



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE
UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO UTILIZANDO OPAL-RT**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta:

CARLOS GARCIA FULGENCIO

Director de Tesis:

Dr. J. AURELIO MEDINA RIOS

Morelia, Michoacán, México
Agosto de 2017



ANÁLISIS TEÓRICO- EXPERIMENTAL DE LA OPERACIÓN DINÁMICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO UTILIZANDO OPAL-RT

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de *Carlos García Fulgencio*

Dr. Antonio Ramos Paz
Presidente del Jurado

Antonio Ramos Paz

Dr. J. Aurelio Medina Rios
Director de Tesis

J. Aurelio Medina Rios

Dr. Roberto Tapia Sánchez
Vocal

Roberto Tapia Sánchez

Dra. Elisa Espinosa Juárez
Vocal

Elisa Espinosa Juárez

Dr. Fernando Martínez Cárdenas
Revisor Externo (ITM)

Fernando Martínez Cárdenas

Dr. Félix Calderón Solorio
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas).*

Félix Calderón Solorio

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Agosto 2017

Le dedicó este trabajo de tesis a mi familia por sus esfuerzos de apoyarme para continuar con mi formación académica, a mis profesores por la apoyo prestado, a mi asesor por su apoyo, paciencia y confianza, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo prestado para realizar este estudio.

Agradecimientos

- Agradezco al señor de la misericordia y la virgen maría (en especial a la medalla milagrosa) por brindarme sabiduría y paciencia para seguir adelante en mi camino acompañandome tanto en lo buenos como en los malos momentos.
- Agradezco a los integrantes de la mesa sinodal el Dr. Antonio Ramos Paz, Dr. Aurelio Medina Rios, Dr. Roberto Tapia Sánchez, Dra. Elisa Espinoza Juárez y al Dr. Fernando Martínez Cárdenas por aprobar ésta tesis.
- Agradezco a mi papá Carlos García Pimentel y mi mamá Epifania Hueramo Fulgencio por acompañarme todos los momentos de mi vida. También a mi hermana Areli García Fulgencio y mi tía Jacinta Hueramo Fulgencio por su apoyo y compañía.
- Agradezco a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica por haberme abierto sus puertas para continuar mis estudios de nivel maestría dentro del campo de los sistemas de potencia, así como también a todos los docentes que brindaron sus conocimientos y su apoyo para continuar en este camino.
- Agradezco también a mi Asesor de Tesis el Dr. J. Aurelio Medina Rios por su apoyo, paciencia y orientación durante todo el desarrollo de ésta tesis.
- Agradezco ampliamente al concejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.
- Agradezco al Dr. Roberto Tapía Sánchez, por sus consejos en el manejo del simulador en tiempo real OPAL-RT. También al M.C José Luis Guillen Aguirre por la enseñanza y manejo de Latex. Además al M.C José Alberto Ávalos González por las asesorías brindadas en el manejo del equipo de laboratorio.

- Agradezco a mis compañeros Juan Luis , Gilberto Suárez,Ricardo, Salvador, Febe, Macario, Napoleón, Carlos Ceja, Balwin, Gilberto Orozco y leonel por los consejos e ideas compartidas.

Resumen

En ésta tesis se presenta el modelo de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico implementado en el simulador en tiempo real OPAL-RT. En el proceso de conversión de CD/AC se emplea un inversor de tres ramas. Para la reducción de contenido armónico en el voltaje de salida del inversor se usó un filtro pasivo LC.

Para la acción de seguimiento de fase se usa un *PLL* de la biblioteca de Simulink para mantener la sincronización entre el sistema híbrido eólico-fotovoltaico. La técnica que se emplea para realizar la conmutación del inversor se conoce como modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM). La técnica mencionada anteriormente y los modelos se encuentran implementados en la plataforma de Matlab y Simulink. Los modelos de los componentes que integran el sistema híbrido eólico-fotovoltaico se implementan con bloques de la biblioteca de Simulink.

Se describe la realización de pruebas de laboratorio para algunos elementos y conocer sus parámetros, como el generador de inducción y el transformador trifásico de tres devanados. Para conocer el valor de los elementos pasivos se emplea equipo de medición para determinar sus parámetros, tales como las resistencias, capacitores e inductancias.

El voltaje de CD que entra al inversor se emuló con una fuente de alimentación fija y el generador eólico con un generador de inducción con banco de capacitores acoplado a un dinamómetro de cuatro cuadrantes girando a velocidad constante.

Se realiza una comparación entre las formas de onda obtenidas de la simulación y la experimentación. Además, se hace un estudio de la distorsión armónica existente en estas formas de onda. Para la validación de resultados, se utiliza Matlab-Simulink®, equipos de laboratorio y el simulador en tiempo real OPAL-RT disponible en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la DEP-FIE.

Palabras clave: Inversor, SPWM, Filtro LC, Seguimiento de fase, simulación en tiempo real.

Abstract

In this thesis, a hybrid wind-photovoltaic system implemented in the real time simulator OPAL-RT is reported. For the DC/AC conversion process a three-branch inverter is used. To mitigate the voltage harmonic content at the inverter output a passive LC filter is used.

For the phase tracking action, a *PLL* from the Simulink® library is used to maintain the synchronism between the hybrid wind-photovoltaic system. The technique used for the inverter commutation is called sinusoidal pulse width modulation (SPWM). This technique and the developed models are implemented in the Matlab Simulink® platform, i.e. in the blocks of the Simulink® library.

Laboratory tests are conducted in electrical components, such as the induction generator and three-phase three-winding transformer, to determine their parameters. Measurement equipment is used to determine the passive elements parameters, such as resistances, inductances and capacitances.

The DC voltage at the inverter input is emulated through a fixed supply source and the wind generator through an induction generator with a capacitor bank coupled to a four-quadrant dynamometer rotating to a constant speed.

A comparison is performed between waveforms obtained through simulation and those obtained through measurements. An assessment of harmonic distortion of the obtained waveforms is conducted. The validation of results exercise is conducted using Matlab-Simulink®, laboratory equipment and the real time simulator OPAL-RT, available at the Electrical Machines Laboratory of the DEP-FIE.

Keywords: Inverter, SPWM, Filter LC, Phase Locked-Loop, Real-time simulation.

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Contenido	XI
Lista de Figuras	XV
Lista de Tablas	XIX
Lista de Abreviaturas y Símbolos	XXI
1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Energías renovables	2
1.1.2. Desarrollo histórico de la energía eólica	2
1.1.3. La Turbina eólica	3
1.1.4. Modos de operación de la turbina eólica	4
1.1.5. Parque eólico	5
1.1.6. Generación distribuida	6
1.1.7. Energía solar	6
1.1.8. Tipos de radiación solar	7
1.2. La celda fotovoltaica	8
1.2.1. Descripción del sistema híbrido eólico-fotovoltaico	9
1.3. Descripción general del problema.	15
1.4. Justificación.	15
1.5. Objetivos.	16
1.5.1. Objetivo general.	16
1.5.2. Objetivos particulares.	16
1.6. Metodología.	17
1.7. Aportaciones.	18
1.8. Descripción de capítulos.	18
2. MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTÁICO.	21
2.1. Introducción.	21
2.2. Modelado de componentes del sistema híbrido.	21

2.2.1. Modelo del generador de inducción	22
2.2.2. Modelo del panel fotovoltaico.	28
2.2.3. Modelo de convertidor CD-CD <i>boost</i>	34
2.2.4. Algoritmo de conductancia incremental	35
2.2.5. Esquema del inversor de tres ramas	38
2.2.6. Filtro pasivo LC	39
2.2.7. Transformador trifásico estrella-estrella aterrizada	41
2.2.8. Módulo de sincronización	42
2.3. Construcción SPWM para el inversor de tres ramas	43
2.4. Cálculo de la distorsión armónica total de una señal	45
2.5. Conclusiones.	46
3. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS NUMÉRICO Y DIGITAL.	47
3.1. Introducción.	47
3.2. Métodos de solución numérica.	47
3.2.1. Método de RK4 para una ecuación diferencial	48
3.2.2. Método de RK4 para un sistema de ecuaciones diferenciales	48
3.2.3. Método de Newton Raphson	51
3.3. Solución del panel fotovoltaico con el método de Newton-Raphson	51
3.4. Solución del convertidor boost con el método RK4	53
3.5. Conclusiones	56
4. SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL CON OPAL-RT.	57
4.1. Modo de operación del OPAL-RT Technologies	57
4.1.1. Generación y captura de señales analógicas	61
4.1.2. Generación y captura de señales digitales	66
4.1.3. Adquisición de voltajes y corrientes con OPAL-RT.	72
4.2. Registro de la velocidad de giro del rotor del dinamómetro usando OPAL-RT	74
4.3. Rectificador trifásico no controlado	79
4.4. Máquina de inducción jaula de ardilla en operación motor	81
4.5. Conclusiones	83
5. CASOS DE ESTUDIO	85
5.1. Introducción.	85
5.1.1. Esquemas implementados del sistema híbrido eólico-fotovoltaico	85
5.2. Caso I: Estudio del sistema híbrido eólico-fotovoltaico en el lado del aerogenerador a velocidad constante	87
5.2.1. Análisis de la corriente en el generador eólico	89
5.3. Caso II: Estudio del sistema híbrido eólico-fotovoltaico analizado en el lado del panel con voltaje constante	90
5.3.1. Descripción de la operación ideal entre el panel fotovoltaico y el convertidor elevador <i>boost</i>	90
5.3.2. Interacción del algoritmo MPP con el panel y el convertidor <i>boost</i>	92
5.3.3. Respuesta dinámica del panel fotovoltaico y voltaje a la salida del convertidor elevador <i>boost</i>	93

5.3.4. Proceso de conversión de CD/CA con el inversor de tres ramas	95
5.3.5. Análisis de contenido armónico para una rama del inversor	99
5.3.6. Seguimiento de fase con el PLL de Simulink	105
5.4. Caso III: Sistema Eólico-Fotovoltaico con carga resistiva	106
5.4.1. Equipo de simulación empleado y esquemas de simulación	108
5.5. Conclusiones	116
6. CONCLUSIONES GENERALES Y SUGERENCIAS DE TRABAJO A FUTURO.	119
6.1. Sugerencias para Trabajo a Futuro	120
A. Convertidor elevador boost	123
B. RT-LAB	125
C. Biblioteca de RT-LAB en Simulink	127
C.1. Bloque principal de comunicación OpCtrl	128
C.2. Archivos requeridos para hacer pruebas con Opal-RT	129
D. Módulo OP5600 de OPAL-RT	131
E. Módulo OP8660 de OPAL RT	133
F. TROCEADOR/INVERSOR IGBT 8857-12 Lab-Volt	135
G. Máquina de Inducción 8505-A0 Lab-Volt	139
G.0.1. Prueba de vacío	140
G.0.2. Prueba de rotor bloqueado	140
G.0.3. Prueba de CD	140
G.0.4. Momento de inercia	140
H. Transformador Trifásico 8372-02 Lab-Volt	143
REFERENCIAS	147

Lista de Figuras

1.1. Disposición de las turbinas eólicas en un parque.	5
1.2. Tipos de radiación solar	8
1.3. Celda fotovoltaica [Boley, 2012]	9
1.4. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico	10
2.1. Máquina de inducción de rotor devanado.	23
2.2. Circuito equivalente para la máquina de inducción en el eje q	23
2.3. Circuito equivalente para la máquina de inducción en el eje d	24
2.4. Circuito equivalente para la máquina de inducción en 0	25
2.5. Esquema de la celda fotovoltaica [Masters, 2004]	29
2.6. Modelo del panel fotovoltaico implementado en Simulink [Villalva <i>et al.</i> , 2009a]	31
2.7. Curvas de V_{CD} vs I_{CD} del panel fotovoltaico KC200GT	32
2.8. Curvas de V_{CD} vs P_{CD} del panel fotovoltaico KC200GT	33
2.9. Curvas de V_{CD} vs I_{CD} variando el nivel de irradiación G en KC200GT	33
2.10. Circuito eléctrico del convertidor <i>boost</i>	34
2.11. Modelo promedio del convertidor <i>boost</i> por ([Van <i>et al.</i> , 1995])	34
2.12. Algoritmo de conductancia incremental	37
2.13. Topología del inversor de tres ramas	38
2.14. Circuito para una rama del filtro LC [Hayt <i>et al.</i> , 2007]	39
2.15. Diagrama de magnitud y fase para el filtro LC	40
2.16. Transformador trifásico conexión estrella-estrella aterrizada [Chapman, 2012]	41
2.17. Módulo de sincronización	42
2.18. Esquema de sincronización entre dos fuentes de generación trifásicas	43
2.19. Generación SPWM	44
2.20. Esquema de Conmutación del Inversor	44
3.1. Algoritmo para la ecuación del panel fotovoltaico utilizando Newton-Raphson	52
3.2. Esquema de solución del convertidor elevador boost	54
3.3. Esquema de panel fotovoltaico y convertidor elevador boost	55
3.4. Respuesta del convertidor <i>boost</i> : a) corriente $i_{L_{boost}}$ y b) el voltaje v_o	55
4.1. Orden de la instalación de los programas de OPAL-RT en la computadora portátil	58
4.2. Comunicación entre la computadora portátil y OPAL-RT	59

4.3. Estructura maestro y consola del archivo en Simulink	59
4.4. Proceso para cargar el modelo de Simulink en OPAL-RT	60
4.5. Esquema para generación y adquisición de una señal analógica con OPAL-RT	61
4.6. Estructura maestro y consola en Simulink para analizar formas de onda	62
4.7. Modelo en el maestro para generar las señales analógicas	62
4.8. Visualización y selección de formas de onda en la consola	63
4.9. Señal senoidal: a) Simulación y b) Adquisición	63
4.10. Análisis: a) Periodo de onda senoidal y b) Contenido armónico	64
4.11. Señal triangular: a) Simulación y b) Adquisición	64
4.12. Período de la señal triangular analizada	65
4.13. Análisis: a) Periodo de onda triangular y b) Contenido armónico	66
4.14. Modelo en el maestro para generar señal digital	67
4.15. Modelo contenido en la consola para visualizar la señal digital	67
4.16. Conexión para generación y adquisición de señales digitales con OPAL-RT	68
4.17. Señal PWM: a) Simulación y b) Adquisición	68
4.18. Opciones del bloque PWM Out de OPAL-RT	69
4.19. Esquema de conexión de OPAL-RT para generar y visualizar las señales PWM	70
4.20. Señales PWM: a) SW1, b) SW2, c) SW3, d) SW4, e) SW5 y f) SW6	71
4.21. Modelo contenido en el maestro para generar señal PWM con OPAL-RT	71
4.22. Circuito trifásico con carga Resistiva	72
4.23. Voltajes abc de fase a neutro en carga resistiva: a) Medición y b) Simulación	73
4.24. Simulación del circuito con carga resistiva en estrella con OPAL-RT	73
4.25. Corrientes abc en carga resistiva: a) Medición y b) Simulación	74
4.26. Conexión física para registrar velocidad del dinamómetro con OPAL-RT	77
4.27. Modelo contenido en el maestro para la registrar frecuencia del dinamómetro con OPAL-RT	77
4.28. Contenido del esclavo para visualizar los datos de velocidad del rotor en r.p.m	78
4.29. Ventana principal para control del dinamómetro	78
4.30. Registro de velocidad del dinamómetro a través de OPAL-RT	79
4.31. Voltajes de entrada y voltaje de CD a la salida del rectificador trifásico	80
4.32. Sensado de voltajes, corrientes y velocidad del motor de inducción	81
4.33. Variables medidas en la máquina de inducción jaula de ardilla operando como motor: a) voltajes, b) corrientes y c) velocidad del rotor	82
5.1. Esquema implementado del sistema del sistema eólico	86
5.2. Esquema implementado del sistema fotovoltaico	86
5.3. Esquema de conexión del sistema eólico	87
5.4. Formas de onda de voltaje V_{Ag} , V_{Bg} , V_{Cg} de generador de inducción	88
5.5. Puntos de medición de corrientes i_{Ag} , i_{Bg} e i_{Cg} en generador eólico	89
5.6. Corrientes i_{Ag} , i_{Bg} e i_{Cg} del generador eólico	89
5.7. Simulación del panel con el convertidor <i>boost</i>	91
5.8. Curva característica P-V del panel fotovoltaico y MPP	92
5.9. Interacción de algoritmo MPP, convertidor <i>boost</i> y el panel.	93
5.10. Comportamiento del voltaje del panel debido al convertidor <i>boost</i>	94
5.11. Comportamiento de la corriente del panel debido al convertidor <i>boost</i>	94

5.12. Voltaje de CD a la salida del convertidor <i>boost</i>	95
5.13. Voltaje de CD fijo suministrado a la entrada del inversor	95
5.14. Esquema de conexión entre el inversor trifásico y PLL	96
5.15. Generación de SPWM en rama 1 para SW1 y SW4	97
5.16. Tiempo muerto entre señales SPWM de SW1 y SW4	97
5.17. Variación de la forma de la portadora con el tamaño de paso T_s	98
5.18. Señales digitales SPWM en: a) rama 1, b) rama 2 y c) rama 3	99
5.19. Punto de análisis de armónicos dominantes en el inversor	100
5.20. Forma de onda medidas entre: a) Fa-P, b) Fb-P y c) (Fa-P)-(Fb-P)	100
5.21. Comparación entre armónicos de voltaje en punto (Fa-P)	102
5.22. Esquema de medición en inversor y filtro LC	102
5.23. Formas de onda de V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del filtro LC	103
5.24. Formas de onda de las corriente i_a , i_b e i_c	104
5.25. Descripción bloque <i>PLL</i> trifásico de Matlab y Simulink	105
5.26. Respuesta del PLL: a) Ángulo de fase y moduladora y b) frecuencia	106
5.27. Sistema híbrido eólico-fotovoltaico con carga resistiva	107
5.28. Corrientes en la carga resistiva i_{Ra} , i_{Rb} e i_{Rc}	107
5.29. Esquema ilustrativo del sistema eólico-fotovoltaico implementado	108
5.30. Equipo de laboratorio utilizado en el desarrollo de ésta tesis	109
5.31. Dinamómetro acoplado a la máquina de inducción jaula de ardilla	109
5.32. Esquema maestro-consola en OPAL-RT	110
5.33. Visualización de las variables en la consola de OPAL-RT	110
5.34. Esquema de simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico en OPAL-RT	111
5.35. Esquema de seguimiento de fase en OPAL-RT	112
5.36. Generación de las tres señales moduladoras en OPAL-RT	112
5.37. Esquema de generación SPWM en OPAL-RT	113
5.38. Envío de señales SPWM al inversor real desde OPAL-RT	113
5.39. Envío de la información de señales a la consola	114
5.40. Cálculo de las corrientes <i>abc</i> de la máquina de inducción	114
5.41. Esquema del panel fotovoltaico, convertidor <i>boost</i> y algoritmo de MPP	115
5.42. Esquema del filtro pasivo LC	115
5.43. Esquema de la carga resistiva en estrella	116
5.44. Esquema de las fuentes de voltaje en el generador	116
B.1. Versión de RT-LAB utilizada en ésta tesis	125
B.2. Vista de la pantalla principal de RT-LAB	126
C.1. Librería de RT-LAB en Simulink de Matlab r2013a	127
C.2. Bloque OpCtrl y archivo .bin	128
C.3. Archivos .bin .conf .mdl y .m para una prueba básica con Opal-RT	129
C.4. Archivos requeridos por OPAL-RT ante el modo de operación solicitado	129
D.1. Módulo OP5600	131
D.2. Interfaz Usuario-Máquina con OPAL-RT	132

E.1. Módulo OP8660	133
F.1. CORTADOR/INVERSOR IGBT 8857-12 Lab-Volt	136
F.2. Inversor empleado en el modelo de sistema híbrido eólico-fotovoltaico . . .	137
G.1. Máquina de Inducción 8505-A0 Lab-Volt	141
H.1. Transformador 8372-02 Trifásico Lab-Volt	144
H.2. Transformador de doce terminales de Simulink	145

Lista de Tablas

1.1. Categorías de generación distribuida [Gómez, 2008].	6
1.2. Proyectos híbridos eólico-fotovoltaicos en México	14
2.1. Parámetros del panel KC200GT ($T = 25^\circ$ y $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$)	32
2.2. Parámetros del filtro LC	39
3.1. Panel fotovoltaico con carga resistiva y cambios de temperatura e irradiación	53
3.2. Parámetros del convertidor Boost	53
3.3. Parámetros para construcción de la señal PWM	53
4.1. Valores de frecuencia registrados del dinamómetro	75
4.2. Coeficientes C para calcular la velocidad del dinamómetro	76
5.1. Capacitores en cada rama del banco	88
5.2. Armónicos en la corriente i_{Ag} del generador eólico	90
5.3. Parámetros del panel fotovoltaico	91
5.4. Parámetros del convertidor elevador <i>boost</i>	92
5.5. Armónicos generalizados para una relación de amplitud $m_a \leq 1$	101
5.6. Componentes impares de la forma de onda de voltaje V_{AB}	103
5.7. Valores de THD entre las formas de onda de voltaje V_{AB}	104
5.8. Componentes influyentes en la forma de onda de la corriente i_a	104
5.9. Valores de THD entre las formas de onda de la corriente i_a	105
5.10. Parámetros <i>PLL</i> trifásico de Matlab	105
5.11. Componentes influyentes en la forma de onda de la corriente i_{Ra}	108
5.12. Valores de THD en las corrientes i_{Ra}	108
E.1. Número de puertos en el módulo OP8660	134
F.1. Parámetros del capacitor del módulo 8857-12 Lab-Volt	135
H.1. Parámetros del transformador trifásico	143

Lista de Abreviaturas y Símbolos

R	Resistencia eléctrica
L	Inductancia eléctrica
DG	Generación distribuida
®	Marca registrada
m_a	Relación de modulación en amplitud
m_f	Relación de modulación en frecuencia
V_{CD}	Voltaje de CD en terminales del panel fotovoltaico
I_{CD}	Corriente de CD a salida del panel fotovoltaico
T	Temperatura de operación del panel
G	Irradiación solar
ω	Frecuencia angular
$Q_{3\phi}$	Potencia reactiva trifásica
THD	Distorsión armónica total
°K	Temperatura expresada en Kelvin
k	Constante de Boltzmann
q	Carga Eléctrica
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
RK4	Runge-Kutta de Cuarto Orden
t	Tiempo de simulación
T_S	Paso de integración
CFE	Comisión Federal de Electricidad
f	Frecuencia de operación del sistema
T_e	Par electromecánico del generador de inducción
J	Constante de Inercia del generador de inducción
θ	Desplazamiento angular del generador de inducción
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}, \lambda_{os}$	Enlaces de flujo del estator en el marco de referencia arbitrario $qd0$
$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}, \lambda_{or}$	Enlaces de flujo del rotor en el marco de referencia arbitrario $qd0$
V_{qs}, V_{ds}, V_{os}	Voltajes del estator en el marco de referencia arbitrario $qd0$
V_{qr}, V_{dr}, V_{or}	Voltajes del rotor en el marco de referencia arbitrario $qd0$
i_{qs}, i_{ds}, i_{os}	Corrientes en el estator del marco de referencia arbitrario $qd0$
i_{qr}, i_{dr}, i_{or}	Corrientes del rotor en el marco de referencia arbitrario $qd0$
K_s, K_r	Matrices de transformación de Park para las variables del estator y rotor

r.p.m.	revoluciones por minuto
L_{ls}	Inductancia del estator en la máquina de inducción
L_{lr}	Inductancia del rotor en la máquina de inducción
L_{lr}	Inductancia mutua estator-rotor en la máquina de inducción
L_{ss}	Inductancia propia del estator en la máquina de inducción
L_{rr}	Inductancia propia del rotor en la máquina de inducción
PLL	Seguimiento de Fase (Phase Locked-Loop)
h	Orden armónico
n	n-ésimo término
v_{in}	Entrada del convertidor boost
v_o	Salida del convertidor boost
OPAL-RT	Simulador en tiempo real
PWM	Modulación de ancho de pulso
SPWM	Modulación senoidal de ancho de pulso
FFT	Transformada rápida de Fourier
abc	Marco referencia natural
SW	Interruptor
$p.u$	valor expresado en por unidad
D	Ciclo de servicio
rms	raíz media cuadrática
V	Volts
A	Amperes
Wb	Weber
W	Watts
Ω	Omh
Hz	Hertz
H	Henry, Henrio
s	Segundos
m	metro
J	Joule
C	Coulomb
F	Faradio
n	notación científica 1×10^{-9}
μ	notación científica 1×10^{-6}
m	notación científica 1×10^{-3}
k	notación científica 1×10^3

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN.

1.1. Antecedentes

Hoy en día la industria generadora de energía eléctrica se enfrenta a grandes retos en lo que refiere a la generación y demanda, por lo que se le ha dado un mayor énfasis en el uso de recursos renovables, esto se hace por la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles que generan daños en la capa de ozono. En lo que respecta a ésta tesis, se encuentra enfocada en el estudio de la operación en conjunto de dos dispositivos que son el panel fotovoltaico y la turbina eólica. Se ha incrementado de manera considerable el uso de paneles fotovoltaicos en zonas del mundo, con la finalidad de reducir los gastos en el consumo de energía eléctrica para abastecer a comunidades que se encuentran fuera del alcance de las líneas de suministro eléctrico comercial. Actualmente existen diversas fuentes alternas de energía que contribuyen de manera considerable para satisfacer la demanda de los usuarios[Vicini y Micheloud, 2012].

Se han realizado grandes esfuerzos en reproducir o simular el comportamiento del sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Por ésta razón, se han desarrollado equipos digitales avanzados con el fin de observar la operación de la turbina eólica y el panel fotovoltaico de manera conjunta, facilitando el acceso a la aplicación de técnicas avanzadas de control con la finalidad de obtener la mayor potencia posible.

1.1.1. Energías renovables

En años recientes, el fenómeno del calentamiento global se ha agudizado debido a la masiva contaminación del medio ambiente por emisiones de distinta índole, provenientes de distintas fuentes, tales como generación de energía eléctrica mediante combustibles fósiles, procesos industriales, comerciales, sistemas de transporte etcétera. En particular, para mitigar este efecto nocivo debido a la generación de energía eléctrica, la tendencia mundial está orientada en el desarrollo de sistemas que utilicen fuentes renovables tales como la energía del viento, solar, hidráulica, geotérmica, mareomotriz y la biomasa entre otras; ésto con la finalidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de Dióxido de Carbono (CO_2), Dióxido de Azufre (SO_2) y Oxido Nitroso (N_2O) hacia la atmósfera [Tong, 2010]. Además, se debe considerar el agotamiento de los combustibles fósiles en un futuro próximo, por lo que se pretende reducir la dependencia de éstos e incrementar el uso de fuentes alternas de generación.

El uso de recursos renovables permite aminorar el severo daño al medio ambiente y a la capa de ozono; reportado por primera vez por el científico mexicano Mario Molina en 1985, en donde reveló la existencia del “*hueco de la capa de ozono*” el cuál se encuentra situado arriba de la Antártida; explicando sus efectos potenciales tanto sobre la tierra como en sus habitantes. Gracias a éste descubrimiento recibió el Premio Nobel de Química en 1995 [Petre, 2013].

1.1.2. Desarrollo histórico de la energía eólica

El viento se ha utilizado como fuente de energía desde hace miles de años para realizar diversos trabajos, tales como impulsar barcos con vela, moler granos para obtener harina (Persia, aproximadamente en el año 200 a.c.), bombeo de agua en suelos subterráneos para campos de cultivo y además para producir movimiento en maquinaria industrial. Las estructuras destinadas a moler cereales eran de eje horizontal y su construcción se encontraba integrada por troncos de árboles, los cuales se conocen con el nombre de “Molinos de Viento”.

En 1888 uno de los fundadores de la industria eléctrica americana, Charles F.

Brush (1849-1929) construyó un aerogenerador de eje horizontal, el cual estaba destinado a cargar una serie de baterías gracias al uso de un dinamo de 12 kW ubicado en el sótano de su mansión. Ésta estructura se trataba del primer generador eólico con un rotor de 17 m y 144 palas a base de madera de cedro el cual continuó operando cerca de 20 años. El estudio de esta estructura apareció publicado en la revista *Scientific American* en diciembre del año 1890 [Juana *et al.*, 2003].

En 1941 entró en operación uno de los más grandes sistemas eólicos conocido como Grandpa's Knob; el cuál se encontraba ubicado en Vermont (U.S); éste sistema contribuyó al abastecimiento de energía eléctrica en la red de Nueva Inglaterra durante el periodo de la Segunda Guerra Mundial [Kubizewki, 2016]. La turbina eólica antes mencionada fue diseñada para generar 1.25 kW; incluyendo un rotor de 175 ft (53.34 m), y se mantuvo en operación hasta que un accidente presentado en 1945 generó daños en su estructura, por lo que se obligó a suspender su operación. Después del accidente, el interés por los sistemas eólicos fue disminuyendo; a medida que el sistema eléctrico crecía en complejidad, haciéndose más accesible para el consumidor. Sin embargo, en 1973 se comenzaron a presentar problemas con la crisis del petróleo, la contaminación ambiental y también la demanda energética, por lo que se volvió a tener interés en el aprovechamiento de la energía del viento. Además, en Dinamarca, Alemania y España se le continuó dando seguimiento al desarrollo tecnológico de las turbinas eólicas y la instalación de sistemas eólicos o parques eólicos que abastecen a sus consumidores [Lecuona, 2002].

1.1.3. La Turbina eólica

La turbina eólica permite convertir la energía eólica captada por el viento en energía mecánica rotacional, la cual posteriormente es transformada en energía eléctrica con la ayuda del generador eléctrico; que puede ser de inducción jaula de ardilla, doblemente alimentado, síncrono o de imanes permanentes. En la conversión de la energía del viento se encuentran involucrados dos procesos, el primero consiste en la extracción de la energía cinética del viento, mientras que el segundo proceso consiste en la conversión de energía mecánica en electricidad. La máxima potencia que puede ser extraída del viento por un aerogenerador no puede ser mayor al 59.3%, conocido como Límite de Betz

[Sorensen, 2016]. Por otra parte, un generador eólico de eje horizontal operando en condiciones óptimas de rendimiento, puede llegar a convertir en energía eléctrica cerca del 45 % de la energía captada por el viento sobre el rotor de la turbina eólica [Villarubia, 2012]. Gracias al avance continuo de la tecnología, se ha logrado que tanto los dispositivos de electrónica de potencia, como los sistemas de control y protección, permitan incrementar la productividad en la instalación eólica [Garduño *et al.*, 2012], pero hay que tener en cuenta que el potencial que se extrae del viento cambia continuamente debido a su intermitencia.

1.1.4. Modos de operación de la turbina eólica

La turbina eólica puede operar típicamente bajo dos modos, velocidad constante o variable. También se toman en cuenta las ráfagas y turbulencias del viento, las cuales producen variaciones en la potencia generada.

En el modo de operación constante, la turbina eólica opera siempre a una velocidad constante a pesar de los cambios en la velocidad del viento. Regularmente se utilizan generadores de inducción de jaula de ardilla (Squirrel Cage Induction Generator) [González *et al.*, 2011].

En el modo de velocidad variable ayuda a obtener la mayor eficiencia de potencia posible con un flujo de viento mínimo, ajustando la velocidad angular y la potencia del generador eléctrico a valores nominales ante los fuertes flujos de viento. La estructura que se emplea en cada modo de operación de la turbina eólica se describe en los puntos I y II.

I.-Turbina eólica de velocidad constante

La estructura de la turbina eólica en este modo de operación puede ser:

- Turbina acoplada con generador asíncrono.
- Turbina acoplada con generador síncrono.

II.-Turbina eólica de velocidad variable

La estructura de la turbina eólica en este modo de operación puede estar dada como:

- Generador de inducción y convertidor en el estator.
- Generador de inducción y ajuste del deslizamiento.

En ésta tesis se hace la consideración de una turbina eólica operando a velocidad constante y empleando un generador asíncrono.

1.1.5. Parque eólico

Un parque eólico se encuentra integrado por un conjunto de turbinas eólicas, los cuales se encuentran instalados a una separación entre 3 y 5 diámetros del rotor en dirección perpendicular a los vientos dominantes, y de 5 a 9 diámetros del rotor en dirección a los vientos dominantes [Masters, 2004] como se muestra en la Figura 1.1. En años recientes, se han instalado parque eólicos en donde los vientos son intensos y constantes con la finalidad de generar energía eléctrica y satisfacer la demanda de los consumidores [Cantoni, 2010]. Las instalaciones se colocan en función de diversas variables, como la ubicación de la infraestructura existente, la viabilidad económica, el impacto ambiental y la producción de energía eléctrica [Garduño *et al.*, 2012].

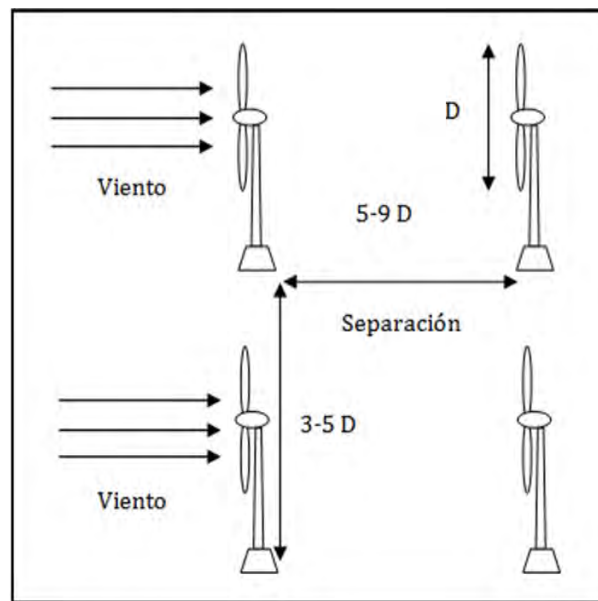


Figura 1.1: Disposición de las turbinas eólicas en un parque.

Las turbinas eólicas se encuentran operando en grupo dentro de un parque, para lograr suministrar energía eléctrica al sistema eléctrico y ser utilizada donde se requiera.

1.1.6. Generación distribuida

El termino anglo-americano es Generación distribuida (GD), mientras en otros países de Norte América se conoce como Generación dispersa, en Europa y algunas partes de Asia es conocido como Generación descentralizada [Ackermann *et al.*, 2001]. Éste tipo de generación se le conoce también como Generación In-Situ, que consiste en la producción de energía eléctrica lo más cercano posible al lugar de consumo, considerando un cierto margen de reserva, además tiene su origen desde la propia generación de electricidad en la industria. La GD se encuentra dividida en las siguientes categorías, según se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Categorías de generación distribuida [Gómez, 2008].

Tipo (DG)	Capacidad
Micro	1 W - 5 kW
Pequeña	5 kW - 5 MW
Mediana	5 MW - 50 MW
Grande	50 MW - 300 MW

1.1.7. Energía solar

El sol es una esfera gaseosa que tiene una temperatura superficial que se encuentra entre los 5000 y 6000 °C [Burdano *et al.*, 1993], [Tejada y Gómez, 2015]. Además, se encuentra constituida en su mayor parte por gas de Hidrógeno (74 %), una cierta porción de Helio (25 %) con otros elementos en pocas cantidades como Oxígeno (1 %), Nitrógeno, Carbón, Silicio, Magnesio y Calcio. En el sol se genera una gran cantidad de energía, originada por la reacción nuclear de fusión [Ortega, 2001]. Ésta reacción se presenta en altas temperaturas en su interior, del orden de 8 a 40 millones de grados Kelvin [Jutglar, 2004]. La energía que se recibe del sol se manifiesta en forma de luz y calor en la tierra. El sol emite continuamente radiación al espacio; irradia una energía de aproximadamente 1.7×10^{14} kW, por lo que representa una fuente absoluta de energía; sin ella no sería posible la existencia de vida sobre la tierra. Éste recurso alimenta la atmósfera, es decir tiene una incidencia directa en el clima [Tejada y Gómez, 2015].

1.1.8. Tipos de radiación solar

Existen distintos tipos de radiación solar; los rayos emitidos por el sol no en todos los casos llegan directamente al suelo, debido a que existen ciertos obstáculos en su trayectoria desde la atmósfera, los cuales se describen de manera concisa a continuación de acuerdo a [Meinel y Meinel, 1982].

Radiación difusa: es la que proviene del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica, éste tipo radiación se recibe a través de las nubes, tal como se ilustra en la Figura 1.2 a).

Radiación directa: se recibe directamente del sol sin ser afectada por la dispersión atmosférica, tal como se ilustra en la Figura 1.2 b).

Además, la radiación de este tipo son mayores en algunas partes del mundo, como Arizona, Sonora y Egipto [SENER, 2016] [BBC, 2016]. Ésto se debe a que los rayos provenientes del sol presentan menores obstáculos ante su paso desde que cruza la atmósfera hasta llegar al suelo.

Radiación global: es la suma de la radiación difusa y directa [Ortega, 2001], según se ilustra en la Figura 1.2 c).

Radiación terrestre: es la que proviene de los objetos (un lago, el reflejo de una pared entre otros), tal como se ilustra en la Figura 1.2 d). Éste tipo de radiación solar es conocida como el reflejo que se presenta al salir el sol después de un momento de lluvia [Ortega, 2001].

Radiación total: representa la suma de la radiación global más la terrestre, y se ilustra en la Figura 1.2 e).

Radiación térmica: es la emisión de energía generada por la temperatura de los cuerpos [Burdano *et al.*, 1993]. Un cuerpo cualquiera emana energía de manera continua en forma de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda. Ésta energía calorífica que se almacena en un cuerpo durante su exposición a los rayos del sol se libera en forma de calor hacia el medio ambiente, tal como se ilustra en la Figura 1.2 f).

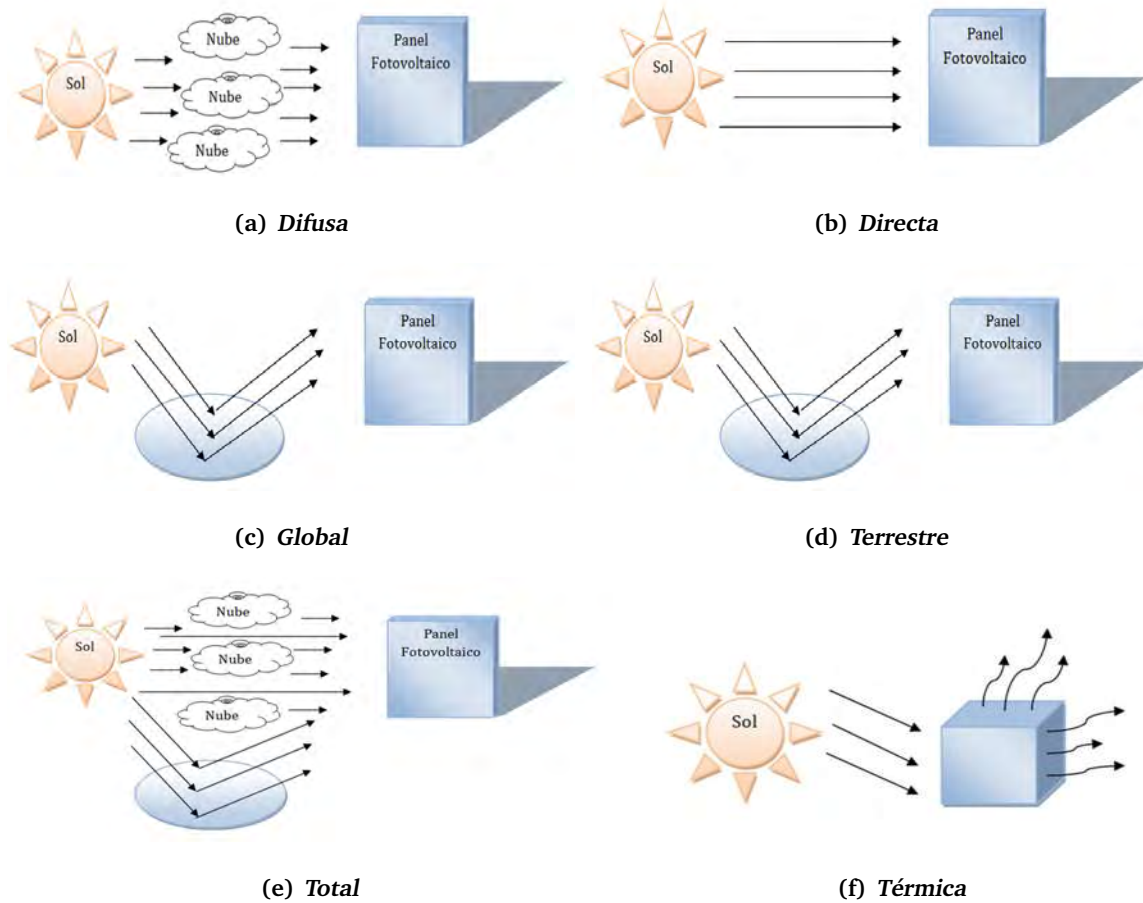


Figura 1.2: Tipos de radiación solar

1.2. La celda fotovoltaica

En 1839 el primer dispositivo fotovoltaico fue demostrado por el físico francés Edmond Becquerel. Además, publicó un artículo en 1839 en donde describe su experimento, donde encontró que al exponer dos barras de plata a la luz, en estas se produce una diferencia de potencial y al conectar una carga externa en sus terminales se genera una corriente eléctrica, por lo que a este efecto se le denominó efecto fotovoltaico [Agredano, 2016] [Ortega, 2001]. Debido al efecto fotovoltaico, la energía luminosa que proviene del sol se puede convertir a energía eléctrica, a través del uso de materiales semiconductores. Los rayos del sol se componen de fotones o partículas energéticas, las cuales poseen diferente

nivel de energía y longitud de onda [Fernández, 2010].

El término “Fotovoltaico” se compone de la palabra griega “photos”, que quiere decir luz, y “Volt” que es la unidad de la diferencia de potencial [Boley, 2012], [Carless, 1995]. En la Figura 1.3 se ilustra la imagen de una celda fotovoltaica, que corresponde al elemento más pequeño que integra a un panel fotovoltaico.

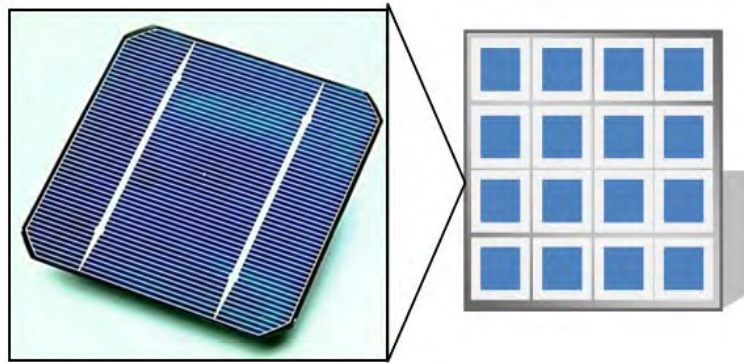


Figura 1.3: Celda fotovoltaica [Boley, 2012]

La fabricación de éstas celdas fotovoltaicas se dividen en dos categorías, la primera corresponde a las celdas fotovoltaicas de película gruesa y la segunda a las de película delgada. Éstas celdas se fabrican de un lingote de Silicio (Si) dopado con Boro (B), el cual es rebajado hasta obtener un prisma rectangular. Además, existen otros tipos de celdas fabricadas de Silicio monocristalino, policristalino, amorfo y Galio con Arsénico entre otros materiales semiconductores [Micheloud y Rommel, 2004].

1.2.1. Descripción del sistema híbrido eólico-fotovoltaico

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico requiere de radiación solar y viento para que pueda operar. El generador eólico requiere de un banco de capacitores para excitar los devanados del generador de inducción; para obtener una forma de onda de CA. Mientras que el panel fotovoltaico proporciona una forma de onda de CD; debido a que los fotones provenientes de los rayos solares son captados por el panel fotovoltaico; éstos inciden sobre el material semiconductor generando un proceso electro-químico entre iones y huecos, generándose una diferencia de potencial o voltaje de CD que se puede aprovechar

[Masters, 2004]. Las cargas presentes en las viviendas por lo general requieren de CA para que sus equipos logren operar, por lo que se requiere de un inversor para realizar la conversión CD/CA. Entre la carga de CA y el convertidor de CD/CA se requiere de un filtro, con la finalidad de obtener una forma de onda semejante a una senoidal pura. La sincronización de ésta fuente de CA a otra fuente de CA, puede lograrse a través de técnicas de seguimiento de fase. Los dispositivos que integran el sistema híbrido eólico-fotovoltaico se ilustran en la Figura 1.4.

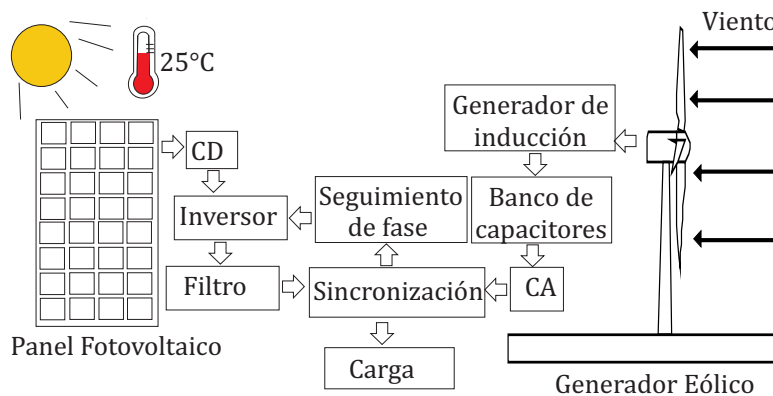


Figura 1.4: Sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Las fuentes renovables de energía tales como la solar, viento, geométrica, mareomotriz, hidráulica entre otras son inagotables por naturaleza. Se ha comprobado que estas fuentes de generación son sustentables y respetuosas con el medio ambiente. Dado que los recursos convencionales como combustibles fósiles generan daños a la capa de ozono, se puede usar como alternativa el sistema híbrido con fuentes alternas. En el caso del recurso eólico y fotovoltaico se tiene una dependencia que se ve afectada por los cambios desfavorables en las condiciones climatológicas. La generación basada en el sistema híbrido eólico-fotovoltaico se considera como una fuente alternativa que usa fuentes limpias para mitigar los problemas de demanda energética [Ahmed y Benachaiba, 2017].

La energía del viento y el sol han recibido cierta popularidad en los últimos años como fuentes alternas de energía. El aprovechamiento del viento para la generación de energía eléctrica ha crecido de manera significativa con el paso del tiempo. Una parte sig-

nificativa de este crecimiento se debe a los sistemas de potencia a gran escala. En cambio las tecnologías con energía renovable a pequeña escala son abundantes pero existe cierta intermitencia en su operación [Zhengnan *et al.*, 2017].

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico utiliza dos fuentes renovables, que aunque existe cierta intermitencia, se obtiene como resultado un sistema más estable y perdurable. Según un informe presentado en el 2016 por la REN21 (Renewable Energy Policy Network for 21 st Century), el 19.2% del consumo de energía a nivel global proviene de fuentes renovables [Zhengnan *et al.*, 2017].

Una de las tareas más importantes que tiene que cumplir el sistema híbrido eólico-fotovoltaico, es el de asegurar que éste sistema de generación siempre se encuentre operando a su máxima capacidad. Ésto se puede lograr si se emplean técnicas para alcanzar el máximo punto de potencia (MPP) [Soro *et al.*, 2016], tales como:

- Algoritmo perturbador y observador (PO).
- Algoritmo de conductancia incremental (CI).
- Lógica difusa (LD).

Las técnicas anteriores también se usan en sistemas eólicos y fotovoltaicos. La razón de utilizar alguno de estos métodos se debe a que son algoritmos más confiables para obtener el MPP, aunque presentan algunos inconvenientes. El método de PO es lento y presenta pérdidas de potencia al rededor del punto MPP. El método de CI requiere de una gran cantidad de cálculos y de sensores de alta precisión para poder operar. EL método de LD continua aún en desarrollo por las variaciones que presenta para alcanzar el punto MPP [Zhengnan *et al.*, 2017]. Para realizar el análisis de la operación dinámica del sistema híbrido eólico-fotovoltaico, se requiere del conocimiento de los elementos que lo integran, y los modelos equivalentes que los pueden representar en forma matemática. En la plataforma de Matlab y Simulink se puede simular el sistema híbrido eólico-fotovoltaico. El modelo del panel fotovoltaico se puede modelar en forma matemática ya que existe bastante información acerca de las ecuación que rigen su comportamiento. Los elementos que integran a la turbina eólica también se pueden modelar, como el generador de inducción.

