61.1 mH$	$\omega_s = 2\pi f \text{ rad/s}$
$b = 0.00186$	$R_r = 0.6 \Omega$	$f = 60 \text{ Hz}$
	$J = 0.05 \text{ kg.m}^2$	$L_m = 59 mH$
	$p = 2$	

La Figura 4.6 muestra el diagrama de la simulación en 20Sim del control de velocidad del motor. Se puede observar que el inversor es alimentado por una fuente de voltaje constante V_{cd} , así como también que un par constante T_{carga} es aplicado en la parte mecánica del generador (Submodelo Figura_3_19). Además de que en el bloque llamado control voltaje, se encuentra implementado el control vectorial indirecto.

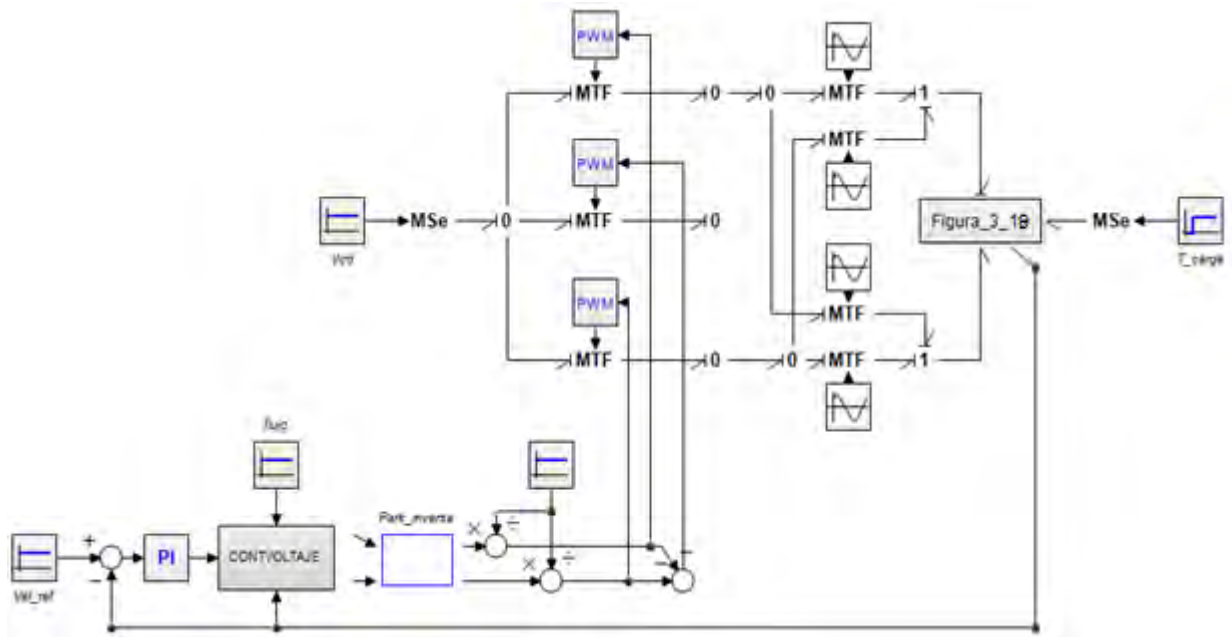


Figura 4.6 Diagrama de simulación de la ley de control de velocidad para la condición de motor.

En el diagrama, también puede apreciarse la implementación de la transformación de Park, la cual es realizada por medio de los transformadores MTF , que se encuentran colocados entre el inversor trifásico y el submodelo que contiene a la máquina de inducción.

La simulación es realizada tomando en cuenta un tiempo de 12 segundos, dentro de los cuales en el instante igual a 6 segundos, se aplica un par de carga en el motor de inducción. El voltaje de entrada en el inversor es considerado como $V_{cd}=1000V$. Además de que la referencia de la velocidad se fija en 150 rad/s. La Figura 4.7 muestra la velocidad en el motor de inducción, en la que se aprecia, como llega a su valor en estado estable (150 rad/s) en alrededor de 4 segundos, y en $t=6$ segundos se aplica un par de carga, lo que provoca que la velocidad se altere. El control realiza su función y restablece la velocidad constante en la máquina, aun cuando el par de carga sigue siendo aplicado.

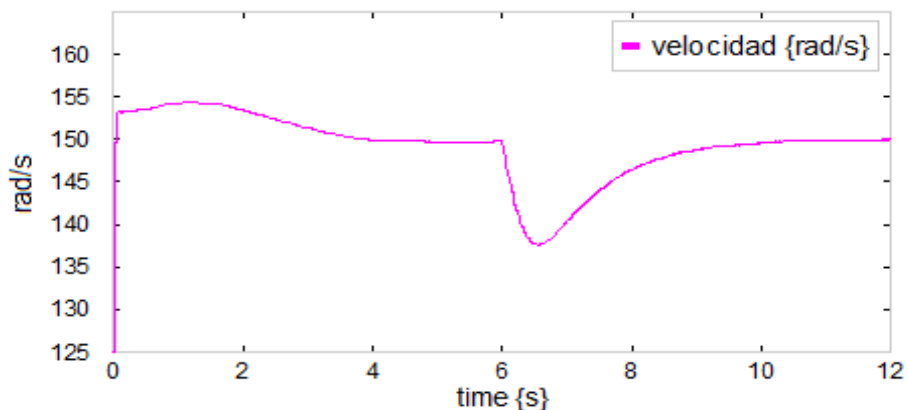


Figura 4.7 Velocidad del motor de inducción.

Además de mostrar los resultados de la velocidad, la Figura 4.8 muestra el voltaje trifásico de salida en el inversor. Estos voltajes presentan una forma de onda cuadrada, debido a que no es utilizado ningún filtro (en este caso) para reducir el contenido armónico generado por la conmutación y el PWM.

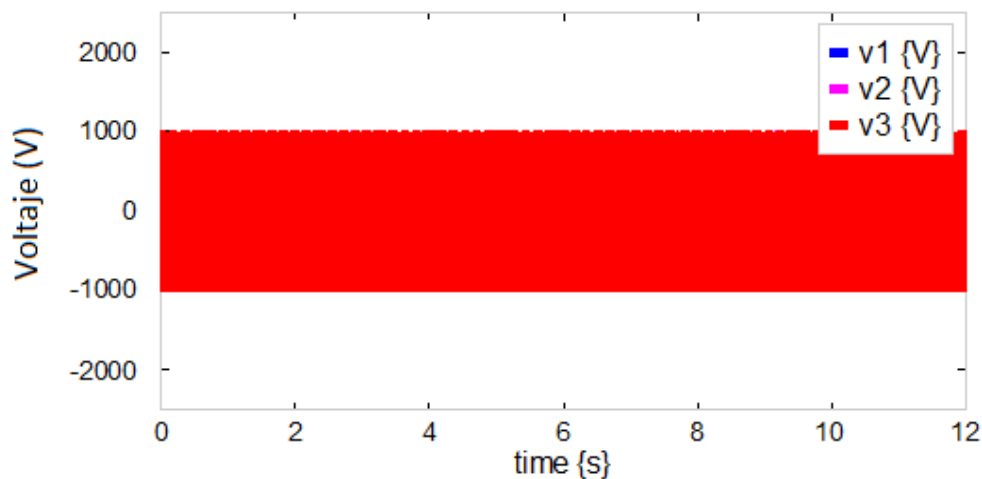


Figura 4.8 Voltajes trifásicos de salida en el inversor.

De esta manera, con la simulación presentada, se verifica el comportamiento de la ley de control para la condición de motor en la máquina de inducción.

4.3 Ley de control de la máquina de inducción como generador

En esta Sección se presenta la ley de control utilizada para controlar la velocidad en la máquina de inducción, cuando opera como generador.

La Figura 4.9 muestra el diagrama a bloques de la configuración cuando el sistema de gestión de energía se encuentra en la denominada Condición 3, mostrada en la Tabla 3.1 de la Sección 3.2.

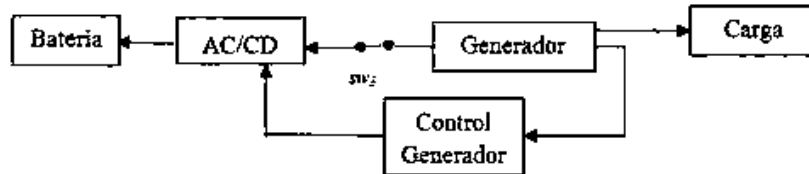


Figura 4.9 Diagrama de flujo de la condición como generador en el sistema de gestión de energía

De la Figura 4.9 se observa que para la Condición 3 del sistema de gestión de energía, ahora la energía de la inercia mecánica es enviada hacia el banco de baterías. Para esto, es necesario que el convertidor de potencia este en su configuración de rectificador y además se debe de tener un par negativo en la máquina de inducción, para que esté en su condición de generador

Al igual y como se realiza con el esquema de control del motor. En esta sección, el control que se implementa, es un control de par, el cual ha sido desarrollado en (Tapia & Medina, 2015).