Las características de modelo del panel fotovoltaico no son lineales y son afectadas por la radiación solar, la temperatura ambiente y las condiciones de la carga. El nivel de radiación puede variar de 250 a 1000 W/m^2 según las condiciones de la zona en donde se encuentre operando el panel [Villalva *et al.*, 2009a]. La temperatura en algunos estudios se asume que permanece constante a 25° C, ya que el coeficiente de temperatura del panel es relativamente pequeña [Masters, 2004] [Tong, 2010].

Para alcanzar el MPP del panel fotovoltaico, se requiere de un convertidor CD/CD entre el panel y la carga. Además, se necesita de un ciclo de servicio para que el convertidor pueda operar. El ciclo de servicio sirve para regular la carga y se obtiene precisamente del algoritmo MPP que se utilice [Echeverría *et al.*, 2014].

Para que el algoritmo MPP opere necesita conocer el voltaje y corriente del CD del panel, después se sigue el proceso marcado el algoritmo MPP, el resultado corresponde a un ciclo de servicio, el cuál se envía a un convertidor CD/CD. El ciclo de servicio ajusta el ancho de la señal en la compuerta del interruptor del convertidor, generándose el ajuste necesario para obtener la máxima potencia.

El proceso de convención CD/CA requiere de un inversor y un filtro LC [Hart, 2001]. La señal de CA que sale del inversor cruza un filtro, reduciendo los armónicos innecesarios, obteniéndose una forma de onda senoidal con cierta distorsión, la cuál dependerá de los parámetros de filtro que se utilice [Arrillaga y Watson, 2003].

El uso de un transformador permite elevar el nivel de voltaje a un nivel requerido [Chapman, 2012]. Para realizar la sincronización entre el voltaje del inversor con otra fuente generadora, se requiere de un *PLL* (Phase-locked-Loop), con el propósito de controlar la conmutación del inversor y mantener el seguimiento de fase del sistema [Satyarajan y Chinmoy, 2016].

El modelo del turbina eólica proporciona un par de torsión o par mecánico que se envía al modelo del generador [Ackerman, 2005]. Éste par de torsión impulsa un generador eléctrico, el cuál genera tres señales alternas, con un desfasamiento de $\pm 120^\circ$ [Chapman, 2012].

La simulación de los modelos matemáticos requieren de un cierto esfuerzo computacional para solucionar los grandes sistemas de ecuaciones; pero hoy en día la eficiencia

de las computadoras ha crecido considerablemente, gracias al continuo avance de la tecnología se han construido diversos equipos de simulación en tiempo real tales como OPAL-RT, RTDS, HYPERSIM [Minwon y Keun, 2004]. La simulación en tiempo real se vuelve cada vez más popular, ya que representa un medio para probar y validar componentes físicos. Además, los modelos se programan en un ambiente controlado y realista. La sincronización del tiempo de simulación con el tiempo real permite el intercambio de entradas y salidas físicas entre dispositivos [Mirtz *et al.*, 2001].

Los simuladores en tiempo real tales como OPAL-RT, se pueden utilizar para crear modelos matemáticos y realizar el análisis de su operación dinámica. Éstos modelos se desarrollan en la plataforma de Matlab y Simulink [Bian y Wy, 2015] [OPAL-RT, 2016]. El proceso experimental que se puede hacer con el simulador en tiempo real OPAL-RT y los equipos de Lab-Volt, permiten elaborar herramientas que pueden utilizarse para la investigación, la enseñanza de sistemas de control y la formación en el campo de las energías renovables [Ahmed *et al.*, 2016].

Se han realizado diversos estudios en los sistemas de conversión la energía viento utilizando el equipo de simulación en tiempo real OPAL-RT. Éstos estudios se han realizado en años recientes en el departamento de ingeniería eléctrica de la academia militar en Kingston, Canadá [Ahmed y Benachaiba, 2017]. Los estudios del viento con estos equipos en tiempo real se han enfocado en la aplicación de estrategias de control para sistemas aislados. El dinamómetro de cuatro cuadrantes acoplado a una máquina síncrona se usa para emular el comportamiento de la turbina eólica. Los países que han desarrollado extensamente ésta tecnología son Alemania, Italia, España, Portugal, Francia, Canadá y USA [Mosquera y Merino, 2006].

En México, su aplicación puede ubicarse a regiones puntuales dentro del país. El Programa de Servicios Integrales de Energía (PSIE) ejecutado por CFE, en conjunto con la SENER junto con recursos del Banco Mundial, concluyó el 30 de Octubre del 2015 con la construcción de 36 sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos en 7 estados del país [SENER, 2016], y se listan en la Tabla 1.2:

Tabla 1.2: Proyectos híbridos eólico-fotovoltaicos en México

Localidad	Entró en operación	Beneficiados	Capacidad (KW)
Estado de Durango			
Mesa de Guadalupe	08/12/2014	131	49
Morontos	16/10/2014	115	49
Rincón de Huajupa	16/10/2014	131	43
Santa Cruz de Marcos	16/10/2014	113	26.5
División del Norte (Los lobos)	16/10/2014	114	37
San Buenaventura	15/02/2016	131	65.5
Tepalcates	15/01/2016	106	26.5
Curachitos	15/01/2016	176	43
La Sierrita	09/12/2015	120	31.5
Ojos Azules	20/03/2015	161	40.5
La Cieneguita	11/06/2015	122	31.5
San José de la Cruz	29/03/2015	129	31.5
Ceja de Cebolleta	28/07/2015	186	100
Ciénega de los Frailes	25/06/2015	224	25
La Graniza	08/02/2016	452	117
EL Dorador	08/02/2016	143	52
San Ignacio de la Sierra	08/03/2016	85	28
El Conejo	08/02/2016	217	66
El Tarahumar	05/02/2016	178	40.5
El Gato de Arriba	05/02/2016	165	33.75
Ciénega de Caballos	05/02/2016	171	40.5
Santa Cruz de la Estaca	05/02/2016	35	11.25
Soyupa	27/11/2015	252	54
El Carmen	27/11/2015	141	27
Zancudo Uno	08/10/2015	100	29.5
Estado de Baja California Sur			
Luis Echeverría Álvarez	26/02/2016	170	117
Estado de Coahuila			
San José de Carranza	17/09/2016	300	124
Boquillas del Carmen	06/02/2015	120	78
Estado de Chihuahua			
Chorreras	15/02/2015	109	33
Basagochic	12/02/2015	300	66
Estado de Guerrero			
Piedras Grandes	30/01/2015	226	190
Estado de San Luis Potosí			
Luis Echeverría Álvarez	26/02/16	170	117
Estado de Sonora			
El encinal	28/06/2016	122	75

1.3. Descripción general del problema.

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico ha tomado gran importancia dentro de los sistemas de generación distribuida. Por lo que resulta importante conocer el comportamiento dinámico de los elementos que integran al sistema en tiempo real. Dado un sistema híbrido eólico-fotovoltaico se describe como realizar una comparación del comportamiento del sistema simulado respecto al comportamiento experimental. Los elementos en que se enfoca el estudio es en la operación del inversor y el filtro LC. Para controlar el inversor se aplica la técnica de modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM). Éste método se logra mediante la comparación de tres señales moduladoras con una señal portadora. La señal portadora contiene la frecuencia de conmutación de los interruptores del inversor. Mientras que las señales moduladoras contiene la información de la frecuencia de la red. El voltaje a la salida del inversor contiene un contenido armónico que se filtra con un filtro LC. Para la simulación e implementación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico se usa el equipo de simulación en tiempo real OPAL-RT y equipo Lab-Volt disponible en el laboratorio.

1.4. Justificación.

El potencial de la energía eólica y solar es enorme, además, a partir de la década del siglo XXI el panorama internacional ha cambiado, en especial por las evidencias científicas que demuestran la existencia del cambio climático y su poderoso impacto en las atípicas condiciones y fenómenos atmosféricos presentes en las distintas regiones del orbe. Lo anterior debido a las grandes emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; que también produce el debilitamiento de la capa de ozono, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles; requerido actualmente en distintos procesos industriales, transporte, climatización, uso doméstico y generación de energía eléctrica, entre otros. El último aspecto está reconocido como una de las causas principales que contribuyen al cambio climático en el mundo.

A nivel mundial se ha abordado la política de desarrollo y utilización de fuentes renovables de energía para sustituir la generación de energía eléctrica mediante la quema

de combustibles fósiles. Dentro de las distintas posibilidades se encuentra la generación de energía eléctrica mediante sistemas híbridos eólicos-fotovoltaicos, abordado en ésta tesis, generalmente de pequeña escala.

En particular, para el sistema híbrido eólico-fotovoltaico considerado y analizado en ésta tesis, se realiza bajo condiciones dinámicas de operación constante. La plataforma de Matlab y Simulink dispone de herramientas matemáticas y elementos eléctricos disponibles en la biblioteca de SimPowerSystems, con el fin de hacer el arreglo de los elementos que interactúan con el generador eólico y con el panel fotovoltaico, permitiendo con esto la simulación fuera de línea y en tiempo real. También se dispone de instrumentos de medición, máquinas eléctricas y otros dispositivos en la DEP-FIE para observar el comportamiento dinámico en tiempo real del sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

1.5. Objetivos.

A continuación se muestran el objetivo general y objetivos particulares de ésta tesis.

1.5.1. Objetivo general.

Simular e implementar un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con equipo de laboratorio Lab-Volt para evaluar y analizar su comportamiento, operación dinámica y presencia de sus fenómenos adversos de calidad de la energía mediante el simulador en tiempo real OPAL-RT.

1.5.2. Objetivos particulares.

- Desarrollar una herramienta digital que permita el análisis de la operación dinámica de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico y su impacto en la calidad de la energía, mediante la determinación de fenómenos adversos, en particular en tiempo real.
- Ejemplificar la adquisición de voltajes, corrientes y generación de señales tanto analógicas como digitales con OPAL-RT.

- Controlar la conmutación del inversor trifásico a través de la técnica SPWM con OPAL-RT y aplicar un PLL de la biblioteca de Matlab y Simulink para establecer el seguimiento de fase del sistema.
- Seleccionar un filtro pasivo LC para reducir el contenido armónico de las señales de voltaje a la salida del inversor.
- Considerar la participación de transformadores trifásicos para ajustar el voltaje en el sistema eléctrico.
- Desarrollar un sensor para registrar la velocidad del dinamómetro de cuatro cuadrantes con OPAL-RT.

1.6. Metodología.

El desarrollo de la tesis está basado en la realización de las siguientes actividades:

- Consulta de fuentes bibliográficas, artículos, páginas web entre otras fuentes para integrar el estado del arte.
- Desarrollo del modelo de la máquina de inducción en un marco de referencia síncrono $qd0$ y transformación de las corrientes resultantes al marco de referencia natural abc con herramientas de la biblioteca de Simulink.
- Obtención de los parámetros de la máquina de inducción mediante pruebas de cortocircuito y circuito abierto con procedimientos descritos por autores apegados a pruebas estandarizadas.
- Desarrollo del modelo correspondiente al panel fotovoltaico a nivel de simulación.
- Aplicación de cada modelo desarrollado mediante una herramienta computacional para el estudio de su comportamiento en estado estacionario.
- Desarrollo e implementación de los modelos en la plataforma de MATLAB y Simulink.

- Utilización de bloques de la biblioteca de Simulink para formar el circuito en estudio. En particular, los bloques eléctricos de la biblioteca “SymPowerSystems”; en especial los transformadores de 12 terminales, para representar las conexiones estrella-estrella aterrizada mediante parámetros obtenidos de los transformadores Lab-Volt con pruebas de laboratorio.
- Validación de resultados mediante simulación digital y experimentación en laboratorio en tiempo real utilizando el simulador en tiempo real OPAL-RT.

1.7. Aportaciones.

Se identifican las siguientes aportaciones asociadas con la investigación reportada en esta tesis:

- Desarrollo e implementación física de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeña escala, utilizando simultáneamente los equipos Lab-Volt, OPAL-RT, RT-LAB y MATLAB y Simulink, para el análisis de su operación dinámica e impacto en calidad de la energía en tiempo real.
- Implementación de la técnica SPWM para controlar la conmutación de un inversor trifásico, utilizando Lab-Volt, RT-LAB, MATLAB y Simulink y OPAL-RT.
- Selección de un filtro pasivo LC para reducir la distorsión armónica a la salida del inversor utilizando el equipo Lab-Volt, MATLAB y Simulink.
- Implementación de un sensor de velocidad para el dinamómetro de cuatro cuadrantes Lab-Volt a través de OPAL-RT.

1.8. Descripción de capítulos.

La presente tesis se encuentra integrada por seis capítulos, bibliografía y apéndices, los cuales se describen a continuación.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se plantean los objetivos de la tesis, la justificación, la metodología utilizada para su desarrollo y las aportaciones principales de ésta tesis.

CAPÍTULO 2. MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTÁICO.

En este capítulo se describen los modelos de los componentes que integran el sistema fotovoltaico reportado en ésta tesis, tales como el panel fotovoltaico, convertidor *boost*, inversor de tres ramas, elementos pasivos y el modelo del generador de inducción.

CAPÍTULO 3. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS NUMÉRICO Y DIGITAL.

En este capítulo se presentan dos métodos numéricos utilizados para la simulación digital fuera de línea de los componentes del sistema híbrido; uno corresponde al método de Newton Raphson, mientras que el segundo al método de Runge Kutta de Cuarto Orden. Su aplicación se ilustra mediante ejemplos demostrativos.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL CON OPAL-RT.

En este capítulo se hace una explicación concisa de la operación conjunta de RT-LAB y OPAL-RT. Se describe el proceso seguido para construir señales analógicas y digitales. Lo anterior se ilustra mediante ejemplos experimentales en laboratorio.

CAPÍTULO 5. CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan los casos de estudio en donde se analiza la respuesta dinámica del sistema híbrido construido, que consta del inversor de tres ramas, filtro LC, generador de inducción y la carga.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO.

En este capítulo se presentan las conclusiones principales de la investigación reportada en ésta tesis así como en base al avance logrado, se sugieren distintas vertientes de investigación en el mismo campo del conocimiento.

REFERENCIAS Y APÉNDICES

En esta sección se listan las referencias de libros, artículos, enlaces de páginas web consultadas durante el desarrollo de ésta tesis. En los apéndices se proporciona información de los equipos empleados en el proceso de experimentación. .

Capítulo 2

MODELADO DEL SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAÍCO.

2.1. Introducción.

En éste capítulo se describe el modelado de los componentes que integran al sistema híbrido eólico-fotovoltaico; se describe el modelo del generador de inducción en el marco de referencia $qd0$, mostrándose los circuitos equivalentes y sus respectivas ecuaciones. Se hace la descripción del modelo del panel fotovoltaico y las ecuaciones que intervienen. También se describe el algoritmo de conductancia incremental mediante un diagrama de flujo. Se explica de manera concisa la construcción de una señal de modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) para controlar la conmutación del inversor. Además, se presentan las ecuaciones del convertidor *boost*, los valores de seleccionados del filtro LC, el esquema del transformador y el módulo de sincronización. También se muestran las fórmulas para calcular distorsión armónica total y el error relativo porcentual.

2.2. Modelado de componentes del sistema híbrido.

La descripción de los modelos contemplados en el sistema híbrido eólico-fotovoltaico se muestran en las secciones siguientes.

2.2.1. Modelo del generador de inducción

El generador de inducción es el más utilizado en los aerogeneradores debido a su bajo costo, su mínimo mantenimiento, es robusto y además se puede conectar a la red eléctrica de suministro a través de las conexiones correspondientes [Masters, 2004].

La máquina de inducción se compone de dos partes principales que es un estator estacionario y un rotor giratorio, ambos se encuentran separados por un pequeño entre hierro que varía de 0.4 mm a 4 mm, dependiendo de la potencia del motor [Wildi, 2007].

El estator consta de una armadura de acero que soporta un núcleo de hierro de forma cilíndrica; este se encuentra constituido por laminaciones de hierro apiladas con varias ranuras equidistantes entre sí, proporcionando espacio para los devanados. Mientras que en la parte rotatoria, el rotor se compone de laminaciones ranuradas que se encuentran apiladas cuidadosamente para crear una serie de ranuras para el devanado del rotor. Los tipos de rotor que se emplean en estas máquinas pueden ser de rotor devanado o jaula de ardilla. En ésta tesis se considera el generador de inducción jaula de ardilla.

El generador de inducción con rotor jaula de ardilla se encuentra compuesto de barras de cobre desnudo, las cuales se encuentran insertadas en las ranuras por uno de sus extremos. Mientras que los extremos opuestos se unen a dos anillos de cobre para que todas las barras se encuentren en cortocircuito.

La máquina de inducción de rotor devanado posee un devanado trifásico distribuido uniformemente en las ranuras; por lo general se conecta en estrella, cada una de sus terminales se encuentran conectadas a tres anillos colectores, los cuales giran junto con el rotor.

Tanto los anillos colectores rotatorios como las escobillas estacionarias permiten conectar resistencias externas en configuración serie al devanado del rotor. Estas resistencias externas se utilizan principalmente durante el periodo de arranque. Durante el periodo de operación normal, las tres escobillas se encuentran en cortocircuito.

La máquina de inducción de rotor devanado opera como jaula de ardilla si las terminales correspondientes a cada uno de los devanados en el rotor se conectan en cortocircuito [Chapman, 2012], [Wildi, 2007].

La máquina de inducción de rotor devanado se ilustra en la Figura 2.1.

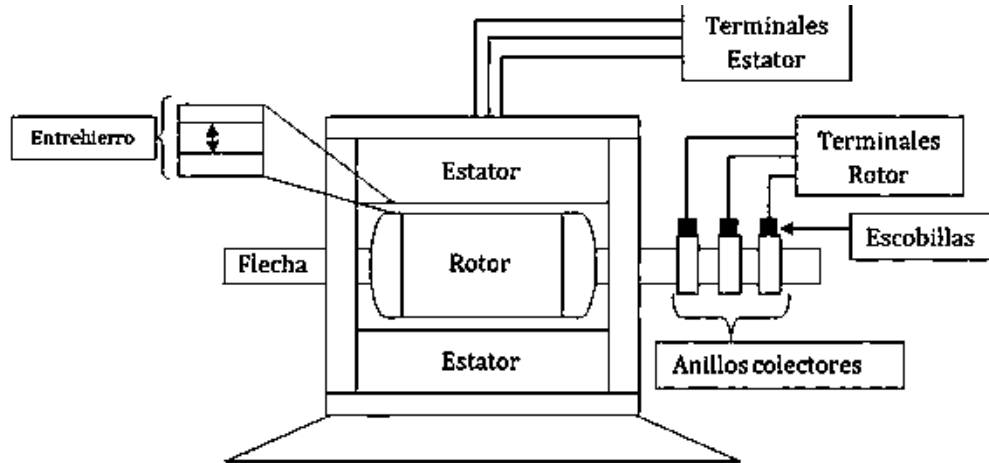


Figura 2.1: Máquina de inducción de rotor devanado.

En ésta tesis se consideró la interacción de la máquina de inducción de rotor devanado con las terminales del rotor en cortocircuito, con el propósito de operar como jaula de ardilla.

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la máquina de inducción se derivan de los circuitos equivalentes en el marco de referencia $qd0$, son presentadas por [Krause *et al.*, 2002].

Los circuitos equivalentes para la máquina de inducción trifásica simétrica balanceada en un marco de referencia arbitrario $qd0$ se muestran en las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4, respectivamente.

El circuito equivalente que modela la máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario en el eje q se muestra en la Figura 2.2 descrito por [Krause *et al.*, 2002].

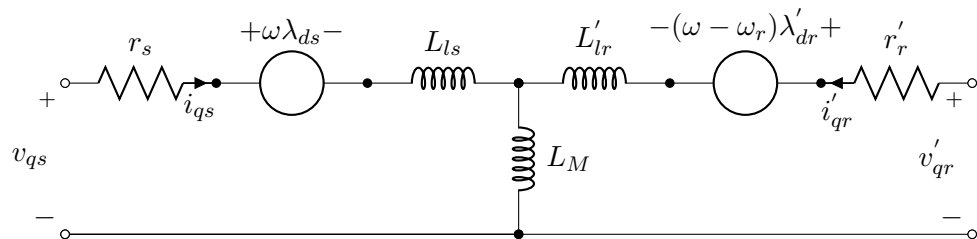


Figura 2.2: Circuito equivalente para la máquina de inducción en el eje q

Las ecuaciones diferenciales que se obtienen del circuito equivalente en el eje q para el estator y el rotor son:

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s i_{qs} - \omega \lambda_{ds} \quad (2.1)$$

$$\frac{d\lambda'_{qr}}{dt} = v'_{qr} - r'_r i'_{qr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} \quad (2.2)$$

donde:

v_{qs} y v'_{qr} voltajes del estator y rotor en q (V)

i_{qs} y i'_{qr} corrientes del estator y rotor en q (A)

λ_{ds} y λ'_{dr} enlaces de flujo del estator y rotor en d (Wb)

ω y ω_r velocidad angular de referencia y del rotor ($\frac{rad}{seg}$)

r_s y r'_r resistencia de los devanados del estator y rotor (Ω)

El circuito equivalente para el eje d se muestra en la Figura 2.3.

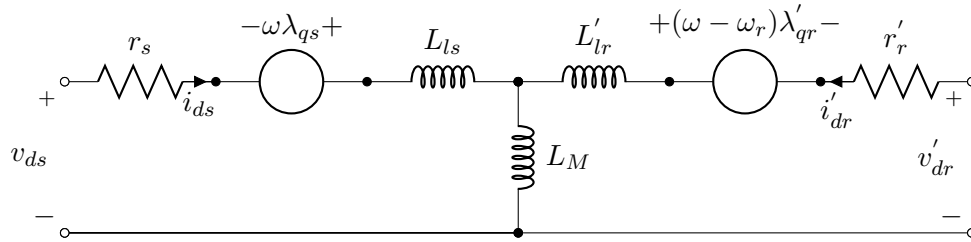


Figura 2.3: Circuito equivalente para la máquina de inducción en el eje d

De manera similar las ecuaciones diferenciales obtenidas del circuito equivalente en el eje d son las siguientes:

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} \quad (2.3)$$

$$\frac{d\lambda'_{dr}}{dt} = v'_{dr} - r'_r i'_{dr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} \quad (2.4)$$

donde:

v_{ds} y v'_{dr} voltajes del estator y rotor en d (V)

i_{ds} y i'_{dr} corrientes del estator y rotor en d (A)

λ_{qs} y λ'_{qr} enlaces de flujo del estator y rotor en d (Wb)

r_s y r'_r resistencia de los devanados del estator y rotor (Ω)

El circuito equivalente en 0 se presenta en la Figura 2.4.

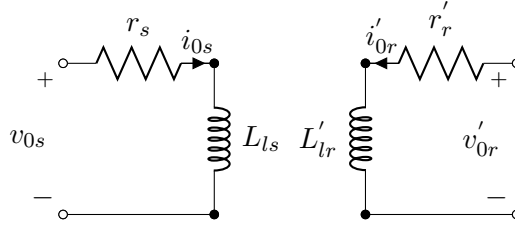


Figura 2.4: Circuito equivalente para la máquina de inducción en 0

Por último, las ecuaciones diferenciales obtenidas del circuito equivalente en 0 son:

$$\frac{d\lambda_{0s}}{dt} = v_{0s} - r_s i_{0s} \quad (2.5)$$

$$\frac{d\lambda'_{0r}}{dt} = v'_{0r} - r'_r i'_{0r} \quad (2.6)$$

donde:

v_{0s} y v'_{0r} voltajes del estator y rotor en 0 (V)

i_{0s} y i'_{0r} corrientes del estator y rotor en 0 (A)

λ_{0s} y λ'_{0r} enlaces de flujo en el estator y rotor en 0 (Wb)

La transformada de Park permite reducir la complejidad de las ecuaciones diferenciales de la máquina pasándolas del marco de referencia natural abc al marco de referencia arbitrario $qd0$ de acuerdo a [Krause *et al.*, 2002], a través de la transformación:

$$\begin{pmatrix} \lambda_{dq0s} \\ \lambda'_{dq0r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L'_{sr} (K_r)^{-1} \\ K_r (L'_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_r L'_r (K_r)^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

donde:

L_s , L'_r y L'_{sr} son las matrices de inductancias del rotor, estator y mutuas.

Las submatrices involucradas en la transformada de Park de la Ecuación (2.7) son las siguientes:

Matriz de transformación de las variables del rotor:

$$K_r = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Matriz de transformación de las variables del estator:

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

donde:

t tiempo (s)

f frecuencia de operación del sistema (Hz)

$\theta = 2\pi ft$ frecuencia angular ($\frac{rad}{seg}$)

$\beta = \theta - \theta_r$ Diferencia de frecuencia angular entre estator y rotor ($\frac{rad}{seg}$)

θ_r frecuencia angular de referencia en el rotor ($\frac{rad}{seg}$)

El resultado de la Ecuación (2.7) de acuerdo a [Krause *et al.*, 2002] es:

$$\begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{lr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Expresando la Ecuación (2.10) como:

$$(\lambda_{dq0}) = (L)(i_{dq0}) \quad (2.11)$$

Resolviendo la Ecuación (2.11) de tal manera que las ecuaciones queden expresadas en términos de enlaces de flujo resulta en:

$$(i_{dq0}) = (L)^{-1}(\lambda_{dq0}) \quad (2.12)$$

En forma desarrollada, la Ecuación (2.12) tiene la forma:

$$\begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{pmatrix} = \frac{1}{M} \begin{pmatrix} L'_{rr} & 0 & 0 & -L_m & 0 & 0 \\ 0 & L'_{rr} & 0 & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M}{L_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -L_m & 0 & 0 & L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & 0 & L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{M}{L_{lr}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Se desarrolla la Ecuación (2.13) sustituyendo cada corriente en las ecuaciones correspondientes de los circuitos equivalentes en $qd0$; una vez realizado ésto se agrupan los términos; por lo que se obtiene la siguiente ecuación diferencial matricial que contiene las variables eléctricas de la máquina de inducción expresada en términos de enlaces de flujo como:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_s L'_{rr}}{M} & -\omega & 0 & \frac{r_s L_m}{M} & 0 & 0 \\ \omega & -\frac{r_s L'_{rr}}{M} & 0 & 0 & \frac{r_s L_m}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r'_r L_m}{M} & 0 & 0 & \frac{r'_r L_{ss}}{M} & -(\omega - \omega_r) & 0 \\ 0 & \frac{r'_r L_m}{M} & 0 & (\omega - \omega_r) & \frac{r'_r L_{ss}}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{r'_r}{L_{lr}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \\ v'_{0r} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

donde:

L_{ls} Inductancia del estator (H)

L'_{lr} Inductancia del rotor (H)

L_m Indutancia mutua estator-rotor (H)

$L_{ss} = L_{ls} + L_m$

$L'_{rr} = L'_{lr} + L_m$

$M = L_{ss} L'_{rr} - (L_m)^2$

r_s y r'_r resistencias de los devanados del estator y rotor (Ω)

El par electromecánico expresado en términos $qd0$ se obtiene como:

$$T_e = -\left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)L_m(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (2.15)$$

La ecuación de movimiento para una sola masa concentrada tiene la forma:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{P}{2J}\right)(T_e - T_L) \quad (2.16)$$

donde:

P número de polos.

T_e par eléctrico (Nm)

T_L par mecánico (Nm)

El deslizamiento de la máquina de inducción se define como la velocidad relativa entre el campo magnético generado por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor, y se obtiene como [Chapman, 2012]:

$$\omega_r = \omega_S(1 - z) \quad (2.17)$$

donde:

z deslizamiento

ω_r velocidad del rotor ($\frac{rad}{seg}$)

ω_S velocidad síncrona ($\frac{rad}{seg}$)

Las ecuaciones mostradas anteriormente se implementan en Matlab y Simulink, transformando las variables en $qd0$ al marco de referencia natural abc con bloques especiales de transformación y otras herramientas disponibles en la biblioteca de Simulink.

2.2.2. Modelo del panel fotovoltaico.

El panel fotovoltaico se encuentra constituido por celdas solares que se encuentran fabricadas de materiales semiconductores, como el silicio. La energía luminosa que proviene del sol se encuentra compuesta de fotones (paquetes de energía solar), estos contienen diferentes cantidades de energía que corresponden a diferentes longitudes de onda del espectro solar [Masters, 2004].

El efecto fotovoltaico es el proceso físico que realiza la célula fotovoltaica para convertir la energía luminosa en energía eléctrica, a través de un proceso químico entre iones y huecos como se ilustra en la Figura 2.5.

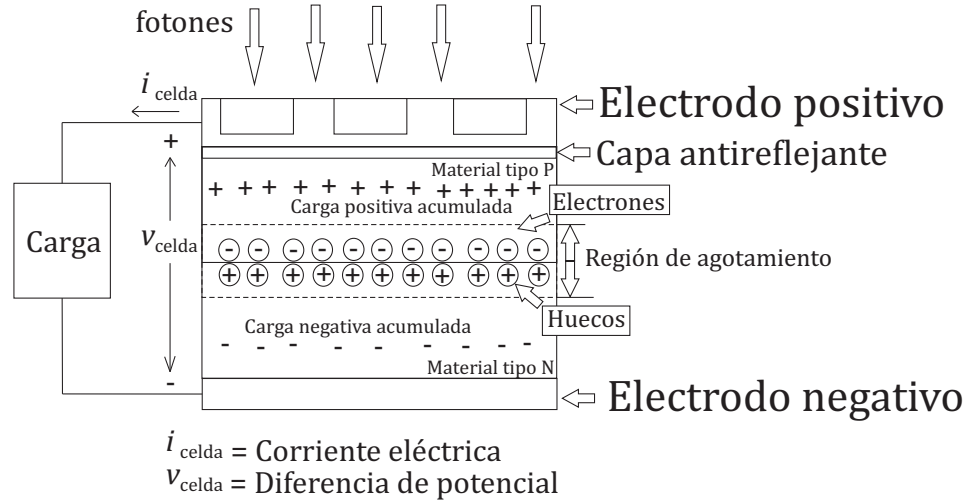


Figura 2.5: Esquema de la celda fotovoltaica [Masters, 2004]

La corriente de la celda fotovoltaica varía con el nivel de irradiación solar y también se ve afectada por la temperatura [Villalva *et al.*, 2009a]. Las ecuaciones que se utilizaron para modelar el funcionamiento del panel fotovoltaico según [Villalva *et al.*, 2009b] son descritas a continuación.

La fotocorriente I_{PV} generada por el panel fotovoltaico se encuentra expresada como [Prakash *et al.*, 2016]:

$$I_{PV} = (I_{PV_n} N_P + K_I(T - T_n)) \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (2.18)$$

donde:

T temperatura a la que se encuentra operando el panel (°K)

T_n temperatura nominal del panel (°K)

G irradiación a la que se encuentra operando el panel (W/m^2)

G_n irradiación nominal del panel (W/m^2)

$K_I=0.0032$ parámetro constante para la corriente del panel KC200GT

N_P número de paneles conectados en paralelo

I_{PV_n} fotocorriente nominal del panel medida en (A)

La fotocorriente nominal I_{PV_n} del panel se obtiene como:

$$I_{PV_n} = \frac{R_P + R_S}{R_P} I_{SC_n} \quad (2.19)$$

donde:

R_S resistencia en serie del panel (Ω)

R_P resistencia en paralelo del panel (Ω)

I_{SCn} corriente de cortocircuito nominal del panel (A)

La corriente de saturación del diodo I_0 se expresa como:

$$I_0 = \frac{I_{SCn}N_P + K_I(T - T_n)}{\exp\left(\frac{V_{OCn}N_S + K_V(T - T_n)}{aV_tN_S}\right) - 1} \quad (2.20)$$

donde:

I_{SCn} corriente de cortocircuito nominal del panel (A)

$K_V = -0.1230$ parámetro constante para el voltaje del panel KC200GT

V_t voltaje térmico del panel (V)

N_S número de paneles conectados en serie

a factor de idealidad (1 para el Germanio y 2 para es Silicio)

V_{OCn} voltaje de circuito abierto nominal en terminales(V)

El voltaje térmico del panel fotovoltaico V_t se puede calcular con:

$$V_t = \frac{N_{Serie}kT}{q} \quad (2.21)$$

donde:

$N_{Serie} = 54$ celdas que integran el panel modelo KC200GT

$k = 1.3806503$ constante de Boltzman (J/°K)

$q = 1.602176461$ constante de carga del electrón (C)

La corriente I_{CD} que entrega el panel fotovoltaico, considerando un arreglo serie-paralelo se encuentra dado por:

$$I_{CD} = I_{PV}N_P - I_0N_P \left(\exp\left(\frac{V_{CD} + I_{CD}R_S\left(\frac{N_S}{N_P}\right)}{aV_tN_S}\right) - 1 \right) - \frac{V_{CD} + I_{CD}R_S\left(\frac{N_S}{N_P}\right)}{R_P\left(\frac{N_S}{N_P}\right)} \quad (2.22)$$

La ecuación básica que define la operación de un solo panel fotovoltaico, es decir $N_S = N_P = 1$ se define como:

$$I_{CD} = I_{PV} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{CD} + I_{CD}R_S}{aV_t}\right) - 1 \right) - \frac{V_{CD} + I_{CD}R_S}{R_P} \quad (2.23)$$

donde:

V_{CD} voltaje a la salida del panel fotovoltaico (V)

I_{CD} corriente a la salida del panel fotovoltaico (A).

Considerando las Ecuaciones (2.18), (2.20) y (2.21), se procede a resolver la Ecuación (2.23) haciendo uso de un método numérico de Newton Raphson, que será descrito más adelante; con la finalidad de encontrar las raíces que permiten obtener la solución de la corriente I_{CD} y por ende el voltaje V_{CD} en las terminales del panel.

Primeramente se procede a igualar a cero la Ecuación (2.23), quedando de la forma:

$$f(I_{CD}, V_{CD}) = 0 = I_{PV} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{CD} + I_{CD}R_S}{aV_t} \right) \right) - \frac{V_{CD} + I_{CD}R_S}{R_P} - I_{CD} \quad (2.24)$$

Derivando la Ecuación (2.24) con respecto a I_{CD} , se obtiene como resultado:

$$f'(I_{CD}, V_{CD}) = -I_0 \left(\exp \left(\frac{V_{CD} + I_{CD}R_S}{aV_t} \right) \right) \left(\frac{R_S}{aV_t} \right) - \left(\frac{R_S}{R_P} \right) - 1 \quad (2.25)$$

De acuerdo a [Villalva *et al.*, 2009a], se emplea la siguiente ecuación del panel definida como:

$$I_m = I_{PV}N_P - I_0N_P \left(\exp \left(\frac{V_{CD} + I_{CD}R_S \left(\frac{N_S}{N_P} \right)}{aV_tN_S} \right) - 1 \right) \quad (2.26)$$

Para utilizar el modelo equivalente propuesto por [Villalva *et al.*, 2009b] se emplean las ecuaciones (2.18), 2.20 y (2.26); la interacción entre éstas ecuaciones se ilustra en la Figura 2.6.

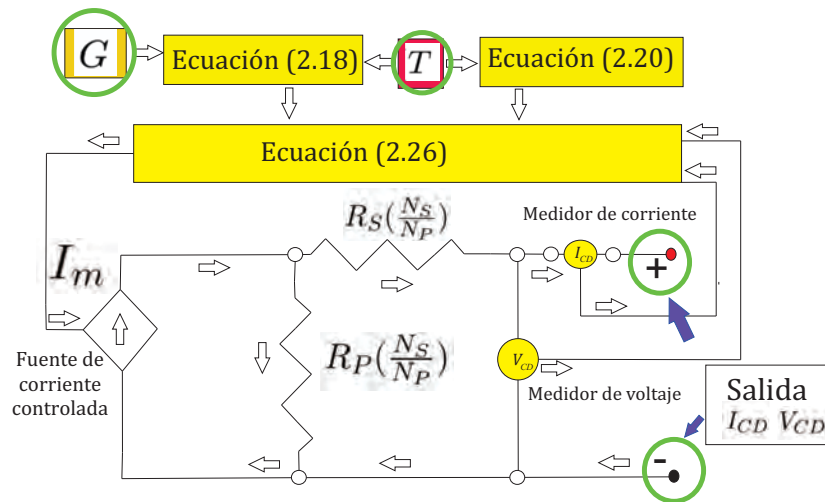


Figura 2.6: Modelo del panel fotovoltaico implementado en Simulink [Villalva *et al.*, 2009a]

El modelo equivalente del panel fotovoltaico implementado en Simulink recibe la entrada de valores de temperatura T ($^{\circ}\text{K}$) e irradiación solar G (W/m^2).

Este circuito equivalente puede ser implementado directamente en Simulink empleando bloques de operaciones matemáticas y elementos eléctricos disponibles en la biblioteca de SimPowerSystems de Simulink.

En ésta tesis se consideran los parámetros mostrados en la Tabla 2.1, los cuales corresponden a un panel fotovoltaico KC200GT, y también se emplea el modelo del panel propuesto por [Villalva *et al.*, 2009a].

Tabla 2.1: Parámetros del panel KC200GT ($T = 25^{\circ}$ y $G = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$)

I_{mp}	7.61 A	corriente de máxima
V_{mp}	26.3 V	voltaje de máxima potencia
P_{max}	200.143 W	potencia máxima
I_{SC}	8.21 A	corriente de cortocircuito
V_{OC}	32,9 V	voltaje de circuito abierto
R_P	425.405 Ω	resistencia en paralelo del panel
R_S	0.221 Ω	resistencia en serie del panel
N_{Serie}	54	celdas en serie que integra el panel

La Figura 2.7 muestra el comportamiento de la corriente I_{CD} con respecto al voltaje V_{CD} del panel fotovoltaico KC200GT, para los valores de Tabla 2.1.

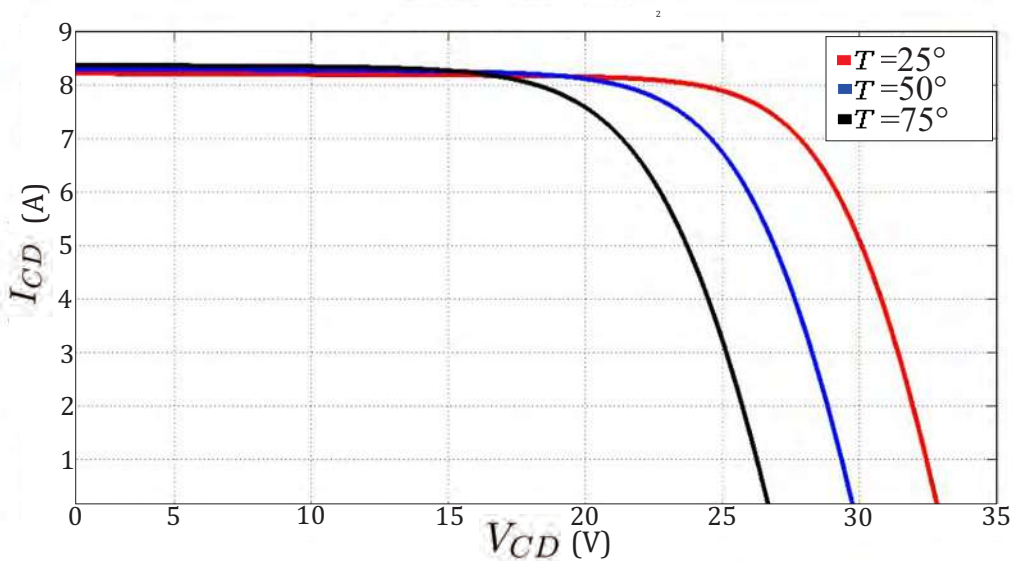


Figura 2.7: Curvas de V_{CD} vs I_{CD} del panel fotovoltaico KC200GT

El voltaje que suministra el panel fotovoltaico varía con la temperatura, generando un nivel de potencia P_{CD} menor a la nominal de 200 W. El comportamiento del voltaje y la potencia del panel fotovoltaico se muestra en la Figura 2.8.

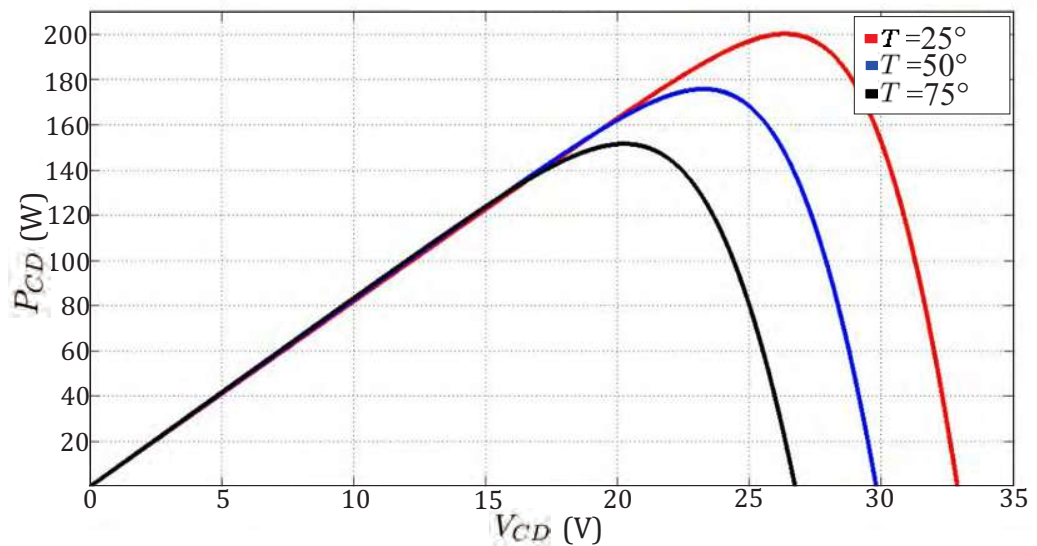


Figura 2.8: Curvas de V_{CD} vs P_{CD} del panel fotovoltaico KC200GT (V)

La Figura 2.9 muestra el comportamiento del panel fotovoltaico KC200GT cuando existe una variación en el nivel de irradiación solar G .

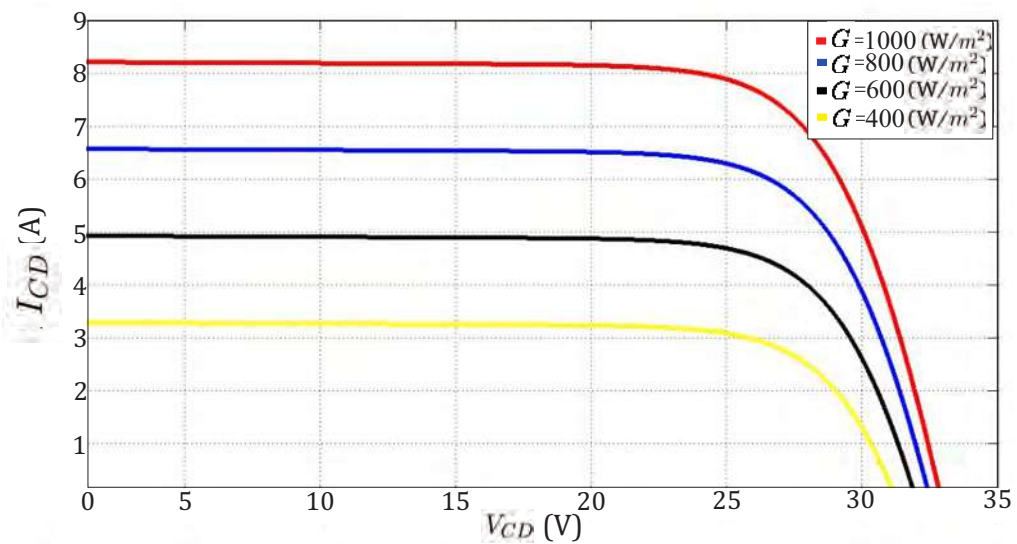


Figura 2.9: Curvas de V_{CD} vs I_{CD} variando el nivel de irradiación G en KC200GT

2.2.3. Modelo de convertidor CD-CD boost

Éste tipo de convertidor tiene la capacidad de proporcionar un nivel de voltaje de CD mayor al de su entrada, el cuál puede variarse mediante el ciclo de servicio (D) para la señal PWM, la cual controla la conmutación de un interruptor. El diagrama del circuito convertidor *boost* se ilustra en la Figura 2.10.

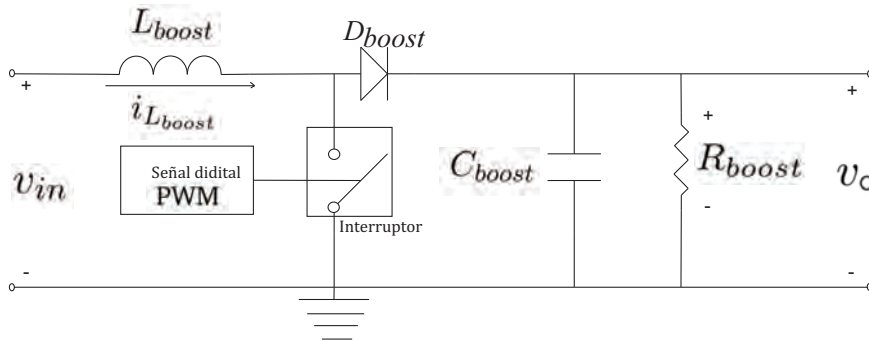


Figura 2.10: Circuito eléctrico del convertidor *boost*

El convertidor *boost* se utiliza en arreglos de paneles fotovoltaicos con la finalidad de entregar un voltaje de salida mayor. Dado que el panel fotovoltaico se encuentra en función de la temperatura y el nivel de irradiación solar; se hace uso de este elemento, con el fin de incrementar el nivel de CD. Ésta señal de CD puede inyectarse a un inversor con filtro, con el fin de generar una señal de CA. En la Figura 2.11 se muestra el modelo promedio del convertidor *boost* con fuentes controladas presentado por ([Van *et al.*, 1995]).

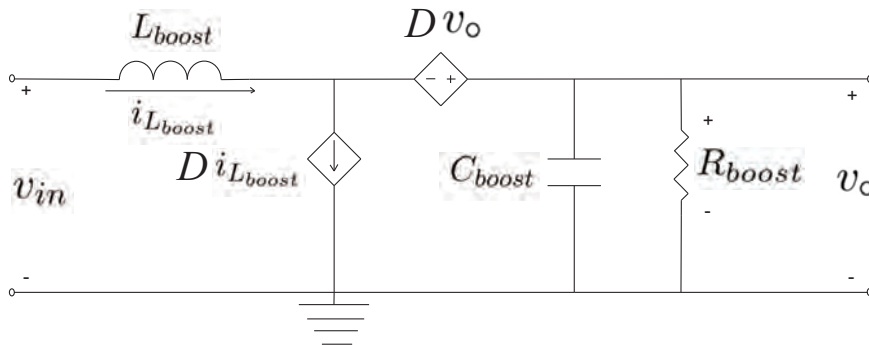


Figura 2.11: Modelo promedio del convertidor *boost* por ([Van *et al.*, 1995])

La derivación de las ecuaciones del circuito presentado en la Figura 2.11 se muestran a mayor detalle en el Apéndice A. La expresión resultante para la corriente en la inductancia del convertidor *boost* es:

$$\frac{di_{L_{boost}}}{dt} = -\frac{(1-D)}{L_{boost}}v_o + \frac{1}{L_{boost}}v_{in} \quad (2.27)$$

donde:

D ciclo de servicio del convertidor *boost*.

v_{in} voltaje de CD en la entrada del convertidor *boost* (V).

v_o voltaje de CD a la salida del convertidor *boost* (V).

L_{boost} inductancia a la entrada del convertidor *boost* (H).