4.3.1 Control del par en el generador de inducción

Para el control del generador, se utiliza un control de par. La ley de control es desarrollada a partir del modelo de la máquina de inducción doblemente alimentada. Para su concepción, se utiliza el concepto de inversión del sistema, es decir que si se tiene una relación de entrada – salida, el sistema puede ser invertido considerando la entrada como la salida y viceversa, obteniéndose así una relación salida – entrada en el modelo inverso.

Para la obtención de la estructura de la ley de control en (Tapia & Medina, 2015), primeramente se realiza una simplificación de estados o cancelación de dinámicas rápidas en el modelo de la máquina de inducción. Esto permite que el sistema simplificado no presente mayor problema, al momento de realizar su inversión gráfica. Posteriormente, del modelo inverso son tomadas las expresiones matemáticas que permiten formular la ley de control.

Para todos los detalles sobre la inversión grafica de sistemas, puede consultarse (Ngwompo, Scavarda, & Thomasset, 1996) y (Gawthrop P. J., 1995).

Básicamente, la inversión del sistema es realizada por medio de dos variables en la máquina de inducción, el par mecánico y el flujo magnético del rotor en el eje d . Estos dos parámetros son invertidos hacia la fuente de alimentación (v_{rq} y v_{rd}), para así poder controlar la potencia activa y reactiva en el generador.

Las dos expresiones matemáticas que representan la ley de control, son las siguientes,

$$(v_{rd})_{(s)} = s(\phi_{rdref})_{(s)} + k_1(\phi_{rdref} - \phi_{rd})_{(s)} + \hat{R}_r(i_{rd})_{(s)} \quad (4.5)$$

$$(v_{rq})_{(s)} = \hat{R}_r(i_{rq})_{(s)} - p\phi_{rd}\Omega + \omega\phi_{rd} + \hat{L}_r s \left(\frac{T_{ref}}{-p\phi_{rd}} \right)_{(s)} + \hat{L}_r k_2 \left(\frac{T_{ref}}{-p\phi_{rd}} - i_{rq} \right)_{(s)} \quad (4.6)$$

Estas expresiones están dadas en el dominio de Laplace (variable compleja s), y en las cuales el parámetro k_1 y k_2 representan ganancias proporcionales en el control. Estas ganancias pueden ser reemplazadas por cualquier tipo de corrector que pueda ser utilizado. Los demás parámetros que conforman estas ecuaciones son: p es el número de par de polos de la maquina; Ω representa la velocidad de rotación de la maquina; \hat{L}_r el valor estimado de la inductancia propia del rotor; \hat{R}_r el valor estimado de la resistencia del rotor; ϕ_{rd} el flujo magnético del rotor en el eje d ; y T_{ref} es el par de referencia.

Así, las expresiones (4.5) y (4.6) son implementadas en el diagrama a bloques mostrado en la Figura 4.10.

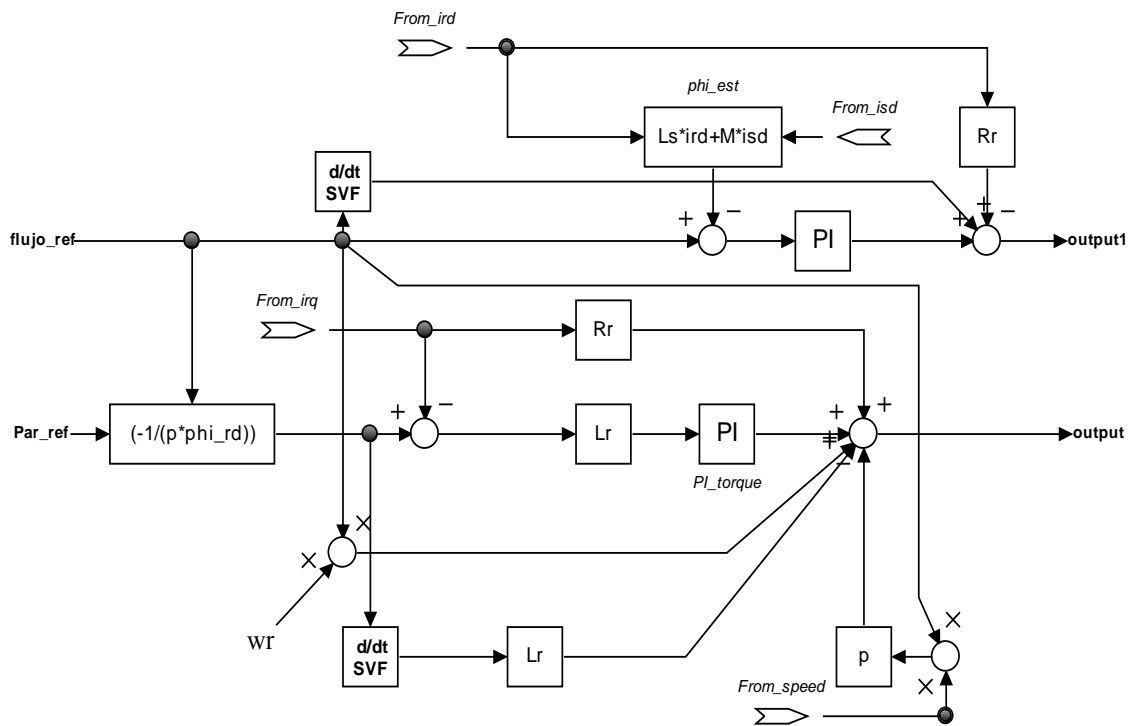


Figura 4.10 Diagrama a bloques del control de par para el generador.

La simulación del generador es presentada en la siguiente subsección.

4.3.2 Simulación del generador de inducción

La Figura 4.11 muestra el diagrama de la simulación en 20Sim del control de par del generador. Se puede observar que el generador es conectado a una carga eléctrica RL conectada en paralelo (parte inferior derecha de la Figura 4.11). Lo anterior es realizado, para poder tener un voltaje a la salida en el generador, ya que en caso de no tener una carga conectada en las terminales del estator no se produciría la corriente que cierra el circuito. Al igual que en el caso anterior, el submodelo de la Figura_3_19 contiene el modelo de la máquina de inducción. Es importante observar que para este caso en específico se tienen 4 bond de entrada en el modelo, esto es debido a que tanto el rotor como el estator se encuentran conectados.

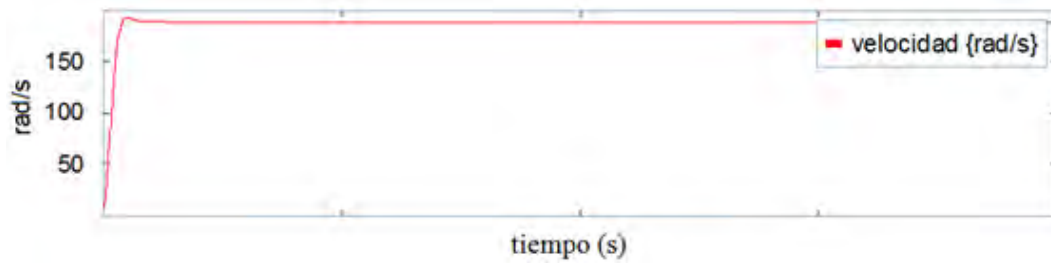


Figura 4.12 Respuesta de la velocidad angular en el generador.

Lo importante en la aplicación de este tipo de control, es observar que el par o torque mecánico, se mantiene controlado. Así, la Figura 4.13 muestra un par negativo, lo que indica que esta la máquina está funcionando como un generador.

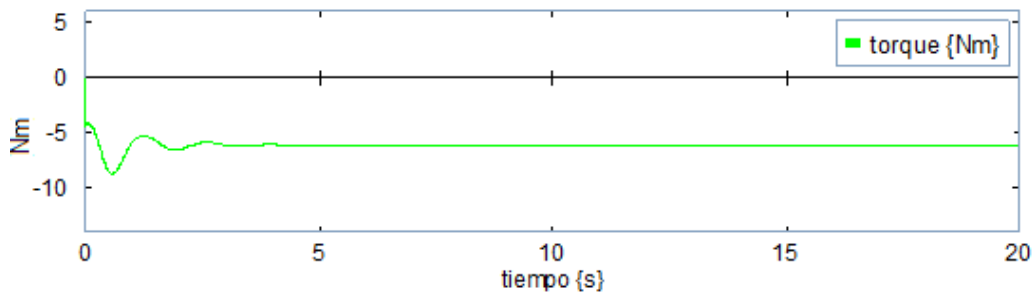


Figura 4.13 Torque presente en el generador.

Finalmente, la Figura 4.14 muestra el voltaje trifásico generado en las terminales del estator de la máquina.

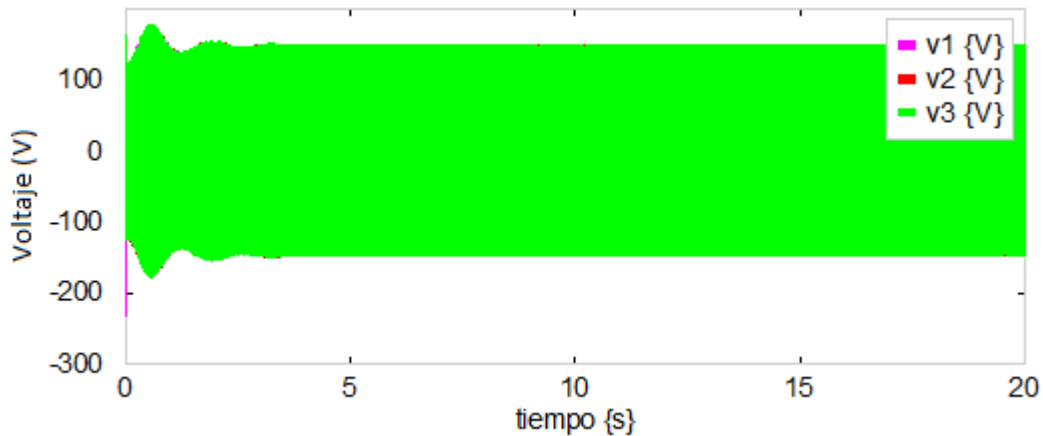


Figura 4.14 Voltajes trifásicos generados en las terminales de la máquina de inducción.

En la siguiente Sección, se presentaran los dos casos de estudio del sistema completo de gestión de energía.

4.4 Sistema de Gestión de Energía – Caso de estudio 1

En el primer caso de estudio se aborda la configuración convencional del sistema. Esto quiere decir que los elementos considerados para este caso son: el banco de baterías, el convertidor bidireccional y la máquina de inducción. La turbina eólica no es considerada.

Los interruptores corresponden únicamente a sw_2 y sw_3 , para la consideración como motor (Condición 2) y como generador (Condición 3), respectivamente. La Figura 4.15 muestra el esquema de conexión del caso de estudio 1.

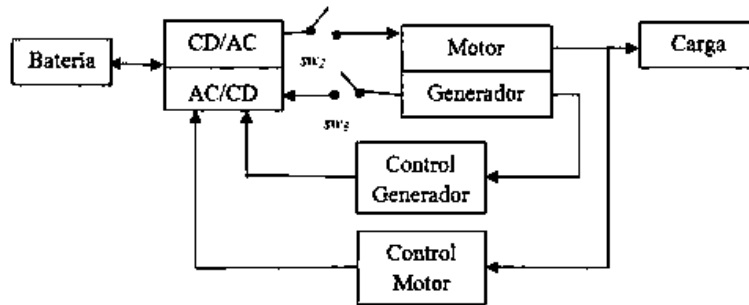


Figura 4.15 Esquema de conexión para el caso de estudio 1.

Para una mejor claridad del sistema de gestión durante las simulaciones, se utilizan los siguientes términos:

- Condición 1.- Configuración de reposo del sistema.
- Condición 2.- Configuración de la consideración de motor (Batería → Inversor → Motor).
- Condición 3.- Configuración de la consideración de generador (Generador → Rectificador → Batería).

En cada una de las condiciones se tiene presente una combinación específica de los dos interruptores. Así, para la Condición 1 = ($sw_2=0$) y ($sw_3=0$); la Condición 2 = ($sw_2=1$) y ($sw_3=0$); y la Condición 3 = ($sw_2=0$) y ($sw_3=1$); teniendo en cuenta que un 0 corresponde al estado abierto del interruptor y un 1 al estado cerrado.

Nota: Como se mencionó en el Capítulo 1, el sistema de gestión de energía se ha enfocado a la aplicación de un vehículo eléctrico, pero este tiene otras aplicaciones también. Es debido a esto que los casos de estudio están enfocados en los vehículos eléctricos.

Una vez definiendo los términos utilizados, se describe el esquema de la Figura 4.15.

Así, en el sistema la Condición 1 está presente cuando la velocidad en el motor de inducción es igual a cero (vehículo estático).

La Condición 2 se presenta siempre que se tenga una referencia de velocidad, ya sea que aumente o que disminuya. Es decir la condición será válida siempre que el conductor se encuentre accionando el acelerador.

Finalmente, la Condición 3 es la que se activa en complemento con la Condición 2 y en relación a la Condición 1, es decir que siempre que no se esté aplicando una referencia de velocidad en la máquina, ésta se encuentra en su configuración de generador, permitiendo así enviar energía a las baterías. Esto siempre y cuando la Condición 1 no sea válida. Esta condición se presenta cuando al motor no se le aplica una velocidad de referencia, pero por la inercia del mismo o por algún par aplicado externamente, sigue produciendo una velocidad. Además se puede presentar cuando el conductor quita el pie del acelerador (el acelerador define la referencia de velocidad).

4.4.1 Simulación caso de estudio 1

Para realizar el esquema de simulación, se hace necesario el uso de las uniones de conmutación (Sección 2.7.2). La Figura 4.16 muestra el diagrama de simulación del caso de estudio 1.

Como se muestra en la Figura 4.16 se utilizan seis SPJ unión 0 para realizar la gestión de la energía absorbida o generada por la máquina de inducción. En el esquema también se puede observar en la esquina inferior derecha, el bloque del submodelo que corresponde al banco de baterías (descrito anteriormente). Se muestran varios elementos de conmutación adicionales, colocados debajo del bloque denotado como Control_Motor y en la salida del bloque Ref_T. Estos interruptores sirven para realizar la conmutación de los estados o condiciones en las líneas de flujo de señal y no de potencia como en el caso de las SPJ.

El bloque Condicion_1 (Figura 4.16 parte derecha) tiene como entrada la referencia de la velocidad de la máquina, y su salida se encuentra conectada a cuatro elementos dentro del esquema de simulación: 1) A la señal del torque de referencia, 2) Al control en el modo de generador, 3) Al control en el modo motor, y 4) A los interruptores que preceden a los 3 *MTF* del convertidor de potencia. Esta señal se encuentra conectada de esta manera, debido a que cuando se cumple la Condición 1, todo el proceso es detenido y todas las referencias son puestas en un valor de cero.

Adicionalmente en la Figura 4.16 en la esquina superior izquierda se aprecia que dos elementos *MSe* están conectados a una SPJ unión 0 (0s), donde uno de ellos proviene del valor del torque de referencia (Ref_T) y el otro de un control PI que se encuentra regulando la velocidad de la máquina. Esta parte del sistema se adiciona para implementar la Condición 3, ya que si la maquina se encuentra en su modo de operación de motor (Condición 2), no necesariamente la velocidad de la máquina debería de ser cero, sino por el contrario, se puede tener un volante de inercia, o simplemente el vehículo puede seguir con una velocidad, entonces la regulación de la velocidad por medio del control PI permite simular este efecto.

Enfocándose en la parte central de la Figura 4.16, se observan los dos bloques por medio de los cuales se implementan la transformación inversa y directa de Park, bloque superior e inferior, respectivamente. La Figura 4.17 muestra las diferentes condiciones en las SPJ.

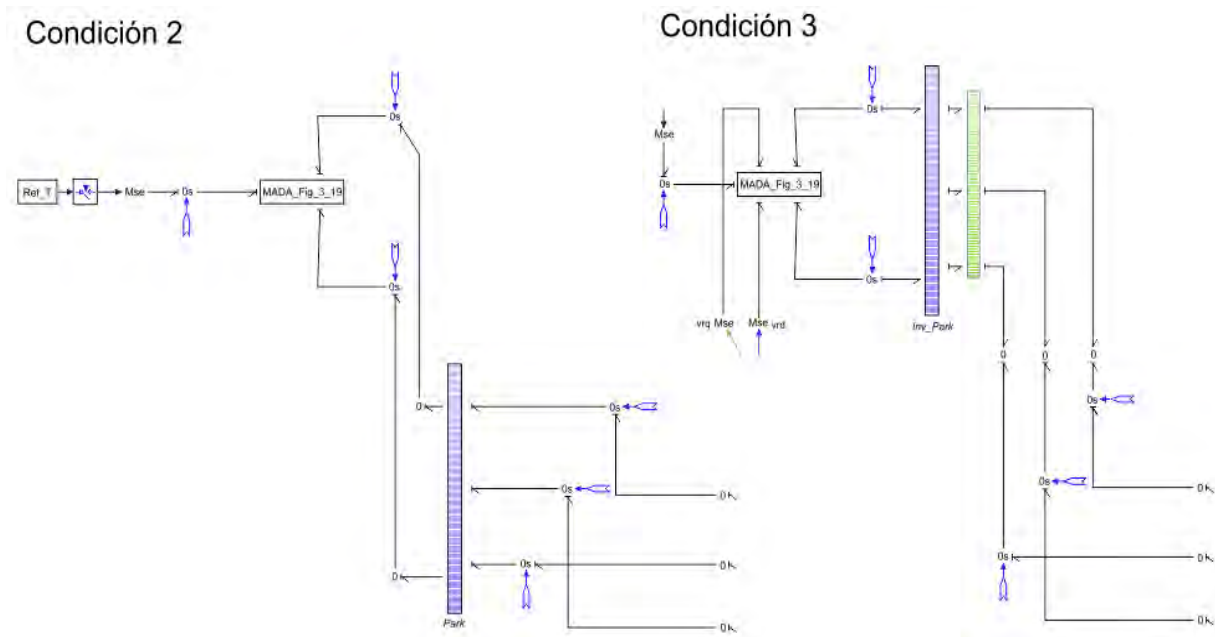


Figura 4.17 Esquema de las Condiciones 2 y 3 durante la simulación.