Para el voltaje de salida del convertidor *boost* se tiene que:

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{(1-D)}{C_{boost}}i_{L_{boost}} - \frac{1}{R_{boost}C_{boost}}v_o \quad (2.28)$$

donde:

$i_{L_{boost}}$ corriente en la inductancia del convertidor *boost*. (A)

C_{boost} capacitor a la salida del convertidor *boost* (F).

R_{boost} resistencia a la salida del convertidor *boost* (Ω).

Expresando las Ecuaciones (2.27) y (2.28) como ecuación matricial, se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \frac{di_{L_{boost}}}{dt} \\ \frac{dv_o}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{(1-D)}{L_{boost}} \\ \frac{(1-D)}{C_{boost}} & -\frac{1}{R_{boost}C_{boost}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{L_{boost}} \\ v_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_{boost}} \\ 0 \end{pmatrix} (v_{in}) \quad (2.29)$$

Ésta ecuación matricial permite simular el comportamiento del convertidor *boost* empleado en ésta tesis.

2.2.4. Algoritmo de conductancia incremental

El método de conductancia incremental se basa en el hecho de que la pendiente de la curva de potencia del panel fotovoltaico es cero cuando se encuentra en el máximo punto de potencia (MPP) [Echeverría *et al.*, 2014]. La relación de potencia con respecto del voltaje de CD se definen como sigue:

$$\frac{dp}{dv} = 0 \quad \text{cuando se encuentra en el MPP} \quad (2.30)$$

$$\frac{dp}{dv} > 0 \text{ cuando se encuentra a la izquierda del MPP} \quad (2.31)$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \text{ cuando se encuentra a la derecha del MPP} \quad (2.32)$$

donde:

p potencia instantánea de CD (W).

v voltaje instantáneo de CD (V).

De acuerdo a [Bollen y Hassan, 2011] se tiene que:

$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(vi)}{dv} = i + v \frac{di}{dv} \approx i + v \frac{\Delta i}{\Delta v} \quad (2.33)$$

Por lo tanto, las expresiones (2.30), (2.31) y (2.32) se pueden reescribir de la siguiente manera según [Prakash *et al.*, 2016]:

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} = -\frac{i}{v} \text{ cuando se encuentra en el MPP} \quad (2.34)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} > -\frac{i}{v} \text{ cuando se encuentra a la izquierda del MPP} \quad (2.35)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} < -\frac{i}{v} \text{ cuando se encuentra a la derecha del MPP} \quad (2.36)$$

El algoritmo comienza por tomar lecturas previas de voltaje y corriente de CD, éstos valores se guardan y nuevamente se vuelve a tomar otras lecturas de voltaje y corriente de CD. Con las lecturas de voltaje y corriente previas y actuales se calcula una diferencia entre estos dos valores. El resultado de esta diferencias se divide para calcular el valor de conductancia incremental de acuerdo las ecuaciones (2.34) a (2.35)

Después se realiza la comparación entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea de los voltajes y corrientes de CD. Cuando las condiciones establecidas para el MPP se cumplen, se genera un incremento o decremento el ciclo de servicio. Lo que provoca cambios en el voltaje y la corriente. El proceso continua iterando hasta que se alcance el punto MPP. Éste algoritmo se utiliza para controlar el convertidor *boost*. El convertidor recibe el voltaje del panel fotovoltaico. La simulación de estos elementos considerando el algoritmo de conductancia incremental es presentado en los casos de estudio.

El diagrama de flujo del algoritmo de conductancia incremental se describe de manera detallada en la Figura 2.12.

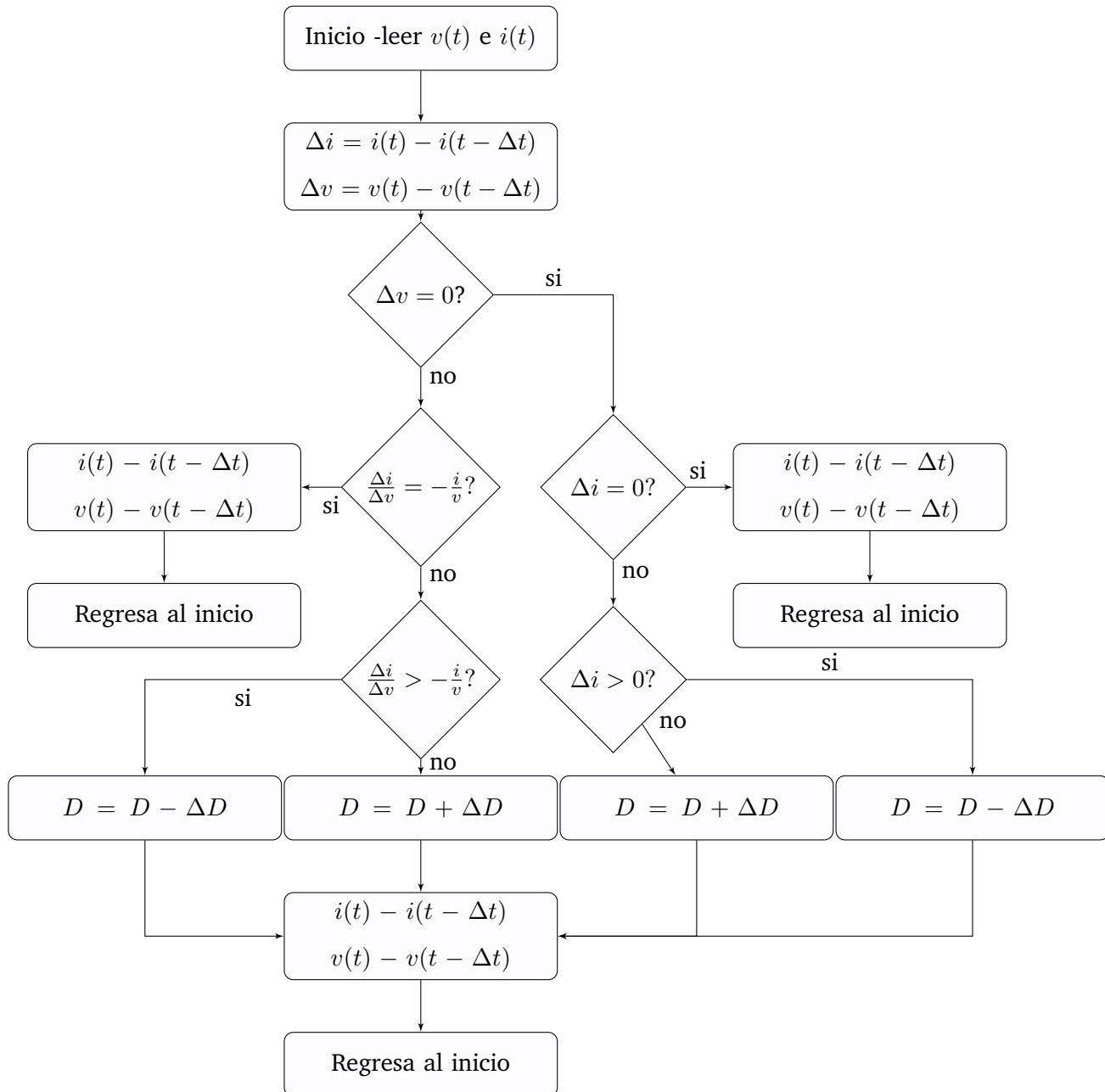


Figura 2.12: Algoritmo de conductancia incremental

El algoritmo se usa en esta tesis para el control del convertidor *boost* considerando un incremento en el ciclo de servicio ΔD de 0.01. Las formas de onda obtenidas en la simulación se presentan en los casos de estudio.

2.2.5. Esquema del inversor de tres ramas

Los inversores se ubican en la electrónica de potencia dentro del campo de la conversión de energía eléctrica. Su función principal es construir una señal alterna con una amplitud y frecuencia variable a partir de una fuente de CD [López *et al.*, 2007]. La topología del inversor con tres ramas utilizada en ésta tesis se muestra en la Figura 2.13.

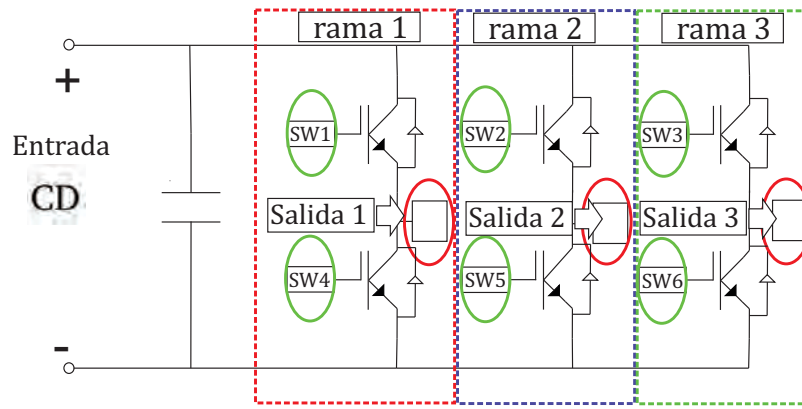


Figura 2.13: Topología del inversor de tres ramas

En la Figura 2.13 se puede observar que el inversor se encuentra integrado por tres ramas con interruptores, cada interruptor (SW) se controla mediante una señal digital en su compuerta. Donde los interruptores denotados como SW1 y SW4 corresponden a la rama 1, SW2 y SW5 a la rama 2, SW3 y SW6 a la rama 3.

En las secciones posteriores se observará que cada rama recibe una señal de modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM) para cada interruptor; donde una de ellas es la señal digital resultante de la comparación entre la señal moduladora y portadora, mientras que la otra es la parte complementaria. Además, se considera un tiempo muerto para garantizar que no se genere un cortocircuito durante su operación de conmutación [Mohan *et al.*, 2009]. Para operar el inversor, en ésta tesis se utilizó el método de conmutación modulado por ancho de pulso senoidal (SPWM). Debe considerarse que la forma de onda a la salida de los inversores no son exactamente senoidales, debido a los efectos de la conmutación en la generación de estas ondas [Londono, 2008]. Por lo que se requiere de un filtro para eliminar el contenido armónico, el cuál se describirá en la siguiente sección.

2.2.6. Filtro pasivo LC

El filtro LC es uno de los métodos más sencillos para mitigar los armónicos presentes en las señales [Arrillaga y Watson, 2003]; su ventaja principal es su simplicidad; pero lamentablemente los filtros pasivos presentan varias desventajas importantes, tales como su deterioro tras el paso del tiempo y por ende pérdida, así como posible resonancia en el sistema de potencia. Cuando el inversor se encuentra operando con las señales SPWM y un nivel de voltaje de CD a la entrada, a su salida las señales de voltajes entre fases tiene un contenido armónico que se encuentra alrededor de los múltiplos de la frecuencia de conmutación de los interruptores [Mohan *et al.*, 2009]. En ésta tesis se emplea un filtro pasa-bajas pasivo LC, el cuál tiene la capacidad de filtrar las señales con frecuencias que superen la frecuencia de corte sintonizada, permitiendo el paso de las señales de baja frecuencia que se encuentren por debajo de la frecuencia de corte f_c [Ogata, 1998]. En la Figura 2.14 se muestra el circuito equivalente de una rama del filtro LC. La frecuencia que se desea obtener es de 60 Hz, que corresponde a la frecuencia de la señal moduladora.

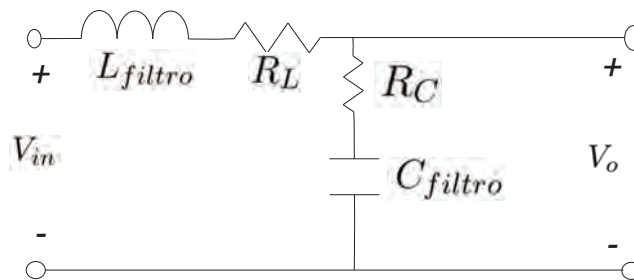


Figura 2.14: Circuito para una rama del filtro LC [Hayt *et al.*, 2007]

Se reportan los parámetros del filtro LC en la Tabla 2.2. Éstos valores se obtienen de los capacitores e inductancias fijas con equipo Lab-Volt.

Tabla 2.2: Parámetros del filtro LC

Elemento	Valor	Resistencia interna en serie
Inductancia	$L_{filtro} = 14.5\text{mH}$	$R_L = 0.96 \Omega$
Capacitor	$C_{filtro} = 77\mu F$	$R_C = 0.98 \Omega$

La función de transferencia $H(s)$ obtenida para una rama del filtro LC es la siguiente:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{sC_{filtro}R_C + 1}{s^2L_{filtro}C_{filtro} + s(C_{filtro}R_L + R_C C_{filtro}) + 1} \quad (2.37)$$

donde:

V_{in} voltaje de entrada del filtro (V)

V_o voltaje de salida del filtro (V)

La frecuencia de corte f_C del filtro LC se puede calcular como [Hayt *et al.*, 2007]:

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{filtro}C_{filtro}}} \quad (2.38)$$

Haciendo uso de la Ecuación (2.38) y los valores de la Tabla 2.2 se tiene que la frecuencia de corte f_C es de aproximadamente 150.62 Hz. Las frecuencias que superen éste valor se filtran, evitando las frecuencias altas del inversor.

La frecuencia angular de corte ω_C se puede calcular como:

$$\omega_C = \frac{1}{\sqrt{L_{filtro}C_{filtro}}} \quad (2.39)$$

Empleando la Ecuación (2.39) y sustituyendo los valores de la Tabla 2.2 se tiene que la frecuencia de corte es de $946.39 \frac{rad}{seg}$. La Figura 2.15 muestra un diagrama de bode utilizando la función de transferencia mostrada en la Ecuación (2.37) con ayuda de Matlab.

El diagrama de bode sirve para caracterizar la respuesta de filtro LC

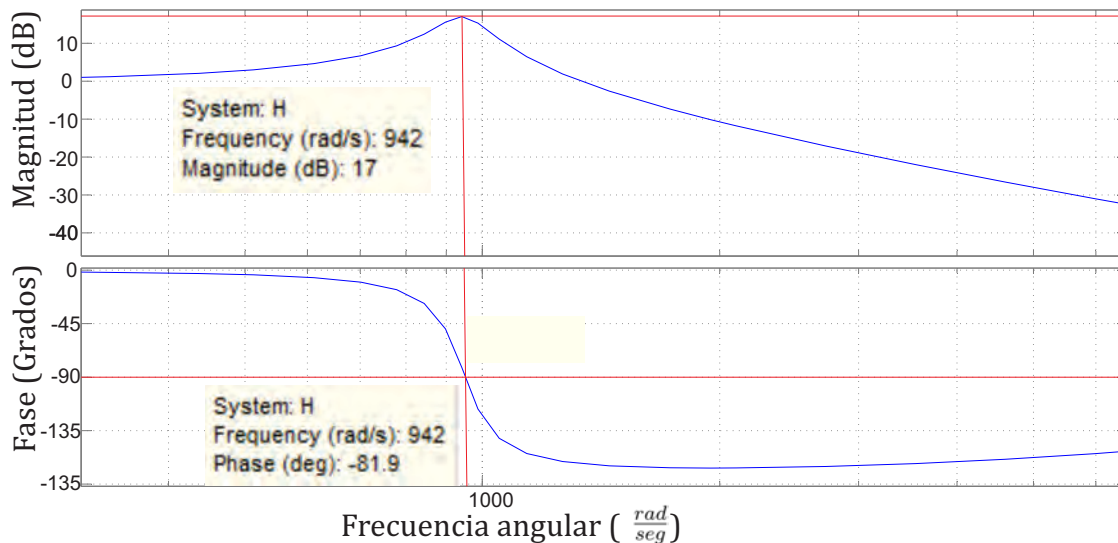


Figura 2.15: Diagrama de magnitud y fase para el filtro LC

2.2.7. Transformador trifásico estrella-estrella aterrizada

En ésta tesis se utilizan transformadores trifásicos de doce terminales 8372-02 de la marca Lab-Volt (Ver Apéndice H). Cada transformador tiene dos tipos de devanados distinguidos como X e Y; el devanado X puede operar a un voltaje nominal 120 V; mientras que devanado Y puede operar hasta 208 V. Estos devanados pueden conectarse de cierta manera para reducir o incrementar el voltaje generado. El lado primario y secundario fue seleccionado de acuerdo al voltaje requerido. En la Figura 2.16 se muestra la conexión del transformador que se empleado en los casos de estudio.

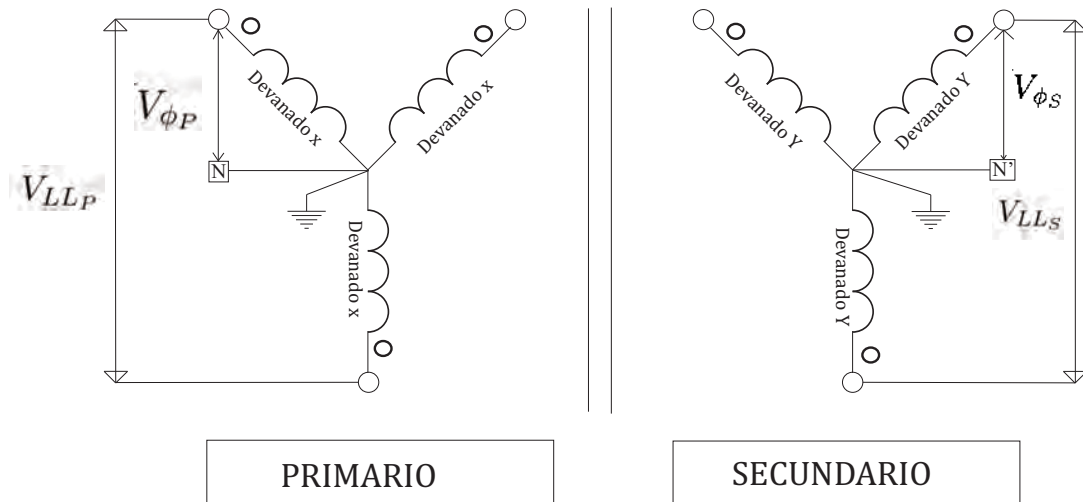


Figura 2.16: Transformador trifásico conexión estrella-estrella aterrizada [Chapman, 2012]

En una conexión estrella-estrella el voltaje del primario en cada fase del transformador está dado por $V_{\phi_P} = \frac{V_{LLP}}{\sqrt{3}}$, mientras que el voltaje de fase en el secundario está relacionado con el voltaje de línea a línea $V_{LLS} = \sqrt{3}V_{\phi_S}$. La relación de voltaje general en el transformador para éste tipo de conexión es la siguiente [Chapman, 2012]:

$$\frac{V_{LLP}}{V_{LLS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi_P}}{\sqrt{3}V_{\phi_S}} = a \quad (2.40)$$

donde:

V_{LLP} voltaje entre fases en el primario del transformador (V).

V_{LLS} voltaje entre fases en el secundario del transformador (V).

V_{ϕ_P} es el voltaje de fase a neutro en el primario del transformador (V).

V_{ϕ_S} es el voltaje de fase a neutro en el secundario del transformador (V).

2.2.8. Módulo de sincronización

El modulo de sincronizacion es un dispositivo que permite establecer la conexión entre dos sistemas trifásicos. Éste equipo se emplea físicamente para sincronizar el sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Además, dicho dispositivo tiene integradas tres lámparas que emiten una luz que indican la secuencia de fases. La interpretación de acuerdo al fabricante Lab-Volt es la siguiente:

- Encendido/apagado intermitente-(la secuencia entre fases es incorrecta). Por lo que no se debe sincronizar.
- Encendido/apagado en grupo-(la secuencia de fases es correcta). En este caso si se puede sincronizar.

La ilustración de este equipo de sincronización se ilustra según se muestra en la Figura 2.17.

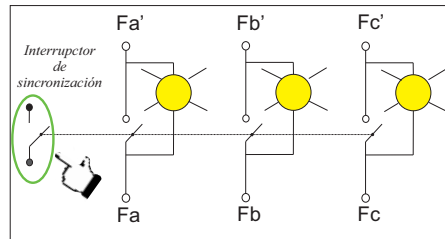


Figura 2.17: Módulo de sincronización

En la parte superior del módulo de sincronización entran tres fases que provienen de un sistema de generación 1. Mientras que en la parte inferior se conectan las fases del sistema de generación 2. Con referencia a [Wildi, 2007], las condiciones que se tienen que satisfacer para sincronizar fuentes generadoras de CA o ser conectadas en paralelo son:

- Tener el mismo nivel de frecuencia entre las fuentes generadoras (60 Hz).
- Debe existir una misma secuencia de fases en las fuentes generadoras (*abc*).

Además, al momento de cerrar las cuchillas de sincronización en este dispositivo, la conexión permanece activa gracias a que se tiene la misma secuencia de fases y la misma frecuencia de operación del sistema. En caso de que no se tenga la misma secuencia de fases (es decir, que una tenga secuencia *abc* y la otra *acb*) se activaran las protecciones que abren el circuito eléctrico.

En la Figura 2.18 se ilustra el esquema de sincronización entre dos fuentes generadas. En la simulación el interruptor trifásico de Simulink representa éste módulo.

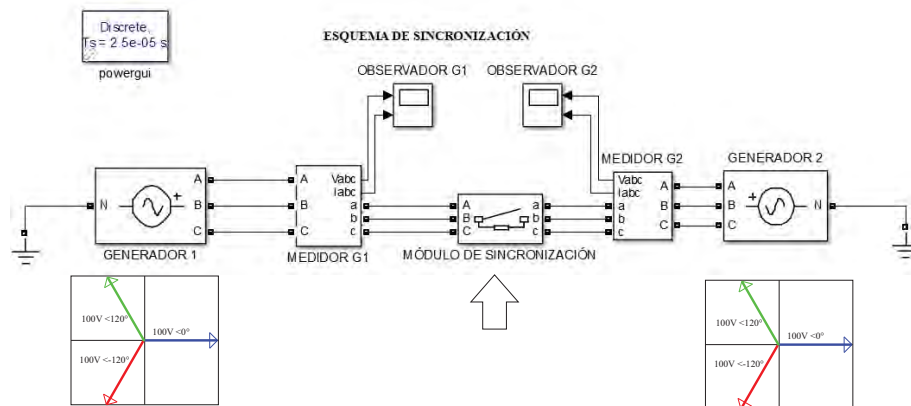


Figura 2.18: Esquema de sincronización entre dos fuentes de generación trifásicas

2.3. Construcción SPWM para el inversor de tres ramas

En ésta tesis se usa la técnica de modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM). Las señales SPWM se usan para realizar el control de encendido de los interruptores para que pueda operar el inversor. Ésta técnica consiste en comparar tres señales senoidales de misma amplitud desfasadas 120° entre sí, conocidas como señales moduladoras; con una señal portadora obteniéndose una señal digital con ciclo de servicio variable [Mohan *et al.*, 2009].

La señal SPWM resultante controla la conmutación de cada uno de los interruptores (SW1-SW6) del inversor de tres ramas. La señal moduladora contiene la frecuencia del sistema y la portadora tiene información de la frecuencia de conmutación del inversor.

En la Figura 2.19 se ilustra la relación de una señal moduladora con la portadora;

que genera la señal SPWM que será enviada a la compuerta del interruptor del inversor.

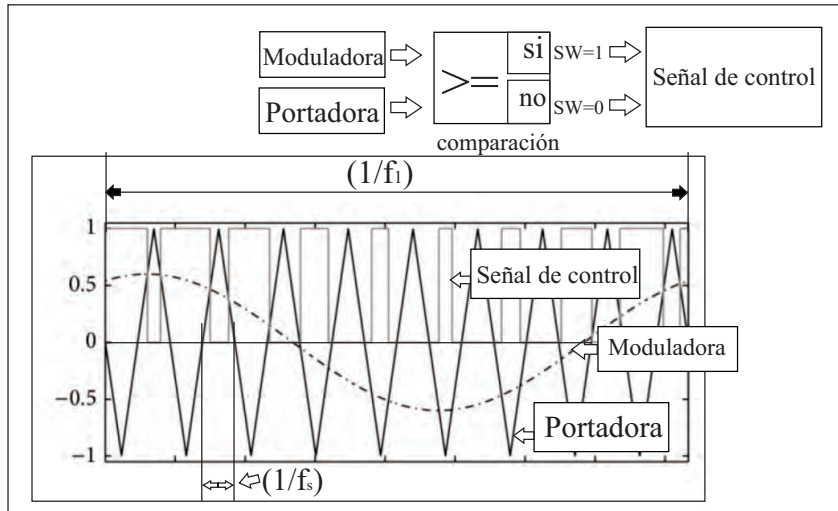


Figura 2.19: Generación SPWM

En la Figura 2.19 los puntos de intersección entre la señal moduladora con la portadora demarcan los momentos en que ocurren los flancos. Por lo que se genera un ciclo de servicio variable. El resultado de la comparación entre cada una de estas señales produce las señales SPWM que controlan la conmutación en el inversor. En la Figura 2.20 se muestra el circuito de conmutación correspondiente al inversor.

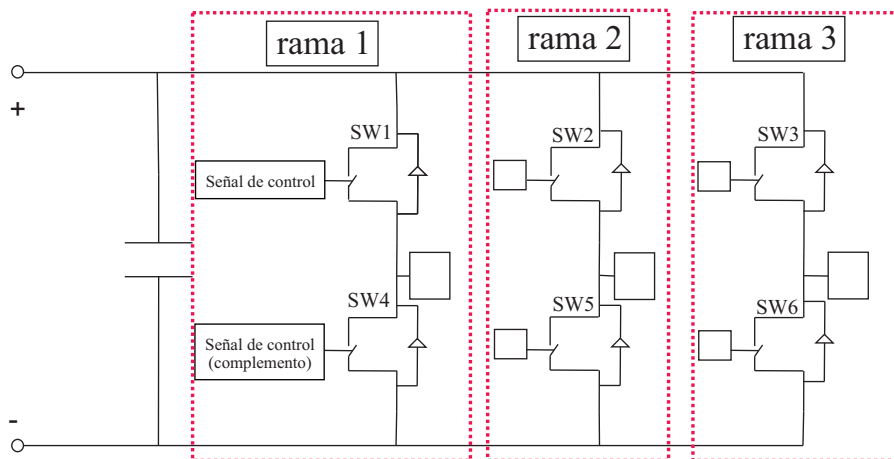
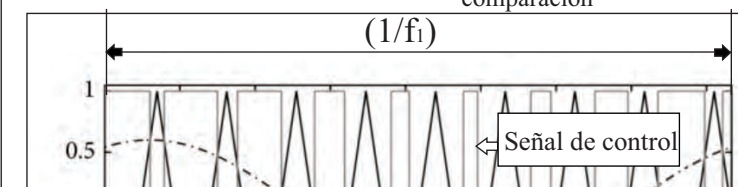


Figura 2.20: Esquema de Conmutación del Inversor

Los interruptores SW1 y SW4 de la rama 1 en la Figura 2.20 se controlan por la



comparación entre la señal moduladora de una fase y la portadora respectivamente, como se mostró anteriormente en la Figura 2.19. De manera similar se aplica para las ramas 2 y 3; considerando que cada señal moduladora se encuentra desfasada 120° .

Para el voltaje ideal entre fases rms (raíz media cuadrática) de la señal fundamental sin distorsión, en salida del inversor según [Mohan *et al.*, 2009] se expresa como:

$$V_{LLrms} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \quad (2.41)$$

donde:

V_{LLrms} voltaje rms entre fases a la salida del inversor (V).

V_d voltaje de CD a la entrada del inversor (V).

m_a relación de modulación en amplitud.

La relación de modulación de amplitud m_a se expresa mediante la relación:

$$m_a = \frac{S_{Moduladora}}{S_{Portadora}} \quad (2.42)$$

donde:

$S_{Moduladora}$ amplitud de la señal moduladora (V).

$S_{Portadora}$ amplitud de la señal portadora (V).

La relación de modulación de frecuencia m_f se define como:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (2.43)$$

donde:

f_s frecuencia de la señal portadora (Hz).

f_1 frecuencia de la señal moduladora (Hz).

2.4. Cálculo de la distorsión armónica total de una señal

El estudio del análisis de Fourier permite descomponer una forma de onda periódica distorsionada en series que contienen sus componentes de CD, la frecuencia fundamental (60 Hz), segunda componente (120 Hz), tercera componente (180 Hz) de manera sucesiva en la frecuencia fundamental. Para analizar La distorsión armónica total (*THD*) en la

corriente y voltaje se pueden calcular como [Mohan *et al.*, 2009]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (2.44)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2}}{V_1} \quad (2.45)$$

donde:

I_1 corriente rms de la fundamental (A).

h componente armónica.

I_h corriente rms de la componente armónica (A).

V_1 voltaje rms de la fundamental (V).

V_h voltaje rms de la componente armónica (V).

En la plataforma de Simulink se dispone de la transformada rápida de Fourier (FFT) de Powergui. Ésta herramienta permite conocer el contenido armónico de la forma de onda analizada.

2.5. Conclusiones.

En este capítulo se presentan los modelos que intervienen en el sistema híbrido eólico-fotovoltaico, tales como el modelo de la máquina de inducción en componentes $qd0$, el modelado del panel fotovoltaico, el convertidor *boost*, el algoritmo de MPP de conductancia incremental. También se describió de manera concisa el esquema del inversor de tres ramas, el filtro pasivo LC, el transformador y la función del módulo de sincronización. Por último, se presentaron las ecuaciones que permiten calcular el valor de THD para las formas de onda de voltaje y corriente.

Capítulo 3

HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS NUMÉRICO Y DIGITAL.

3.1. Introducción.

En este capítulo se describen de manera concisa las técnicas numéricas utilizadas en esta tesis, con el fin de representar la operación dinámica de algunos componentes del sistema eólico-fotovoltaico de generación. En particular, se hace referencia a la solución numérica del sistema mediante el método Runge kutta de cuarto orden para el convertidor *boost*, así como del método de Newton Raphson para la solución numérica del panel fotovoltaico.

3.2. Métodos de solución numérica.

Los métodos de solución que fueron empleados en esta tesis son el método de Runge Kutta de Cuarto Orden (RK4); para la solución de ecuaciones diferenciales considerando una paso de integración (T_s) de $25 \mu s$ en la simulación fuera de línea del convertidor *boost*; por otro lado, también se utiliza el método de Newton Raphson para encontrar la solución de las ecuaciones del panel fotovoltaico.

3.2.1. Método de RK4 para una ecuación diferencial

El más popular de los métodos es el Runge Kutta de Cuarto Orden (RK4), y la forma comúnmente usada [Chapra y Canale, 2007] se muestra como sigue:

$$y_{(i+1)} = y_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.1)$$

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (3.2)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{(hk_1)}{2}\right) \quad (3.3)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{(hk_2)}{2}\right) \quad (3.4)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \quad (3.5)$$

donde:

h tamaño de paso.

x_i incremento en el paso.

f función a evaluar.

$k_1 \dots k_4$ coeficientes evaluados en la función.

y_i variable a resolver.

Éste método resulta efectivo para resolver ecuaciones diferenciales, pero en el caso de que se tengan más variables de estado, éste método se extiende como se muestra en la siguiente sección.

3.2.2. Método de RK4 para un sistema de ecuaciones diferenciales

En el campo de la ingeniería y la ciencia se hace uso de sistemas de ecuaciones, por lo que si se cuenta con un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias y un número de “1,2... n ” estados; su representación es la siguiente [Chapra y Canale, 2007]:

$$\frac{dy_1}{dx} = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.6)$$

.

.

$$\frac{dy_n}{dx} = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.7)$$

El calculo de los valores de k_1, k_2, k_3 y k_4 se hace:

Para k_1 :

$$k_{(1,1)} = f_1(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.8)$$

$$k_{(1,2)} = f_2(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.9)$$

.

.

$$k_{(1,n)} = f_n(x, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (3.10)$$

Para k_2 :

$$k_{(2,1)} = f_1\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{(1,1)}}{2}, y_2 + \frac{hk_{(1,2)}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(1,n)}}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$k_{(2,2)} = f_2\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{(1,1)}}{2}, y_2 + \frac{hk_{(1,2)}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(1,n)}}{2}\right) \quad (3.12)$$

.

.

$$k_{(2,n)} = f_n\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{1,1}}{2}, y_2 + \frac{hk_{1,2}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(1,n)}}{2}\right) \quad (3.13)$$

Para k_3 :

$$k_{(3,1)} = f_1\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{(2,1)}}{2}, y_2 + \frac{hk_{(2,2)}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(2,n)}}{2}\right) \quad (3.14)$$

$$k_{(3,2)} = f_2\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{(2,1)}}{2}, y_2 + \frac{hk_{(2,2)}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(2,n)}}{2}\right) \quad (3.15)$$

.

.

$$k_{(3,n)} = f_n\left(x + \frac{h}{2}, y_1 + \frac{hk_{(2,1)}}{2}, y_2 + \frac{hk_{(2,2)}}{2}, \dots, y_n + \frac{hk_{(2,n)}}{2}\right) \quad (3.16)$$

Para k_4 :

$$k_{(4,1)} = f_1(x + h, y_1 + hk_{(3,1)}, y_2 + hk_{(3,2)}, \dots, y_n + hk_{(3,n)}) \quad (3.17)$$

$$k_{(4,2)} = f_2(x + h, y_1 + hk_{(3,1)}, y_2 + hk_{(3,2)}, \dots, y_n + hk_{(3,n)}) \quad (3.18)$$

$$k_{(4,n)} = f_n(x + h, y_1 + hk_{(3,1)}, y_2 + hk_{(3,2)}, \dots, y_n + hk_{(3,n)}) \quad (3.19)$$

Una vez que se calculan las cuatro constantes k_1, k_2, k_3 y k_4 se hace el cálculo de los nuevos estados, es decir:

$$y_{(1_{new})} = y_1 + \frac{h}{6}(k_{(1,1)} + 2k_{(2,1)} + 2k_{(3,1)} + k_{(4,1)}) \quad (3.20)$$

$$y_{(2_{new})} = y_2 + \frac{h}{6}(k_{(1,2)} + 2k_{(2,2)} + 2k_{(3,2)} + k_{(4,2)}) \quad (3.21)$$

..

$$y_{(n_{new})} = y_n + \frac{h}{6}(k_{(1,n)} + 2k_{(2,n)} + 2k_{(3,n)} + k_{(4,n)}) \quad (3.22)$$

Se incrementa el paso de integración:

$$x_{new} = x + h \quad (3.23)$$

Se actualiza el incremento en el paso de integración y las variables de estado como:

$$x = x_{new} \quad (3.24)$$

$$y_1 = y_{(1_{new})} \quad (3.25)$$

$$y_2 = y_{(2_{new})} \quad (3.26)$$

$$\cdot \quad (3.27)$$

.

$$y_n = y_{(n_{new})} \quad (3.28)$$

El ciclo se repite hasta que se alcanza la convergencia.

Nota: La x representa el tiempo de simulación y la y representa las variables de estado o incógnitas a resolver.

3.2.3. Método de Newton Raphson

Método de Newton Raphson es un método numérico, que permite localizar raíces de un polinomio mediante el trazo de una tangente, la ecuación según [Chapra y Canale, 2007] es:

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (3.29)$$

donde:

x_i raíz de la función.

$f(x_i)$ la función a evaluar.

$f'(x_i)$ derivada de la función.

3.3. Solución del panel fotovoltaico con el método de Newton-Raphson

Las expresiones que describen el comportamiento del panel fotovoltaico se mostraron en la Sección 2.2.2. También se hace uso de los parámetros presentados en la Tabla 2.1. En este caso se presenta el comportamiento del panel fotovoltaico al colocarle una carga resistiva R_{Carga} de 3Ω , después se aplican tres cambios de irradiación solar y temperatura.

Recordando la ecuación del panel fotovoltaico se tiene que:

$$I_{CD} = I_{PV} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{CD} + R_S I_{CD}}{aV_t - 1} \right) \right] - \frac{V_{CD} + R_S I_{CD}}{aV_t} \quad (3.30)$$

Para resolver la Ecuación (3.30), es necesario encontrar las raíces con la Ecuación (3.29); por tanto, la función se expresa como:

$$f(V_{CD}, I_{CD}) = I_{PV} - I_o \left[\exp \left(\frac{V_{CD} + R_S I_{CD}}{aV_t - 1} \right) \right] - \frac{V_{CD} + R_S I_{CD}}{aV_t} - I_{CD} \quad (3.31)$$

La derivada de la Ecuación (3.31) con respecto a la corriente I_{CD} del panel queda como:

$$f'(V_{CD}, I_{CD}) = -I_o \left(\frac{R_S}{aV_t} \right) \exp \left(\frac{V_{CD} + R_S I_{CD}}{aV_t - 1} \right) - \left(\frac{R_S}{R_P} \right) - 1 \quad (3.32)$$

La representación matemática para aplicar el método de Newton Raphson queda como:

$$I_{CD_{i+1}} = I_{CD_i} - \frac{f(I_{CD_i}, V_{CD_i})}{f'(I_{CD_i}, V_{CD_i})} \quad (3.33)$$

El voltaje que se tiene en terminales del panel fotovoltaico corresponde al voltaje de la carga; y se puede determinar como:

$$V_{CD_{i+1}} = I_{CD_{i+1}} R_{Carga} \quad (3.34)$$

Los valores de la corriente I_{CD} y voltaje V_{CD} del panel se calculan con el método de Newton Raphson anteriormente descrito con las Ecuaciones (3.33) y (3.34) con la finalidad de encontrar la solución de la Ecuación (3.30) mostrada anteriormente. Además, se considera una tolerancia de 1×10^{-5} ; es decir, que el programa continuará iterando hasta alcanzar la tolerancia asignada. El algoritmo que se sigue para resolver las ecuaciones del panel fotovoltaico se ilustra en la Figura 3.1

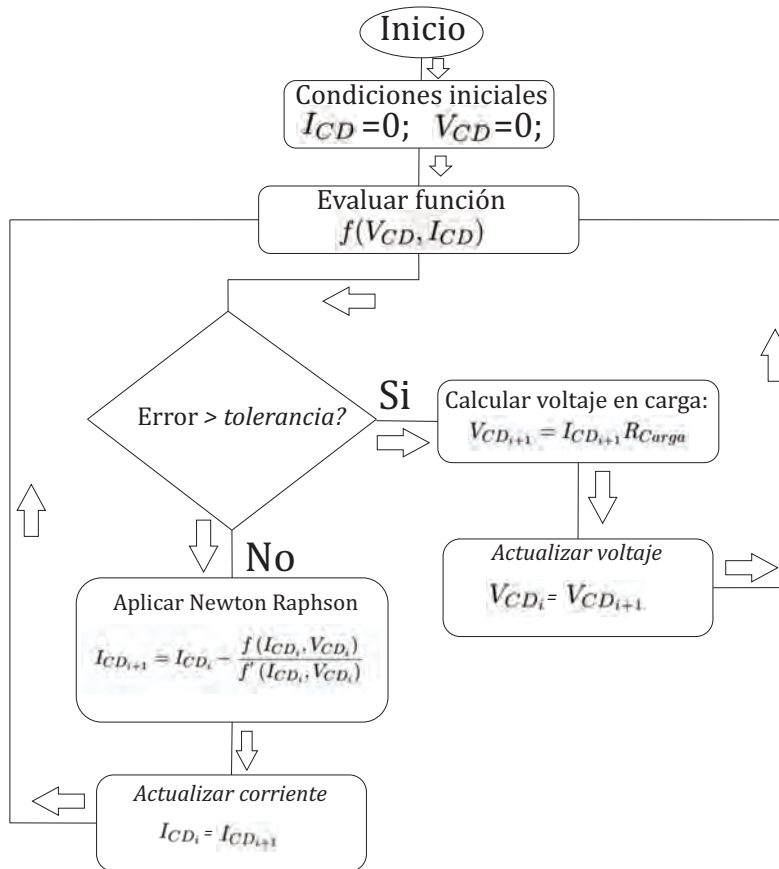


Figura 3.1: Algoritmo para la ecuación del panel fotovoltaico utilizando Newton-Raphson

El algoritmo anterior se aplicó para conocer los valores de corriente y voltaje que suministra el panel fotovoltaico ante cambios de temperatura e irradiación solar con la carga

resistiva. Los resultados obtenidos mediante simulación para tres niveles de Irradiación solar (G) y Temperatura (T) seleccionados, se registran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Panel fotovoltaico con carga resistiva y cambios de temperatura e irradiación

T ($^{\circ}C$)	G W/m^2	V_{CD} (V)	I_{CD} (A)
25	1000	23.99	7.997
30	800	19.55	6.517
35	400	9.82	3.274

3.4. Solución del convertidor boost con el método RK4

En este caso uso del método numérico RK4, descrito en la Sección 3.2.2 para la solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales. Además, se considera el proceso de la conmutación por modulación de ancho de pulso (PWM), el cuál se genera mediante la comparación entre una forma de onda diente de sierra con una forma de onda constante. El resultado de las intersecciones genera los pulsos que permiten la conmutación del interruptor del convertidor *boost*. Ésta conmutación produce que el voltaje de CD en la salida sea mayor al de entrada. Los parámetros del convertidor *boost* se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros del convertidor Boost

V_{in}	32.9 V
C_{boost}	175 μF
L_{boost}	4.6 mH
R_{boost}	100 Ω

Los parámetros empleados para la señal PWM se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Parámetros para construcción de la señal PWM

Amplitud de señal diente de sierra (V_{ds})	1 V_{pico}
Voltaje de control ($V_{control}$)	0.35 V
Ciclo de servicio del convertidor (D)	35 %
Frecuencia de la señal $V_{ds}(f_{ds})$	2000 Hz

Las ecuaciones que definen el comportamiento del convertidor *boost* son:

$$\frac{di_{L_{boost}}}{dt} = -\frac{(1-D)}{L_{boost}}v_o + \frac{1}{L_{boost}}v_{in} \quad (3.35)$$

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{(1-D)}{C_{boost}}i_{L_{boost}} - \frac{1}{R_{boost}}v_o \quad (3.36)$$

donde:

D ciclo de servicio del convertidor *boost*.

L_{boost} inductancia a la entrada del convertido (H)

C_{boost} capacitor de salida del convertidor (F)

R_{boost} resistencia a la salida del convertidor (Ω)

v_o voltaje de salida del convertidor (V)

v_{in} voltaje de entrada del convertidor (V)

En la Figura 3.2 se describe el proceso para solucionar las ecuaciones del convertidor *boost*. El voltaje de CD considerado en la entrada del convertidor v_{in} es de 39.2 V, por lo tanto, se espera obtener que el voltaje a la salida v_o del convertidor sea mayor que el de entrada.

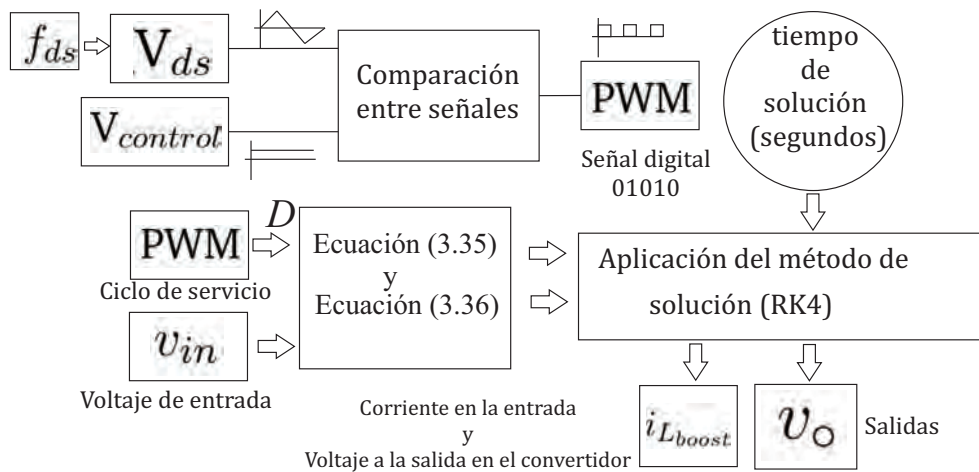


Figura 3.2: Esquema de solución del convertidor elevador boost

El esquema del panel fotovoltaico con el convertidor *boost* que fue simulado se ilustra en la Figura 3.3.

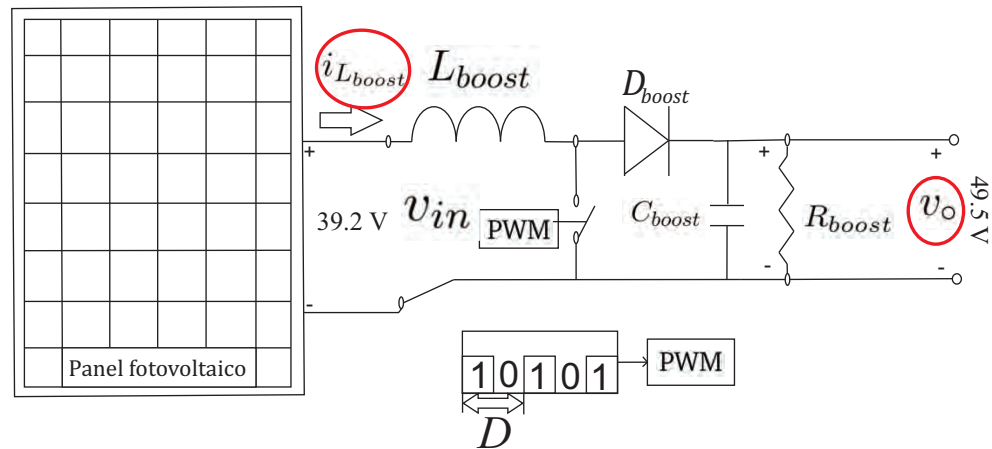


Figura 3.3: Esquema de panel fotovoltaico y convertidor elevador boost

La forma de onda que se obtuvo para la corriente en la inductancia L_{boost} y el voltaje en la salida del convertidor v_o , fue para un tiempo de simulación de 1 segundo. Los resultados se obtuvieron mediante a la simulación con el código elaborado en Matlab y Simulink. La Figura 3.4 muestran las respuestas en estado estable del convertidor *boost*.

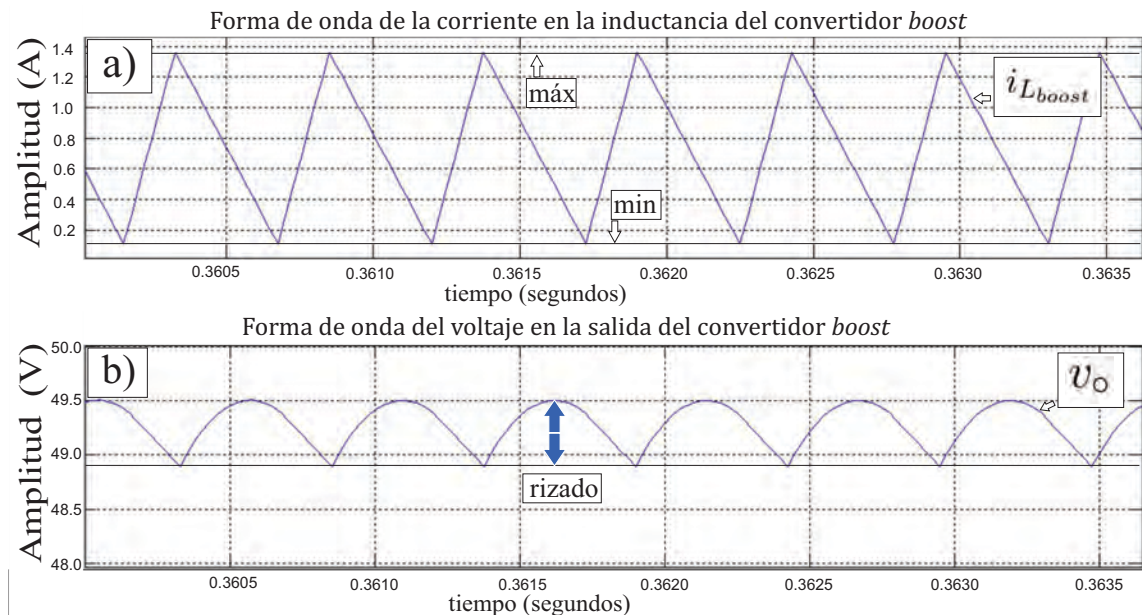


Figura 3.4: Respuesta del convertidor *boost*: a) corriente $i_{L_{boost}}$ y b) el voltaje v_o

Con referencia a la Figura 3.4 a), la respuesta de voltaje en la salida del convertidor *boost* es de aproximadamente 49.5 V, presenta un rizado un poco mayor del 1%. Mientras

que en la Figura 3.4 b), se puede apreciar que el convertidor se encuentra operando en modo de conducción continua por la forma onda de la corriente en la inductancia L_{boost} . Además, la circulación de corriente a través de la inductancia es permanente [Hart, 2001]; presentando una oscilación que alcanza un valor máximo de 1.4017 A y 0.1557 A como mínimo. Entonces, gracias a este arreglo del convertidor *boost*, el usuario puede incrementar el nivel voltaje a su entrada hasta el nivel deseado, considerando siempre la capacidad y comportamiento de los componentes físicos; tales como resistencias, capacitores e inductores.