Cuando se activa la Condición 2, la referencia del torque está dada directamente por una señal de referencia que varía en relación con el perfil de la velocidad. Por el contrario, en la Condición 3, el torque de referencia es aplicado por medio del regulador de la velocidad, para poder simular un volante de inercia.

4.3.1.1 Escenario A

Una primera simulación se realiza considerando el escenario mostrado en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Condiciones Caso de estudio 1 – escenario A.

Instante de tiempo (s)	Condición
t=0	Condición 1. Comienzo de la simulación sin considerar condiciones iniciales en los elementos. Solamente se considera el voltaje inicial del banco de baterías.
t=1	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia.
t=151	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 150 rad/s en la velocidad de referencia.
t=180	Condición 3. Modo generador. No se aplica una referencia de velocidad, pero si se mantiene un perfil de velocidad (constante de 150 rad/s hasta t=200s, después rampa decreciente) considerando un volante de inercia o que el conductor quito el pie del acelerador. Esta condición se mantiene hasta que t=350s.

t=350	Condición 1. Sistema en reposo. La MADA no se encuentra conectada a ninguna fuente.
t=600	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia, aplicado hasta t=650s
T=650	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 50 rad/s en la velocidad de referencia.
t=1100	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa decreciente en la velocidad de referencia, aplicada hasta t=1150s
t=1150	Condición 1. Final de la simulación. Estado de reposo.

Las condiciones mostradas en la Tabla 4.2 corresponden a las condiciones explicadas anteriormente, además de que se resume cada una de las condiciones en la segunda columna de la tabla.

Los resultados de la simulación del escenario A son mostrados en la Figura 4.18.

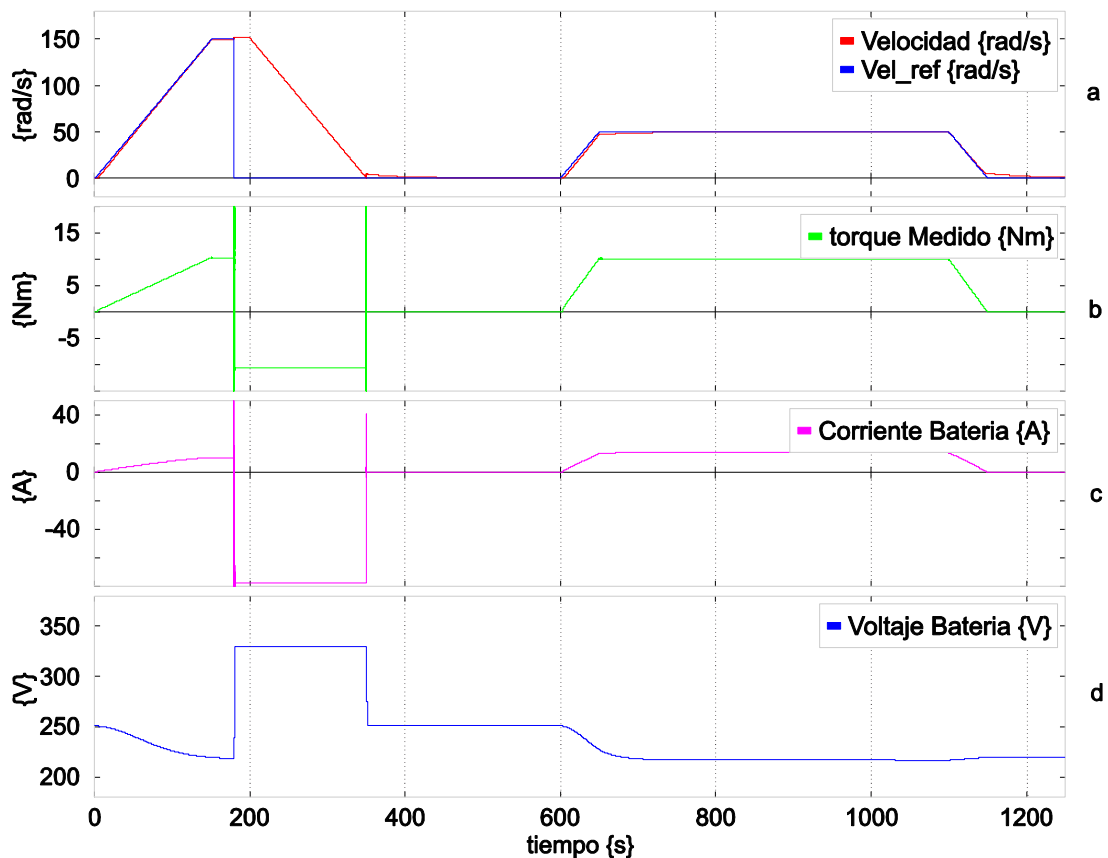


Figura 4.18 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario A – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.

Como se puede observar la Figura 4.18 coincide con las condiciones del escenario. De estos resultados es importante destacar el que corresponde al torque de la máquina de inducción (Figura 4.18b),

en el cual se observa que presenta un par negativo (modo de generador) durante 170s (de $t=180s$ a $t=350s$), y es positivo y/o cero (modo de motor) durante el resto del tiempo. El mismo caso sucede para la corriente del banco de baterías (ver Figura 4.18c), en donde la corriente se hace negativa para realizar la carga de la batería, la cual puede ser verificada por el voltaje en el banco de baterías (Figura 4.18d). El voltaje en el banco de baterías incrementa hasta un valor de 330V, y regresa inmediatamente a su valor inicial de 250V cuando la maquina regresa a su función de motor.

Es importante destacar que durante los instantes de transición $t=180s$ y $t=350s$, se presenta un periodo transitorio de alrededor de 0.5 segundos. Esto se debe a las conmutaciones en la Figura 4.19a. Estos transitorios podría reducirse o eliminarse si se consideraran condiciones iniciales adecuadas en los elementos dinámicos durante las transiciones y/o buscar alguna otra técnica que pueda ser aplicada. Sin embargo, esto no se trata en esta tesis y queda como un trabajo futuro para mejorar lo propuesto aquí.

Se hace importante también verificar los niveles de voltaje presentes en el sistema. De esta manera, la Figura 4.19a muestra las formas de onda del voltaje de salida del inversor y la Figura 4.19b el voltaje del generador, que corresponde a la entrada del voltaje para el rectificador.

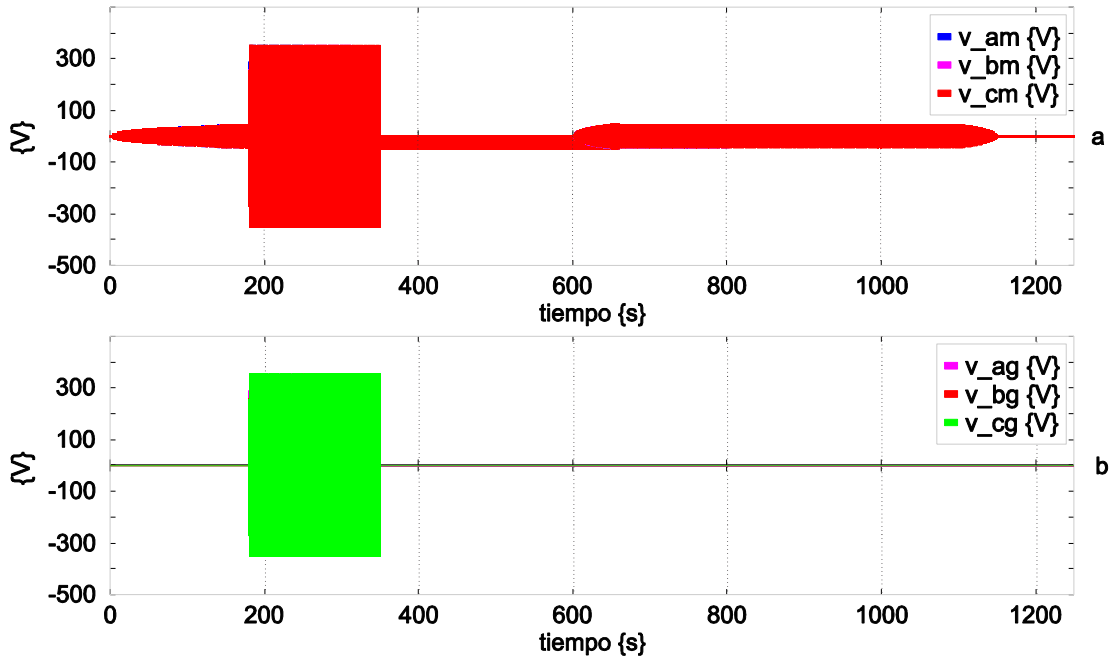


Figura 4.19 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario A – a) voltajes de salida del inversor – b) voltajes del generador.

Se observan unas pequeñas variaciones en el voltaje de salida del inversor (oscilaciones numéricas), esto es debido a que no se consideró un filtro de salida en él a fin de reducir los armónicos que genera. Es decir que la máquina de inducción funciona como filtro ella misma (devanados del estator). Por otra parte,

en la Figura 4.19b se observa el voltaje generado por la maquina cuando se encuentra el sistema de gestión en la Condición 3.

4.3.1.2 Escenario B

El siguiente escenario, es muy similar al anterior, solamente se tienen diferentes consideraciones durante la simulación. La Tabla 4.3 resume las consideraciones para este escenario.

Tabla 4.3 Condiciones Caso de estudio 1 – escenario B.

Instante de tiempo (s)	Condición
t=0	Condición 1. Comienzo de la simulación sin considerar condiciones iniciales en los elementos. Solamente se considera el voltaje inicial del banco de baterías.
t=1	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia.
t=50	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 50 rad/s en la velocidad de referencia. Esta condición se mantiene hasta t=150.
t=150	Condición 3. Modo generador. No se aplica una referencia de velocidad, pero si se mantiene un perfil de velocidad (constante de 50 rad/s hasta t=200s, después rampa decreciente) considerando un volante de inercia o que el conductor quito el pie del acelerador. Esta condición se mantiene hasta que t=250s.
t=250	Condición 1. Sistema en reposo. La MADA no se encuentra conectada a ninguna fuente.
t=600	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia, aplicado hasta t=780s
t=780	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 180 rad/s en la velocidad de referencia, hasta t=850s.
t=850	Condición 3. Modo generador. No se aplica una referencia de velocidad, pero si se mantiene un perfil de velocidad constante de 180 rad/s hasta t=1060s.
t=1060s	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 180 rad/s en la velocidad de referencia, hasta t=1100s.
t=1100	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa decreciente en la velocidad de referencia, aplicada hasta t=1280s
t=1280	Condición 1. Final de la simulación. Estado de reposo. La MADA no se encuentra conectada a ninguna fuente.

El objetivo de este escenario, es el de mostrar que para diferentes referencias de velocidad y condiciones de uso, se tiene el mismo rendimiento en el sistema de gestión de energía. Los resultados son mostrados en la Figura 4.20

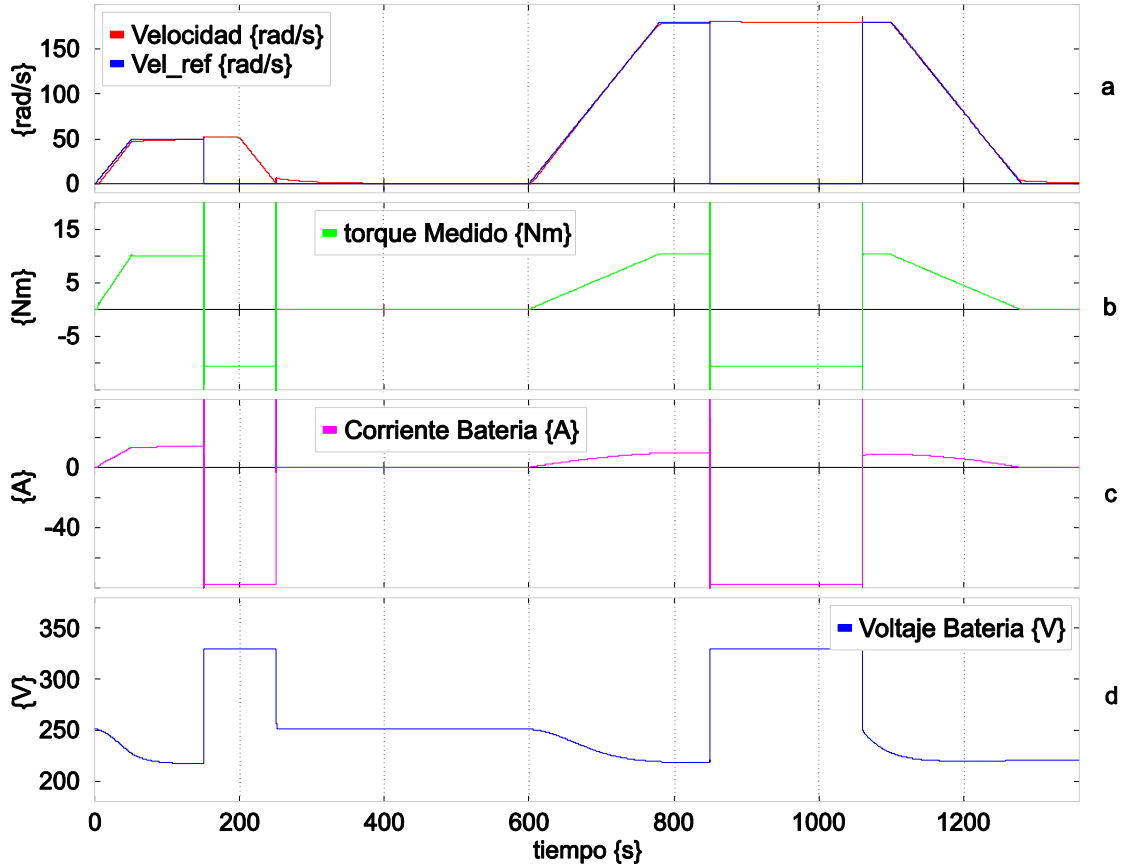


Figura 4.20 Respuestas de la simulación Caso 1, escenario B – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.

En los resultados del escenario B, se tiene el mismo resultado para los instantes menores a $t=600s$, solamente se tiene como límite una velocidad constante (50 rad/s) inferior a la utilizada en el escenario A. La segunda parte de la simulación, contrario al escenario, muestra como la velocidad se mantiene constante desde $t=850s$ y hasta $t=1060s$ cuando el sistema se encuentra en la Condición 3 (Ver Figura 4.20).

4.5 Sistema de Gestión de Energía – Caso de estudio 2

En el segundo caso de estudio se aborda la configuración propuesta del sistema de gestión de energía. Los elementos considerados para este caso son los mismos que para el caso de estudio 1, pero se adiciona la turbina eólica.

El sistema está representado por el diagrama de la Figura 3.1, el cual es mostrado nuevamente en esta sección (ver Figura 4.21) por cuestiones de claridad de la exposición.

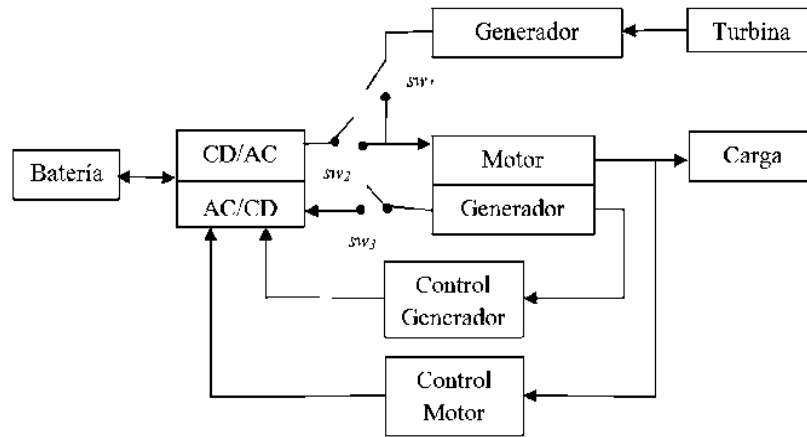


Figura 4.21 Diagrama de la configuración para el segundo caso de estudio.

En este caso de estudio, se hace necesario adicionar una condición más, la cual es llamada Condición 4 que representa la configuración del motor alimentado por la turbina de viento (Viento → Generador turbina → Motor).

De esta manera, las combinaciones de los interruptores cambian de acuerdo a la adición del interruptor correspondiente a la turbina eólica. Así, las condiciones quedan de la siguiente manera: Condición 1 = ($sw_1=0$), ($sw_2=0$) y ($sw_3=0$); la Condición 2 = ($sw_1=0$), ($sw_2=1$) y ($sw_3=0$); la Condición 3 = ($sw_1=0$), ($sw_2=0$) y ($sw_3=1$); y la Condición 4 = ($sw_1=1$), ($sw_2=0$) y ($sw_3=0$).

Las Condiciones 1, 2 y 3 tienen las mismas características que el caso de estudio anterior. Sin embargo la adición de un elemento más (turbina eólica) hace necesario definir su función dentro del sistema.

La Condición 4 está presente de manera similar a la Condición 2, es decir que se tiene que mantener una velocidad de referencia, y además se tienen que cumplir ciertas condiciones para poder cambiar de la Condición 2 a esta condición. Estas consideraciones son: que la velocidad de referencia o la velocidad de motor debe ser considerable, como para que el generador de la turbina eólica produzca el voltaje y la corriente necesaria para alimentar al motor de inducción, y que cuando se encuentra activa esta consideración, y la velocidad disminuye considerablemente, el sistema tiene que volver a la Condición 2. Lo anterior permite tener un ahorro en la energía que esta almacenada en la batería, debido a que no es utilizada cuando la Condición 4 está presente.