3.5. Conclusiones

En éste capítulo se describieron de manera concisa los métodos para la representación y solución numérica para el convertidor *boost*. También se mostró la aplicación del método de RK4 para la solución numérica de las ecuaciones diferenciales del convertidor, así como el método de Newton-Raphson para la representación y solución del modelo del panel fotovoltaico considerando cambios de temperatura e irradiación solar. .

Capítulo 4

SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL CON OPAL-RT.

En este capítulo se explica de manera detallada la operación del simulador en tiempo real OPAL-RT. Se explica la manera de generar y adquirir señales presentando los esquemas empleados en Matlab y Simlink; mostrando las gráficas y resultados obtenidos. Las señales que se construyen durante estas pruebas, son de tipo digital y analógica. Además, se muestran pruebas ilustrativas. En el caso de las señales analógicas, se analizan dos formas de onda para conocer su contenido armónico con la FFT de Simulink.

4.1. Modo de operación del OPAL-RT Technologies

La compañía de OPAL-RT®, realiza el desarrollo de simuladores en tiempo real basados en PC/FPGA, equipos de pruebas Hardware-in-the-Loop (HIL), con el propósito de diseñar, probar y optimizar tanto el control como la protección de sistemas utilizados en redes eléctricas, electrónica de potencia, entre otras tareas [OPAL-RT, 2016]. Éste equipo de simulación en tiempo real, es una herramienta que permite simular modelos matemáticos, adquirir señales tanto de voltaje como de corriente. Además, se disponen de entradas y salidas tanto analógicas como digitales. Además, el simulador den tiempo real (OPAL-RT) puede ser operado a través de la computadora portátil que tenga instalado el software RT-

LAB (Ver el apéndice B). Las características del ordenador portátil que se utilizó en ésta tesis son:

- Procesador Intel Core i7-4600M a 2.90 GHz.
- 8 GB de Memoria RAM.
- Windows 10 Pro.
- 1 TB de Disco Duro.

Las versiones de Matlab y Simulink que puede soportar RT LAB versión 11.0.1.390 son las siguientes:

- Matlab R2013A (32 Bit) (8.1) (Utilizada para los estudios de ésta tesis)
- Matlab R2012B (32 Bit) (8.0)
- Matlab R2012A (32 Bit) (7.14)
- Matlab R2011B (32 Bit) (7.13)
- Matlab R2011A (32 Bit) (7.12)

Es recomendable instalar el software RT-LAB después de haber instalado alguna de las versiones de Matlab tal como se muestra en la Figura 4.1, ya que de lo contrario no se tendrá acceso a algunas de las bibliotecas exclusivas de RT-LAB dentro de la biblioteca de Simulink (Ver apéndice C).



Figura 4.1: Orden de la instalación de los programas de OPAL-RT en la computadora portátil

También se sugiere que la comunicación entre el equipo de simulación en tiempo real OPAL-RT y la computadora portátil sea a través de ethernet como se muestra en la Figura 4.2, ya que de manera inalámbrica puede perderse en algún momento inesperado la comunicación entre los equipos.

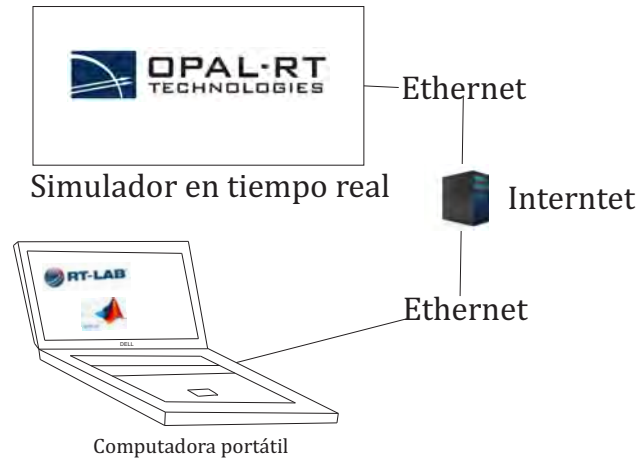


Figura 4.2: Comunicación entre la computadora portátil y OPAL-RT

Una vez activado el OPAL-RT, se procede a ejecutar el programa RT-LAB (Ver apéndice B). Para cargar el modelo, se tienen que usar los bloques de la biblioteca de OPAL-RT en Simulink. La estructura del archivo debe ser maestro (definido como SM_) y consola (definido como SC_), tal como se muestra en la Figura 4.3. Si el archivo no cuenta con ésta estructura, no se carga del modelo en OPAL-RT.

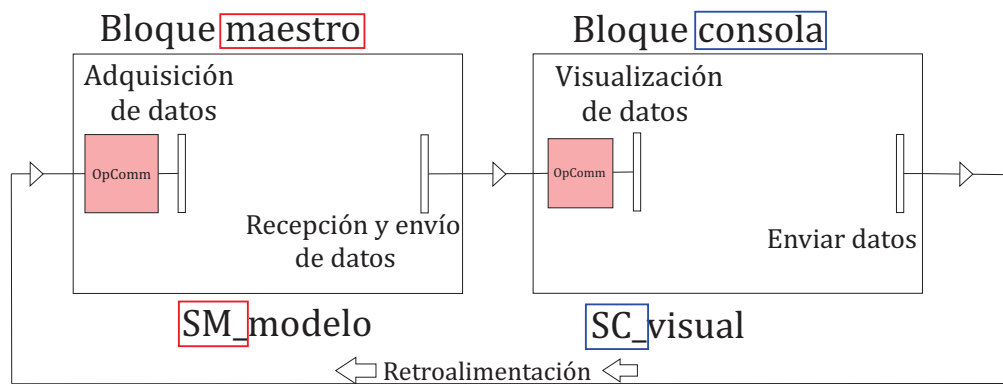


Figura 4.3: Estructura maestro y consola del archivo en Simulink

En el bloque maestro se construye el modelo del sistema que se desea analizar, mientras que en la consola se colocan elementos de graficación para observar las señales simuladas por el bloque maestro. También se pueden modificar los parámetros del maestro desde la consola a través de la ruta de retroalimentación. Además, al momento de ejecutar la simulación se abre una ventana, que es duplicado del contenido de la consola, la cuál permite observar las señales entregadas del modelo cargado en OPAL-RT.

El proceso que se sigue para cargar el modelo de Simulink dentro de OPAL-RT se ilustra en la Figura 4.4.

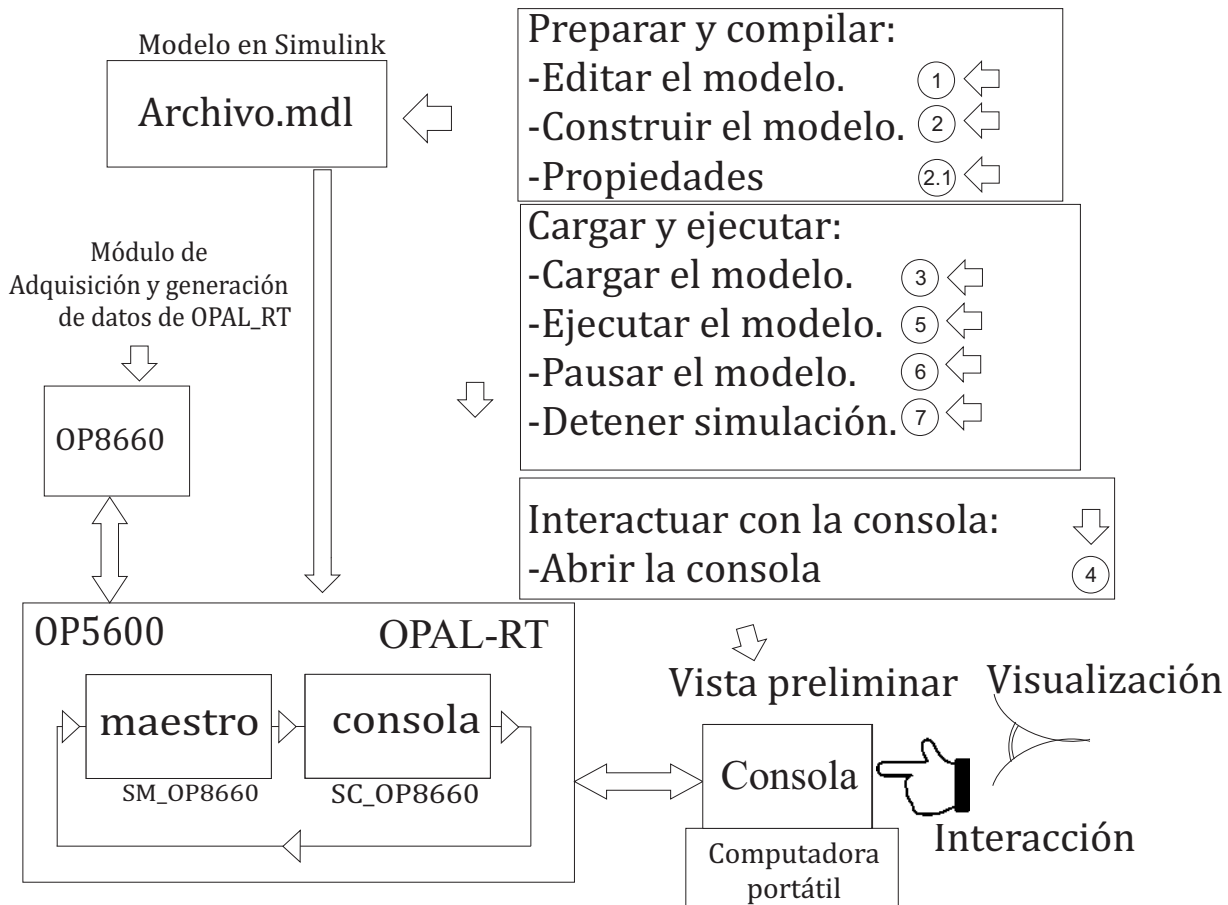


Figura 4.4: Proceso para cargar el modelo de Simulink en OPAL-RT

Nota: Para detener la marcha del modelo ejecutado en OPAL-RT, se tiene que seleccionar la opción “7” desde la ventana de RT-LAB como se mostró anteriormente. De lo contrario, la simulación continuará ejecutándose en OPAL-RT.

Los pasos que se siguen para cargar el modelo de Simulink en OPAL-RT siguen el orden 1,2,3,4,5 y 7 como se mostró en la Figura 4.4. Los errores que presente el modelo se marca en el proceso “2” o “3”. El proceso “2.1” permite seleccionar el modo de operación de OPAL-RT, es decir, solo simulación o simulación con tarjeta de adquisición de datos. En ésta tesis se emplea la simulación y la tarjeta para realizar el registro de las variables requeridas.

4.1.1. Generación y captura de señales analógicas

OPAL-RT se compone de dos módulos, el primero es el módulo OP5600 que representa el CPU; el segundo es el módulo OP8660 que contiene la tarjeta de adquisición de datos y los puertos tanto analógicos como digitales entre otras entradas. El propósito de esta sección es describir como generar y adquirir una señal analógica,. Para ésto es necesario acceder a RT-LAB y construir el esquema tratado en la Sección 4.1. Para construir el modelo se usan de los bloques de OPAL-RT en la biblioteca de Simulink (Ver apéndice C). En cada bloque de OPAL-RT se definen ciertos páramtros. Además, se requiere que los archivos propios de OPAL-RT (.conf y .bin) se encuentren en la misma carpeta donde se encuentra el archivo con el modelo para hacer la simulación y usar la tarjeta de adquisición de datos (Ver apéndice C.2).

La manera física de conectar OPAL-RT y la computadora portátil para adquirir y generar una señal analógica se ilustra en la Figura 4.5.

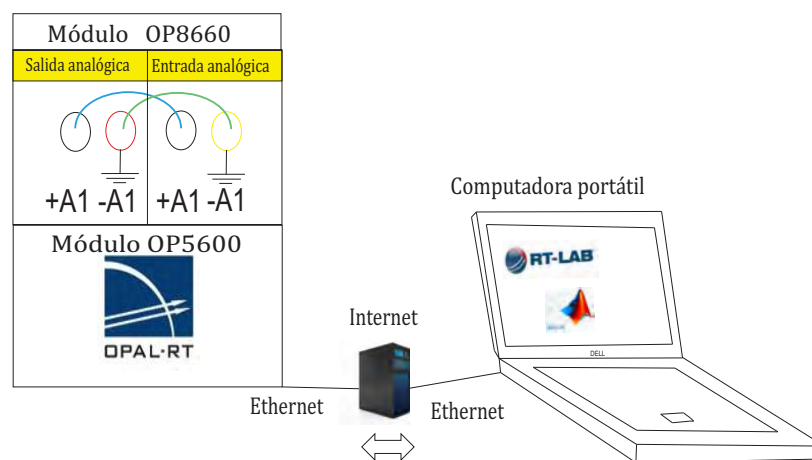


Figura 4.5: Esquema para generación y adquisición de una señal analógica con OPAL-RT

Declaración de tiempo de muestreo (Ts) en la simulación



Figura 4.6: Estructura maestro y consola en Simulink para analizar formas de onda

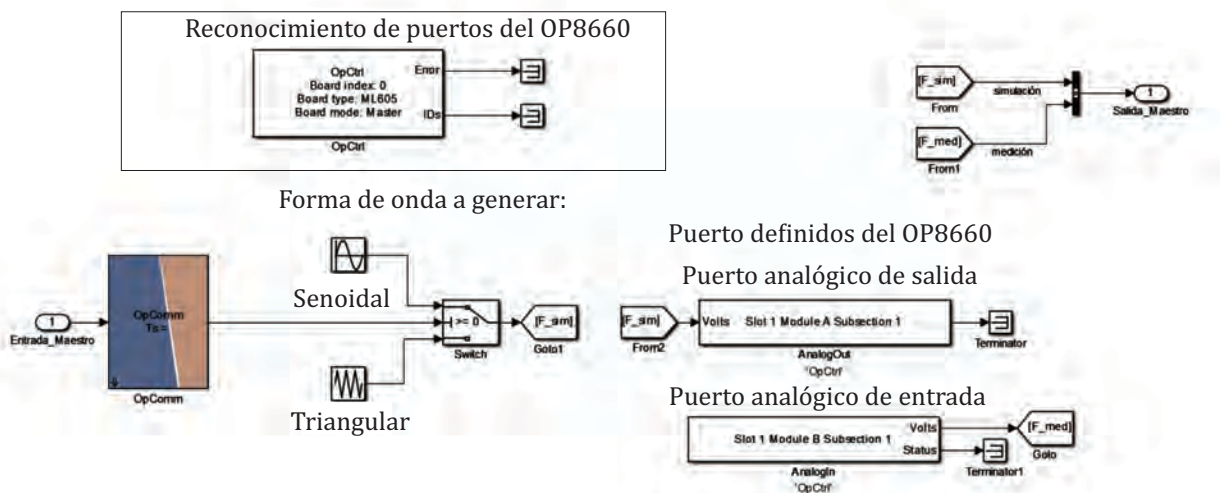


Figura 4.7: Modelo en el maestro para generar las señales analógicas

La consola contiene un elemento para observar la señal generada, según se ilustra

en la Figura 4.8. Además, se usó un interruptor manual para seleccionar la señal que se quiera analizar. Ésto se puede hacer a través de la ventana de la consola. Para seleccionar la señal que desee analizar, el interruptor se mueve a la posición “1” para obtener la forma de onda senoidal; mientras que para seleccionar la señal triangular se coloca en la posición “0”, éste proceso se hace durante la simulación en tiempo real con OPAL-RT.



Figura 4.8: Visualización y selección de formas de onda en la consola

La señal senoidal considerada en la simulación y la adquisición con Opal-RT tiene una amplitud de 2 V, con una frecuencia de 60 Hz se ilustra en la Figura 4.9.

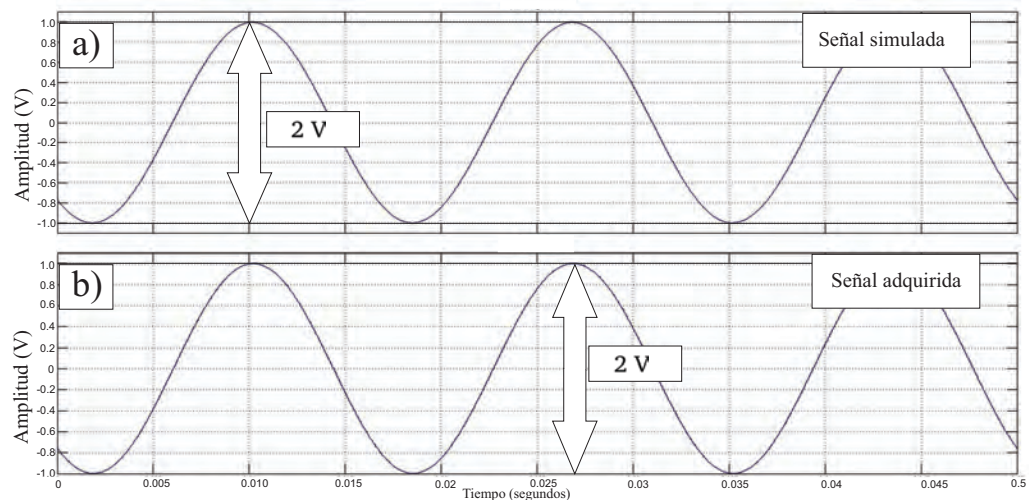
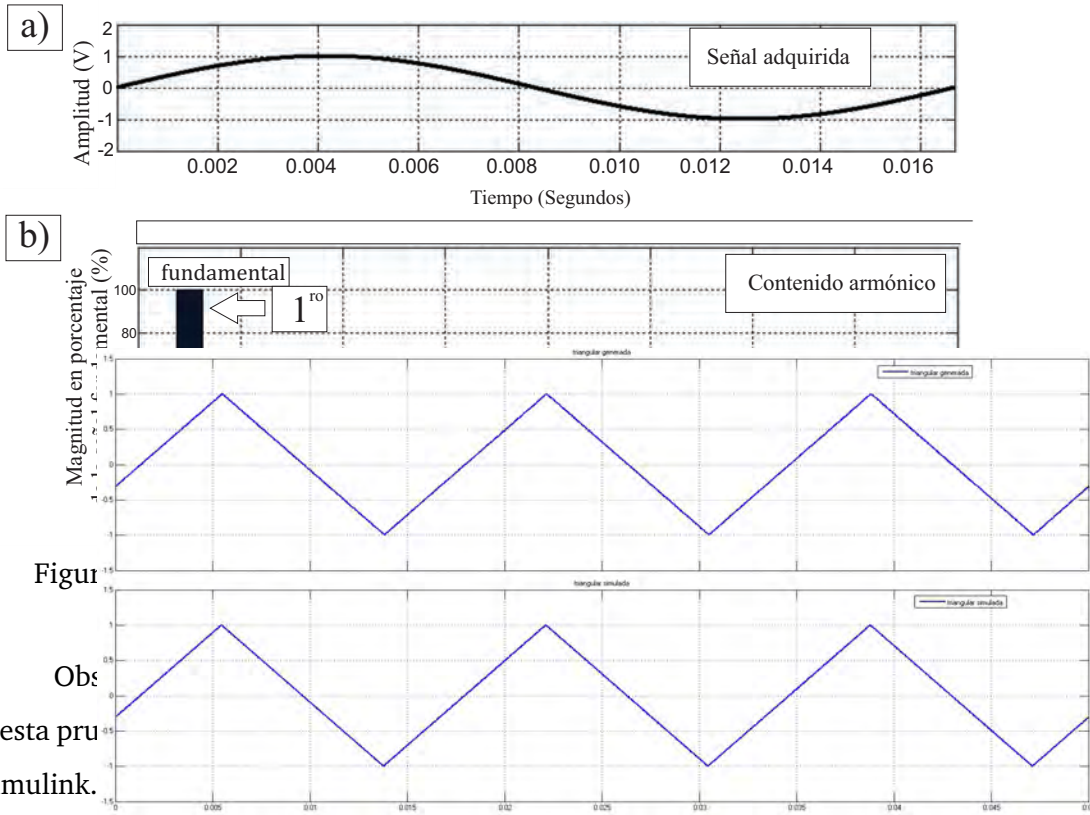


Figura 4.9: Señal senoidal: a) Simulación y b) Adquisición

Aplicando la herramienta FFT de Simulink a la señal senoidal mostrada en la Figura 4.10 a), se obtiene la componente fundamental mostrada en la Figura 4.10 b).



Para esta prueba de Simulink.

amplitud es de 2 V, con una frecuencia de $f=60$ Hz, según se muestra en la Figura 4.11.

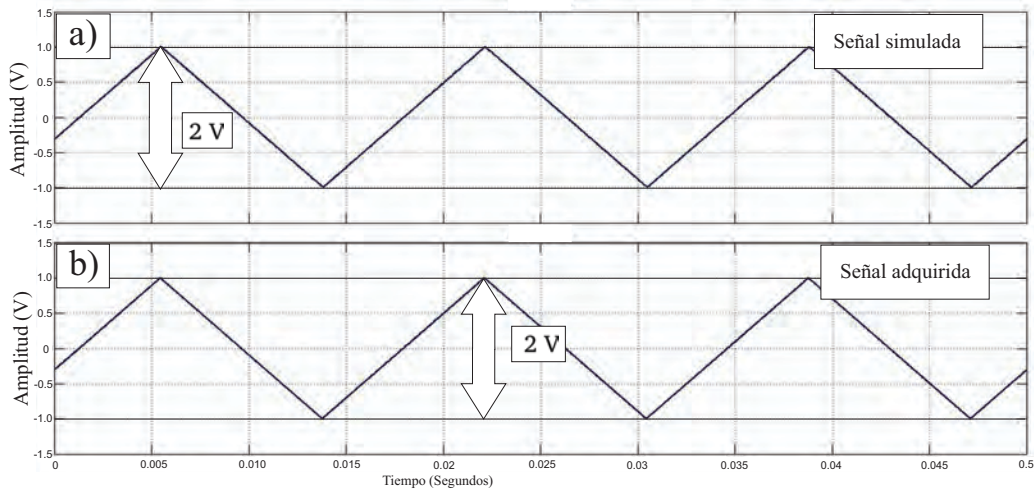


Figura 4.11: Señal triangular: a) Simulación y b) Adquisición

De acuerdo al desarrollo analítico de ésta señal, el contenido armónico de la señal triangular se encuentra dominado por las componentes de orden impar. Realizando un análisis de Fourier para un periodo de la señal triangular como se muestra en la Figura 4.13 a), al analizar los resultados mostrados

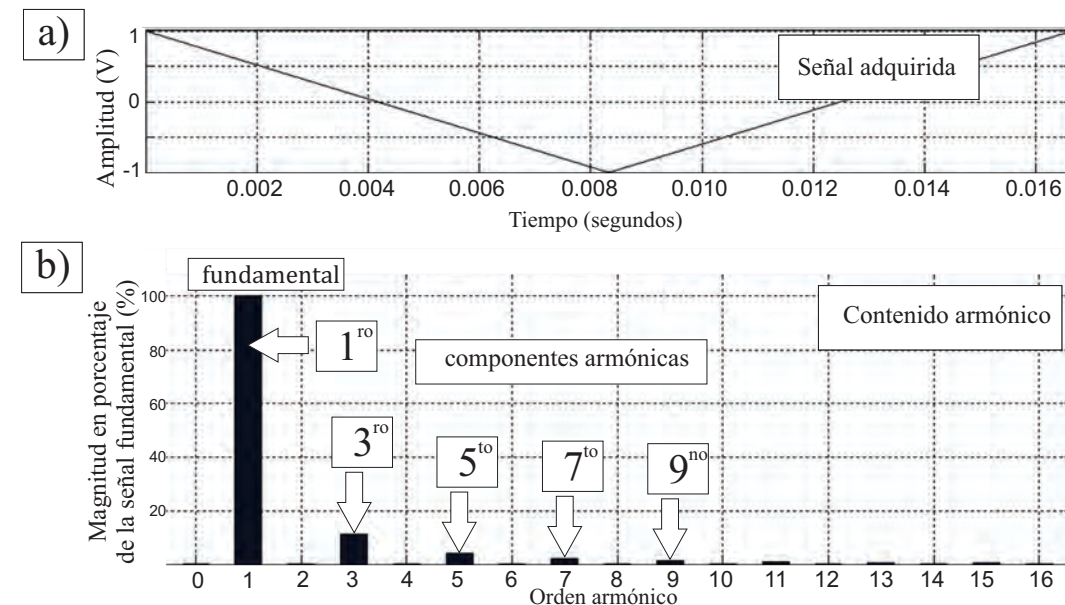


Figura 4.13: Análisis: a) Periodo de onda triangular y b) Contenido armónico

En la Figura 4.13 se observa que el contenido armónico de la señal triangular se encuentra compuesta por una señal fundamental y armónicos impares, además se utilizaron 667 muestras para realizar el análisis debido al paso de integración de $25\mu s$.

4.1.2. Generación y captura de señales digitales

En esta sección se presenta una prueba ilustrativa, que tiene como propósito generar y adquirir seis señales tipo PWM, todas con frecuencia de 20 Hz y un ciclo de servicio del 80 % con OPAL-RT. Para hacer esto posible, se utilizó el puerto de salida digital (+DO1,-DO1) para generar la señal y el puerto de entrada digital (+DI1,-DI1) para adquirir la señal. Para visualizar las señales digitales, también se puede hacer uso de los puertos alternos (4 A 0-3) y (4 B 0-3) que se encuentran en el módulo OP5600; se hace uso de cables RJ-45 pa-

ra establecer la comunicación de los puertos antes mencionados, obteniéndose las señales

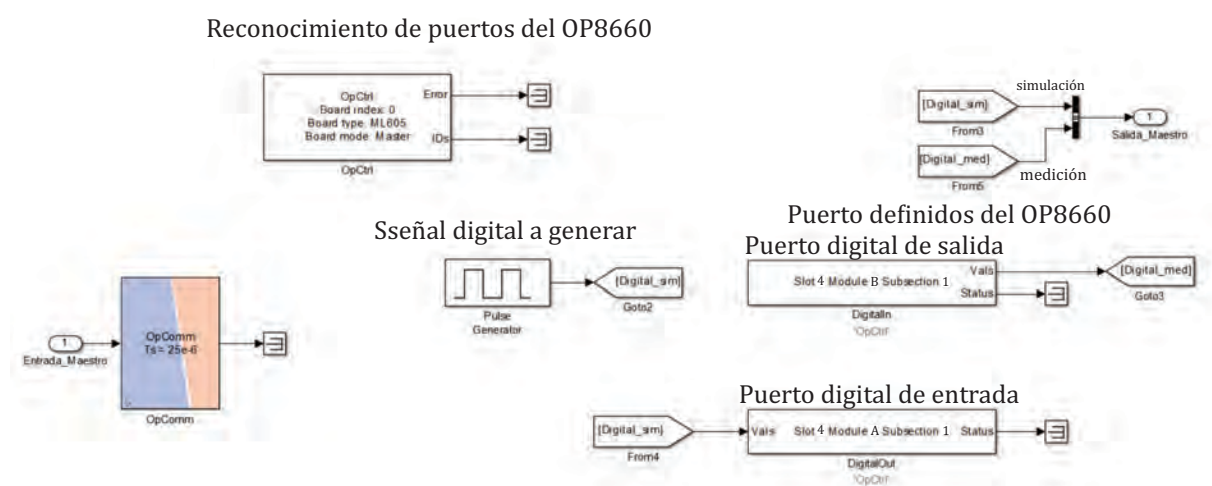


Figura 4.14: Modelo en el maestro para generar señal digital

do que
ante la
Matlab.

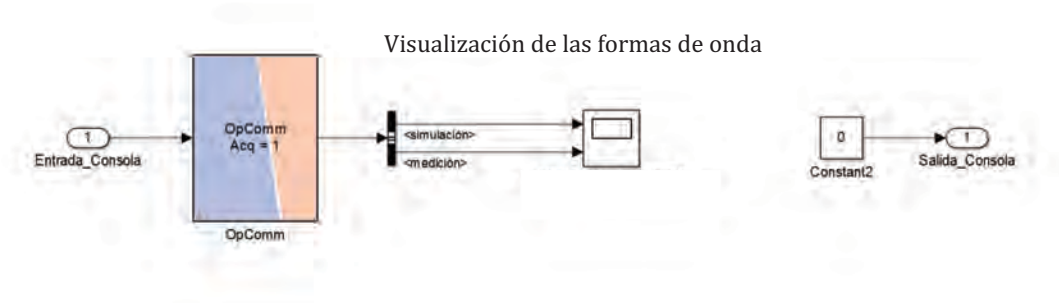


Figura 4.15: Modelo contenido en la consola para visualizar la señal digital

La manera en que se encuentra conectada la computadora portátil con OPAL-RT se ilustra en la Figura 4.16.

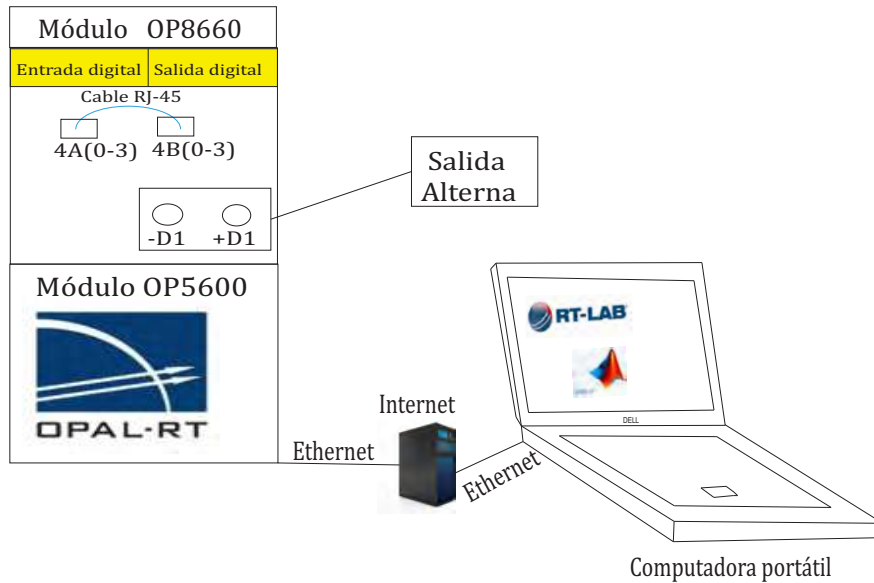


Figura 4.16: Conexión para generación y adquisición de señales digitales con OPAL-RT

El puerto digital de salida se encuentra configurado para generar las señales digitales PWM. Además, permite tomar la lectura de estas señales y observarlas con OPAL-RT. La generación y adquisición de una de ellas es mostrada en la ventana de la consola en la Figura 4.17.

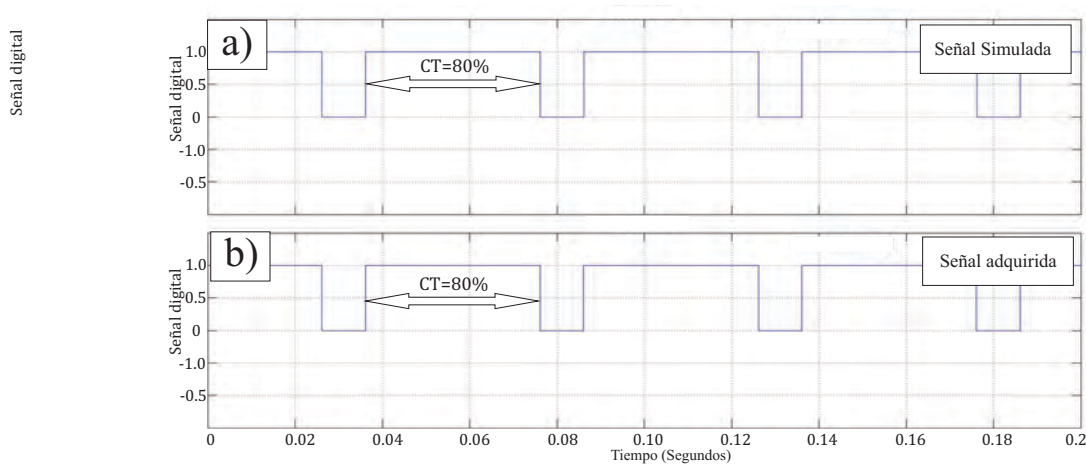


Figura 4.17: Señal PWM: a) Simulación y b) Adquisición

Hay tres alternativas para generar señales de tipo PWM con OPAL-RT. La primera es generar de manera interna una señal triangular y compararla con una señal de referencia para obtener pulsos PWM, para después ser enviadas a los puerto digitales de salida del modulo OP8660. La segunda alternativa, es usar el bloque generador de pulso de Simulink. La tercera alternativa, es hacer uso de los bloques propios de OPAL-RT, los cuales se ubican en la biblioteca de OPAL-RT en Simulink. Las salidas se encuentran en el módulo OP8660 como puerto de entrada serial (DB9) (Ver apéndice E). La ventaja que presenta ésta alternativa con respecto a las anteriores, es que éste permite definir tiempos muertos, desfaseamiento entre señales, entre otras según se observa en la Figura 4.18.

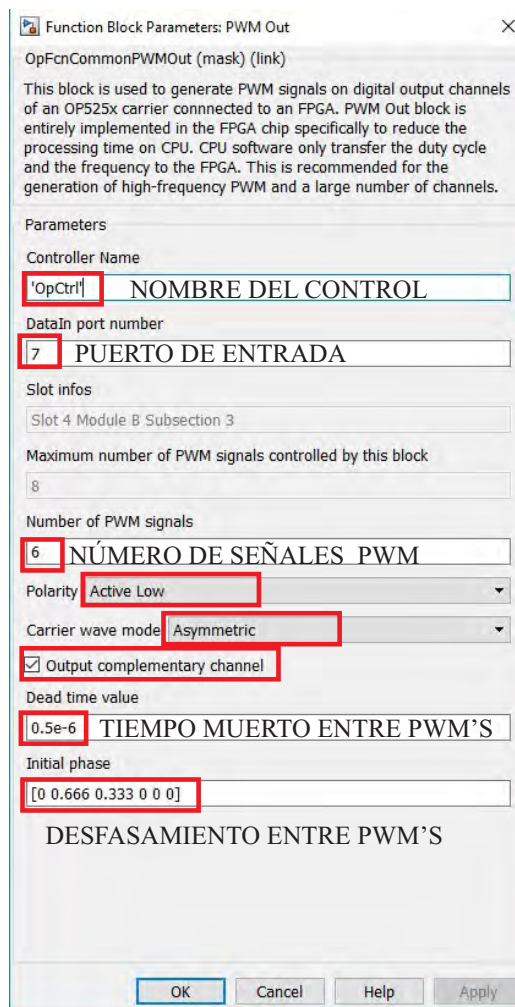


Figura 4.18: Opciones del bloque PWM Out de OPAL-RT

OPAL-RT dispone de dos salidas puerto serial (DB9), que le permiten enviar pulsos a dos inversores trifásicos (Ver Apéndice F). También cabe mencionar que se construyó un cable Serial (DB9) utilizando cable de red y el arreglo correspondiente, asignando la ruta de manera personalizada hacia cada uno de los interruptores del Inversor. El esquema de conexión de OPAL-RT con la computadora portátil para lograr observar las señales PWM, generadas se muestra en la Figura 4.19. Además, se deben configurar los puertos digitales (7 y 8) de OPAL-RT para adquirir las señales PWM y observarlas a través de la ventana de la consola.

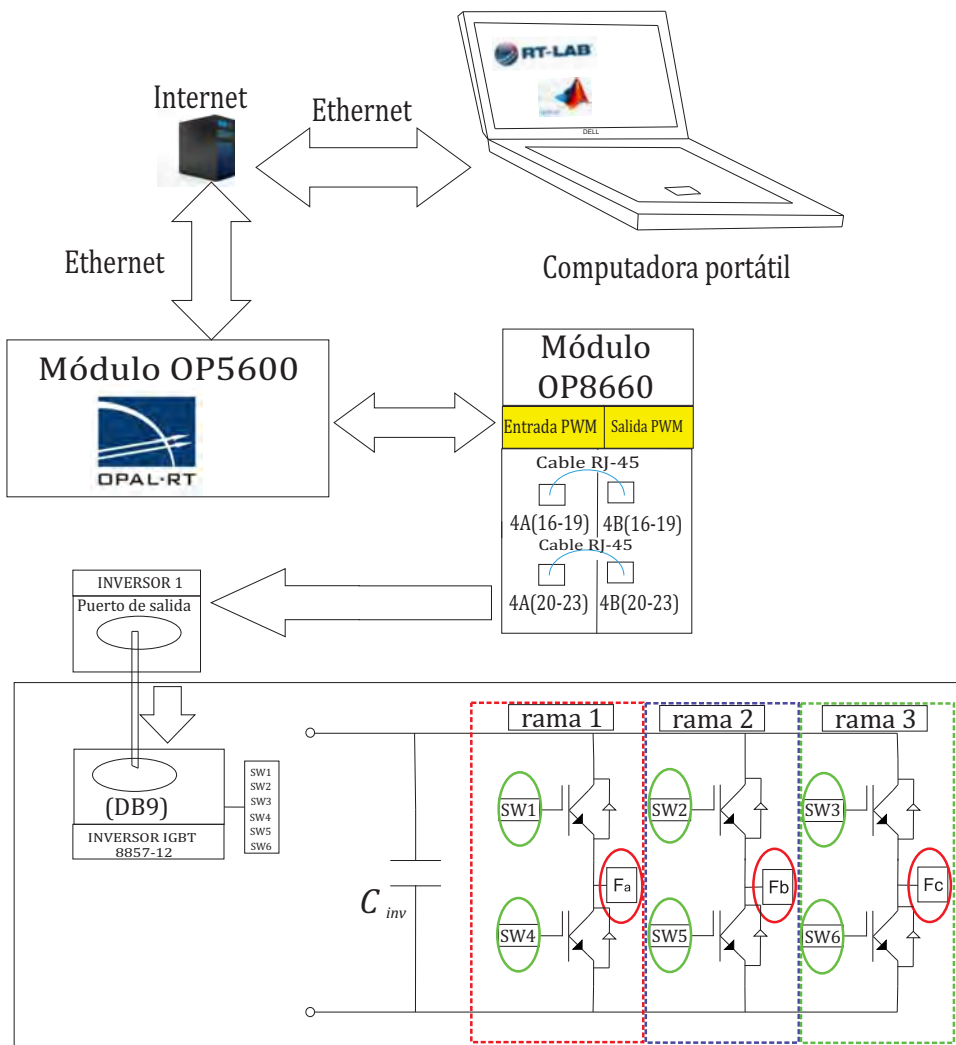


Figura 4.19: Esquema de conexión de OPAL-RT para generar y visualizar las señales PWM

Éstas señales PWM también permiten controlar la conmutación del inversor. Las seis señales PWM que se obtienen a la salida del puerto Serial (DB9) del OP8660 se pueden observar utilizando los puertos de entrada digitales mostrados en la Figura 4.20.

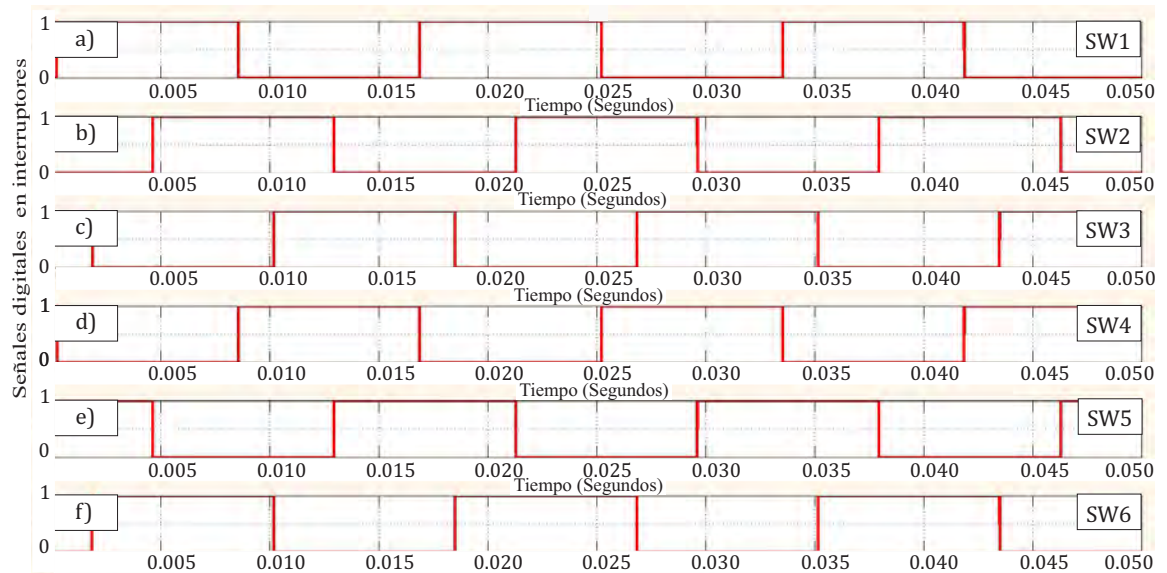


Figura 4.20: Señales PWM: a)SW1, b)SW2, c)SW3, d)SW4, e)SW5 y f)SW6

En este caso se usa el bloque “PWM Out”, este bloque requiere un valor de frecuencia expresado en Hz y un valor de ciclo de servicio que se encuentre entre 0 y 1; es decir, desde 0 hasta el 100% del ciclo de servicio. En la Figura 4.21 se muestra el modelo contenido en el maestro, el cuál permite generar la señal PWM antes mencionada.

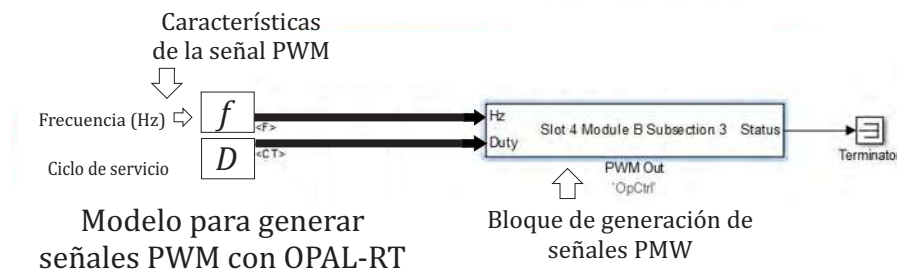


Figura 4.21: Modelo contenido en el maestro para generar señal PWM con OPAL-RT

donde:

f vector columna con frecuencias de las señales PWM.

D vector columna con ciclos de servicio.

4.1.3. Adquisición de voltajes y corrientes con OPAL-RT.

En este caso se utiliza una carga resistiva balanceada conectada en estrella a una fuente trifásica (Fuente de alimentación 8525-22 Lab-Volt) ajustada a un valor de 120 Volts de fase a neutro, según se muestra en la Figura 4.22. Los puertos de OPAL-RT que se utilizan en esta prueba corresponden a las entradas de alto voltaje y corriente del módulo OP8660, respetando los valores nominales (Ver apéndice E).

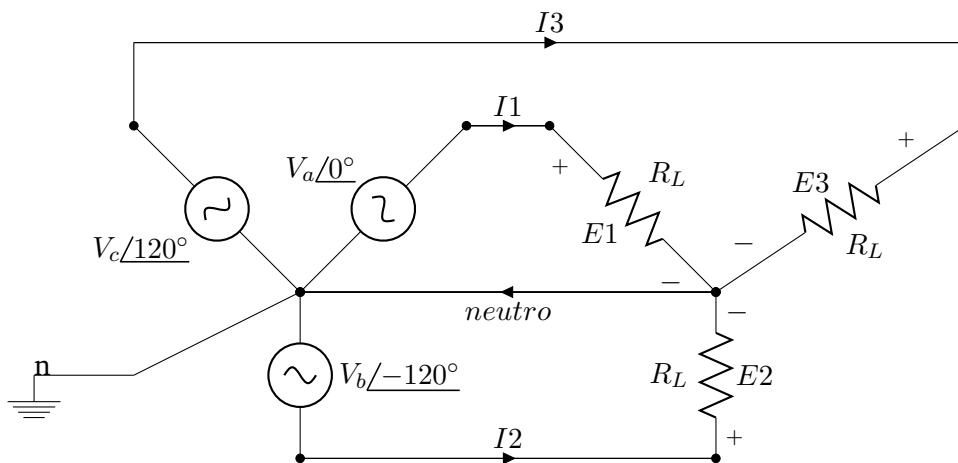


Figura 4.22: Circuito trifásico con carga Resistiva

El valor de las resistencias en la carga (conectadas en estrella) es de $R_L = 1200\Omega$ con una tolerancia de $\pm 5\%$. Los valores rms de los voltajes medidos de fase a neutro de la fuente trifásica y corrientes en la carga son:

- $E_1 = 120 \text{ Volts } \angle 0^\circ$
- $E_2 = 120 \text{ Volts } \angle -120^\circ$
- $E_3 = 120 \text{ Volts } \angle +120^\circ$
- $I_1 = 0.1 \text{ Amperes } \angle 0^\circ$
- $I_2 = 0.1 \text{ Amperes } \angle -120^\circ$
- $I_3 = 0.1 \text{ Amperes } \angle 120^\circ$

En la Figura 4.23 se muestra la comparación entre los valores de voltajes medidos de fase a neutro con la simulación.

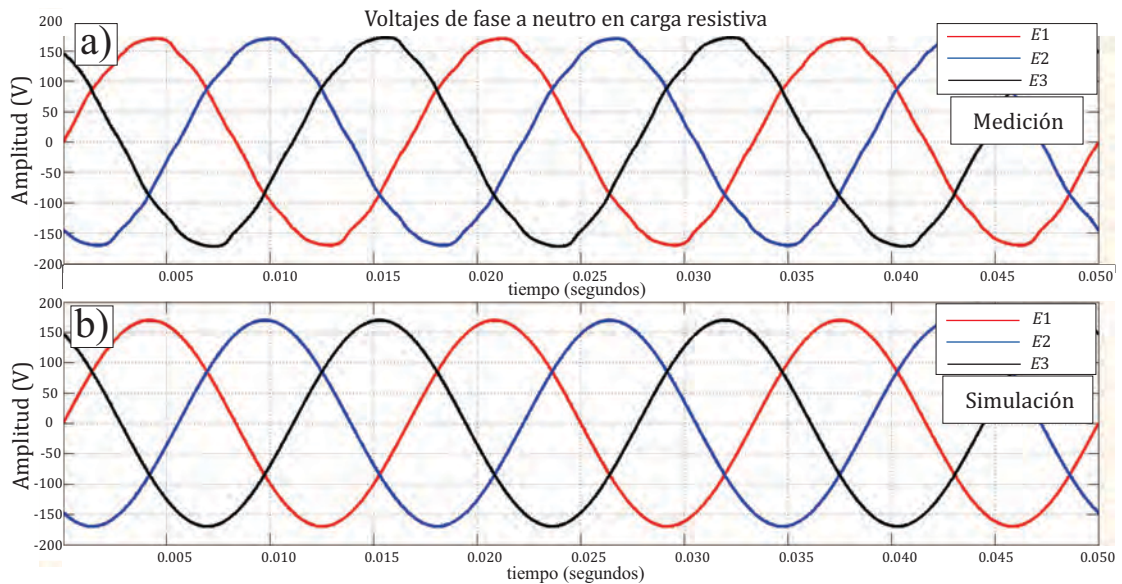


Figura 4.23: Voltajes abc de fase a neutro en carga resistiva: a) Medición y b) Simulación

La manera en que se conectó OPAL-RT, la fuente de alimentación y la carga para realizar la prueba se ilustra en la Figura 4.24.