4.5.1 Simulación caso de estudio 2

La Figura 4.22 muestra el esquema de simulación, para el caso de estudio 2. Esta figura, solamente muestra la parte de la conexión de la turbina de viento, debido a que el resto del esquema, tiene la misma distribución que el del caso de estudio 1 (Figura 4.16).

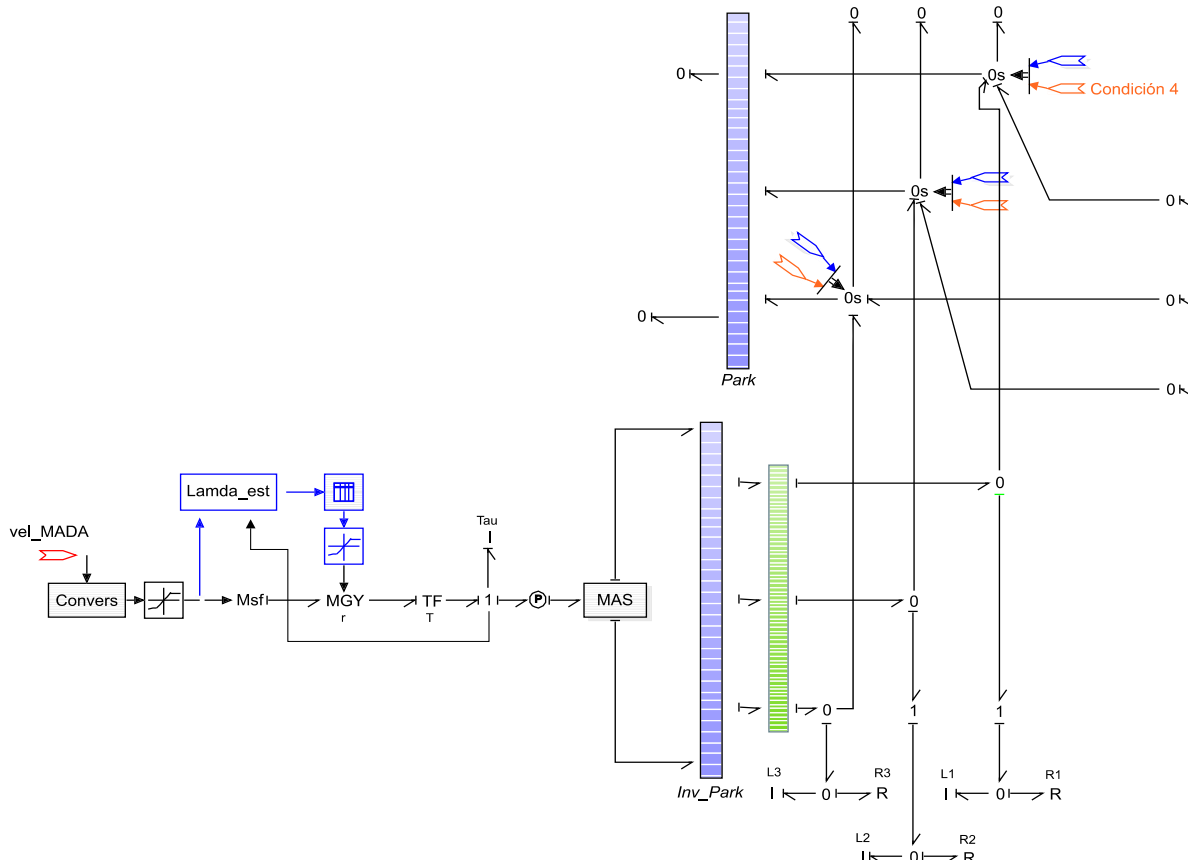


Figura 4.22 Caso de estudio 2. Esquema de simulación.

Como se observa, las tres uniones SPJ ahora tienen un bond extra, el cual proviene del modelo de la turbina eólica. Es decir, que ahora existen 2 bonds que tratan de imponer un esfuerzo en dicha unión. Es por eso que se agrega una señal más de conmutación en la SPJ. Esta señal permitirá poder elegir el bond que proviene de la turbina de viento, para que se pueda realizar una conexión directa del Motor con la turbina.

Es importante notar que para la conexión de la turbina eólica con el motor se ha agregado un filtro RC en paralelo. (Parte inferior de la Figura 4.22), esto se encuentra indicado con los componentes L_1, L_2, L_3 y R_1, R_2, R_3 para cada una de las correspondientes fases. Esto se hace necesario, debido a que no

pueden ser conectadas dos máquinas (generador-motor) en serie, debido a los devanados del estator en ambas máquinas.

Como las Condiciones 1 y 2 se siguen manteniendo, la configuración que toma cada una de ellas durante la simulación, es la misma a la mostrada en la Figura 4.17. Entonces, solo se hace necesario añadir la Condición 4, la cual es mostrada en la Figura.

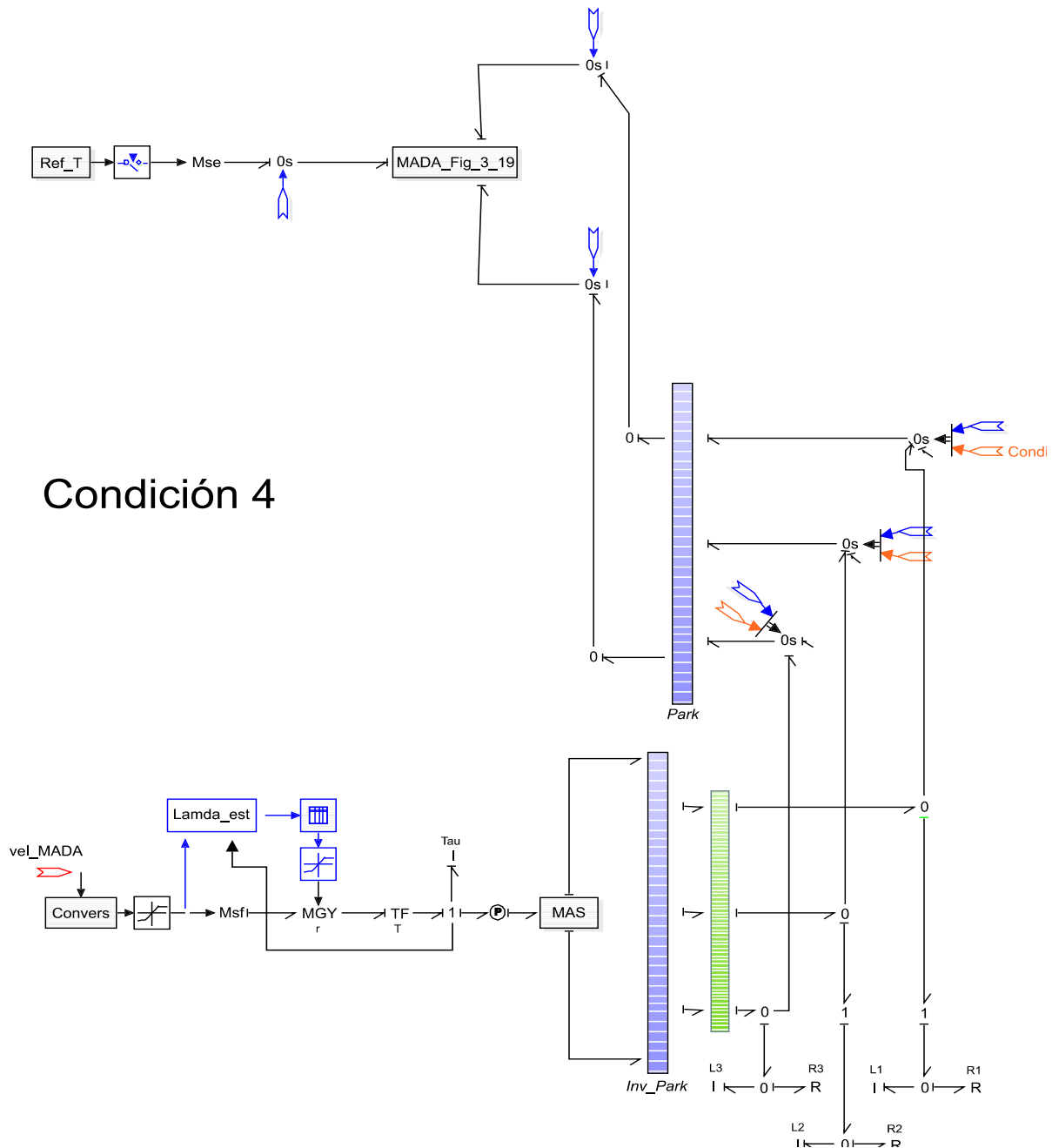


Figura 4.23 Esquema de la Condición 4 durante la simulación.

La Figura 4.23 muestra la conexión por medio del filtro en paralelo de la turbina eólica con la máquina de inducción, en su configuración de motor (Condición 2).

La Tabla 4.4 resume las consideraciones para este escenario.

Tabla 4.4 Condiciones Caso de estudio 2.

Instante de tiempo (s)	Condición
t=0	Condición 1. Comienzo de la simulación sin considerar condiciones iniciales en los elementos. Solamente se considera el voltaje inicial del banco de baterías.
t=1	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia.
t=80	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 80 rad/s en la velocidad de referencia.
t=100	Condición 3. Modo generador. No se aplica una referencia de velocidad, pero si se mantiene un perfil de velocidad (constante de 80 rad/s hasta t=150s, después rampa decreciente).
t=200	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada rampa decreciente, hasta t =280s
t=280	Condición 1. Sistema en reposo.
t=600	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa en la velocidad de referencia, aplicado hasta t=788s
t=788	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada constante de 180 rad/s en la velocidad de referencia.
t=900	Condición 4. Modo turbina. El motor es alimentado por la turbina eólica y la energía de la batería es ahorrada. La velocidad del motor es mantenida constante en el valor de 180 rad/s. Esto es aplicado hasta el instante t=1000s
t=1000	Condición 2. Modo motor. Se regresa a esta configuración con un perfil de entrada constante de 180 rad/s, aplicada hasta t=1100s
t=1100	Condición 2. Modo motor. Perfil de entrada tipo rampa decreciente de 180 rad/s a 0 rad/s, aplicada hasta t=1280s
t=1280	Condición 1. Final de la simulación. Estado de reposo. La MADA no se encuentra conectada a ninguna fuente.

La Figura 4.24 muestra los resultados obtenidos durante la simulación. En esta se observa como el perfil de la velocidad es mantenido en ambos casos, en los cuales se cambia a la Condición 3 y a la Condición 4, para los instantes de t=100s a t=150s y el de t=900s a t=1000s, respectivamente (ver Figura 4.24a). Al igual que en el caso anterior, en los instantes de conmutación entre cada una de las condiciones, se presentan algunas oscilaciones y valores considerables (en comparación con los valores de estado estable o durante los cuales no existe una conmutación).

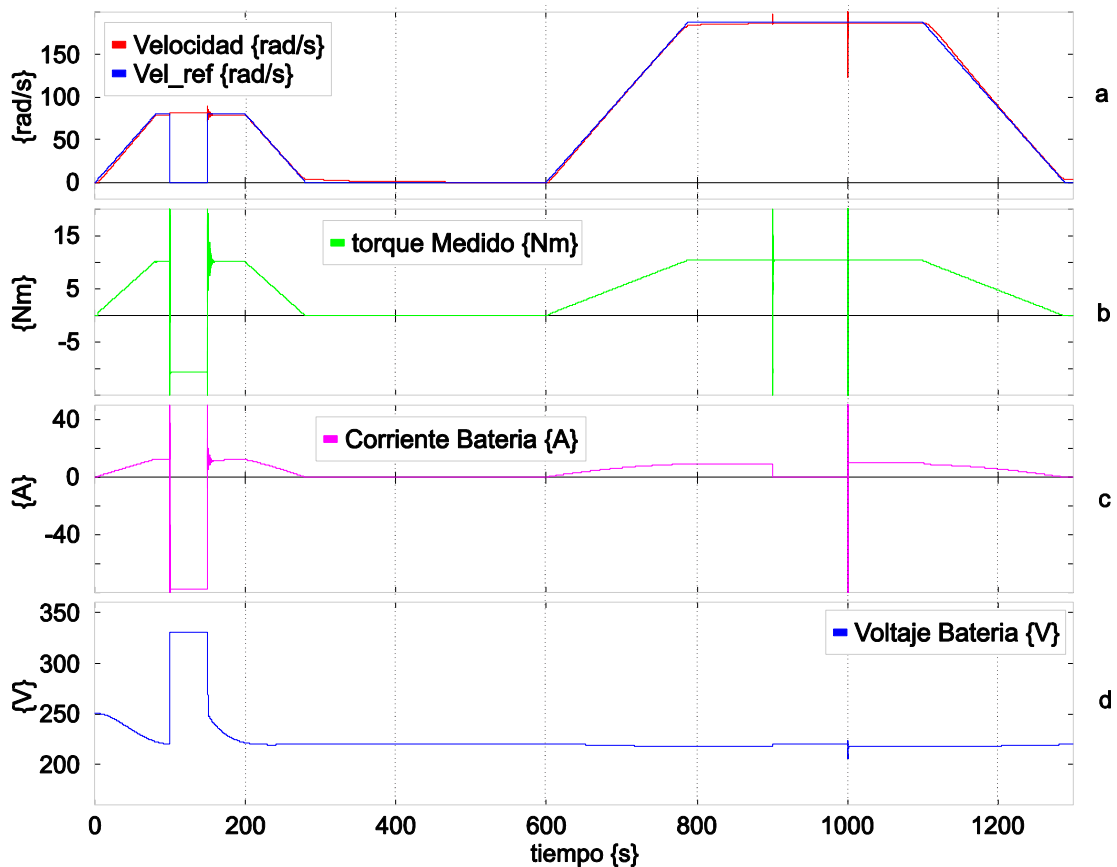


Figura 4.24 Respuestas de la simulación Caso 2 – a) Velocidad – b) Torque – c) Corriente batería – d) Voltaje batería.

En lo que se refiere al torque (Figura 4.24b) y a la corriente del banco de baterías (Figura 4.24c), se tiene el mismo perfil en ambas respuestas. El torque cambia de un valor de 10Nm en su Condición 2 a un valor de -77Nm en la Condición 3, y se mantiene en los 10Nm cuando se está en la Condición 4, esto debido a que la potencia la está suministrando la turbina eólica y no el convertidor de potencia. Un caso similar sucede con la corriente de la batería, y se destaca que la corriente en la batería es cero cuando la Condición 4 está presente (ver Figura 4.24c). Finalmente, la condición anterior es verificada en la Figura 4.24d, donde el voltaje del banco de baterías se mantiene constante cuando la turbina eólica está conectada y se carga el banco de baterías cuando está presente el modo de generador.

De este caso de estudio, se puede concluir que al incluir una turbina eólica en el sistema, esta permite realizar un ahorro de la energía almacenada en el banco de baterías. Lo que no es posible realizar es la recarga de la batería por medio de la energía generada por la turbina eólica, debido a que esta tienen que estar proporcionando su energía al motor. Lo anterior se podría realizar si se tuvieran, por ejemplo un grupo de turbinas eólicas de baja potencia conectadas, entonces unas podrían ser reservadas para recargar

el banco de baterías y otras para alimentar directamente al motor. Para el caso de estudio presentado en esta tesis, esto no se consideró, si no que se tiene una sola turbina eólica capaz de proporcionar la energía suficiente para alimentar al motor de inducción.

4.6 Conclusiones

En este capítulo se desarrolló el sistema de gestión de energía de la máquina de inducción.

Se presentaron las diferentes leyes de control necesarias para cada uno de los dispositivos.

Así, primeramente se presentó la ley de control para el funcionamiento como motor de la máquina de inducción. Para lo anterior, se utiliza un control vectorial tradicional, el cual es simplemente aplicado al modelo en bond graph de la máquina de inducción.

Se describe la ley de control para el funcionamiento como generador de la máquina, así como también su simulación. Esto para verificar el comportamiento que presenta el generador.

Una vez expuestas las leyes de control, se realizó el sistema de gestión de energía. Esto se realiza considerando 4 condiciones de uso y/o configuraciones del sistema. De estas cuatro condiciones, solamente 3 fueron utilizadas para el caso de estudio 1. Donde se consideró la estructura de conexión tradicional y se verificó su correcto funcionamiento por medio de dos escenarios de simulación. Para el caso de estudio 2, se incorporó el modelo del aerogenerador, lo cual permitió que la energía del sistema completo, y específicamente, del banco de baterías realizará un ahorro de su energía. Esto se mostró mediante el escenario de simulación elegido para este caso de estudio.

Detalles en cuanto a la simulación del sistema de gestión quedan pendientes para trabajos posteriores, tal y como es el caso de tratar de reducir o eliminar los transitorios durante las conmutaciones de la uniones de potencia.

Capítulo 5

5 Conclusiones y trabajos futuros

5.1 Conclusiones

En esta tesis se realizó el desarrollo de un sistema de gestión de energía aplicado a un vehículo eléctrico, para lo cual se utilizó la metodología de bond graph como herramienta de modelado en los diferentes elementos que componen el sistema. Esto debido a que esta metodología represento de manera gráfica el sentido de la potencia y/o energía dentro del sistema completo.

Las contribuciones principales de esta tesis, se centran en el sistema de gestión de la energía y también en la propuesta de una configuración que mejora la gestión de la energía. Esta propuesta de configuración, en comparación con la configuración tradicional (banco de baterías y motor/generador de inducción), toma en cuenta la adición de un aerogenerador con el objetivo de realizar un ahorro de la energía almacenada en la batería cuando el motor es alimentado directamente con el aerogenerador. Esto se mostró con la simulación del caso de estudio 2.