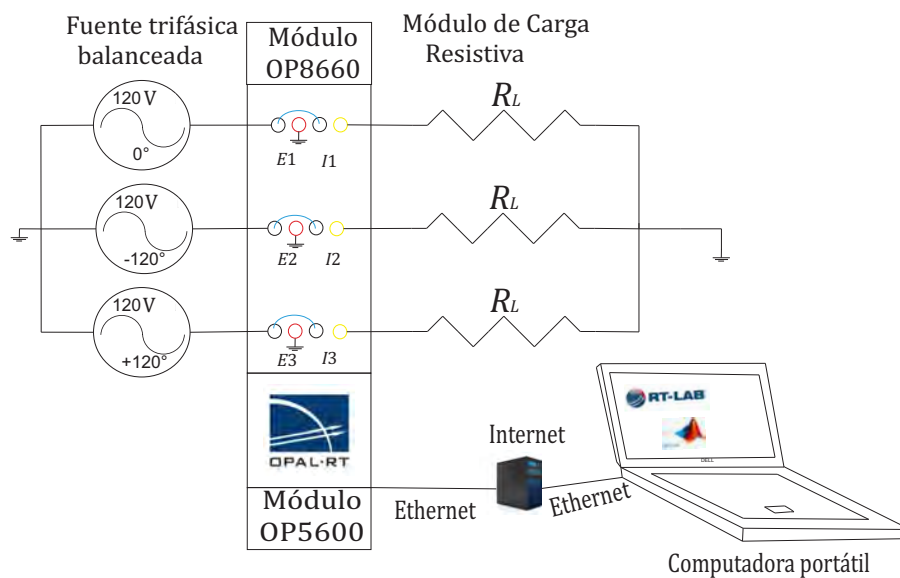


Figura 4.24: Simulación del circuito con carga resistiva en estrella con OPAL-RT

En la Figura 4.25 se muestra la comparación entre los valores de corriente medidos por fase y los resultado de la simulación con OPAL-RT.

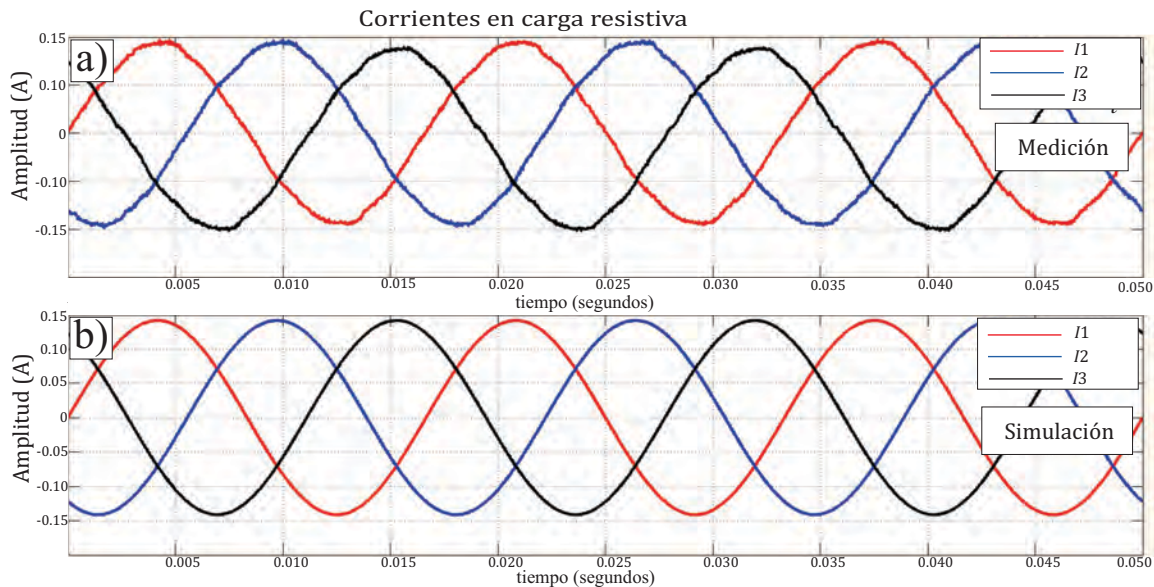


Figura 4.25: Corrientes abc en carga resistiva: a) Medición y b) Simulación



4.2. Registro de la velocidad de giro del rotor del dinamómetro usando OPAL-RT

El dinamómetro es una máquina que opera como motor, puede proporcionar una velocidad y un par de mecánico. El dinamómetro proporciona una señal digital con cierta frecuencia. Esta señal se puede leer con OPAL-RT, a cada velocidad le corresponde un valor de frecuencia. Estas lecturas de frecuencia se hacen a través del puerto conocido como Encoder; el dinamómetro tiene un puerto de salida y OPAL-RT dispone de dos puertos de entrada. Al hacer la conexión entre estos dos puertos se configura OPAL-RT, se emplean los bloques de "PMW in" disponibles en la biblioteca de Simulink. Los valores de frecuencia se registraron en pasos de 50 r.p.m. hasta 3600 r.p.m. que es la nominal. El registro de la

velocidad del rotor y la frecuencia presente se indica en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores de frecuencia registrados del dinamómetro

Y	Velocidad (r.p.m.)	X	(Hz)
y_1	0	x_1	0
y_2	50	x_2	850
y_3	100	x_3	1700
y_4	150	x_4	2560
y_5	200	x_5	3400
y_6	250	x_6	4250
y_7	300	x_7	5100
y_8	350	x_8	5980
y_9	400	x_9	6800
y_{10}	450	x_{10}	7680
y_{11}	500	x_{11}	8530
y_{12}	550	x_{12}	9430
y_{13}	600	x_{13}	10270
y_{14}	650	x_{14}	11060
y_{15}	700	x_{15}	11930
y_{16}	750	x_{16}	12840
y_{17}	800	x_{17}	13680
y_{18}	850	x_{18}	14500
y_{19}	900	x_{19}	15360
y_{20}	950	x_{20}	16280
y_{21}	1000	x_{21}	17070
y_{22}	1050	x_{22}	17980
y_{23}	1100	x_{23}	18780
y_{24}	1150	x_{24}	19630
y_{25}	1200	x_{25}	20490
y_{26}	1250	x_{26}	21340
y_{27}	1300	x_{27}	22180
y_{28}	1350	x_{28}	23060
y_{29}	1400	x_{29}	23980
y_{30}	1450	x_{30}	24730
y_{31}	1500	x_{31}	25610
y_{32}	1550	x_{32}	26430
y_{33}	1600	x_{33}	27230
y_{34}	1650	x_{34}	28180
y_{35}	1700	x_{35}	29000
y_{36}	1750	x_{36}	29840
y_{37}	1800	x_{37}	30760
y_{38}	1804	x_{38}	30888

Y	Velocidad (r.p.m.)	X	(Hz)
y_{39}	1805	x_{39}	30905
y_{40}	1806	x_{40}	31030
y_{41}	1850	x_{41}	31540
y_{42}	1900	x_{42}	32470
y_{43}	1950	x_{43}	33220
y_{44}	2000	x_{44}	34040
y_{45}	2050	x_{45}	34980
y_{46}	2100	x_{46}	35940
y_{47}	2150	x_{47}	36810
y_{48}	2200	x_{48}	37610
y_{49}	2250	x_{49}	38310
y_{50}	2300	x_{50}	39140
y_{51}	2350	x_{51}	39810
y_{52}	2400	x_{52}	40970
y_{53}	2450	x_{53}	42000
y_{54}	2500	x_{54}	42590
y_{55}	2550	x_{55}	43430
y_{56}	2600	x_{56}	44440
y_{57}	2650	x_{57}	45210
y_{58}	2700	x_{58}	46230
y_{59}	2750	x_{59}	46800
y_{60}	2800	x_{60}	47700
y_{61}	2850	x_{61}	48650
y_{62}	2900	x_{62}	49410
y_{63}	2950	x_{63}	50230
y_{64}	3000	x_{64}	51400
y_{65}	3050	x_{65}	52130
y_{66}	3100	x_{66}	53100
y_{67}	3150	x_{67}	53680
y_{68}	3200	x_{68}	54590
y_{69}	3250	x_{69}	55310
y_{70}	3300	x_{70}	56530
y_{71}	3350	x_{71}	57340
y_{72}	3400	x_{72}	58010
y_{73}	3450	x_{73}	59070
y_{74}	3500	x_{74}	59900
y_{75}	3550	x_{75}	60530

Se usaron todos los valores de la Tabla 4.1, tomando la frecuencia como entrada (x_n) y velocidad en r.p.m como salida (y_n), ésto se realiza con el propósito de aplicar regresión polinomial, interpolando los puntos con un polinomio de tercer grado de la forma:

$$y_n = C_0 + C_1x_n + C_2(x_n)^2 + C_3(x_n)^3 \quad (4.7)$$

El arreglo matricial de los datos registrados en la Tabla 4.1 se expresan como:

$$(Y) = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y_{75} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & (x_1)^2 & (x_1)^3 \\ 1 & x_2 & (x_2)^2 & (x_2)^3 \\ 1 & x_3 & (x_3)^2 & (x_3)^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{75} & (x_{75})^2 & (x_{75})^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = (A)(C) \quad (4.8)$$

Se realiza el cálculo de la matriz pseudoinversa, esto se aplica porque el sistema contiene más ecuaciones que incógnitas [Chapra y Canale, 2007]. Entonces, para calcular el valor de los coeficientes de la Ecuación (4.7), se aplica la Ecuación (4.8) para realizar el cálculo de los coeficiente C_0 , C_1 , C_2 y C_3 considerando los datos de la Tabla 4.1. Por último, se aplica la siguiente operación matricial definida como:

$$C = (C_0, C_1, C_2, C_3)^T = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (4.9)$$

Los coeficientes de C que se obtienen después de haber aplicado la Ecuación (4.9) se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Coeficientes C para calcular la velocidad del dinamómetro

Coeficiente	Valor numérico
C_0	188.40×10^{-2}
C_1	581.214×10^{-4}
C_2	209.554×10^{-10}
C_3	$-250.3996 \times 10^{-15}$

Una vez que se obtienen los coeficientes del polinomio de tercer grado, se construye la función en OPAL-RT. Ésta función proporciona un valor correspondiente a la velocidad

del dinamómetro. Es decir, que a cada valor de frecuencia registrado se tendrá como resultado un valor de velocidad. En la Figura 4.26, se muestra el esquema de conexión físico de OPAL-RT y el dinamómetro de cuatro cuadrantes.

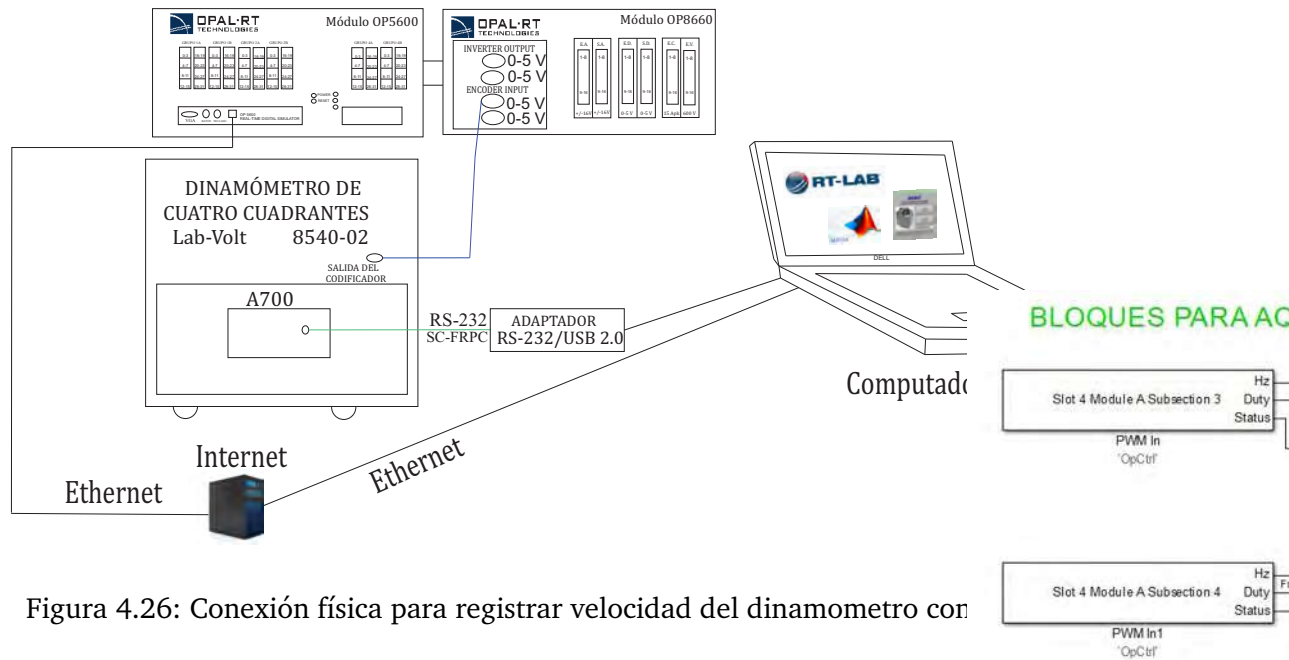


Figura 4.26: Conexión física para registrar velocidad del dinamómetro con

Em modelo contenido en el maestro para adquirir el valor de frecuencia que le esta llegando al puerto encoder de OPAL-RT, es necesario hacer uso de un bloque PWM de entrada, especificando el puerto 12, como se muestra en la Figura 4.27.

Modelo de adquisición de datos del dinamómetro con OPAL-RT

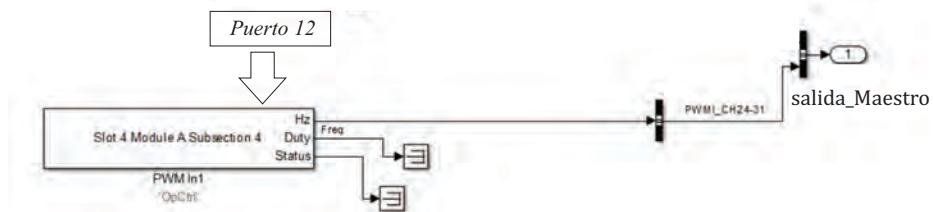


Figura 4.27: Modelo contenido en el maestro para la registrar frecuencia del dinamómetro con OPAL-RT

En la consola se visualiza el arreglo de polinomio de tercer grado como se aprecia

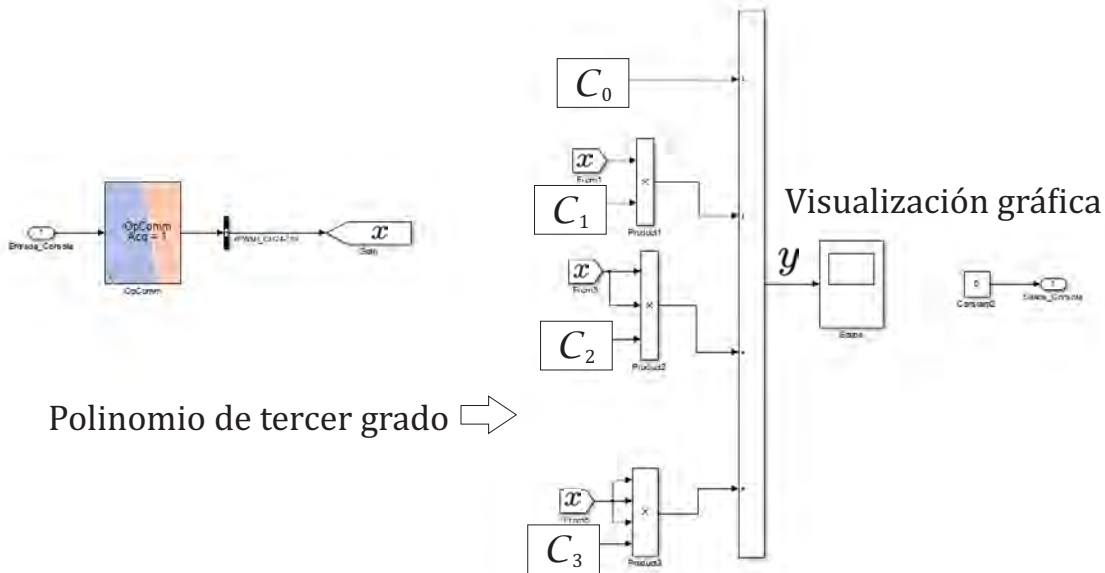


Figura 4.28: Contenido del esclavo para visualizar los datos de velocidad del rotor en r.p.m

El dinamómetro de cuatro cuadrantes puede operarse a través de la computadora portátil siempre y cuando se tenga instalado el software con el cual viene incluido. Además es necesario usar un cable USB a RS232 para lograr la comunicación entre la computadora y el dinamómetro. También el software permite variar la velocidad del dinamómetro hasta un valor de 3600 r.p.m. que es la nominal. El cambio de velocidad se hace de manera manual, como se ilustra en la Figura 4.29.

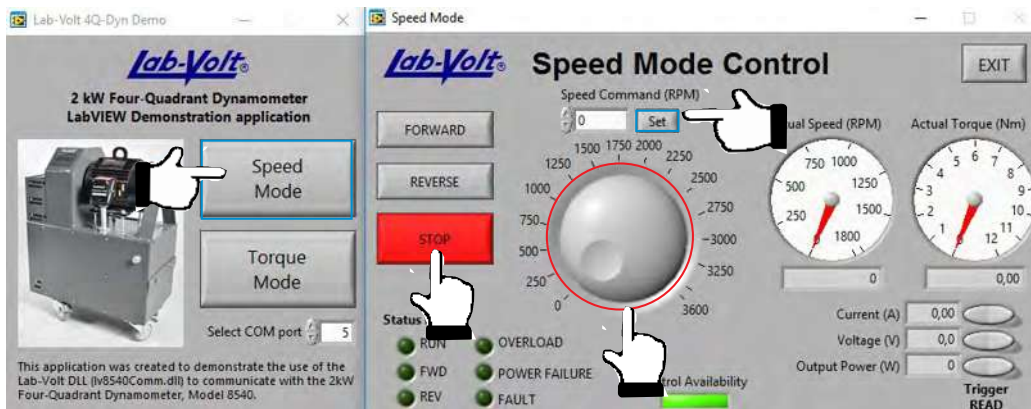


Figura 4.29: Ventana principal para control del dinamómetro

Una vez aplicada la Ecuación (4.7) con los valores de las constantes antes mostradas en la Tabla 4.2 en OPAL-RT; se realizan diversos cambios de velocidad en incrementos de 100 r.p.m. hasta llegar a 2000 r.p.m. y después de forma inversa, según se muestra en la Figura 4.30.

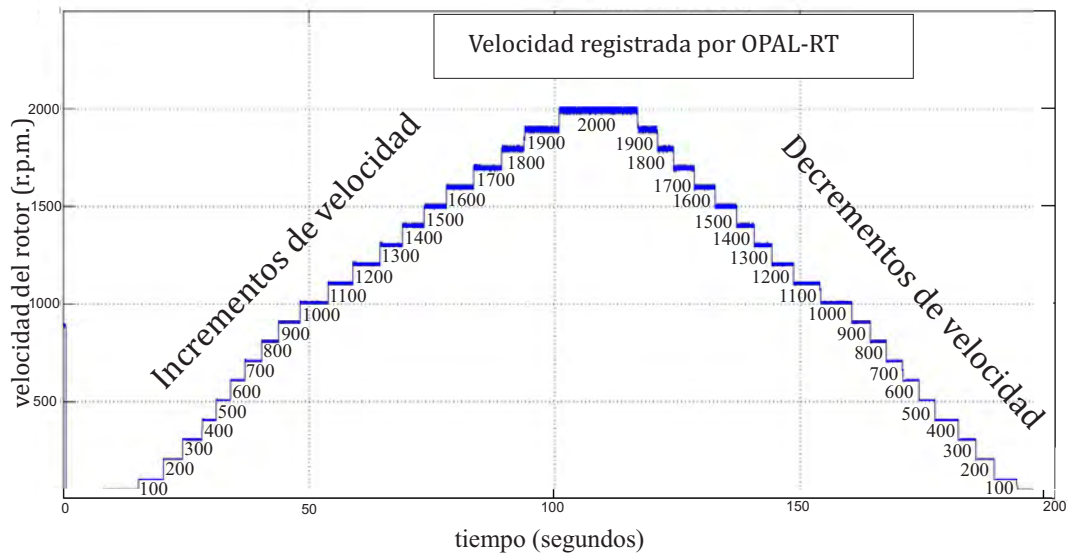


Figura 4.30: Registro de velocidad del dinamómetro a través de OPAL-RT

Ésta herramienta se utiliza para registrar la velocidad del rotor de la máquina de inducción operando como motor, en una sección posterior.

4.3. Rectificador trifásico no controlado

El voltaje de CD a la salida de un rectificador debe estar tan libre de rizado como sea posible, de tal manera que se debe de contar con un capacitor, de la capacidad adecuada para que opere como filtro en el lado de CD. Ésta señal debe contener una componente de CD. En esta prueba ilustrativa, no es necesario enviar pulsos para controlar los interruptores del inversor, dado que éste módulo IGBT 8857-12 Lab-Volt (Ver el Apéndice F) cuenta con diodos rectificadores en su estructura y la conmutación se realiza de manera natural. El voltaje rms de CA máximo que puede proporcionar la fuente trifásica real entre fases es

237 V, obteniéndose a la salida del rectificador un valor de CD aproximadamente de 320 V. Además, existe un nivel de rizado muy pequeño, gracias a un capacitor de 2.38 mF que se encuentra a la salida del rectificador. El voltaje de CD a la salida de un rectificador trifásico de acuerdo a [Mohan *et al.*, 2009] se obtiene como:

$$V_{\text{rectificador}} = \left(\frac{3}{\pi}\right) \sqrt{2} V_{LL} \quad (4.10)$$

donde:

$V_{\text{rectificador}}$ voltaje de CD a la salida del rectificador (V).

V_{LL} voltaje rms de CA entre fases a la entrada del rectificador (V).

Los parámetros conocidos de la prueba se sustituyen en la Ecuación (4.10), obteniéndose:

$$V_{\text{rectificador}} = \left(\frac{3}{\pi}\right) \sqrt{2}(237V) = 320.0624V$$

El rectificador realiza la conmutación natural de los diodos (1-6,6-2,2-4,4-3,3-5 : 5-1) [Hayt *et al.*, 2007]. A la salida del rectificador se encuentra un capacitor que reduce el rizado, generando una señal constante. En la Figura 4.31 se muestran los voltajes *abc* de entrada y de CD a la salida del rectificador respectivamente.

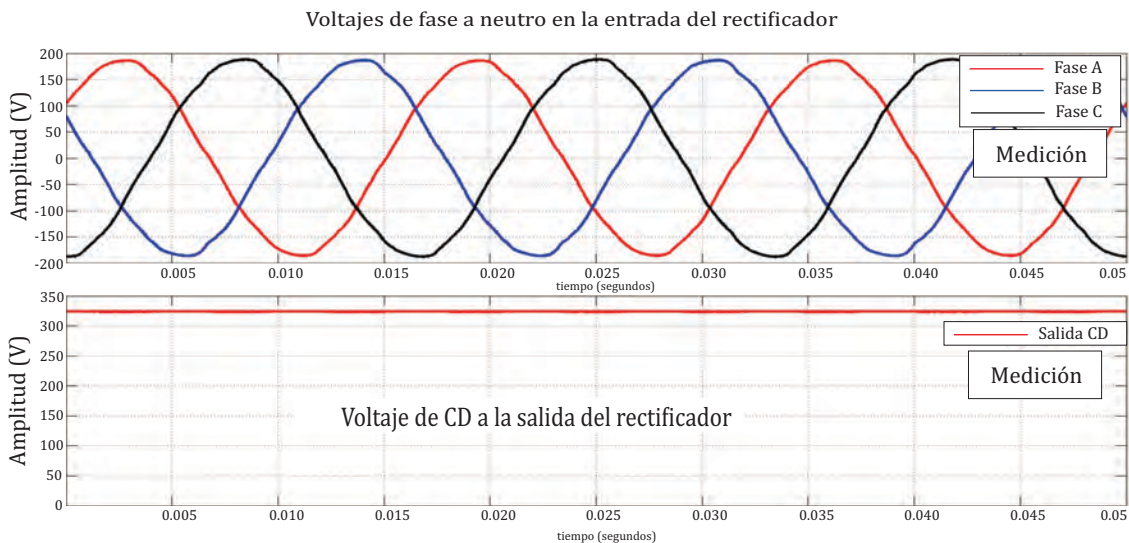


Figura 4.31: Voltajes de entrada y voltaje de CD a la salida del rectificador trifásico

4.4. Máquina de inducción jaula de ardilla en operación motor

La máquina de inducción jaula de ardilla 8505-A0 (Ver apéndice G) se opera como motor alimentándola con 208 Volts de CA entre sus fases, se realiza el registro de las formas de onda de las corrientes y de los voltaje. Para el caso de la medición de las corrientes en el estator se utilizan tres transformadores de corriente (TC) con relación 50/5 para evitar algún posible daño en el equipo OP8660 de OPAL-RT. La velocidad es sensada a través del dinamómetro de cuatro cuadrantes y la entrada encoder del OPAL-RT; el esquema físico de conexión se muestra en la Figura 4.33.

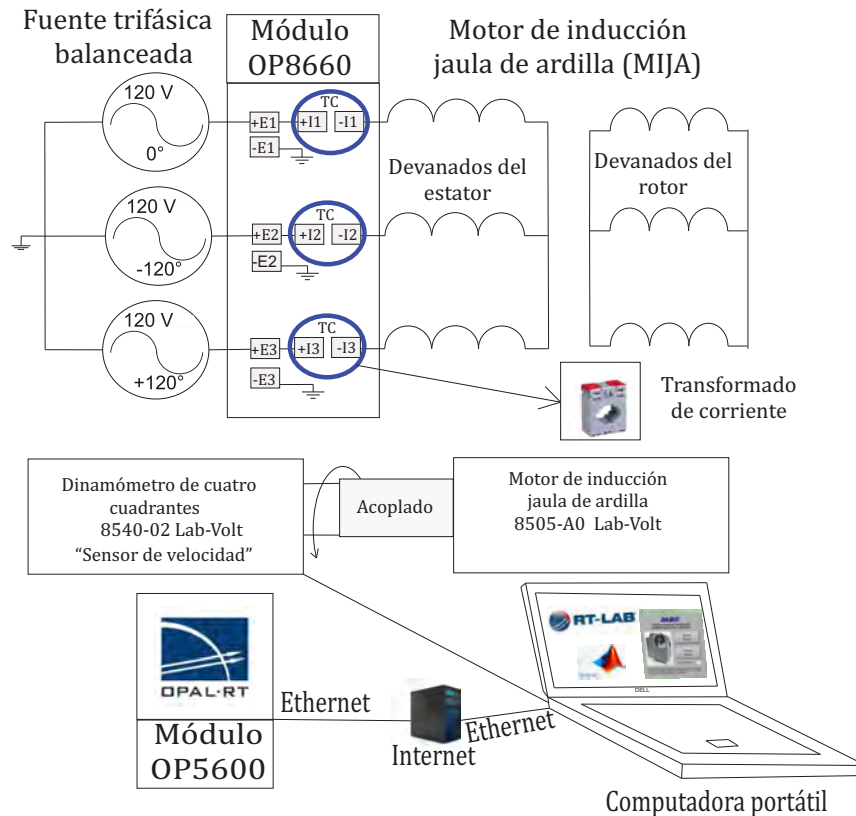


Figura 4.32: Sensado de voltajes, corrientes y velocidad del motor de inducción

La prueba duró 65 segundos, y las variables de medidas de la máquina con de OPAL-RT fue de voltajes, corrientes y la velocidad del rotor en la Figura 4.33. El registro se hace desde el arranque de la máquina hasta detener su marcha.

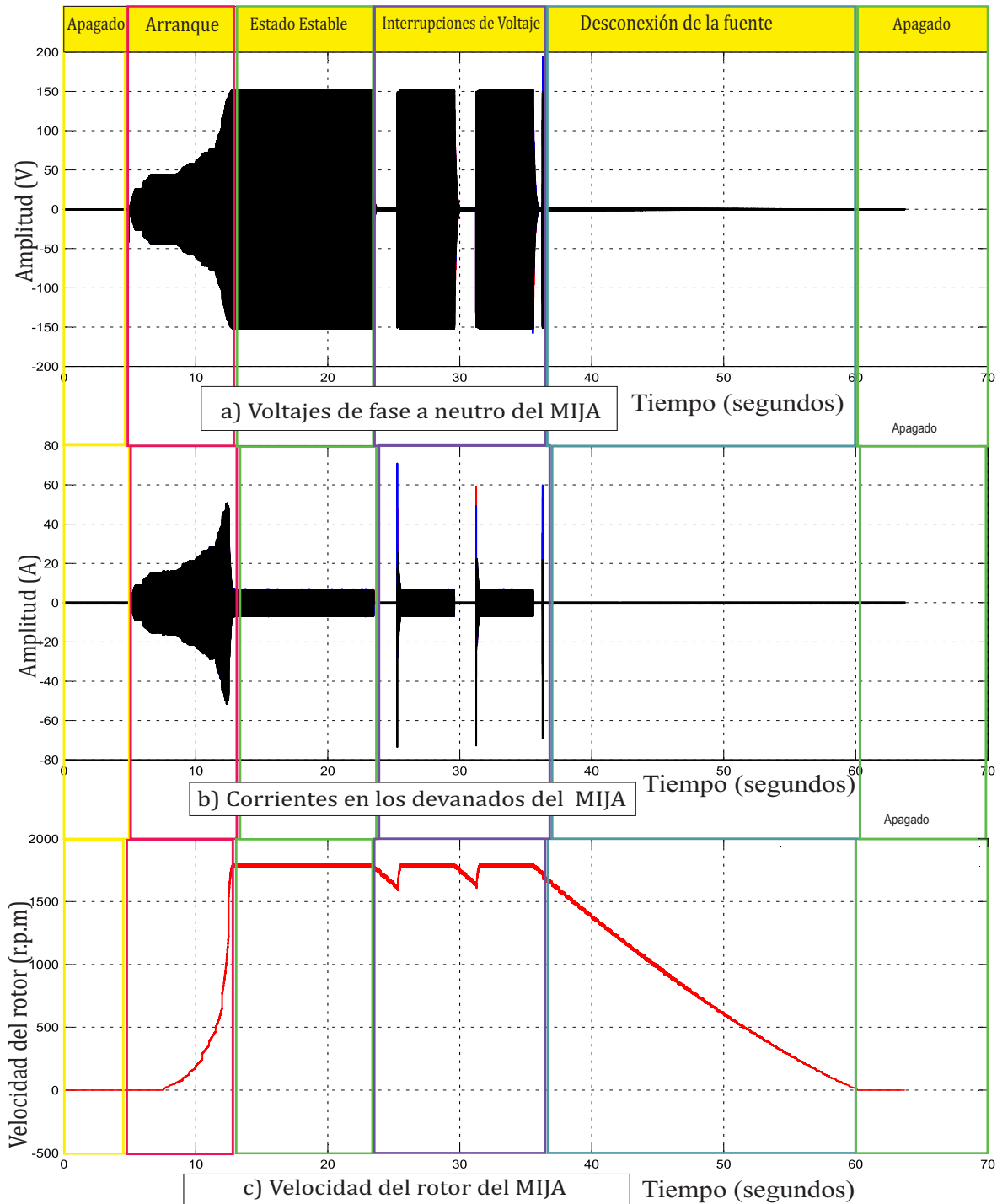


Figura 4.33: Variables medidas en la máquina de inducción jaula de ardilla operando como motor: a) voltajes, b) corrientes y c) velocidad del rotor

Considerando la operación de la máquina de inducción jaula de ardilla como motor. Los siguientes datos se obtuvieron con equipo de medición disponible en el laboratorio:

- Corriente de estátor al arranque ≈ 45 A de pico.
- Velocidad del rotor ≈ 1792 r.p.m en estado estable.
- Corriente de estátor en estado estable ≈ 6 A de pico.
- El par mecánico aplicado en el eje del rotor en vacío es de 2.13 N m
- Potencia trifásica activa $P_{3\phi}=400$ Watts.
- Potencia trifásica reactiva $Q_{3\phi}=2100$ Vars.

La medición las variables de la máquina de inducción pueden ser almacenadas en Matlab y Simulink para estudios posteriores. Esta prueba demostrativa se realizó con la finalidad de observar el comportamiento tanto de los voltajes como de las corrientes y la velocidad en el proceso de arranque, estado estable y paro general usando OPAL-RT, para registrar el comportamiento de las corrientes, voltajes y velocidad.

4.5. Conclusiones

Mediante casos de prueba o ejemplos demostrativos, se describió la manera de construir y adquirir señales tanto analógicas como digitales, haciendo un análisis de cada señal. También, se describe una manera de generar señales tipo PWM e inyectarlas al inversor trifásico. Fue presentada una comparación entre la simulación y medición de voltajes y corrientes correspondientes a una carga resistiva trifásica, comparando las señales medidas físicamente con las señales obtenidas mediante simulación digital. Por último, se almacenaron los datos correspondientes a la máquina de inducción operando como motor. Las mediciones fueron realizadas con OPAL-RT y se presentó una gráfica para el comportamiento de las variables de la máquina de inducción .

Capítulo 5

CASOS DE ESTUDIO

5.1. Introducción.

En este capítulo se realizan tres casos de estudio con el sistema híbrido eólico-fotovoltaico en operación. El primer caso de estudio se enfoca en el análisis de la operación dinámica del sistema eólico observado desde el generador de inducción; el segundo caso de estudio se refiere al análisis de la operación dinámica del sistema con panel fotovoltaico visto desde el inversor; mientras que el último estudio corresponde al análisis de la corriente de al conectar carga resistiva en estrella.

5.1.1. Esquemas implementados del sistema híbrido eólico-fotovoltaico

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico se operó de la manera siguiente:

- Generador eólico a velocidad constante.
- Panel fotovoltaico y convertidor boost entregando un voltaje de CD constante.

En la operación del generador eólico, se consideró que la velocidad vista en el generador de inducción corresponde a un valor superior a la velocidad sincrónica; dado que la máquina de inducción requiere un par negativo para generar voltaje de CA; se conecta un banco de capacitores para excitar los devanados del estator [Wildi, 2007][Chapman, 2012]. El par negativo lo proporciona el dinamómetro de cuatro cuadrantes. Éste se encuentra acoplado

físicamente al generador de inducción. En la salida del generador de inducción se encuentra conectado en paralelo un banco de capacitores y después un transformador para mantener el mismo voltaje del sistema fotovoltaico. El esquema implementado del sistema eólico se presenta en la Figura 5.1.

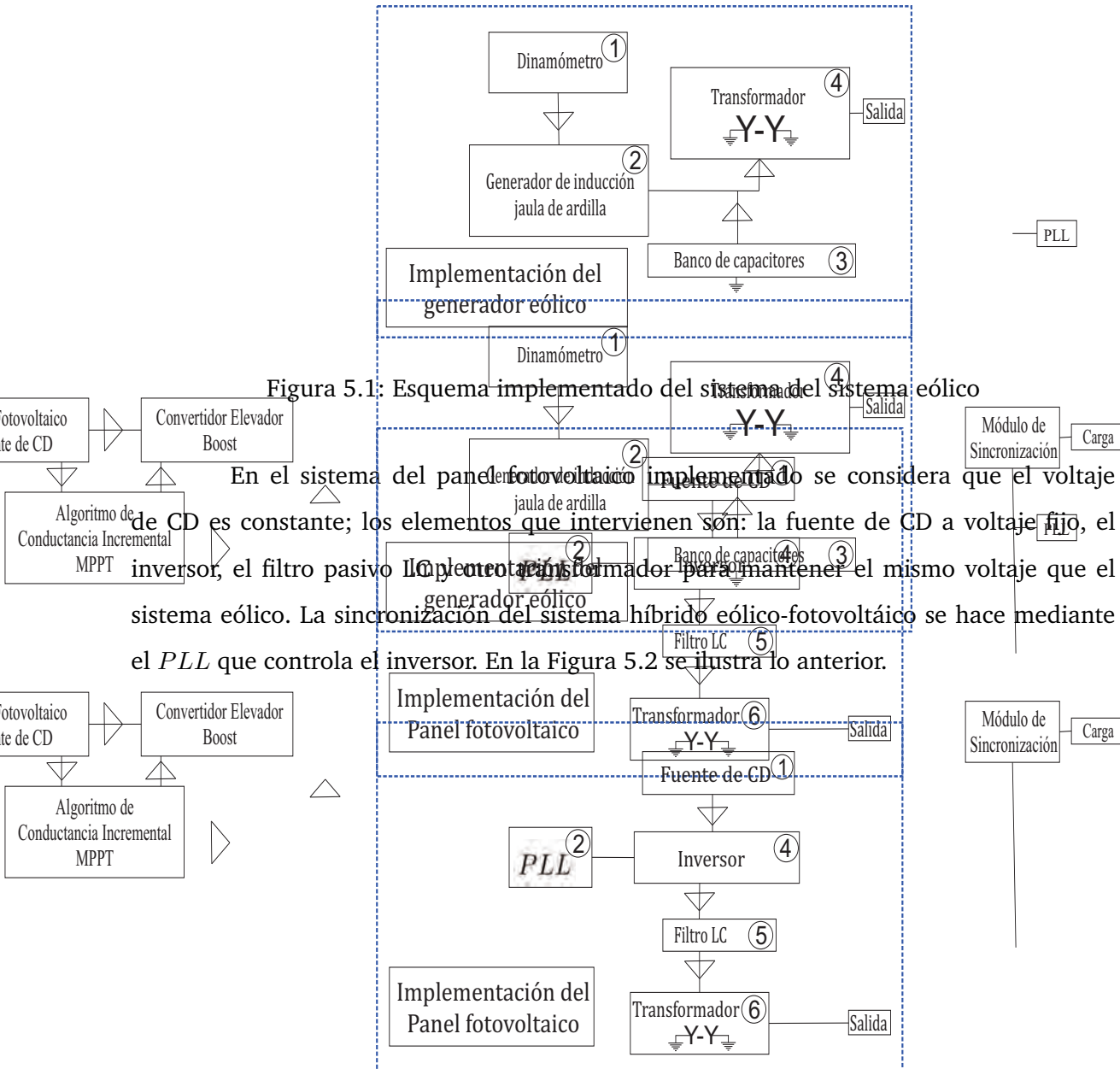


Figura 5.1: Esquema implementado del sistema eólico

En el sistema del panel fotovoltaico implementado se considera que el voltaje de CD es constante; los elementos que intervienen son: la fuente de CD a voltaje fijo, el inversor, el filtro pasivo LC y el transformador para mantener el mismo voltaje que el sistema eólico. La sincronización del sistema híbrido eólico-fotovoltaico se hace mediante el PLL que controla el inversor. En la Figura 5.2 se ilustra lo anterior.

Figura 5.2: Esquema implementado del sistema fotovoltaico

5.2. Caso I: Estudio del sistema híbrido eólico-fotovoltaico en el lado del aerogenerador a velocidad constante

En este caso de estudio se presenta el comportamiento del sistema eólico considerando una velocidad constante; el dinamómetro de cuatro cuadrantes proporciona un par mecánico negativo al generador de inducción jaula de ardilla, el cual tiene conectado un banco de capacitores para lograr generar voltaje de CA. La conexión física de aerogenerador y los elementos que se emplean se ilustra en Figura 5.3.

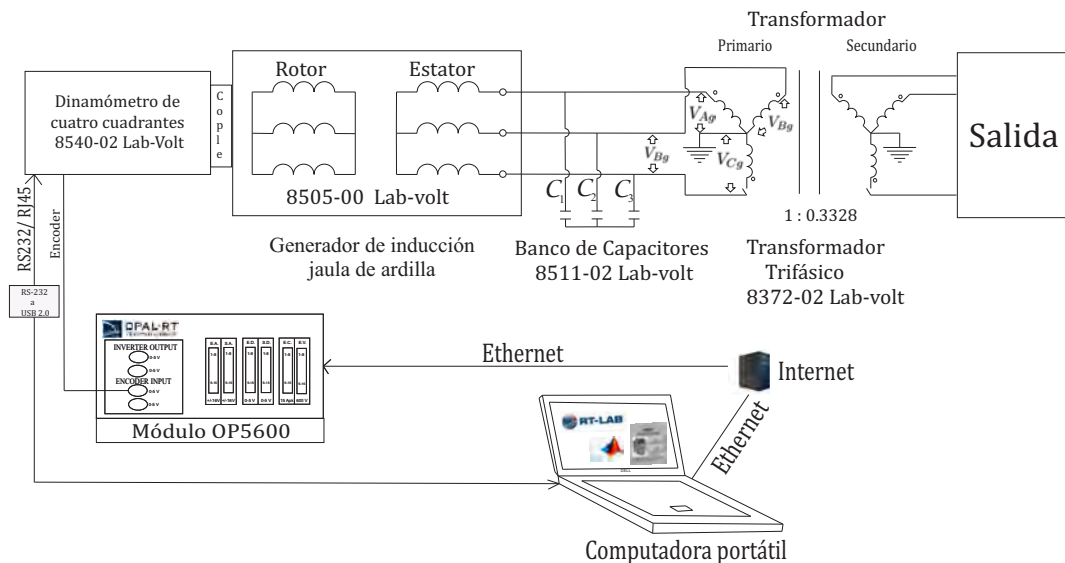


Figura 5.3: Esquema de conexión del sistema eólico

Con la flecha del generador de inducción en movimiento, se conecta el banco de capacitores para inyectar potencia reactiva a los devanados del generador de inducción; para establecer campos magnéticos en el estator y que las líneas de flujo sean cortadas por el rotor [Chapman, 2012]; obteniéndose un nivel de voltaje rms a la salida de 208 V nominales entre fases, a una frecuencia de operación de 60 Hz. Cabe señalar que la velocidad del generador de inducción fue seleccionada para no afectar la frecuencia de operación del sistema 60 Hz considerada. Por lo que el dinamómetro gira a una velocidad de 1805 r.p.m. En la simulación corresponde a tener un par mecánico de 1.08 Nm. Cada rama del banco se encuentra integrada por capacitores individuales conectados en paralelo; los valores de

cada rama se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Capacitores en cada rama del banco

C_1	$121\mu F$
C_2	$121\mu F$
C_3	$121\mu F$

Para formar el banco de capacitores se utilizaron tres módulos de capacitancias Modelo 8511-02 Lab-Volt y la combinación de cuatro capacitores en paralelo para formar el capacitor de $121\mu F$. La potencia reactiva trifásica $Q_{3\phi}$ del banco operando a una frecuencia de 60 Hz se puede calcular con la siguiente expresión según [Wildi, 2007]:

$$Q_{3\phi} = (V_{LL})^2 2\pi f C \quad (5.1)$$

donde:

V_{LL} voltaje entre fases del generador de inducción (Volts).

$C=C_1=C_2=C_3$ capacitancia del banco (Faradios).

f frecuencia a la que opera el banco (Hz).

El generador de inducción opera a un voltaje nominal de 208 V entre fases. Empleando la Ecuación (5.1) se obtiene que la potencia reactiva trifásica del banco es de 97 kVar. Los voltajes de fase a neutro en el generador de inducción V_{Ag} , V_{Bg} y V_{Cg} se ilustran en la Figura 5.4.

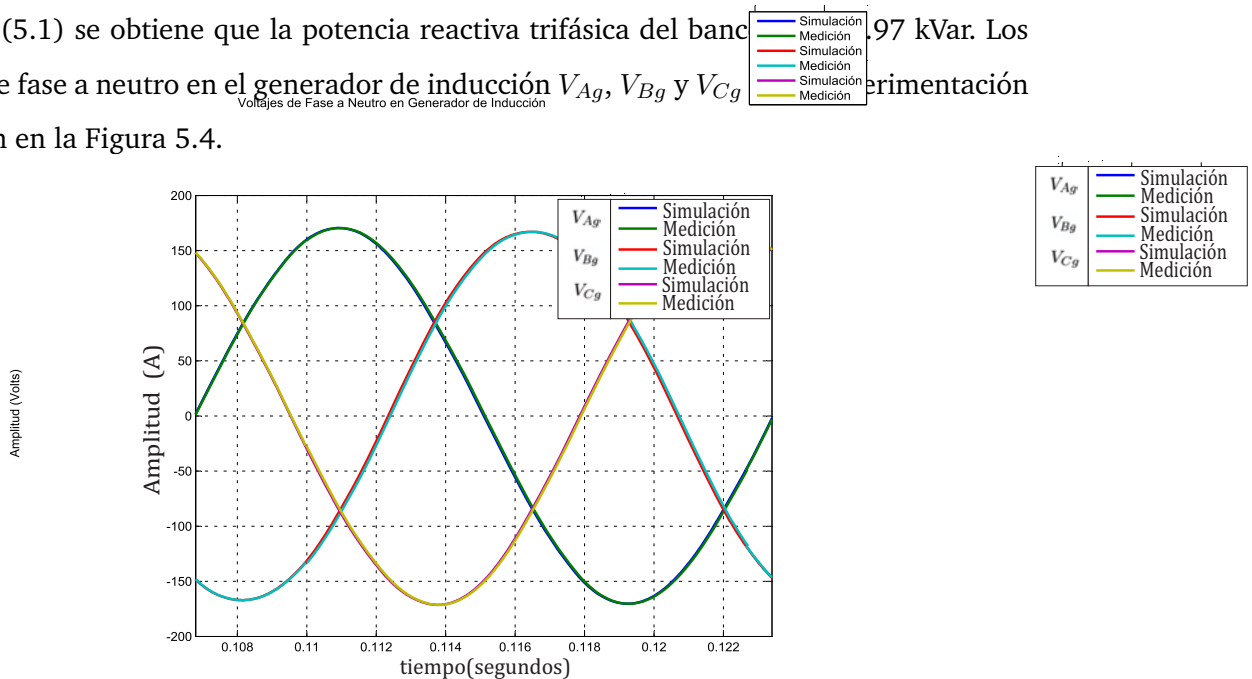


Figura 5.4: Formas de onda de voltaje V_{Ag} , V_{Bg} , V_{Cg} de generador de inducción

5.2.1. Análisis de la corriente en el generador eólico

Los transformadores y las máquinas eléctricas son fuentes generadoras de armónicos debido a efecto de saturación magnética [Arrillaga y Watson, 2003]. El punto donde se realizó el estudio para la corriente i_{Ag} se indica en la Figura 5.5.

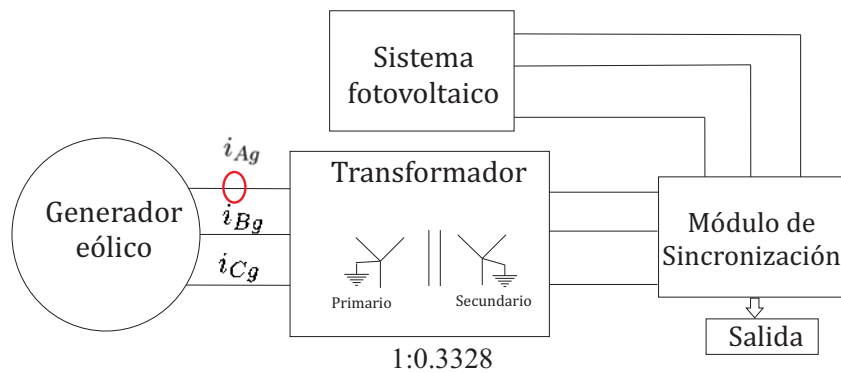


Figura 5.5: Puntos de medición de corrientes i_{Ag} , i_{Bg} e i_{Cg} en generador eólico

En la Figura 5.6 se presenta una comparación entre la simulación y la medición de las corrientes i_{Ag} , i_{Bg} e i_{Cg} .