Los elementos de conmutación fueron una parte importante en el sistema, ya que estos permiten realizar el modelado de la conexión y desconexión de elementos en ciertos instantes de tiempo. Para lo anterior, las bases de estos elementos modelados en bond graph fueron expuestas, para posteriormente hacer uso de ellos cuando se desarrolla el sistema de gestión de energía.

Además del modelo de los interruptores, se presentaron también los modelos de la máquina de inducción, el convertidor de potencia bidireccional, el banco de baterías, y de una turbina eólica. La verificación de cada uno de los modelos se realizó de manera individual por medio de simulaciones, para posteriormente adicionar cada modelo al sistema completo.

Se presentaron las leyes de control necesarias de manera individual o local para cada uno de los elementos. Estas permitieron verificar el rendimiento de cada una de ellas. Una vez presentadas, estas leyes de control fueron agrupadas con las uniones de conmutación para formar así el sistema de gestión de energía.

Se presentaron dos casos de estudio en esta tesis. Si bien los casos se encuentran enfocados en un vehículo eléctrico, estos pueden ser aplicados en cualquier otro sistema que contemple la misma configuración presentada en ésta tesis.

Con los casos presentados se comprobó que el sistema de gestión funciona de una manera correcta.

5.2 Trabajos futuros

Un primer trabajo futuro es el de mitigar las oscilaciones presentes en los intervalos de conmutación. Una primera opción para la mitigación de las oscilaciones, es hacer el uso de modelos simplificados y o reducidos de los diferentes elementos que componen al sistema.

El sistema de gestión de energía puede ser aplicado a un sistema eléctrico que contenga diferentes fuentes de generación de energía, así como de almacenamiento de las misma, es decir, a un sistema inteligente (Smart grid).

Considerar un conjunto de pequeñas turbinas eólicas y reservar algunas de ellas para realizar la recarga del banco de baterías.

Realizar la implementación en un simulador de tiempo real del sistema de gestión propuesto, programando las leyes de control y el sistema de gestión en un dispositivo externo y simular todos los componentes en el simulador.

V. Bibliografía

20Sim. (2016). Recuperado el 23 de Julio de 2016, de <http://www.20sim.com/>

Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons.

Amjadi, Z., & Williamson, S. S. (2010). Power-electronics-based solutions for plug-in hybrid electric vehicle energy storage and management systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* , 57 (3), 608-616.

Bordons, C. G.-T. (2015). *Gestión Óptima de la energía en Microrredes con Generación Renovable*. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(2), 117-132.

Borutzky, W. (2011). *Bond graph modelling of engineering systems* (2nd ed.). New York: Springer.

Cabo de Guzmán Domínguez, S. (2011). *Estudio preliminar de las itv para vehículos híbridos y eléctricos*.

Casacca, M. A. (1996). *Lead acid battery storage configurations for improved available capacity*. *IEEE transactions on energy conversion*, 11(1), 139-145.

Chau, K. T. (2007). Design of a magnetic geared outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles. *IEEE Transactions on Magnetics* , 43 (6), 2504-2506.

Cherry, C. R., Weinert, J. X., & Xinmiao, Y. (2009). Comparative environmental impacts of electric bikes in china. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* , 14 (5), 281-290.

Dauphin-Tanguy, G. (2000). *Les Bond Graphs*. Hermes Science.

Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2010). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design* (2nd ed.). Boca Raton FL: CRC Press Taylor and Francis Group.

Flórez, G. A. (2006). *Modelación y Simulación del Control Vectorial por Campo Orientado del Motor de Inducción basado en el Método Indirecto*. Pamplona, Colombia: Tesis de Licenciatura. Universidad de Pamplona.

Franco, C. J., & Baena, A. I. (2010). Dinámica de la penetración de tecnologías alternativas para vehículos automotores y su impacto en las concentraciones de carbono atmosférico. *Revista Avances en Sistemas e Informática* , 7 (2), 1-8.

García, A., & Reyes, J. (2015). Patenting, trajectory and characteristics of automotive batteries: the case of hybrid cars. *Entreciencias* , 3 (6), 41-56.

Gawthrop, P. J. (1995). Bicausal bond graph. In Proceedinf of the international Conference on Bond Graph Modeling and Simulation.

Gawthrop, P. J. (2007). *Peter J. Gawthrop, and Geraint P. Bevan, Bond-Graph.*

Gerónimo, C. Y. (2015). *Motores Magnéticos para los Generadores de los Autos Eléctricos o Híbridos.* Universidad Nacional del Callao. Sección de Post Grado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Gutiérrez Gómez, A. d., & Escobedo de la Cruz, B. (2014). Alba: Tecnología Sustentable. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa* , 1-13.

Hadley, S. W., & Tsvetkova, A. (2009). Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation. *The Electricity Journal* , 22 (10), 56-68.

Howell, R., Qin, N., Edwards, J., & Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy* , 412- 422.

Junco, S., Diéguez, G., & Ramírez, F. (2007). On commutation modeling in bond graphs. *SIMULATION SERIES* , 39 (1), 12.

Karnopp, D. C., Margolis, D. L., & Rosenberg, R. C. (2006). *System dynamics, Modeling and simulation of mechatronic systems.* USA: Wiley.

Krause, P. C. (2002). Sudhoff,“Analysis of Electric Machinery and Drive Systems”. IEEE ress.

Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems* (3rd ed.). Wiley-IEEE Press.

Manzano Guillen, J. G. (2011). *Mercado de la Motocicleta de Combustión Interna y Oportunidades de la Industria de la Motocicleta Eléctrica.* Madrid: Tesis de licenciatura. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica.

Marín, D. (2009). *Wind Integration in Island Networks.* Lille, France: PhD. Thesis.

Meissner, E. &. (2003). *Battery monitoring and electrical energy management: Precondition for future vehicle electric power systems.* *Journal of power sources*, 116(1), 79-98.

Ménard, L. F. (2010). Dynamic energy model of a lithium-ion battery. *Mathematics and computers in simulation.* *Mathematics and Computers in Simulation* , 81 (2), 327-339.

Menchaca Torre, H. L. (2013). *Desempeño de un vehículo híbrido y su contraparte de combustión interna bajo condiciones de manejo de una ciudad mexicana.* *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(2), 219-230.

Muyeen, S. M., Hasan, M. D., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, T., Tomaki, Y., y otros. (2007). Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models. *IET Renewable Power Generation.* , 1 (2), A. Sakahara and E. Sasano.

- Ngwompo, R. F., Scavarda, S., & Thomasset, D. (1996). Inversion of linear time-invariant SISO systems modelled by bond graph. *J. Franklin Inst.* , 2, 157-174.
- Ordóñez, C. P. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible: http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11805/PFC_Carlos_Pena_Ordonez.pdf.
- Patiño, C. (2016). *Diseño de una turbina de levitación magnética en el dominio físico*. Morelia, Michoacan: Tesis de Maestría.
- Patiño, C., Tapia, R., Medina, A., & Fuerte, C. (2014). Wind turbine inverse control: A bond graph approach. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC).
- Pérez, L. O. (2002). *Simulación de un Vehículo Eléctrico Experimental. Análisis del XVIII Congr. Arg. de Control Autom.*
- Petru, T., & Thiringer, T. (2002). Modeling of wind turbines for power system studies. T. Petru and T. Thiringer: IEEE Transaction on Power Systems.
- Pírez, P. (. (2000). *Relaciones de poder y modelos de gestión: la energía eléctrica en la ciudad de Buenos Aires, 1900-1960*. *Desarrollo Económico*, 97-120.
- Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de potencia*. México: Pearson educación.
- Sampietro, J. L. (2015). Control predictivo económico de vehículos híbridos basados en pilas de combustible. In *Actas de las XXXV Jornadas de Automática* , 871-879.
- Sánchez, S. (2008). *Diseño de Técnicas de Control No Lineal Clásica, Inteligentes y Lineal Sobre el Motor de Inducción*. Tesis de Maestría. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Tapia, G., Tapia, A., Zubia, I., Ostolaza, X., & Saenz, J. R. (2001). Electrical fault simulation and dynamic response of a wind farm. G. Tapia, A. Tapia, I. Zubia, X. Ostolaza and J. R. Saenz: International Conference on Power and Energy Systems.
- Tapia, R., & Medina, A. (2015). Doubly-fed wind turbine generator control: A bond graph approach. *Simulation Modelling Practice and Theory* , 53, 149-166.
- Thounthong, P., Raël, S., & Davat, B. (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources* , 193 (1), 376-385.
- Umarikar, A. a. (2005). *Modelling of switching systems in bond graphs using the concept of switched power junctions*”, *J. Franklin Institute*, 342, 131-147.
- Won, J. S. (2005). Intelligent Energy Management Agent for a Parallel Hybrid Vehicle-Part II: Torque Distribution, Charge Sustenances Strategies, and Performance Results. *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* , 54 (3), 935-953.
- Zayas, A. (2014). *Gestión total eficiente de la energía eléctrica*. Doctoral Dissertation. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