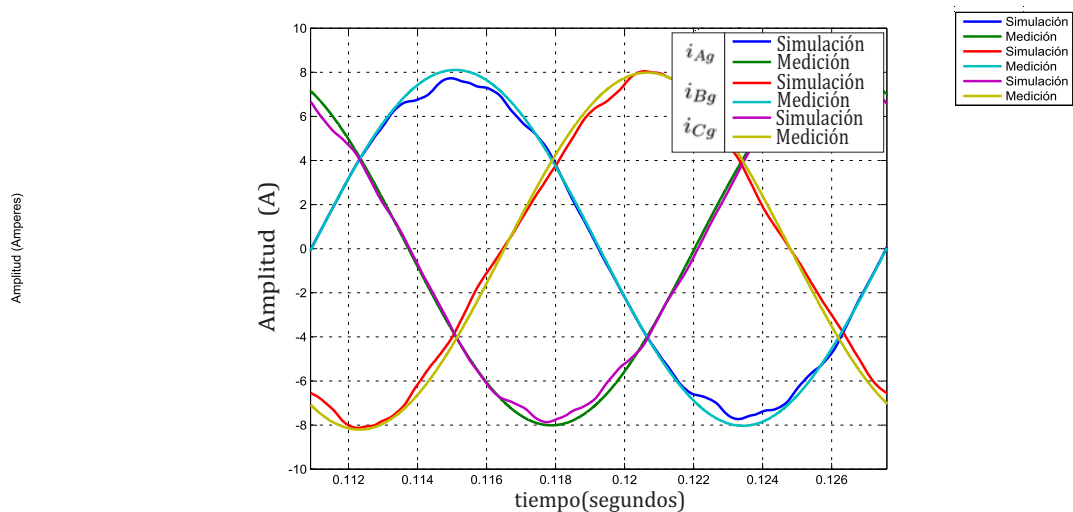


Figura 5.6: Corrientes i_{Ag} , i_{Bg} e i_{Cg} del generador eólico

La corriente de magnetización simétrica se encuentra asociada con la saturación del núcleo de las máquinas eléctricas y transformadores, por lo que ésta contiene armónicos impares [Arrillaga y Watson, 2003]. Los armónicos más influyentes en la forma de onda i_{Ag}

de la medición mostrada anteriormente en la Figura 5.6 se registran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Armónicos en la corriente i_{Ag} del generador eólico

h	i_{Ag}
Fundamental	5.180 A
3	0.092
7	0.057
11	0.063
	$THD=12.34$

Con referencia a la Tabla 5.2. se puede apreciar que el 3^{er} armónico es generado por la máquina de inducción; mientras que el 7^{mo} y 11^{vo} se generan por la saturación magnética del transformador [Arrillaga y Watson, 2003].

5.3. Caso II: Estudio del sistema híbrido eólico-fotovoltaico analizado en el lado del panel con voltaje constante

En este caso de estudio se presenta la simulación del panel fotovoltaico operando en conjunto con el convertidor *boost*. También se muestra la emulación del sistema fotovoltaico con la participación de una fuente de alimentación, la cuál se utiliza para emular el voltaje de CD fijo entregado al inversor con el filtro pasivo LC. El inversor se encuentran conmutando en base a los pulsos SPWM. Las señales moduladoras se construyen con el ángulo de seguimiento de fase que entrega el *PLL* de Matlab y Simulink.

5.3.1. Descripción de la operación ideal entre el panel fotovoltaico y el convertidor elevador *boost*

El modelo del panel fotovoltaico utilizado para ésta simulación es el KC200GT (ver Sección 2.2.2), considerando los parámetros que fueron presentados anteriormente en la Tabla 2.1. Las ecuaciones que se emplean para emular el comportamiento de este elemento se mostraron anteriormente en la Sección 2.2.2. Los valores de temperatura e irradiación solar utilizados para operar el panel fotovoltaico se indican en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Parámetros del panel fotovoltaico

Temperatura (T)	25°
Irradiación (G)	1000 W/m ²

El panel entrega un voltaje de 32.9 V de CD a su salida sin carga, es decir en vacío; con carga nominal puede proporcionar hasta 7.61 A, tomando en consideración que el voltaje en terminales del panel se reducirá hasta un voltaje cercano a 26.3 V, según se muestra en la Tabla 2.1.

En la Figura 5.7 se presenta el circuito eléctrico del convertidor *boost* y el panel fotovoltaico.

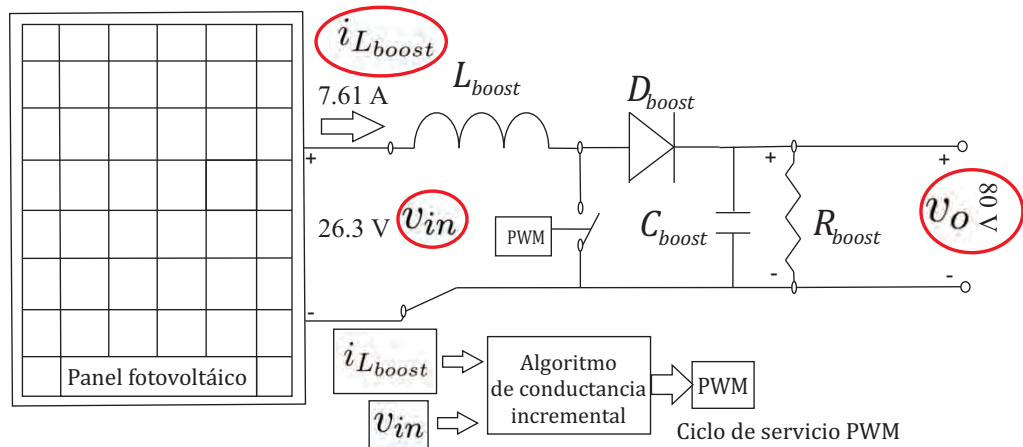


Figura 5.7: Simulación del panel con el convertidor *boost*

De acuerdo al circuito eléctrico del convertidor *boost* mostrado anteriormente, el voltaje de CD del panel entra por v_{in} ; la corriente que sale del panel es la misma que la corriente que cruza a través de la inductancia L_{boost} denotada por $i_{L_{boost}}$; mientras que la señal de control del algoritmo MPP es PWM y el voltaje de salida del convertidor es v_o . La ecuaciones que describen el comportamiento de convertidor elevador *boost* se describieron en la Sección 2.2.3. El voltaje de CD proporcionado por éste convertidor se controla utilizando el algoritmo de conductancia incremental; el se describe en la Sección 2.2.4.

Los parámetros del convertidor *boost* que fueron seleccionados para realizar esta simulación se listan en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4: Parámetros del convertidor elevador *boost*

L_{boost}	4.6295 mH
C_{boost}	167 μ F
R_{boost}	33.3 Ω
F_s	2 kHz

En OPAL-RT se utilizó la frecuencia de 2 kHz debido a la limitación de paso de integración de $25\mu s$.

5.3.2. Interacción del algoritmo MPP con el panel y el convertidor *boost*

El algoritmo de máxima potencia empleado es el de conductancia incremental. Éste se basa en el hecho de que la pendiente de la curva de potencia del panel es cero en el punto de máxima potencia (MPP), es positiva a la izquierda del MPP y negativa a la derecha del MPP [Echeverría *et al.*, 2014], según se ilustra en la Figura 5.8.

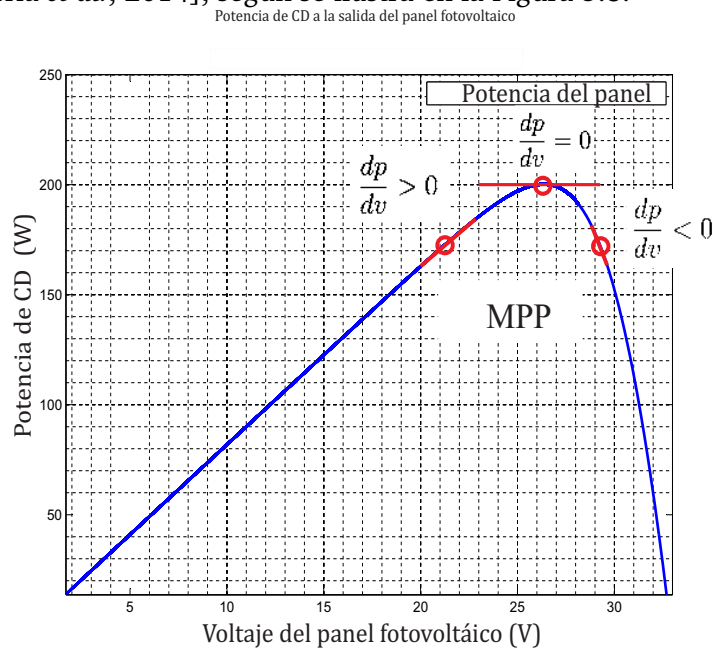


Figura 5.8: Curva característica P-V del panel fotovoltaico y MPP

El panel comienza su operación ante las condiciones de temperatura e irradiación solar antes descritas en la Tabla 2.1 y 5.3; por lo que entrega un voltaje y una corriente de CD al encontrarse conectado al convertidor *boost*. La información de éstas dos variables

se almacena con el propósito de efectuar la operación demandada por el algoritmo MPP de conductancia incremental presentado anteriormente en la Figura 2.12. La respuesta del algoritmo especifica una señal PWM con cierto ciclo de servicio, la cual es enviada al interruptor del convertidor *boost*; generando la conmutación necesaria para obtener un voltaje de CD mayor a la salida. La forma en que interactúa el panel fotovoltaico y el convertidor elevador *boost* se ilustra mediante el diagrama de bloques presentado en la Figura 5.9.

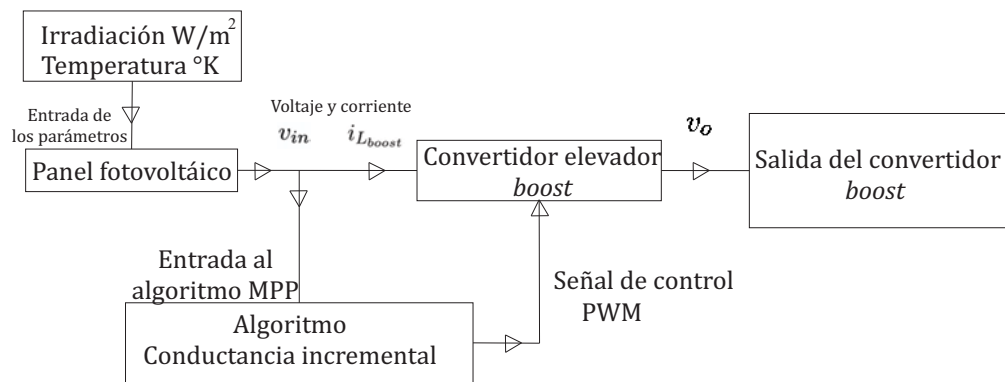


Figura 5.9: Interacción de algoritmo MPP, convertidor *boost* y el panel.

La respuesta que presenta la corriente como en el voltaje del panel y el voltaje de salida del convertidor *boost* se muestran en la siguiente sección.

5.3.3. Respuesta dinámica del panel fotovoltaico y voltaje a la salida del convertidor elevador *boost*

Para analizar el comportamiento del panel y el convertidor *boost* operando en conjunto involucrando el control de máxima potencia MPP; se procede a solucionar las ecuaciones correspondientes del panel fotovoltaico y del convertidor con los elementos seleccionados; éstas se desarrollaron en la plataforma de Matlab y Simulink.

El comportamiento en el voltaje del panel debido a la interacción con el algoritmo de conductancia incremental se presenta en la Figura 5.10. Ésta respuesta presenta oscilaciones por la forma de onda de la corriente del convertidor *boost* durante la operación con el algoritmo de conductancia incremental en conjunto con el panel.

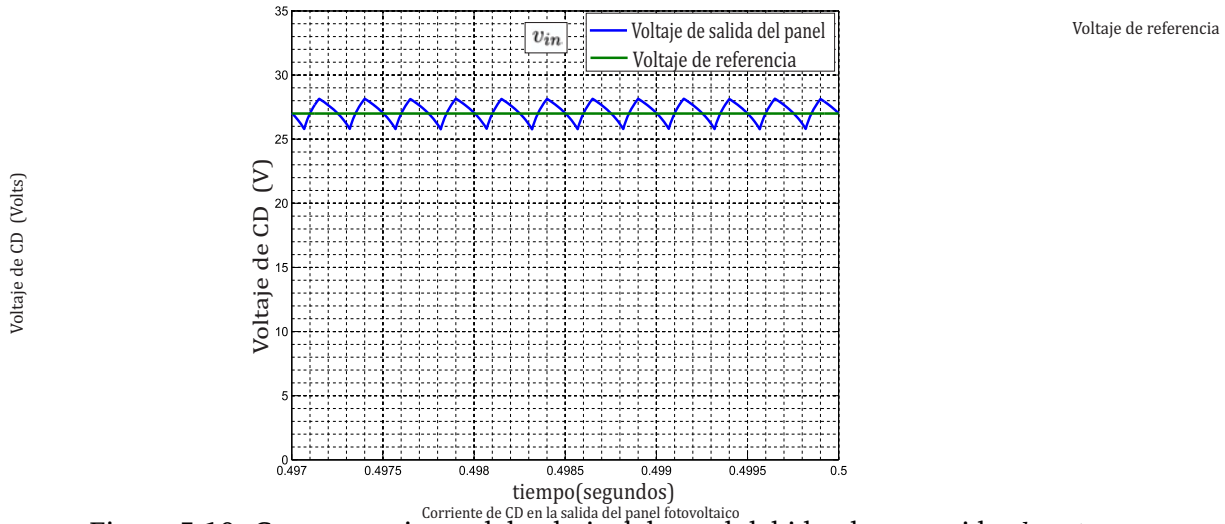


Figura 5.10: Comportamiento del voltaje del panel debido al convertidor *boost*

La forma de onda de la corriente en la inductancia L_{boost} del convertidor *boost* se ilustra en la Figura 5.11. Ésta forma de onda se obtiene porque el convertidor se encuentra operando en modo de conducción continua [Hart, 2001].

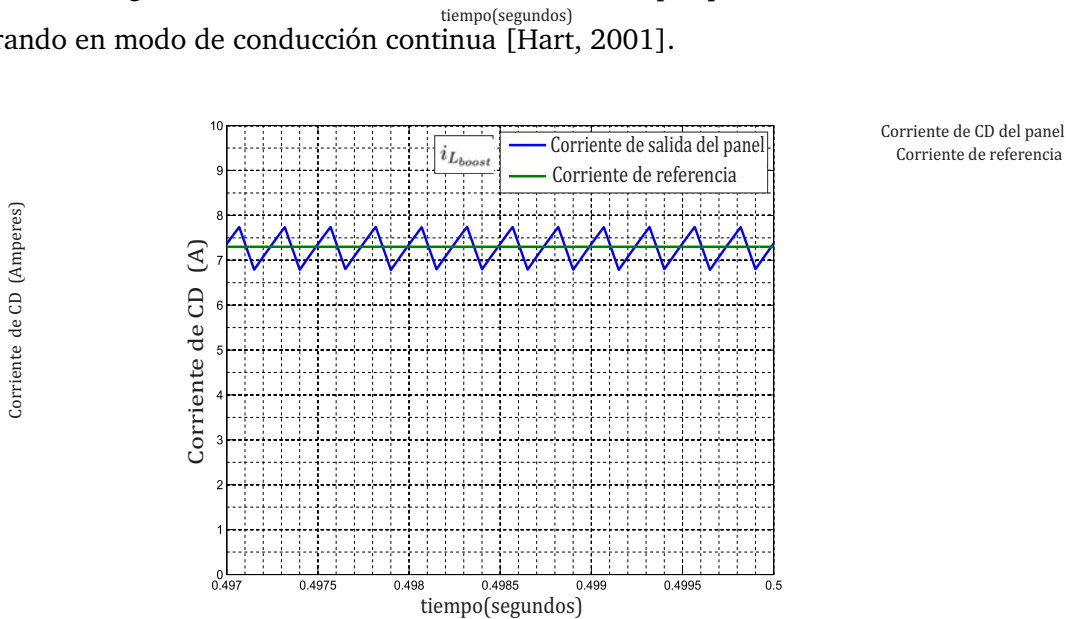


Figura 5.11: Comportamiento de la corriente del panel debido al convertidor *boost*

En la Figura 5.12 se presenta el voltaje de CD a la salida del convertidor *boost*. Éste voltaje es el que se encuentra proporcionando la fuente de CD fija.

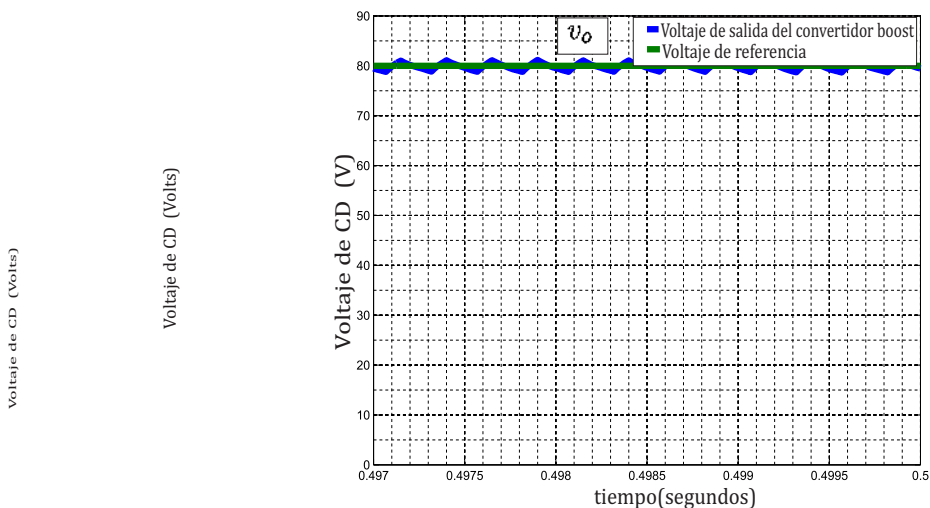


Figura 5.12: Voltaje de CD a la salida del convertidor *boost*

Las oscilaciones alrededor de los 80 V de CD en el voltaje de salida del convertidor *boost* se deben a pequeñas desviaciones del punto MPP [Valderrama *et al.*, 2011].

5.3.4. Proceso de conversión de CD/CA con el inversor de tres ramas

El voltaje de CD fijo a 80 V entregado por la fuente de alimentación corresponde al voltaje proporcionado por el convertidor *boost* (V_d), éste voltaje se suministra al inversor de tres ramas, que tiene un capacitor a su entrada, lo que permite desprestigiar el rizado. El voltaje de CD que entra al inversor se ilustra en la Figura 5.13.

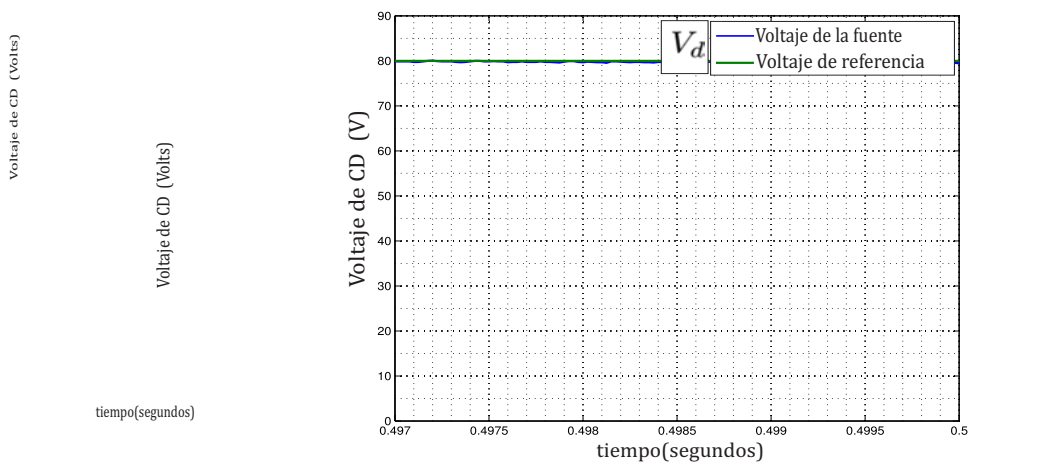


Figura 5.13: Voltaje de CD fijo suministrado a la entrada del inversor

El voltaje de CA que se obtiene del inversor se realiza a través de la conmutación de los interruptores; éstos interruptores integran al inversor de tres ramas tanto físico como en la simulación. Éste inversor se encuentra integrado por seis interruptores que se encuentran distribuidos en las tres ramas; se representa cada una como rama 1, rama 2 y rama 3. En cada rama se encuentran dos interruptores, uno en la parte superior y otro en la inferior, que son controlados por señales digitales SPWM respectivamente. El esquema que se implementó y analizó con OPAL-RT se muestra en la Figura 5.14. El seguimiento de fase entrega un ángulo de fase que permite construir las señales moduladoras.

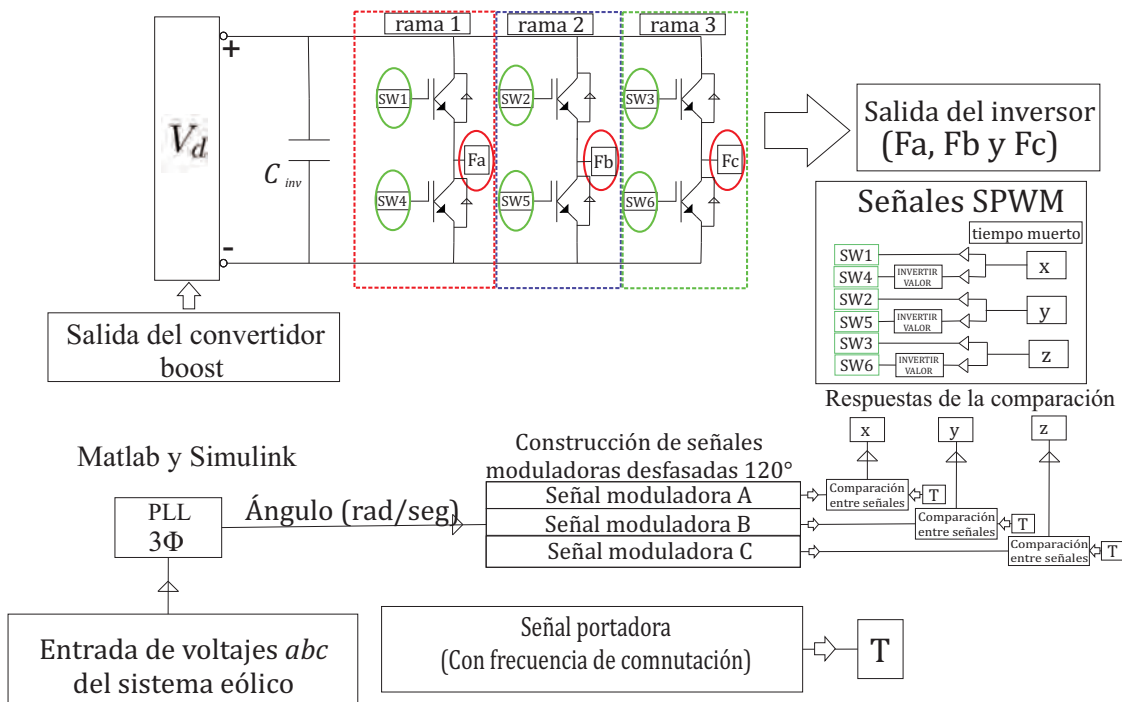


Figura 5.14: Esquema de conexión entre el inversor trifásico y PLL

Se emplea la técnica de SPWM para controlar la conmutación de los interruptores (SW1...SW6) presentes en el inversor. Cada una de las señales SPWM se construyen mediante la siguiente condición [Mohan *et al.*, 2009]:

$$\begin{aligned}
 S_{Moduladora} \geq S_{Portadora} &\Rightarrow \text{Señal digital} = 1 \\
 S_{Moduladora} \leq S_{Portadora} &\Rightarrow \text{Señal digital} = 0
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

donde:

$S_{Moduladora}$ amplitud de la señal moduladora (V).

$S_{Portadora}$ amplitud de la señal portadora (V).

En la Figura 5.15 se ilustra la técnica SPWM aplicada para construir las señales de control de la rama 1 del inversor.

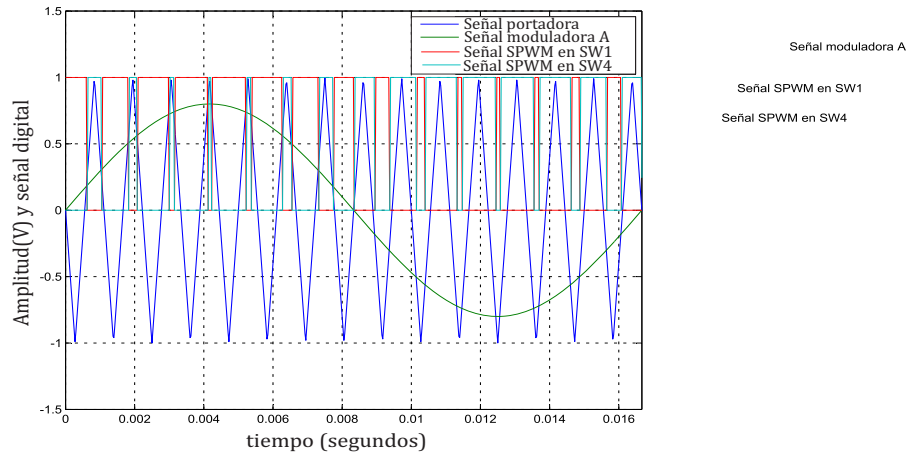


Figura 5.15: Generación de SPWM en rama 1 para SW1 y SW4

En la conmutación de los interruptores se requiere de un tiempo muerto; esto evita que se generen posibles cortocircuitos en las ramas del inversor [Rashid, 2007]. El tiempo muerto se selecciona en la Figura 5.16.

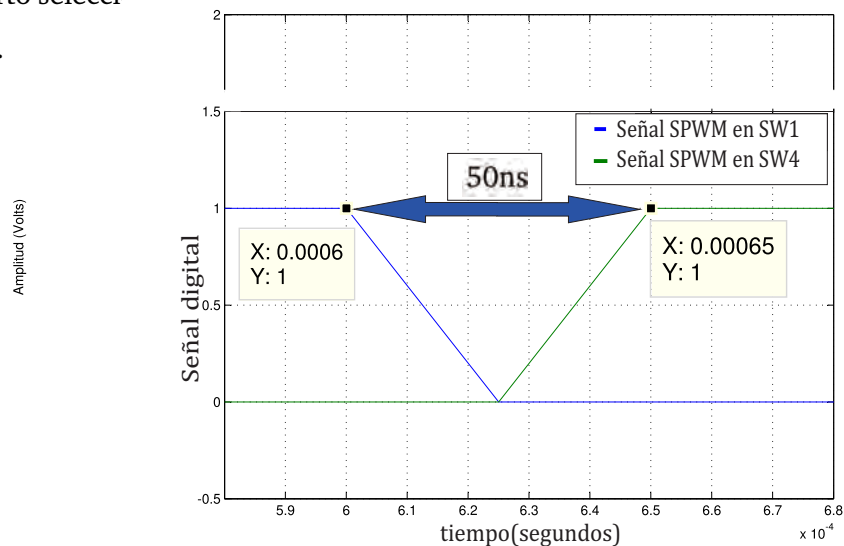


Figura 5.16: Tiempo muerto entre señales SPWM de SW1 y SW4

El voltaje de CD aplicado a la entrada de inversor es de aproximadamente 80 V. Éste voltaje se considera que es el voltaje de CD proporcionado por el convertidor *boost*. Además, se empleó una relación de modulación de amplitud m_a de 0.8 y el voltaje de CD denotado como V_d .

Las señales SPWM surgen de la comparación entre cada una de las señales moduladoras desfasadas 120° y la forma de onda triangular que corresponde a la señal portadora, considerando una frecuencia de conmutación de 900 Hz [Mohan *et al.*, 2009]; esto con el fin de generar señales de conmutación tipo SPWM y controlar cada uno de los seis interruptores del inversor. Entoncés, la interacción de la señal portadora con las tres moduladoras genera las señales de control. El arreglo de interruptores esta dado de la siguiente manera: rama 1 (SW1 y SW4), rama 2 (SW2 y SW5) y rama 3 (SW3 y SW6) como se mostró anteriormente en la Figura 5.14.

La forma de onda de la señal portadora idealmente es una señal triangular pura, considerando un paso de integración (T_s) muy pequeño de $1\mu s$. La señal fue generada con OPAL-RT considerando las características de operación propias del equipo de simulación, por lo que se considero un paso de integración de $25\mu s$, por lo que se modifico ésta forma de onda. La comparación entre la señal triangular construida en estos dos pasos de tiempo se ilustran en la Figura 5.17.

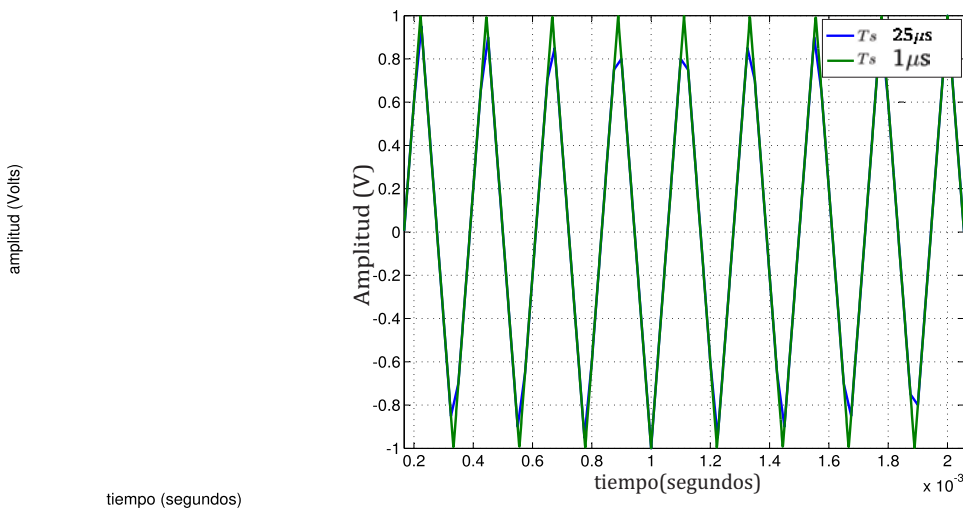
Comportamiento de Señal Triangular con T_s 

Figura 5.17: Variación de la forma de la portadora con el tamaño de paso T_s

El control del inversor se realizó en tiempo real mediante el interfaz con OPAL-RT. Las señales obtenidas mediante las comparación entre las moduladoras y la portadora para cada rama del inversor se ilustran en la Figura 5.18.

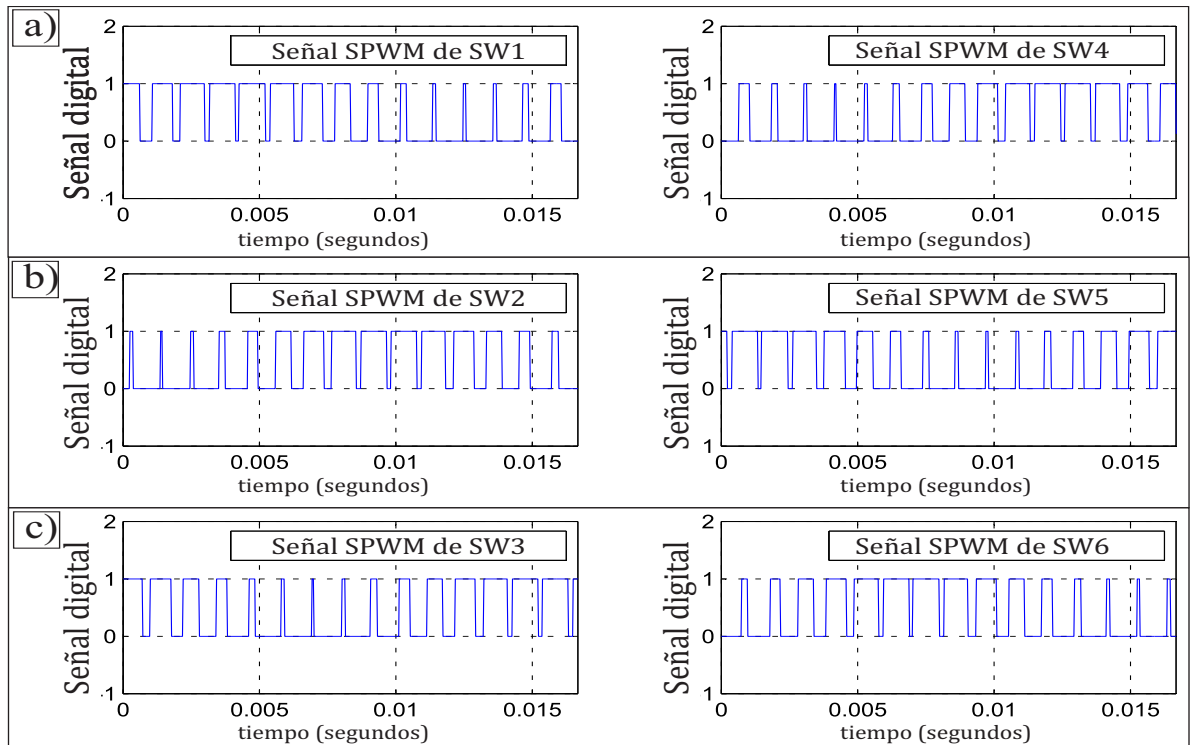


Figura 5.18: Señales digitales SPWM en: a) rama 1, b) rama 2 y c) rama 3

El equipo de simulación OPAL-RT genera las digitales anteriores como pulsos 0 V o 5 V de CD; ésto se logró empleando los bloques de salida digital (DigitalOut) en la biblioteca de RT-LAB I/O en Simulink; por lo que estas señales SPWM se conectaron de manera física a través de los respectivos puertos del equipo OP8660 de OPAL-RT.

5.3.5. Análisis de contenido armónico para una rama del inversor

El inversor recibe un voltaje de CD fijo (V_d) de 80 V, luego se realiza un análisis de contenido armónico en la rama 1 del inversor. Para hacer esto se realiza la medición entre una fase del inversor y el punto P. Los puntos donde se realizaron las mediciones son (Fa-P)(Fb-P) y (Fa-P)-(Fb-P), como se señala en la Figura 5.19.

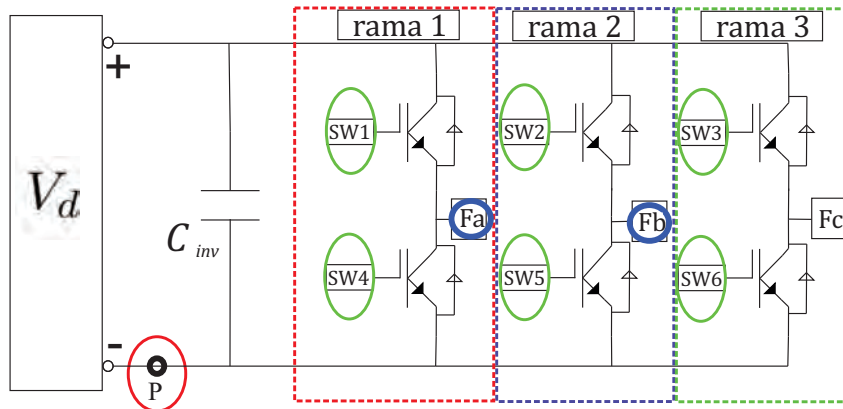
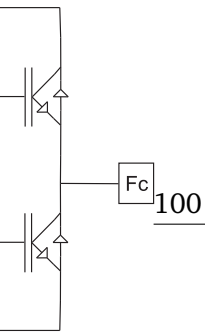


Figura 5.19: Punto de análisis de armónicos dominantes en el inversor

Las formas de onda que se observan en los puntos seleccionados tienen una amplitud con el valor de V_d [Mohan *et al.*, 2009], según se muestra en la Figura 5.20.

Medición entre Fa-P

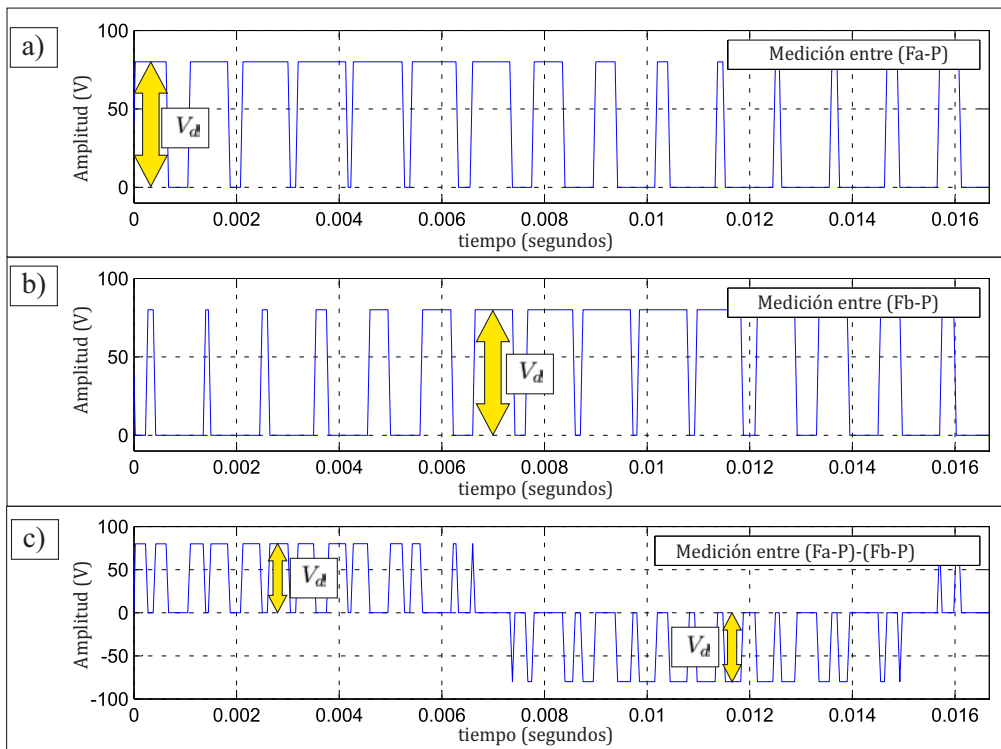


Figura 5.20: Forma de onda medidas entre: a) Fa-P, b) Fb-P y c) (Fa-P)-(Fb-P)

Para el análisis de la forma de onda para el voltaje medido en el punto (Fa-P) presentada anteriormente en la Figura 5.20 a); se aplicó la siguiente operación matemática

de acuerdo a [Mohan *et al.*, 2009] para estimar los valores de voltaje en cada armónico, para ésta forma de onda se usa la siguiente ecuación:

$$(V_p)_h = \frac{V_d}{2}(factor) \quad (5.3)$$

donde:

V_d voltaje de CD a la entrada del inversor (V).

V_p voltaje pico del armónico en estudio (V).

h orden armónico en estudio.

$factor$ constante definida en la Tabla 5.5.

Otro aspecto importante es la medición del error; que es la diferencia entre el valor verdadero y el valor aproximado. Se utiliza la ecuación descrita por [Chapra y Canale, 2007] para calcular el error relativo porcentual (E_{RP}) definida como:

$$E_{RP} = \frac{|Valor_{verdadero} - Valor_{aproximado}|}{Valor_{verdadero}} 100\% \quad (5.4)$$

La forma de onda mostrada en la Figura 5.20 a) se analizó con la transformada rápida de Fourier (FFT) de Matlab y Simulink, con la finalidad de conocer algunas de las componentes armónicas en el voltaje del inversor. El valor de V_d es de 80 V, la relación de modulación en frecuencia que se considerada es de $m_f=15$ y la relación de modulación en amplitud es de $m_a=0.8$. Se tomaron tres de los factores presentados por [Mohan *et al.*, 2009] y fueron seleccionados de acuerdo a las relaciones que se tienen. Cada valor del armónico se calcula con la Ecuación (5.3) y cada uno de los valores mostrados en la columna $factor$ de la Tabla 5.5. Los armónicos resultantes de la experimentación se compararon con los resultados teóricos y el error entre los resultados con la Ecuación 5.4.

Tabla 5.5: Armónicos generalizados para una relación de amplitud $m_a \leq 1$

	h	(Hz)	$factor$	$(V_p)_h$ verdadero	$(V_p)_h$ aproximado	E_{RP}
	1	60	0.8	32 V	32.02 V	0.06 %
m_f	15	900	0.818	32.72 V	32.59 V	0.39 %
$m_f + 2$	17	1020	0.220	8.8 V	8.77 V	0.34 %
$2m_f + 1$	31	1860	0.314	12.56 V	12.33 V	1.86 %

En la Figura 5.21 se ilustra la comparación entre los armónicos calculados y obtenidos presentados anteriormente con la simulación en OPAL-RT.

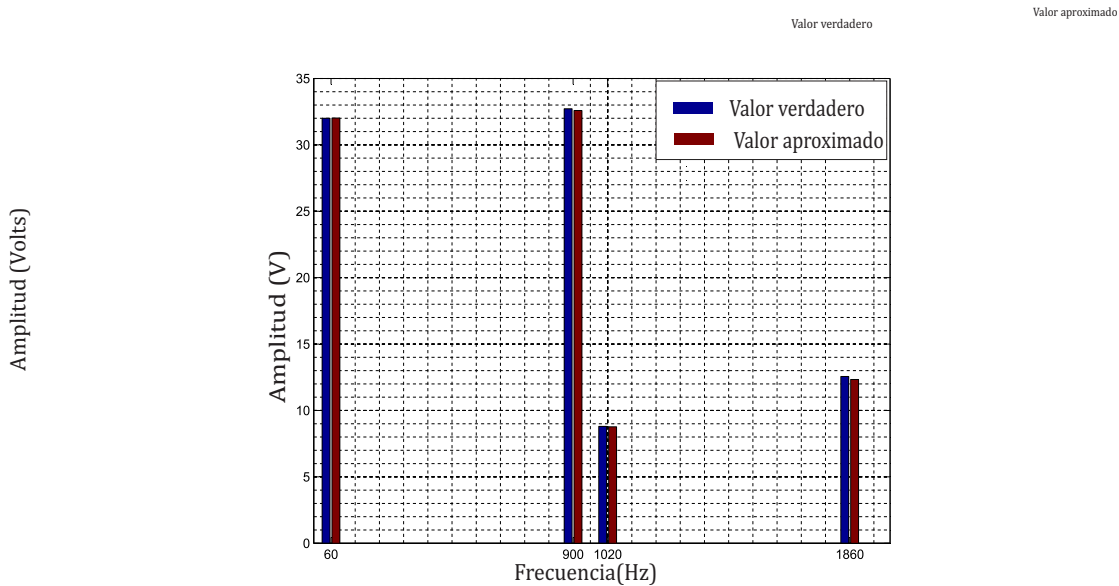


Figura 5.21: Comparación entre armónicos de voltaje en punto(Fa-P)

El voltaje que se obtiene a la salida del inversor tiene un elevado contenido armónico debido a la conmutación de los interruptores [Mohan *et al.*, 2009]. Con el propósito de reducir ésta distorsión armónica, se utiliza el filtro pasivo LC descrito en la Sección 2.2.6. Éste elemento se encuentra conectado a la salida del inversor. Los puntos de donde se obtiene la onda de la corriente i_a a la salida del inversor en la fase Fa y el voltaje entre los puntos A y B del filtro LC V_{AB} se señalan en la Figura 5.22.

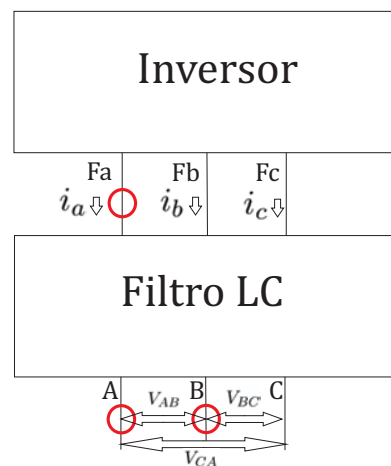


Figura 5.22: Esquema de medición en inversor y filtro LC

El filtro LC se encuentra sintonizado a una frecuencia de resonancia de 150 Hz,

para que los armónicos que superan la frecuencia de resonancia se filtren a través de estos elementos [Hayt *et al.*, 2007]. Las formas de onda del voltaje simulada y medida de los puntos V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del filtro LC se muestran en la Figura 5.23.

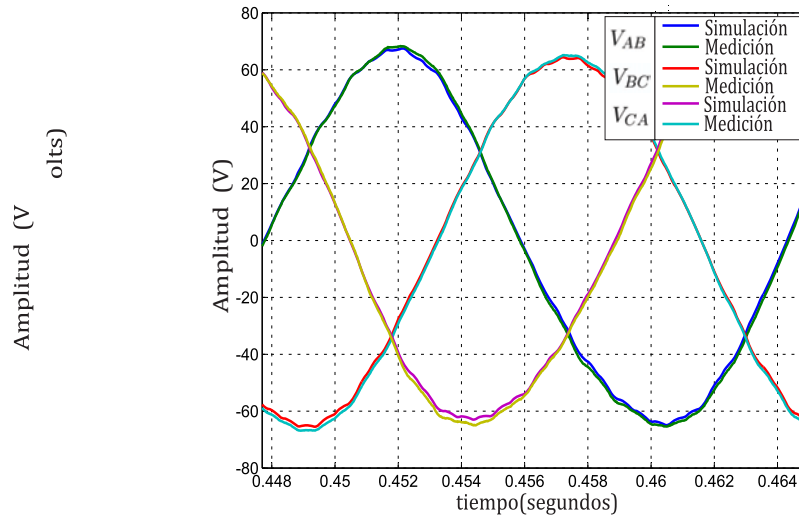


Figura 5.23: Formas de onda de V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} del filtro LC

Los valores de la componentes armónicas y THD del período de la forma de onda mostrada en la Figura 5.23 se analizan con la FFT de Matlab y Simulink. Los armónicos más relevantes se presentan en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6: Componentes impares de la forma de onda de voltaje V_{AB}

h	Voltaje rms simulado	Voltaje rms medido
1	46.44 V	45.66 V
3	1.30 V	1.27 V
5	0.20 V	0.26 V
7	0.15 V	0.169 V

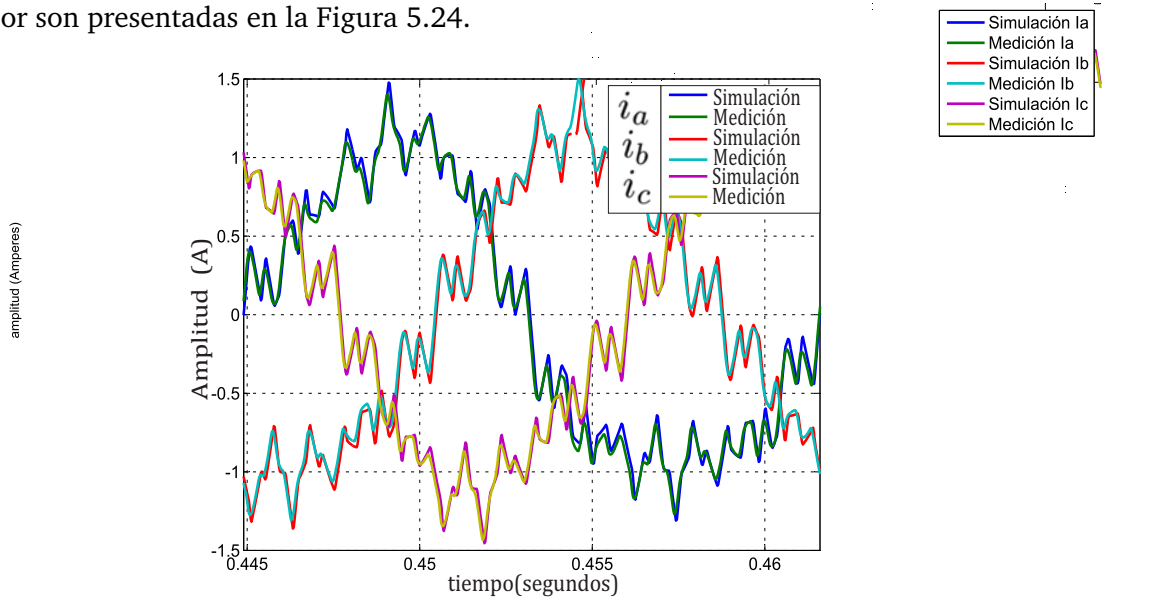
La presencia del 3^{er}, 5^{to} y 7^{mo} armónico se producen por la saturación magnética del transformador [Arrillaga y Watson, 2003]. El valor de THD y el cálculo del error relativo porcentual para el voltaje simulado y medido se calcularon con las ecuaciones (2.44) y (5.4); presentando los resultados en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Valores de THD entre las formas de onda de voltaje V_{AB}

	THD(%) simulación	THD(%) medición	E_{RP}
V_{AB}	2.85	2.86	0.44 %

Corrientes a la salida del inversor en la fase A

Las corrientes i_a , i_b e i_c resultantes de la simulación y medición en la salida del inversor son presentadas en la Figura 5.24.

Figura 5.24: Formas de onda de las corriente i_a , i_b e i_c

El análisis del período de la corriente i_a presentado en la Figura 5.24 se realizó con la herramienta FFT de Matlab y Simulink; para determinar su contenido armónico. En la Tabla 5.8 se muestran algunos de los armónicos múltiplos de la frecuencia de conmutación [Mohan *et al.*, 2009].

Tabla 5.8: Componentes influyentes en la forma de onda de la corriente i_a

h	Corriente rms simulada	Corriente rms medida
1	0.7628 A	0.7622 A
13	0.0848 A	0.0839 A
17	0.0679 A	0.0653 A

El valor del THD para ésta corriente fue calculado con la Ecuación (2.45); incluyendo el error relativo porcentual con la Ecuación (2.44). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Valores de THD entre las formas de onda de la corriente i_a

	THD(%) simulación	THD(%) medición	E_{RP}
i_a	14.2415	13.9487	2.05 %

5.3.6. Seguimiento de fase con el PLL de Simulink

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico requiere del seguimiento de fase para mantener la sincronización entre sus fases; por lo tanto se utilizó el bloque *PLL* de Matlab y Simulink. El *PLL* requiere de la lectura de los voltajes *abc*; ésto es necesario para que pueda operar y de ésta forma conseguir el ángulo de fase del sistema para controlar la salida del inversor. Los elementos que integran el *PLL* se ilustran en la Figura 5.25.

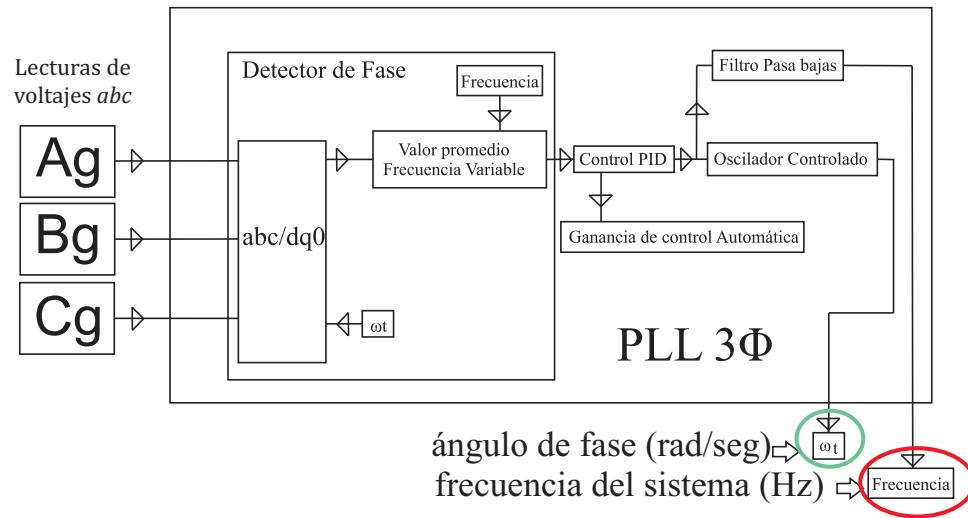


Figura 5.25: Descripción bloque *PLL* trifásico de Matlab y Simulink

Las ganancias por defecto que se utilizaron en el *PLL* se muestran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Parámetros *PLL* trifásico de Matlab

K_p	180	ganancia proporcional
K_i	3200	ganancia integral
K_d	1	ganancia derivativa

El *PLL* realiza el seguimiento de fase del sistema eólico. En la Figura 5.26a) y b) se ilustra el seguimiento de fase y la frecuencia de operación del sistema.

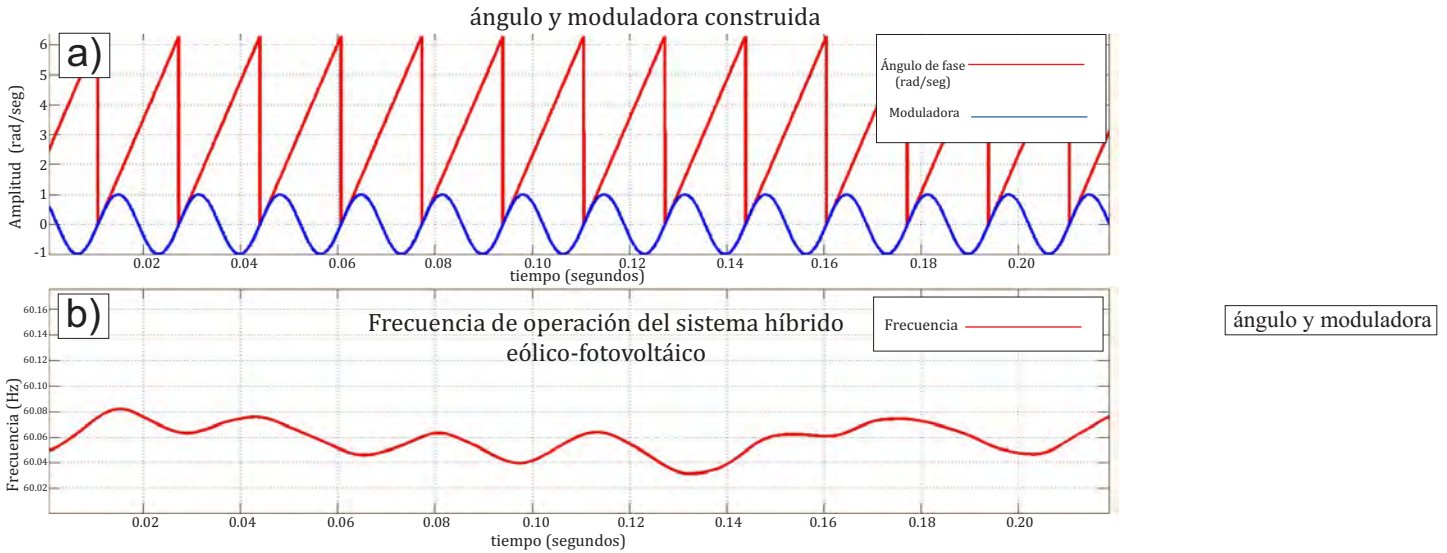


Figura 5.26: Respuesta del PLL: a) Ángulo de fase y moduladora y b) frecuencia

En la Figura 5.26 a) se puede apreciar el ángulo de fase y la señal moduladora de la fase A; ésta señal moduladora interviene en la operación del inversor. En la Figura 5.26 b) se muestra la frecuencia del sistema; este valor corresponde a la frecuencia de operación de 60 Hz y sus oscilaciones no superan el $\pm 0.8\%$ que establece La ley de servicio público de la energía eléctrica de la CFE.

5.4. Caso III: Sistema Eólico-Fotovoltaico con carga resistiva

En este caso de estudio se conecto una carga en estrella en la salida del sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Esto se hace con el propósito de observar el comportamiento con una carga resistiva balanceada y observar la distorsión armónica que presenta. En esta carga solamente se presenta la el comportamiento de la corriente de una fase. Esperándose que la distorsión de ésta sea mínima debido a los elementos que se incluídos en el sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

La carga es resistiva con resistencias de 300Ω conectadas en estrella aterrizada. Se analiza la forma de onda de la corriente i_{Ra} una de las resistencias. El esquema físico se ilustra en la Figura 5.27.

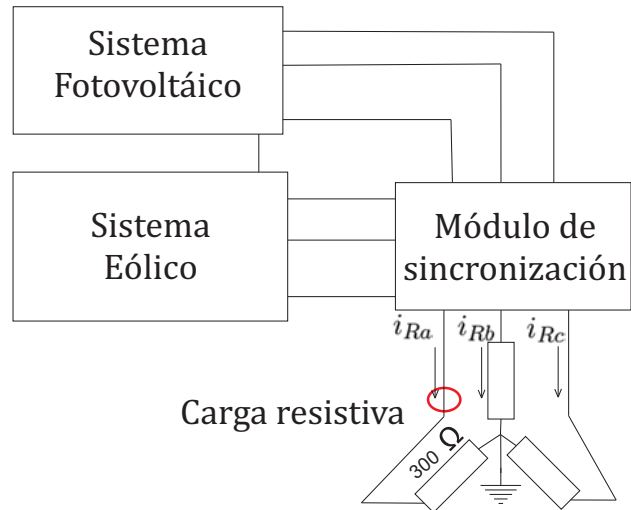


Figura 5.27: Sistema híbrido eólico-fotovoltaico con carga resistiva

La carga resistiva se conecta al sistema híbrido eólico-fotovoltaico, la caída de voltaje en una de las resistencias es de 56.06 V de pico. Las corrientes i_{Ra} , i_{Rb} e i_{Rc} que se obtienen a través de la simulación y la medición se muestran en la Figura 5.28.

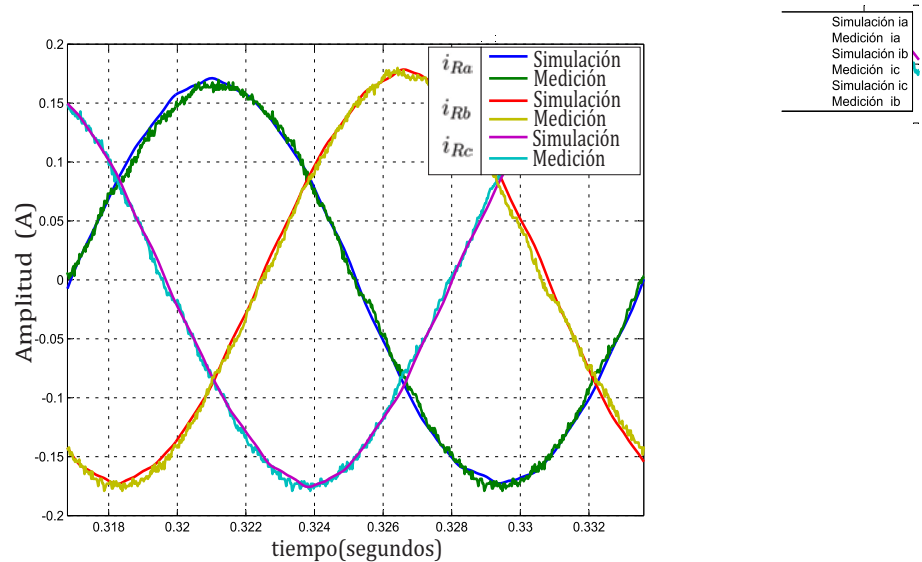


Figura 5.28: Corrientes en la carga resistiva i_{Ra} , i_{Rb} e i_{Rc}

Los armónicos que influyen en la carga resistiva i_{Ra} se registran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Componentes influyentes en la forma de onda de la corriente i_{Ra}

h	Corriente rms simulada	Corriente rms medida
1	0.132 A	0.124 A
3	1.92e-3 A	1.83e-3 A

El valor del THD fue calculado para estas componentes armónicas que se apreciaron durante el análisis realizado y también el error relativo porcentual.

Tabla 5.12: Valores de THD en las corrientes i_{Ra}

	THD (%) simulación	THD (%) medición	E_{RP}
i_{ACarga}	1.45	1.48	2.01 %

5.4.1. Equipo de simulación empleado y esquemas de simulación

El sistema híbrido eólico-fotovoltaico que fue implementado en el laboratorio y estudiado con OPAL-RT se ilustra en la Figura 5.29. Además, la simulación con OPAL-RT se encuentra en sincronía con la generación y adquisición de datos.

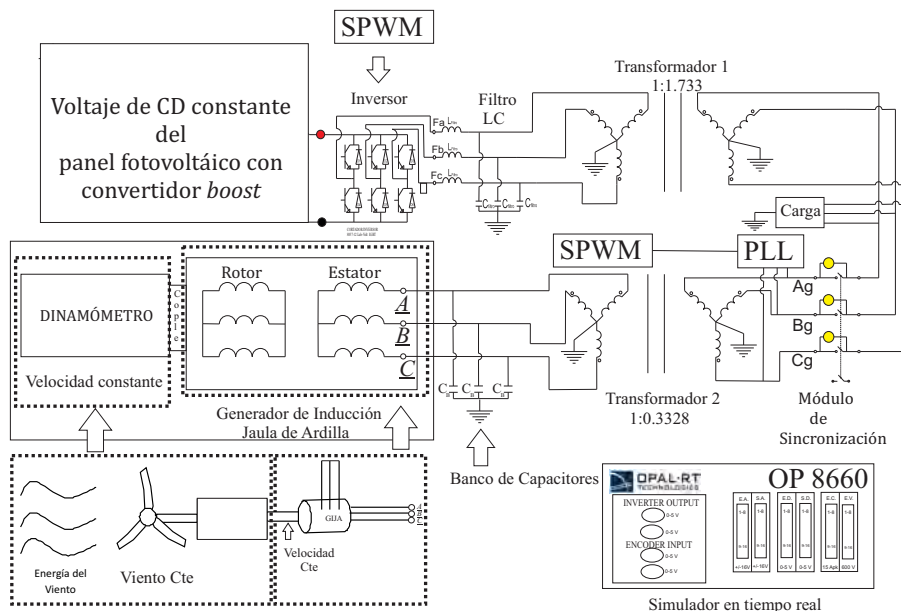


Figura 5.29: Esquema ilustrativo del sistema eólico-fotovoltaico implementado

El equipo que se utilizó para realizar la investigación reportada en ésta tesis se muestra en la Figura 5.30.

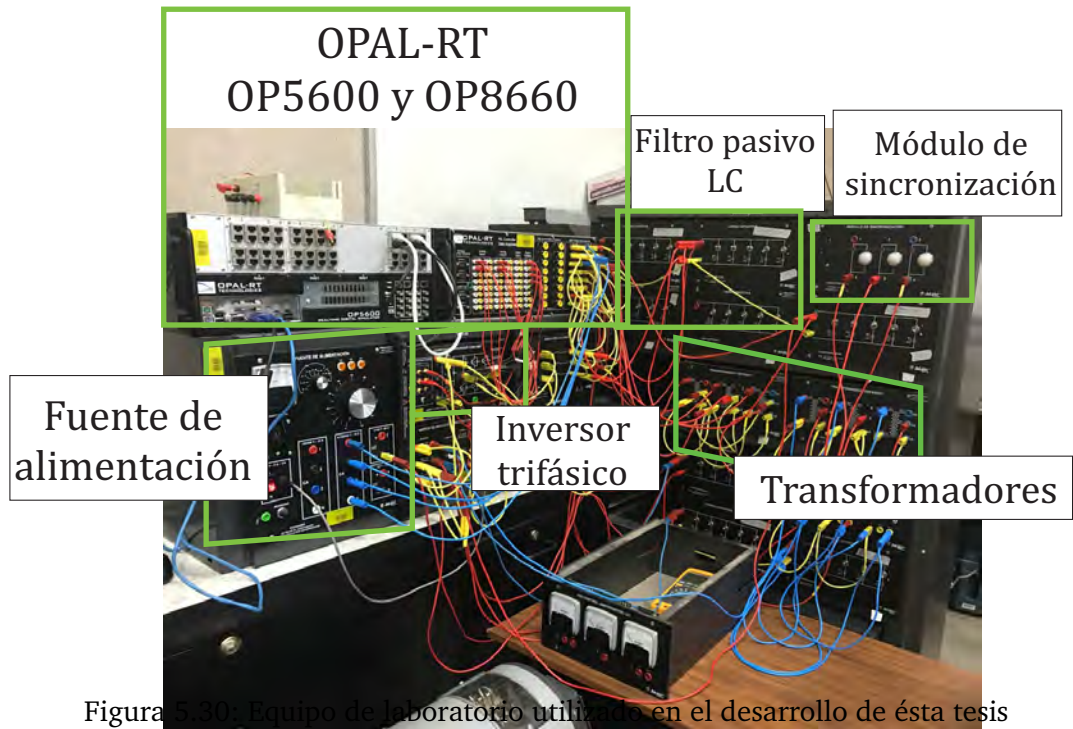


Figura 5.30: Equipo de laboratorio utilizado en el desarrollo de ésta tesis

La Figura 5.31 muestra el dinamómetro de cuatro cuadrantes acoplado al generador de inducción, para emular el generador eólico.

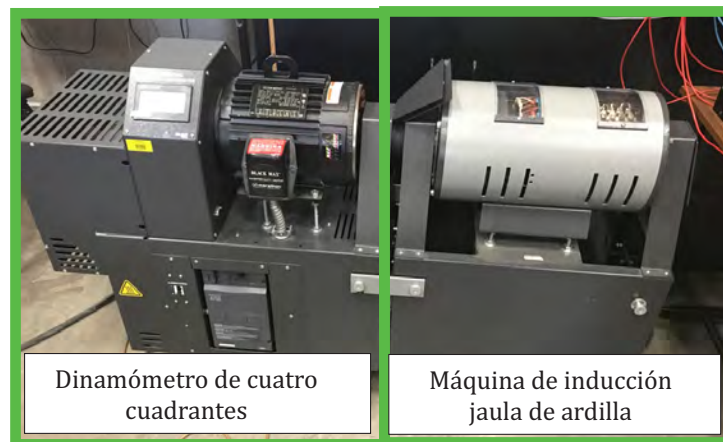


Figura 5.31: Dinamómetro acoplado a la máquina de inducción jaula de ardilla

La ventana principal del modelo que contiene los elementos necesarios para simular el sistema híbrido eólico-fotovoltaico se ilustra en la Figura 5.32.



Figura 5.32: Esquema maestro-consola en OPAL-RT

En la Figura 5.33 se ilustra el contenido de la consola. En esta ventana se visualizan todas las variables que se deseen, los datos obtenidos se pueden almacenar como una estructura de datos. Ésto permite almacenar grandes cantidades de información para ser estudiadas en Matlab y Simulink.

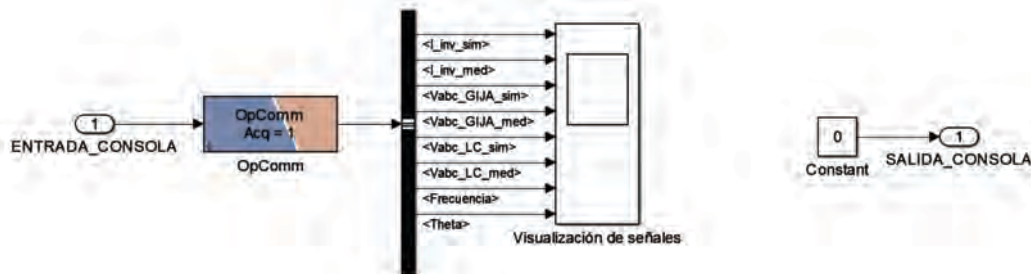
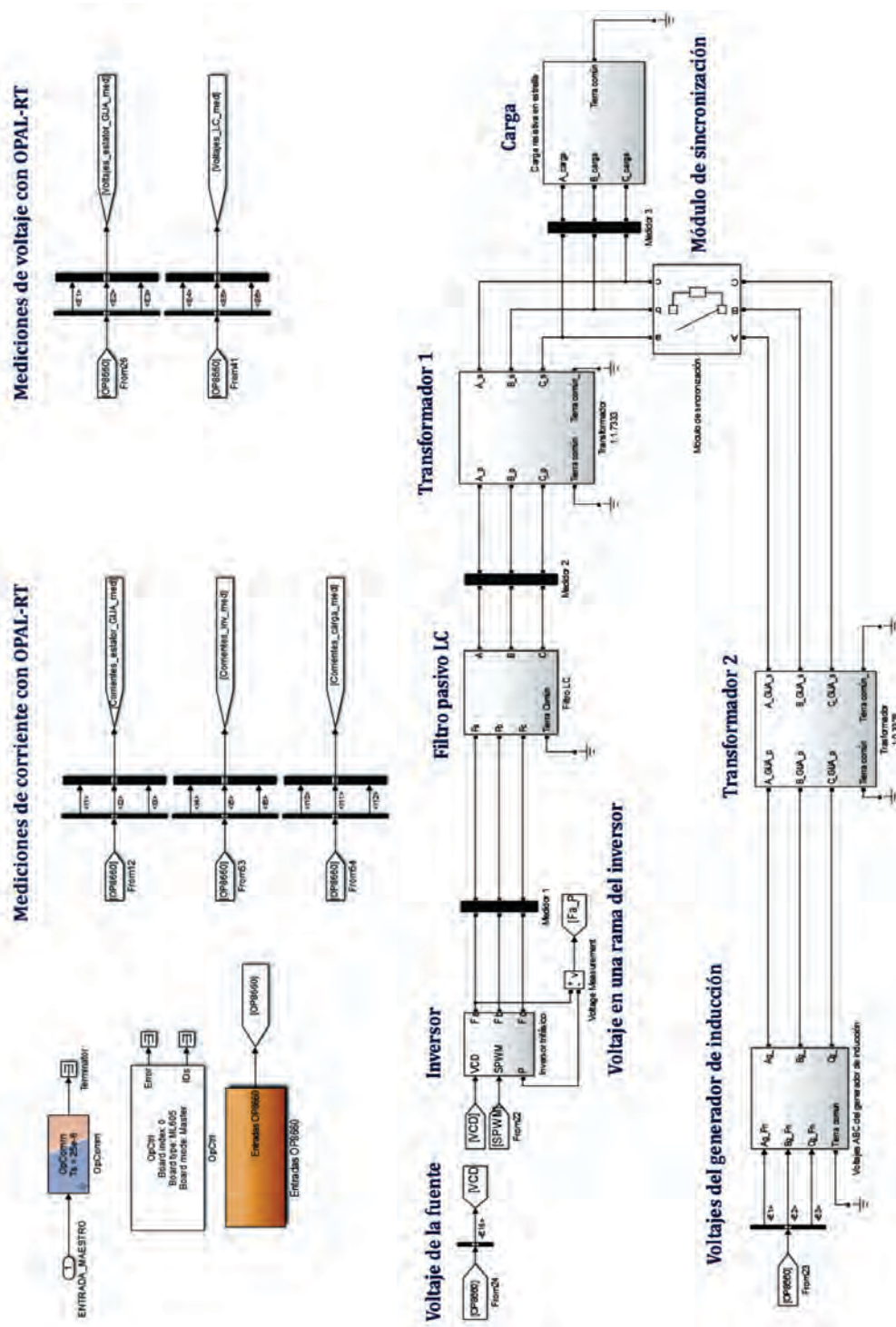


Figura 5.33: Visualización de las variables en la consola de OPAL-RT

Los datos se almacenen de tal manera que se puede hacer la comparación entre las señales que se mostraron anteriormente. En el maestro se encuentran los elementos que integran el sistema híbrido eólico-fotovoltaico, estos se ilustran en la Figura 5.34. El modelo se implementó con bloques de la biblioteca de SimPowerSystems en Simulink.



Ing. Carlos García Fulgencio

Figura 5.34: Esquema de simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico en OPAL-RT

En la Figura 5.35 se muestra el seguimiento de fase usado con el bloque *PLL* de Simulink. Éste bloque toma la lectura de los voltajes del generador de inducción para proporcionar un ángulo de fase y la frecuencia de operación del sistema.

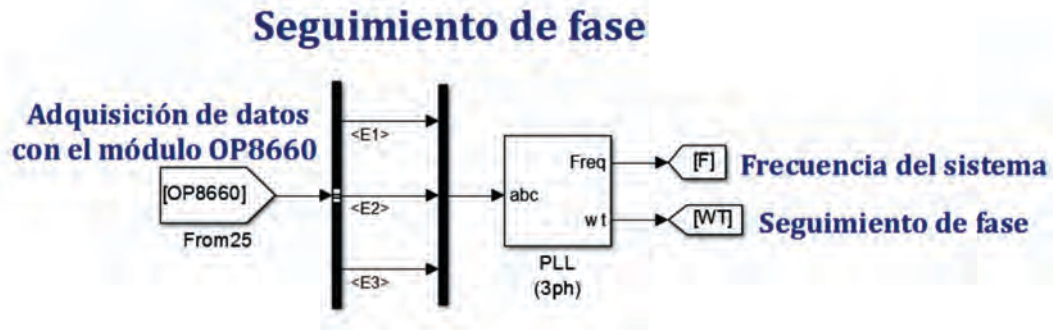


Figura 5.35: Esquema de seguimiento de fase en OPAL-RT

Una vez se tiene el ángulo de fase, se emplean funciones trigonométricas de la biblioteca de Simulink para generar las señales moduladoras desfasadas $\pm 120^\circ$, según se ilustra en la Figura 5.36.

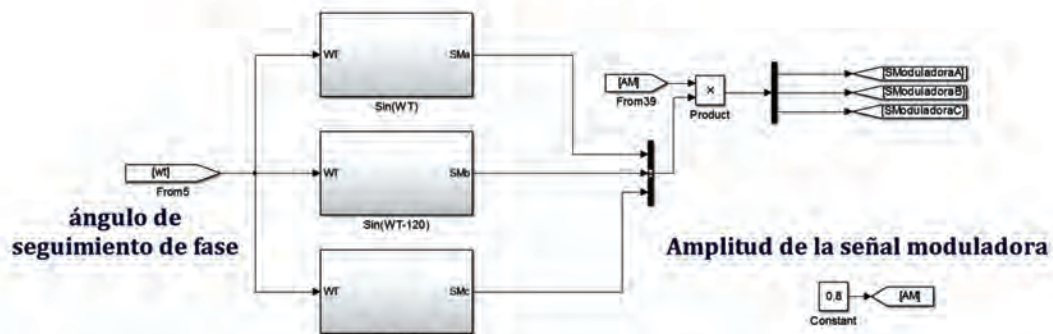


Figura 5.36: Generación de las tres señales moduladoras en OPAL-RT

Las señales modulares son generadas en el tiempo de simulación en OPAL-RT. Cada una de las señales moduladoras se comparan con una señal portadora, obteniendo como resultado las señales SPWM para el control del inversor.

La generación de señales SPWM que requiere el inversor real y virtual para realizar el proceso de conmutación se muestra en la Figura 5.37.

Generación de la señales SPWM

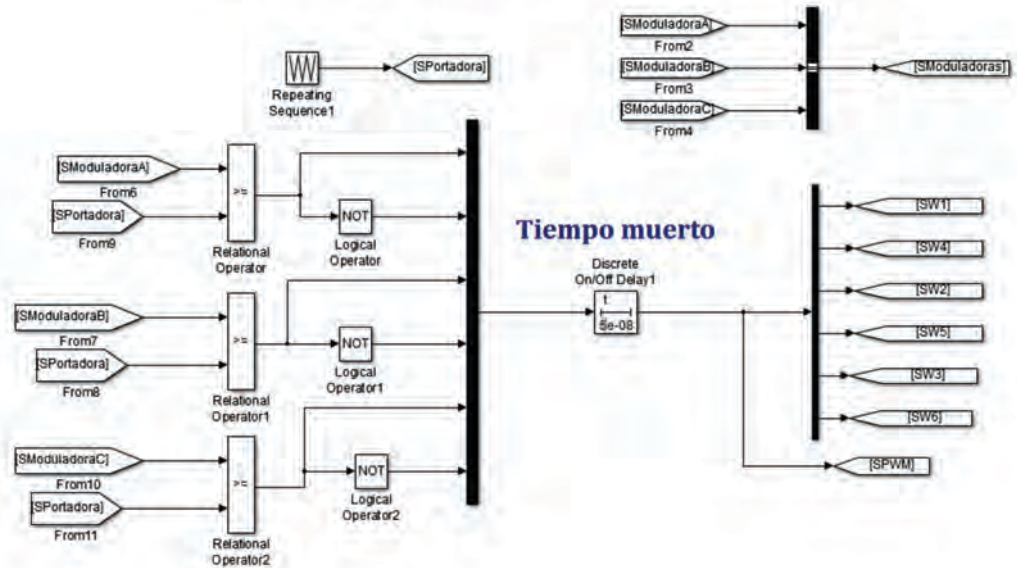


Figura 5.37: Esquema de generación SPWM en OPAL-RT

Las señales SPWM que se generan son enviadas a los puertos digitales de salida correspondientes de OPAL-RT, el cual es mostrado en la Figura 5.38.

SEÑALES SPWM

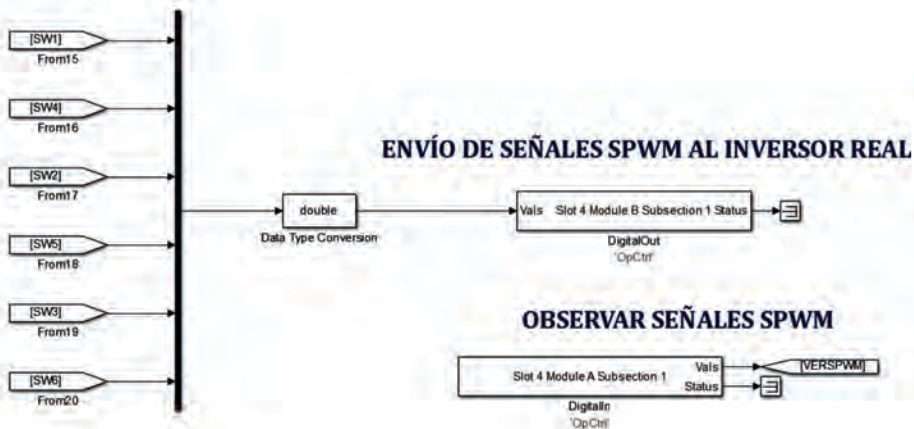


Figura 5.38: Envío de señales SPWM al inversor real desde OPAL-RT

Las formas de onda que son obtenidas mediante la simulación y la experimenta-

ción son enviadas a la consola, como se muestra en la Figura 5.39.

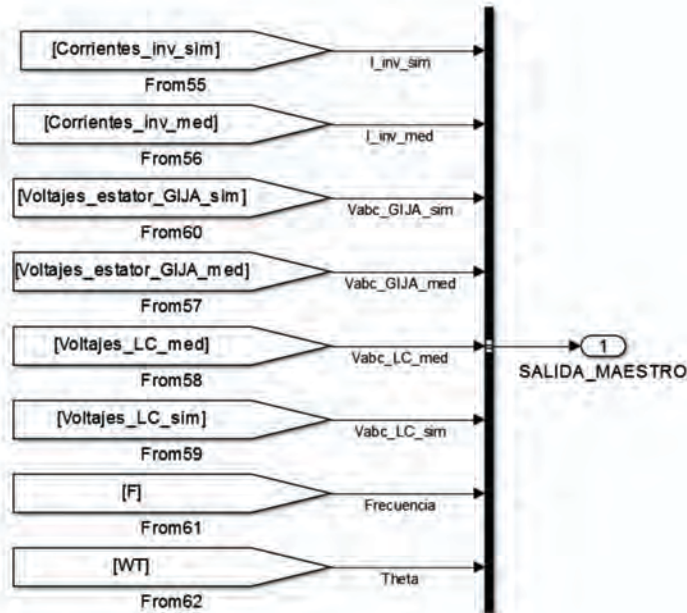


Figura 5.39: Envío de la información de señales a la consola

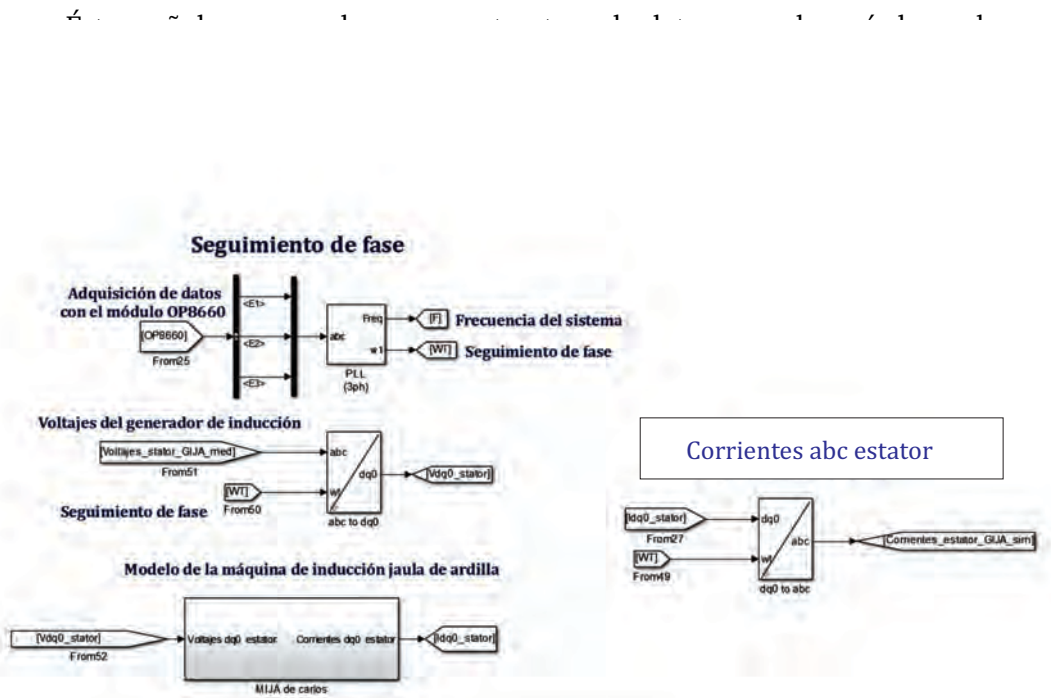


Figura 5.40: Cálculo de las corrientes abc de la máquina de inducción

En la Figura 5.41 se ilustra el esquema del panel con el convertidor *boost* que se utilizó para ver las formas de onda de corriente y voltaje que puede llegar a generar.

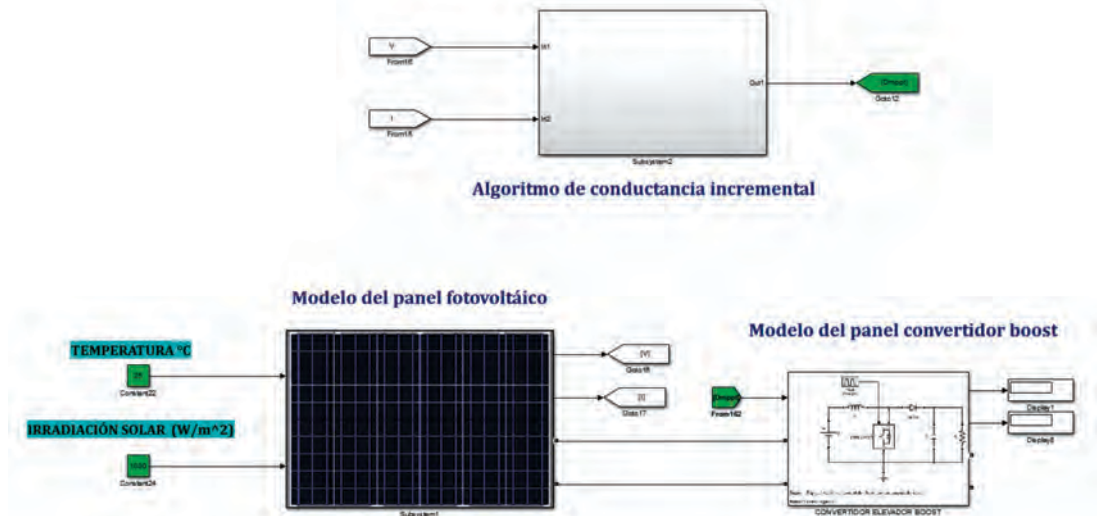


Figura 5.41: Esquema del panel fotovoltaico, convertidor *boost* y algoritmo de MPP

El filtro pasivo LC empleado en la simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico, fue implementado con los bloques de elementos eléctricos de la biblioteca de Simulink y se ilustra en la Figura 5.42.

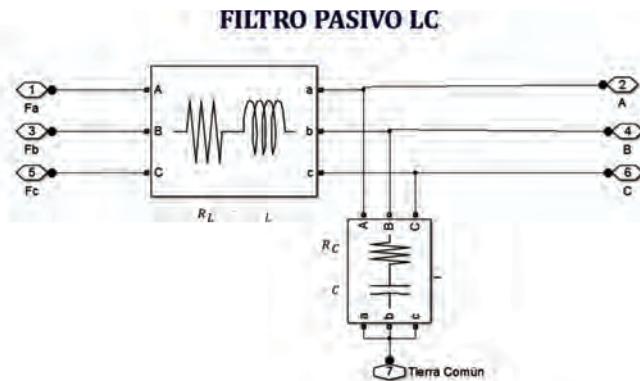


Figura 5.42: Esquema del filtro pasivo LC

Para la carga resistiva también se utiliza en la simulación, el elemento eléctrico de la biblioteca de Simulink, el cuál es mostrado en la Figura 5.43.

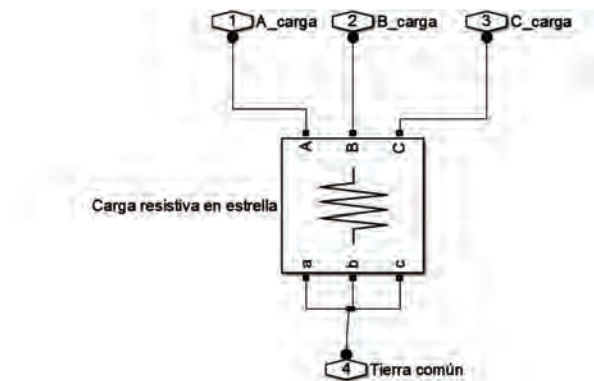


Figura 5.43: Esquema de la carga resistiva en estrella

Las señales de voltaje del generador de inducción que son registradas por OPAL-RT se envían a tres fuentes de voltaje controladas, esto se hace con la finalidad de hacer la sincronización de manera interna.

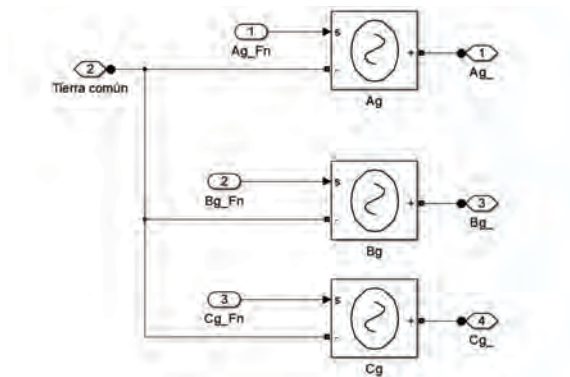


Figura 5.44: Esquema de las fuentes de voltaje en el generador

5.5. Conclusiones

En este capítulo se presentaron la comparación entre las formas de onda obtenidas por medio de la simulación y la experimentación con OPAL-RT. Cada caso de estudio muestra la comparación entre forma de onda en puntos de interés dentro del sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Se presentaron la respuestas de un panel fotovoltaico conectado a un convertidor elevador *boost*, tomando en cuenta la participación del algoritmo de conductancia incremental a manera de simulación. Se realizó una comparación entre las formas

de onda que se obtuvieron la comparación entre ciertas formas de onda que se obtuvieron mediante simulación y experimentación respectivamente, observándose en todos los casos una distorsión armónica total asociados con cada caso de estudio, presentándose una aproximación muy cercana entre las respuestas .

Capítulo 6

CONCLUSIONES GENERALES Y SUGERENCIAS DE TRABAJO A FUTURO.

En ésta tesis se desarrollo el modelo de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico de generación. Se implementó en el simulador en tiempo real OPAL-RT para determinar su operación dinámica en tiempo real y su impacto en la calidad de la energía; en particular, la producción de armónicos y distorsión armónica total.

Se realizó la implementación de un arreglo alternativo para el control de un inversor trifásico Lab-Volt, haciendo uso de señales SPWM mediante una señal portadora y tres señales moduladoras para iniciar la comparación entre cada señal portadora y cada moduladora desfasada 120° . Lo anterior con el propósito de obtener un ciclo de servicio específico para que el inversor operé. Estas señales SPWM se contruyeron con OPAL-RT en Matlab y Simulink, a través RT-LAB, y puertos de salida digitales guiados a cada uno de los interruptores del inversor real. Lo anterior se realizó con el propósito de obtener una señal de CA a la salida al ingresar un voltaje de CD a su entrada.

Se elaboró un arreglo dentro del bloque maestro haciendo uso de un bloque PLL trifásico de la librería de Simulink, con el fin de permitir la sincronización de las salidas del inversor con el sistema eólico.

Se seleccionaron los parámetros de un filtro LC, el cuál se implemento mediante tres módulos de capacitores y un módulo de inductancias disponibles en el laboratorio de máquinas eléctricas de la DEP-FIE, permitiendo mitigar el contenido armónico que generará el inversor debido a la conmutación.

Se logró monitorear con cierta precisión la velocidad del rotor de la máquina de inducción a través de OPAL-RT con ayuda del dinamómetro de cuatro cuadrantes.

Se logró operar el generador de inducción del aerogenerador mediante un banco de capacitores y el movimiento mecánico con el dinamómetro de cuatro cuadrantes; obteniendo de esta forma las señales de voltaje de CA.

Se logró operar panel fotovoltaico junto con el inversor trifásico mediante la simulación y su implementación con el equipo de el laboratorio Lab-Volt y OPAL-RT presentándose los casos de estudio realizados. En todos los casos de estudio se analizaron las respuestas obtenidas mediante la simulación y experimentación.

Se logró operar exitosamente el sistema híbrido eólico-fotovoltaico; lo cual permitió el análisis de su operación dinámica con OPAL-RT y su impacto con la calidad de la energía.

Las respuestas se obtuvieron fielmente mediante mediciones en laboratorio. Lo cual permitió validar exitosamente el modelo eólico-fotovoltaico reportado en esta investigación.

6.1. Sugerencias para Trabajo a Futuro

En base a la investigación reportada, se propone trabajar en lo siguiente:

- Incorporar un modelo de control de velocidad al modelo de la turbina eólica.
- Realizar el estudio del sistema híbrido eólico-fotovoltaico con el generador de inducción doblemente alimentado haciendo uso de dos inversores y después validarlo con el equipo de laboratorio.
- Implementar físicamente un convertidor *boost* para elevar el voltaje de CD que se tenga a la entrada y alimentar el inversor trifásico. Ésto con el motivo de analizar su

operación con el simulador en tiempo real OPAL-RT y validar los resultados esperados.

- Incorporar otros modelos de fuentes renovables de energía al sistema híbrido desarrollado, así como de esquemas para su conexión al sistema externo.
- Implementar otros esquemas del sistema híbrido eólico-fotovoltaico.
- Emplear valores de voltaje de los paneles fotovoltaicos en la simulación con OPAL-RT.

Las referencias citadas se muestra a continuación:

1.- [Danish, 2016]

.

Apéndice A

Convertidor elevador boost

La manera en que se obtuvieron las expresiones (2.27) y (2.28) tomando como referencia el circuito mostrado en la Figura (2.11) se muestran a continuación. Primeramente se aplicó una Ley de Corrientes de Kirchhoff (LCK) en el nodo que se encuentra entre las fuentes controladas obteniéndose que:

$$i_{L_{boost}} = Di_{L_{boost}} + i_{C_{boost}} + i_R \quad (\text{A.1})$$

donde:

D ciclo de servicio.

C_{boost} capacitor del convertidor (Farad).

L_{boost} inductancia del convertidor (Henry).

R_{boost} resistencia del convertidor (Ohm).

Reescribiendo la Ecuación (A.1) y ordenando términos semejantes se tiene que:

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{(1-D)}{C_{boost}} i_{L_{boost}} - \frac{v_o}{R_{boost} C_{boost}} \quad (\text{A.2})$$

Aplicando una Ley de Voltajes de Kirchhoff (LVK) en la malla del convertidor boost se tiene que:

$$v_{in} = -Dv_o + v_o + L_{boost} \frac{di_{L_{boost}}}{dt} \quad (\text{A.3})$$

Reescribiendo la Ecuación (A.3) se tiene que:

$$\frac{di_{L_{boost}}}{dt} = -\frac{(1-D)}{L_{boost}} v_o + \frac{v_{in}}{L_{boost}} \quad (\text{A.4})$$

Apéndice B

RT-LAB

El software que permite operar la unidad OP5600 en conjunto del equipo OP8660 y la versión de este programa se muestra en la Figura B.1.

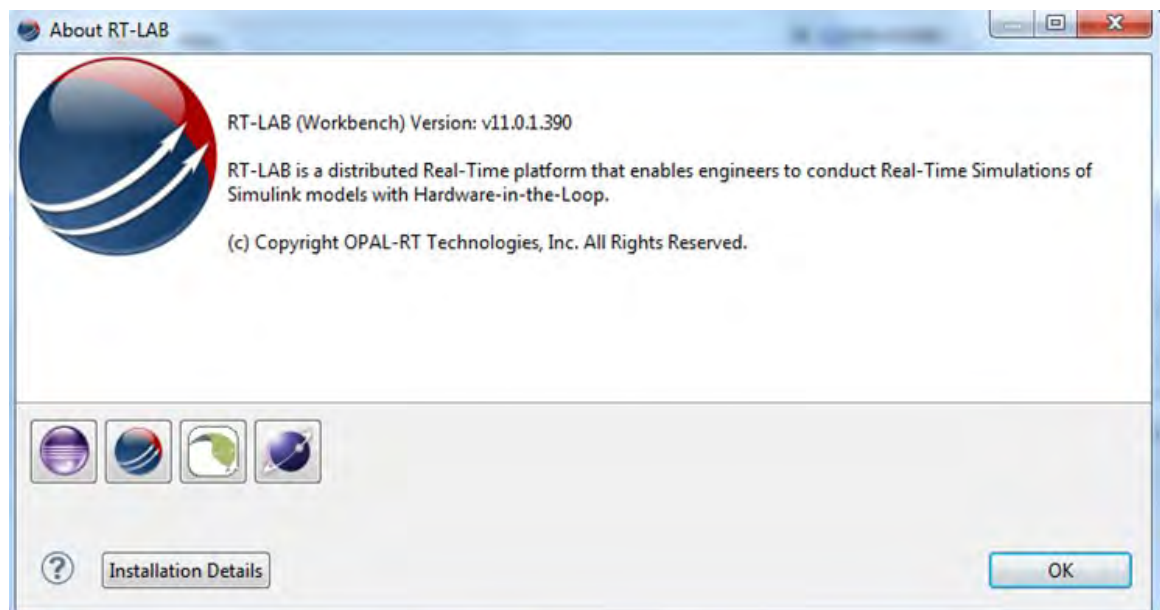


Figura B.1: Versión de RT-LAB utilizada en ésta tesis

La ventana principal de RT-LAB v11.0.1.390 se muestra en la Figura B.2.

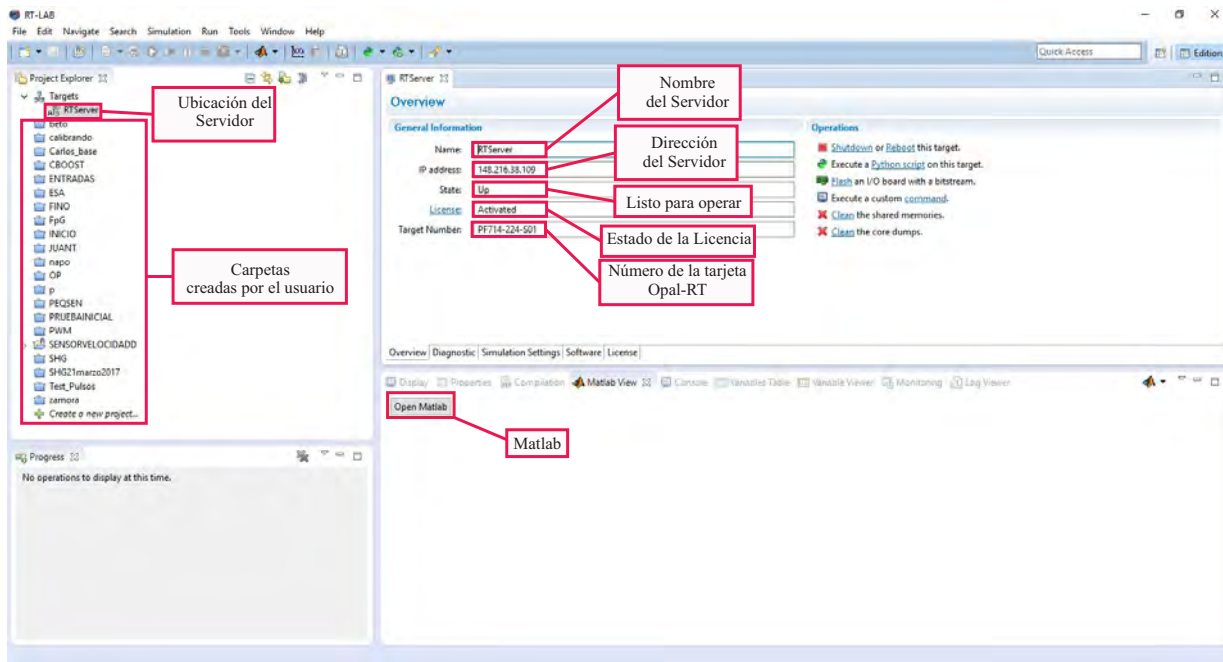


Figura B.2: Vista de la pantalla principal de RT-LAB

La configuración de puertos seguida en este proyecto son las siguientes:

- La configuración de los puertos de entrada analógica tanto de alto voltaje como de corriente usados en este equipo son: 3,4,5 y 6.
- La configuración de los puertos de entrada analógica (1-32) corresponden a los puertos 1 y 2.

Nota: en la opción Probe Control se tienen que cambiar los parámetros “Max number of samples for signal” a 25000 y “Number of samples for signal” por 20000. Esto con el fin de obtener mejor apreciación la adquisición de señales .

Apéndice C

Biblioteca de RT-LAB en Simulink

Primeramente se sugiere instalar Matlab y Simulink, en este caso r2013a y después RT-LABv11.1.39 en el ordenador. Esto con la finalidad de que sean reconocidos ciertos paquetes en la librería de Simulink al operar el software RT-LAB, como se muestra en la Figura C.1. La ruta dentro de Simulink en donde se encuentran es la siguiente:

Libraries \RT-LAB I/O \Opal-RT\Common

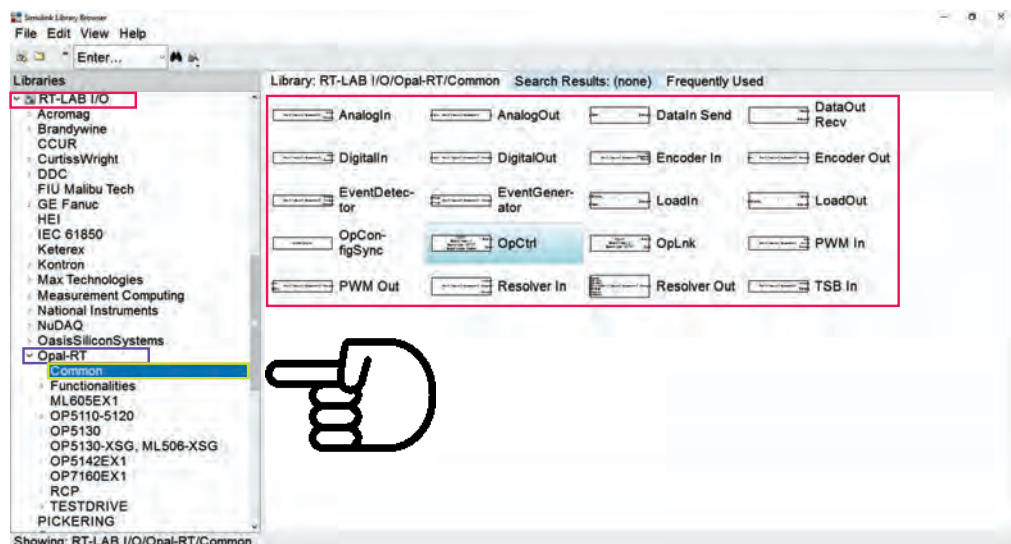


Figura C.1: Librería de RT-LAB en Simulink de Matlab r2013a

Estos bloques permiten establecer comunicación con las entradas y salidas del módulo OP5600 y OP8660. Además se tiene que identificar el puerto en el cual se ubica.

Nota: También se puede hacer uso de los bloques que se encuentran dentro de la librería ML605EX1. La ruta de esta librería alternativa es: *Libraries \RT-LAB I/O \Opal-RT\ML605EX1*.

C.1. Bloque principal de comunicación OpCtrl

El bloque OpCtrl es el bloque que permite establecer la comunicación entre los puertos de OPAL-RT para lograr adquirir señales, ya sean de alto voltaje y corriente o generar señales de tipo analógico o digital, solo hay que agregar el nombre del archivo .bin tal como se muestra en la Figura C.2.

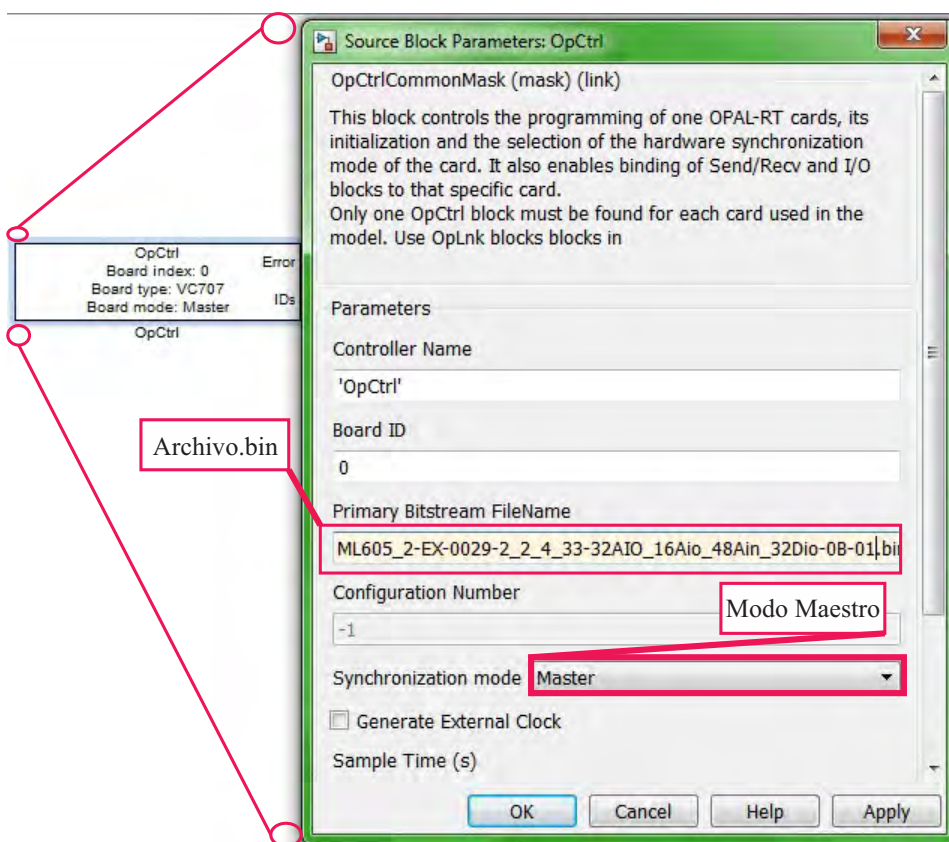


Figura C.2: Bloque OpCtrl y archivo .bin

C.2. Archivos requeridos para hacer pruebas con Opal-RT

Para que se pueda establecer la comunicación entre el programa (Matlab y Simulink) en OPAL-RT y RT-LAB, es necesario contar con dos tipos de archivos (.bin y .conf) al realizar la compilación y la carga, de lo contrario no se logrará establecer la comunicación. Por una parte, el archivo.mdl es el que contiene el arreglo de bloques de Simulink (Maestro-Consola) y el archivo.m que puede almacenar las variables que se deseen cargar automáticamente, sin necesidad de ser insertadas de manera manual por el usuario. Un ejemplo de los archivos que se tienen que cargar se muestran en la Figura C.3.

ML605_2-EX-0029-2_2_4_33-32AIO_16Aio_48Ain_32Dio-0B-01	10/11/2015 05:21 ...	Archivo CONF	2 KB
ML605_2-EX-0029-2_2_4_33-32AIO_16Aio_48Ain_32Dio-0B-01	10/11/2015 05:21 ...	Archivo BIN	9,017 KB
init_dpc	02/12/2015 01:25 ...	Archivo M	1 KB
base_.mdl	05/08/2016 02:47 ...	Archivo MDL	102 KB

Figura C.3: Archivos .bin .conf .mdl y .m para una prueba básica con Opal-RT

De acuerdo al modo en que se opere el equipo, se dispone de dos modos de operar el simulador en tiempo real, mostradas en la Figura C.4. Los archivos que se deben cargar dependerá del análisis realizado.

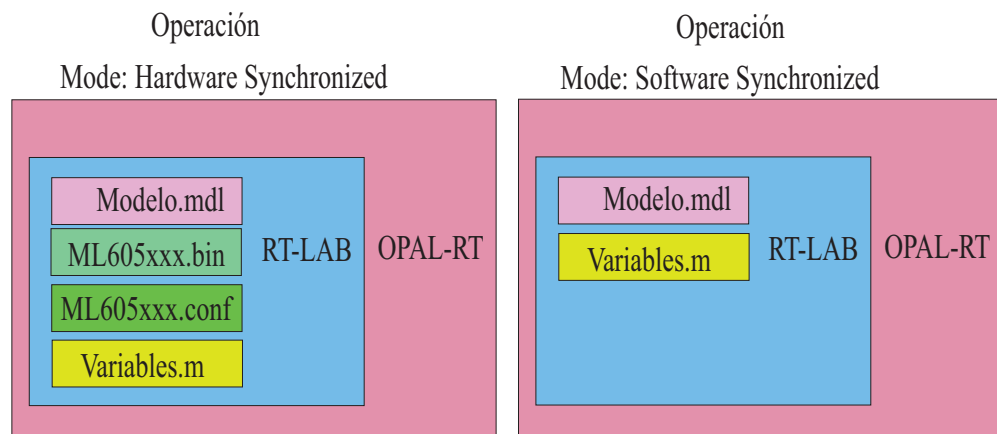


Figura C.4: Archivos requeridos por OPAL-RT ante el modo de operación solicitado

Apéndice D

Módulo OP5600 de OPAL-RT

En la U.M.S.N.H se dispone de un simulador en tiempo real conocido como OPAL-RT TECHNOLOGIES, y se dispone de un kit actualmente en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, ubicado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas. El Módulo que se muestra a continuación es el OP5600 (CPU) y se puede observar en la Figura D.1.

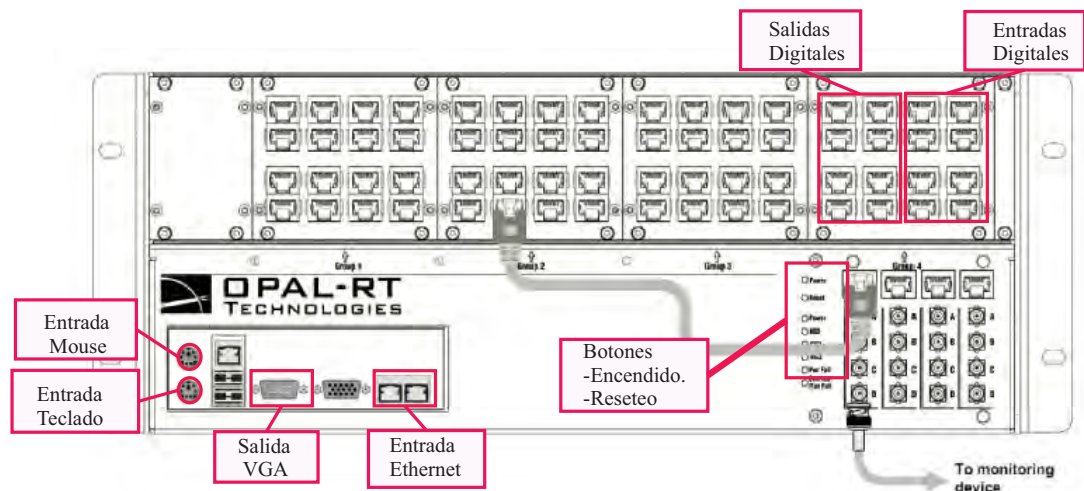


Figura D.1: Módulo OP5600

Éste equipo corresponde al CPU del equipo OPAL-RT (Simulador en Tiempo Real), este módulo permite la interacción entre el usuario y algún ordenador con el cual se desee

comunicar a través de un cable de ethernet con acceso a internet como se muestra en la Figura D.2 .

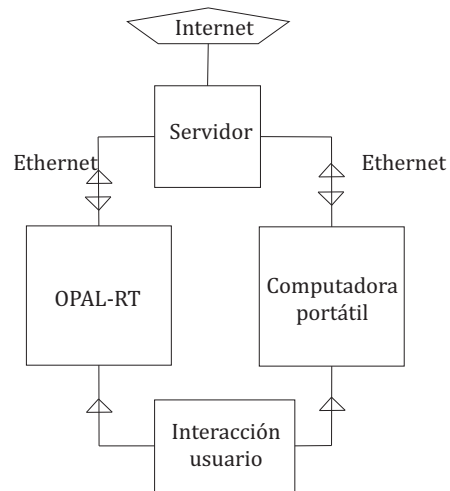


Figura D.2: Interfaz Usuario-Máquina con OPAL-RT

Además, cabe señalar que comunicación entre OPAL-RT y la computadora portátil del usuario se realizó a través de cable ethernet para que la conexión no se pierda en algún momento .

Apéndice E

Módulo OP8660 de OPAL RT

Éste módulo forma parte del simulador en tiempo real OPAL-RT TECHNOLOGIES y permite tomar lecturas de las señales de entrada con el fin de ser manipuladas por el usuario. Además, opera en conjunto con el módulo OP5600, las entradas se detallan en la Figura E.1.

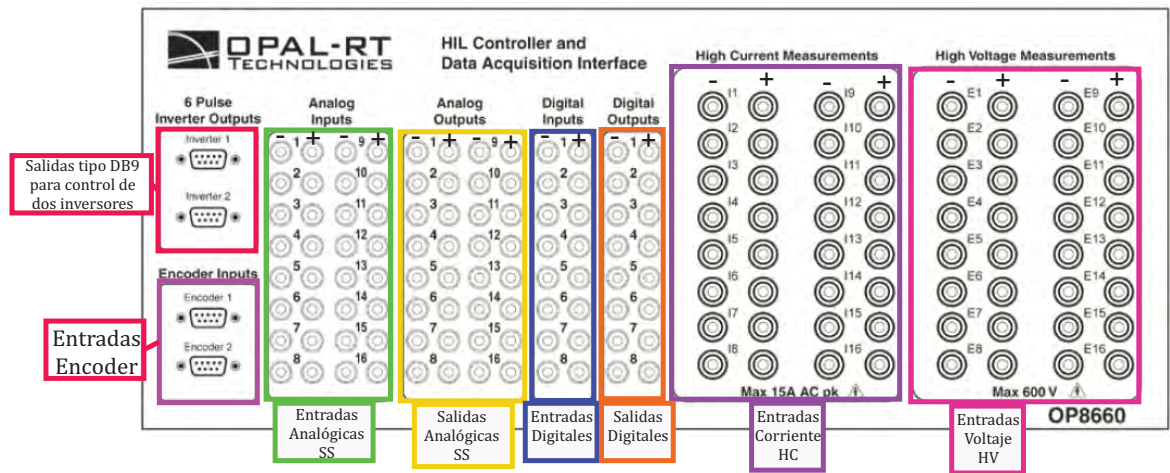


Figura E.1: Módulo OP8660

El módulo cuenta con puertos que están destinados a tomar las lecturas que el usuario requiera y son descritas en la Tabla E.1.

Tabla E.1: Número de puertos en el módulo OP8660

Salidas de Control Inversor	2 puertos serial independientes	0-5 V
Entradas Encoder	2 puertos serial independientes	0-5 V
Entradas Analógicas SS	32 puertos independientes	+16V/ - 16V Máx/Mín
Salidas Analógicas SS	32 puertos independientes	+16V/ - 16V Máx/Mín
Entradas Digitales	16 puertos independientes	0-5 V
Salidas Digitales	16 puertos independientes	0-5 V
Entradas para Corriente HC	puertos independientes	15 A de pico Máx
Entradas para Voltaje HV	32 puertos independientes	600 V Máx

En ésta tesis se utilizó solamente un módulo inversor modelo 8857-12 Lab-Volt, por lo que se uso uno de los dos puertos seriales disponibles. Por un lado, se uso un puerto serial para recibir los datos que provienen del dinamómetro de cuatro cuadrantes modelo 8540-02 Lab-Volt, a través de un cable que dispone de conectores, al puerto serial conocido como DB9. Las señales tipo SPWM se obtuvieron a través de los puertos de salida digitales.

Éste equipo resulta indispensable cuando se pretende adquirir cualquier tipo de señal, por lo que el usuario debe tener cuidado de que se encuentre encendido en ese momento ya que de no ser así, se puede correr el riesgo de dañar la integridad del equipo.

Apéndice F

TROCEADOR/INVERSOR IGBT

8857-12 Lab-Volt

El módulo 8857-12 Lab-Volt usado como inversor en esta tesis se muestra en la Figura F.1. Éste módulo puede ser operado como inversor o rectificador. Los parámetros del capacitor obtenidos a través de la medición con un medidor RLC de este módulo se muestran en la Tabla F.1.

Tabla F.1: Parámetros del capacitor del módulo 8857-12 Lab-Volt

C_{inv}	2.38 mF
$R_{C_{inv}}$	1 Ω

Este módulo se puede usar como rectificador trifásico no controlado ya que los seis IGBTs se encuentran abiertos cuando no existe control sobre ellos, por lo que se sugiere no hacer uso de las compuertas cuando este módulo sea utilizado para rectificar las señales AC, de otro modo se puede encender el indicador (LED color rojo), indicando que existe una sobrecorriente en los IGBTs, lo anterior indica una señal de alarma para un módulo, por lo que se bloquea hasta que el usuario lo reestablece.

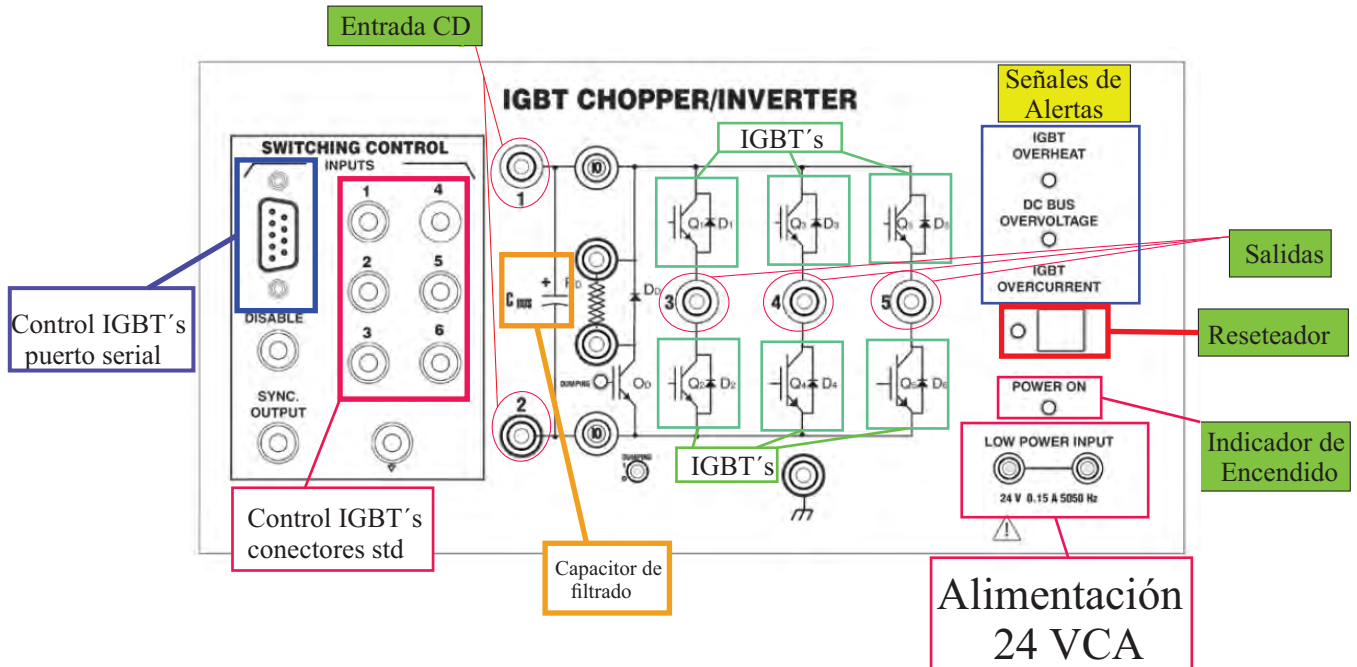


Figura F.1: CORTADOR/INVERSOR IGBT 8857-12 Lab-Volt

El inversor puede soportar 420 V de CD y 10 A como máximo. Tanto la apertura como el cierre de los interruptores se puede controlar con señales digitales (0-5 V) y la frecuencia de conmutación que puede soportar es de 20 kHz como máximo. Además, cabe mencionar que éste módulo puede operar como rectificador ya que cuenta con seis diodos rectificadores en anti paralelo con los IGBT, tal como se puede apreciar en la Figura F.1.

Esto se puede lograr al conectar las fases *abc* en las entradas 3,4 y 5 del inversor, por lo que se obtendrá voltaje de CD (máximo 330 V) con un nivel de rizado muy pequeño gracias a un capacitor con alta capacitancia en la salida. Este voltaje de CD se puede medir en las terminales 1 y 2 del equipo. De acuerdo a [Mukund, 2006] los IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) tienen una velocidad de conmutación en el orden de los nanosegundos (ns).

El modelo del inversor implementado en ésta tesis se elaboro con bloques de Simulink, como se ilustra en la Figura F.2.

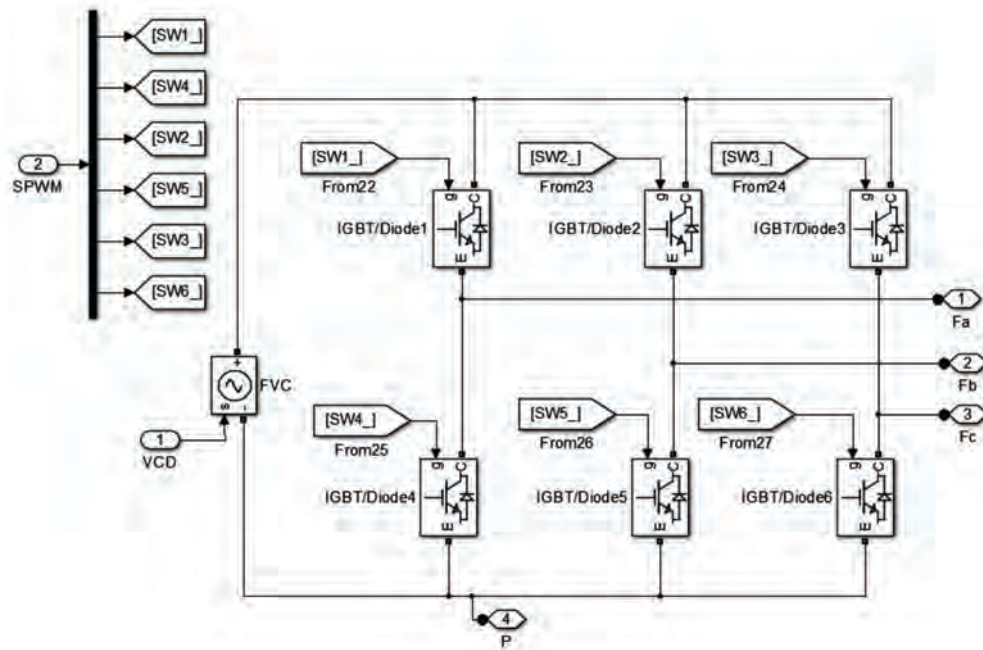


Figura F.2: Inversor empleado en el modelo de sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Éste arreglo de interruptores se implemento en la simulación del sistema híbrido eólico-fotovoltaico.

Apéndice G

Máquina de Inducción 8505-A0

Lab-Volt

la Figura G.1 muestra la máquina de inducción es un modelo 8505-A0. Tiene un rotor devanado a 4 polos con una capacidad de 2kW. Se encuentra disponible en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Los parámetros obtenidos a través de las pruebas de rotor bloqueado y rotación en vacío operándolo como motor, toma en cuenta las indicaciones marcadas por [IEEE, 2004],[IEEE, 2009] [Chapman, 2012] y [Moreno, 2007], obteniéndose los siguientes resultados.

Parámetros de los devanados del estátor, rotor y mutuos:

- $R_{Estator}=0.5 \Omega$; $r_s=0.5 \Omega$
- $X_{Estator}=1.7989 \Omega$; $L_{ls}= 4.771 \text{ mH}$
- $R_{Rotor}=0.5 \Omega$; $r'_r=0.5 \Omega$
- $X_{Rotor}=1.7989 \Omega$; $L'_{lr} = 4.771 \text{ mH}$
- $X_M=19.6000 \Omega$; $L_m=51.99 \text{ mH}$
- Inercia de la máquina (acoplado al dinamómetro) $J=0.1185 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$

Las pruebas que se aplicaron para determinar los parámetros eléctricos de la máquina de inducción se describen de manera concisa a continuación.

G.0.1. Prueba de vacío

La prueba de vacío que se aplicó a para encontrar la reactancia de magnetización X_M . Consiste en conectar la máquina de inducción a la fuente trifásica, y colocar tres amperímetros para medir la corriente de CA. También se debe medir la potencia activa y reactiva que consume operando en vacío [IEEE, 2004].

G.0.2. Prueba de rotor bloqueado

Ésta prueba permite determinar los parámetros de las reactancias de dispersión $X_{Estator}$ y X_{Rotor} . La prueba consiste en bloquear el rotor completamente, para esto se utilizó el dinamómetro en modo torque. Logrando bloquear el rotor de la máquina de inducción. Los valores de corriente y potencia se registran para realizar las operaciones señaladas por las pruebas estandarizadas [IEEE, 2004].

G.0.3. Prueba de CD

Ésta prueba permite determinar la resistencia en los devanados del estator y rotor. La prueba consiste en inyectar un voltaje de CD cercano al 10% del voltaje nominal en únicamente dos de las terminales del generador de inducción conectadas en estrella [Chapman, 2012].

G.0.4. Momento de inercia

Para calcular el momento de inercia, la máquina se opera como motor para llegar a su valor nominal, después se apaga y se registran los tiempos y las velocidad a las que va descendiendo hasta que se detenga completamente. Una vez que se tienen registrada en una tabla los datos de velocidad y tiempo se emplea la fórmula siguiente según [IEEE, 2009] [Moreno, 2007]:

$$J = P_{perdidas} \left(\frac{30}{\pi} \right)^2 \left(\frac{t_2 - t_1}{n_2 - n_1} \right) \quad (G.1)$$

donde:

J momento de inercia del máquina ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$).

P_{perdidas} potencia de pérdidas en el rotor (W).

t_2 y t_1 valores de tiempo (segundos)

n_2 y n_1 valores de velocidad del rotor (r.p.m.)

La Ecuación (G.1) se aplica para cada uno de los valores de tiempo y velocidad registrados. Por lo que se tendrá una nueva tabla con valores de inercia, por último se aplica un promedio para obtener el valor del momento de inercia estimado.

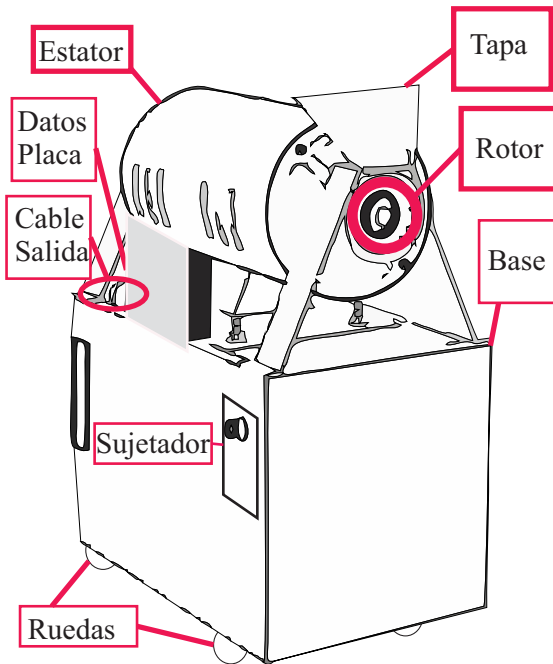


Figura G.1: Máquina de Inducción 8505-A0 Lab-Volt

Apéndice H

Transformador Trifásico 8372-02

Lab-Volt

El módulo transformado trifásico es una estructura que se encuentra integrada por tres devanados con núcleos laminados, según se muestra en la Figura H.1. Además, se aplicaron las pruebas de cortocircuito y circuito abierto con referencia a [Chapman, 2012] y [Ras, 1991], para estimar los parámetros de dicho módulo, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla H.1: Parámetros del transformador trifásico

Parámetro	Valor
$V_{OC_{Primario}}$	120 V (Fase a Neutro)
$I_{OC_{Primario}}$	2.153 A
$V_{CC_{Primario}}$	1.58 V (Fase a Neutro)
$I_{CC_{Primario}}$	11.316 A
P_{OC}	427.6 W
P_{CC}	34.15 W
$R_{Primario}$	0.04445 Ω
$X_{Primario}$	0.0538 Ω
$R_{Secundario}$	0.077 Ω
$X_{Secundario}$	0.1616 Ω
R_{fe}	100.4125 Ω
X_M	66.769 Ω
Relación como elevador (estrella-estrella)	1:1.7333
Relación como reductor (estrella-estrella)	1:0.5769

La conversión de los parámetros del transformador a valores en por unidad (*p.u.*). Para el caso de utilizar el transformador trifásico de 12 terminales de Simulink, en caso de querer elevar el voltaje de entra se toma la relación (120/208), tomando como base 120 V. Es decir:

$$\begin{aligned}
 S_{base} &= 750 \text{ VA (Potencia Trifásica)} \\
 V_{base} &= 120 \text{ V (Fase a neutro)} \\
 I_{base} &= \frac{S_{base}}{3V_{base}} = \frac{750 \text{ VA}}{3(120 \text{ V})} = 2.083 \text{ A} \\
 Z_{base} &= \frac{3(V_{base})^2}{S_{base}} = \frac{3(120 \text{ V})^2}{750 \text{ VA}} = 57.6 \Omega \\
 Z_{P.U. \text{Primario}} &= \frac{Z_{\text{Primario}}}{Z_{base}} = 0.0007717 + j 0.0009340 \text{ p.u} \\
 Z_{P.U. \text{Secundario}} &= \frac{Z_{\text{Secundario}}}{Z_{base}} = 0.077 + j 0.1616 \text{ p.u} \\
 R_{feP.U.} &= \frac{R_{fe}}{Z_{base}} = 1.7432 \text{ p.u} \\
 X_{MP.U.} &= \frac{X_M}{Z_{base}} = 1.1591 \text{ p.u}
 \end{aligned}$$

Para el caso de utilizar el transformador trifásico como transformador reductor de voltaje, se toma la relación (208/120) tomar y el voltaje base de 208V.

$$\begin{aligned}
 S_{base} &= 750 \text{ VA (Potencia Trifásica)} \\
 V_{base} &= 208 \text{ V (Fase a neutro)} \\
 I_{base} &= \frac{S_{base}}{3V_{base}} = \frac{750 \text{ VA}}{3(208 \text{ V})} = 1.2019 \text{ A} \\
 Z_{base} &= \frac{3(V_{base})^2}{S_{base}} = \frac{3(208 \text{ V})^2}{750 \text{ VA}} = 173.0560 \Omega \\
 Z_{P.U. \text{Primario}} &= \frac{Z_{\text{Primario}}}{Z_{base}} = 2.5685 \text{e-}4 + j 3.1088 \text{e-}4 \text{ p.u} \\
 Z_{P.U. \text{Secundario}} &= \frac{Z_{\text{Secundario}}}{Z_{base}} = 4.4494 \text{e-}4 + j 9.338 \text{e-}4 \text{ p.u} \\
 R_{feP.U.} &= \frac{R_{fe}}{Z_{base}} = 0.5802 \text{ p.u} \\
 X_{MP.U.} &= \frac{X_M}{Z_{base}} = 0.3858 \text{ p.u}
 \end{aligned}$$

En la Figura H.1 se muestra el esquema del transformador trifásico compuesto por tres transformadores, utilizado en el desarrollo de esta investigación.

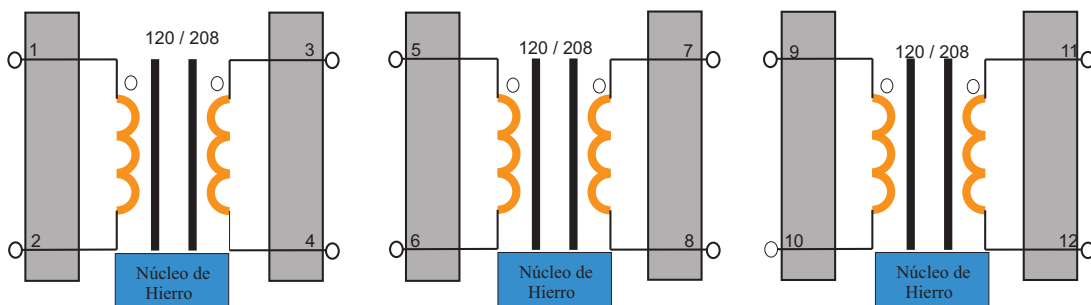


Figura H.1: Transformador 8372-02 Trifásico Lab-Volt

En la biblioteca de Simulink se dispone del modelo de un transformador que per-

mite hacer la conexión estrella-estrella aterrizada. Los valores que se emplean en el transformador son en por unidad ($p.u$). El modelo de este transformador se ilustra en la Figura H.2.

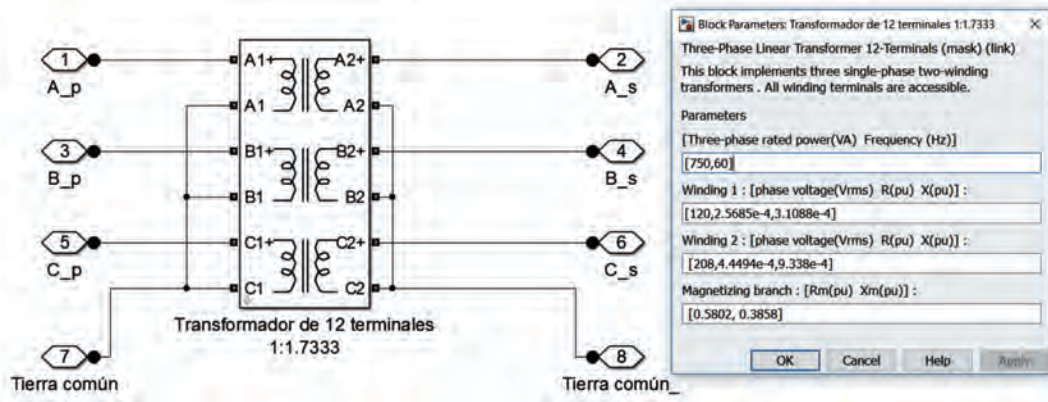


Figura H.2: Transformador de doce terminales de Simulink

REFERENCIAS

- [Ackerman, 2005] Ackerman, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd. Pags.(525-552).
- [Ackermann *et al.*, 2001] Ackermann, T., Anderson, G., y Soder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*. Pags.(139-144).
- [Agredano, 2016] Agredano, J. (2016). Sistemas híbridos de generación: Lecciones aprendidas iie. (<http://proyectedeenergiarenovable.com/descargas/manuales/HIBRIDOS/PRES-ENT1/PRESENTA.PPT>.) Consultado: 16 de Junio.
- [Ahmed *et al.*, 2016] Ahmed, K., Merabet, A., Hussein, I., y Beguenane, R. (2016). Standalone wind energy conversion system using opal-rt real-time hil/rcp laboratory. *Natural Science and Engineering Research Council of Canada*. Pags.(1-5).
- [Ahmed y Benachaiba, 2017] Ahmed, S. y Benachaiba, C. (2017). Simulation and control of solar wind hybrid renewable power system. *International Conference on Systems and Control (ICSC)*. Pags.(51-56).
- [Arrillaga y Watson, 2003] Arrillaga, J. y Watson, R. (2003). *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, Ltd, segunda edición. Pags.(219,246-247,64).
- [BBC, 2016] BBC, M. (2016). Lugar mayor nivel de incidencia solar en la tierra. (http://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/02/160131_vert_earth_lugar_mas_soleado_yv.) Consultado: 21 de Marzo.
- [Bian y Wy, 2015] Bian, D. y Wy, Y. (2015). Real-time co-simulation platform using opal-rt

and opnet for analyzing smart grid performance. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Pags.(1-5).

[Boley, 2012] Boley, G. (2012). *Renewable Energy, fo Sustaintable Future*. Oxford University Press. Pag.(76).

[Bollen y Hassan, 2011] Bollen, M. y Hassan, F. (2011). *Integration of Distributed Generation in the Power Systems*. John Wiley & Sons. Pags.(7-29,30-46).

[Booker, 2016] Booker, O. T. (2016). Countryside & windmills. (<https://onlinetourbooker.com/product/countryside-tour/>). Consultado: 3 de Abril.

[Burdano *et al.*, 1993] Burdano, E., Burdano, S., y Gracia, C. (1993). *Física General*. Tebár. Pag.(623).

[Cantoni, 2010] Cantoni, N. (2010). *Energía: Un recurso para conocer y cuidar*. ALBATROS. Pags.(33-36).

[Carless, 1995] Carless, J. (1995). *ENERGÍA RENOVABLE: Guía de alternativas ecológicas*. EDAMEX, Única edición. Pags.(39-44,67-71).

[Chapman, 2012] Chapman, S. J. (2012). *Máquinas Eléctricas*. Mc Graw Hill, quinta edición. Pags.(231-232,282-289,90-95).

[Chapra y Canale, 2007] Chapra, S. y Canale, R. (2007). *Métodos Numéricos para Ingenieros*. Mc GraW Hill, quinta edición. Pags.-(148-149).

[Danish, 2016] Danish, A. (2016). Danish wind industry association. (http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/pictures/lacour.htm). Consultado: 29 de Abril.

[Echeverría *et al.*, 2014] Echeverría, N., Judewicz, M., Murcia, G., Strack, J., y González, S. (2014). Algoritmo mppt de conductancia incremental con doble cota. *AADECA*. Pags.(1-8).

[Fernández, 2010] Fernández, M. (2010). *Energía Solar: Electricidad Fotovoltáica*. LIBER FACTORY. Pags.(13-16).

- [Garduño *et al.*, 2012] Garduño, R., Rodríguez, A., y Sánchez, M. (2012). Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores. *Boletín IIE Soluciones tecnológicas para centrales generadoras*, (Vol.36). Pags.(47-55).
- [González *et al.*, 2011] González, F., Vázquez, F., Morilla, F., y Díaz, D. (2011). Modelo matemático y modos de operación de un aerogenerador de velocidad variable. *CIINDET XI Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, 23 al 25 de noviembre de 2011, Cuernavaca Morelos, México*. Pags.(1-7).
- [Gómez, 2008] Gómez, M. (2008). *Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas: Generación Distribuida*. Tesis Doctoral. Pag.(23).
- [Hart, 2001] Hart, D. (2001). *Electrónica de Potencia*. Prentice Hall. Pags.(212-217).
- [Hayt *et al.*, 2007] Hayt, W., Kemmerly, J., y Durbin, S. (2007). *Análisis de Circuitos en Ingeniería*. Mc Graw Hill. Séptima Edición. Pags.(239-249,641-643).
- [IEEE, 2004] IEEE (2004). *IEEE Standar Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generator*. IEEE. Pags.(24-28).
- [IEEE, 2009] IEEE (2009). *IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines*. IEEE. Pag.(58).
- [Juana *et al.*, 2003] Juana, J. M., Santos, F., Crespo, A., Guerrero, M., Francisco, A. D., y Fernández, J. (2003). *Energías Renovables para el Desarrollo*. Paraninfo, primera edición. Pag.(158).
- [Jutglar, 2004] Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. CEAC. Pag.(9).
- [Krause *et al.*, 2002] Krause, P., Wasynczuk, O., y Sudhoff, S. (2002). *Analisis of Machinery and Drive Systems*. IEEE Wiley - Interscience, second edición. Pags.(150-187).
- [Kubizewki, 2016] Kubizewki, I. (2016). The encyclopedia of earth:grandpa's knob. (<http://www.eoearth.org/view/article/153075/>). Consultado: 29 de Abril.

- [Lecuona, 2002] Lecuona, A. (2002). *ENERGÍA EÓLICA: Principios básicos y tecnología*. Universidad Carlos III de Madrid. Pag.(1-20).
- [Londono, 2008] Londono, C. (2008). *Análisis y Simulación de Algunas Estrategias de Control SPWM y SVPWM en Corriente para un Puente Inversor*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pag.(19).
- [López et al., 2007] López, D., Camacho, G., Díaz, J., y Gaviria, C. (2007). *Modulación PWM Aplicada a Inversores Trifásicos Dentro del Esquema de Accionamientos Eléctricos AC*. Universidad de Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET). Pags.(1-24).
- [Masters, 2004] Masters, G. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons. Pags.(307-377,385-431,445-500,505-592).
- [MATLAB, 2016] MATLAB (2016). Mathworks matlab & simulink. (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>). Consultado: 23 de Abril.
- [Meinel y Meinel, 1982] Meinel, A. y Meinel, M. (1982). *Aplicaciones de la energía solar*. EDITORIAL REVERTÉ. Pag.(42).
- [Micheloud y Rommel, 2004] Micheloud, O. y Rommel, V. (2004). *Smart grid, fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Cengage Learning. Pags.(112-114).
- [Minwon y Keun, 2004] Minwon, P. y Keun, Y. (2004). Novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using rtds. *IEEE TRANSACTIONS OF ENERGY CONVERSION*, (Vol.19)(No.1). Pags.(164-169).
- [Mirtz et al., 2001] Mirtz, M., Abouzar, E., Francesco, A., Ettore, B., y Antonello, M. (2001). Dynamic phasors to enable distributed real-time simulation. *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, (Vol.57)(No.1). Pags.(195-204).
- [Mohan et al., 2009] Mohan, N., Undeland, T., y Robbins, W. (2009). *Electrónica de Potencia: Convertidores, Aplicaciones y Diseño*. Mc Graw Hill. Tercera Edición.Pags.(176-215).

- [Moreno, 2007] Moreno, H. L. (2007). *Pruebas y Obtención de Parámetros de la Máquina Síncrona*. UMSNH. Pags.(41-48).
- [Mosquera y Merino, 2006] Mosquera, P. y Merino, L. (2006). *Empresa y Energías Renovables. Lo que su empresa debe saber sobre energías renovables, eficiencia energética y kioto*. Fund. Confemental. Pag.(138).
- [Mukund, 2006] Mukund, P. (2006). *Wind and Solar Power Systems: design, analysis, and operation*. CRC Press. Pag.(223).
- [Ogata, 1998] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice-Hall Hispanoamericana, tercera edición. Pags.(710-785).
- [OPAL-RT, 2016] OPAL-RT (2016). Opal-rt technologies. (<http://www.opal-rt.com/>). Consultado: 1 de Abril.
- [Ortega, 2001] Ortega, M. (2001). *Energías Renovables*. PARANINFO. THOMSON LEARNING, segunda edición. Pags.(33-34,109,112,141,162,172,175).
- [Petre, 2013] Petre, C. (2013). Mario molina, vigie "écolo". (<http://www.lefigaro.fr/mon-figaro/2013/05/21/10001-20130521ARTFIG00539-mario-molina-vigie-ecolo.php>). Consultado: 26 de Junio.
- [Prakash *et al.*, 2016] Prakash, K., Vejju, P., y Reddy, V. (2016). Multiport switch based mppt for stand-alone photovoltaic power systems. *IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*. Pags.(1-6).
- [Ras, 1991] Ras, E. (1991). *Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección*. Marcombo. Pags.(229-233).
- [Rashid, 2007] Rashid, M. (2007). *POWER ELECTRONICS HANDBOOK: DIVICES, CIRCUITS AND APPLICATIONS*. ELSERVIER, tercera edición. Pag.(556).
- [Satyarajan y Chinmoy, 2016] Satyarajan, J. y Chinmoy, P. (2016). Interconnection of renewables to the utility grid by three phase pulse width modulated voltaje source inverter

without phase locked loop. *International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System*. Pags.(818-823).

[SENER, 2016] SENER (2016). Pagina oficial de la secretaria de energía. (<https://www.gob.mx/sener/articulos/servicios-integrales-de-energia?idiom=es>). Consultado:16 de Junio.

[Sorensen, 2016] Sorensen, J. (2016). *General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines*. Springer International Publishing Switzerland. Pag.(4).

[Soro et al., 2016] Soro, M., Ahmed, C., Abderazak, E., y Mustapha, M. (2016). Modeling and simulation of hybrid power system integrating wind, solar, biodiesel energies and storage battery. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. Pags.(457-463).

[Tejada y Gómez, 2015] Tejada, A. y Gómez, G. (2015). *Prontuario Solar de México*. Universidad de Colima y Universidad Veracruzana. Pag.(33).

[Tong, 2010] Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Wit Press, MPG Books. Pags.(3,12).

[Valderrama et al., 2011] Valderrama, F., Moreno, H., y Vega, H. (2011). *Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost*. Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Pags.(44,55).

[Van et al., 1995] Van, E., J, H., M, D., y Ben, J. (1995). Pwm-switch modeling of dc-dc converters. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, (Vol.10). Pags.(659-665).

[Vicini y Micheloud, 2012] Vicini, R. y Micheloud, O. (2012). *Smart Grid. Fundamentos, Tecnologías y aplicaciones*. CENGAGE. Pag.(1).

[Villalva et al., 2009a] Villalva, M., Gazoli, J., y Ruppert, E. (2009a). Comprehensive approach to modelling and simulation of photovoltaic array. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (Vol. 24). Pags.(1198-1208).

- [Villalva *et al.*, 2009b] Villalva, M., Gazoli, J., y Ruppert, E. (2009b). Modelling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. *Brazilian Journal of Power Electronics*, Vol. 14. Pags.(35-45).
- [Villarubia, 2012] Villarubia, M. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Marcombo., primera edición. Sección 2.6. Pags.(40-43).
- [Wildi, 2007] Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*. PEARSON EDUCACIÓN., sexta edición. Pags.(263-264).
- [Zhengnan *et al.*, 2017] Zhengnan, C., Fergal, R., y Willian, L. (2017). Performance modelling of small-scale wind and solar energy hybrid system. *Conference (ISSC)*. Pags.(1-6).