



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**Diseño de un sistema de provisión de energía híbrido fotovoltaico, batería,
conectado a la red pública.**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Ortiz Celi, Cristian Ernesto

DIRECTOR: Castillo Calvas, Tuesman Daniel, Ing., M. Sc, A

LOJA-ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister.

Tuesman Daniel Castillo Calvas.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: Diseño de un sistema de provisión de energía híbrido fotovoltaico, batería, conectado a la red pública, realizado por Ortiz Celi Cristian Ernesto, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, enero de 2018

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo **Ortiz Celi Cristian Ernesto** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: *Diseño de un sistema de provisión de energía híbrido fotovoltaico, batería, conectado a la red pública*, de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones, siendo Tiesman Daniel Castillo Calvas director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Ortiz Celi Cristian Ernesto

Cédula: **1105023475**

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres, mi hermano, mi novia y familia en general por el inmenso cariño y aprecio que les tengo.

AGRADECIMIENTO

A Dios en primer lugar por iluminarme con sabiduría y comprensión durante mi proceso de formación académica. A mis padres, mi novia y abuelitas por el amor, apoyo y confianza depositada en mí. A mi familia en general por el cariño mostrado.

A los docentes de la Titulación de Electrónica y Telecomunicaciones por haber compartido sus conocimientos tanto académicos como humanísticos en las aulas y fuera de ellas, de manera especial, al Magister. Tiesman Daniel Castillo Calvas por brindarme el apoyo necesario para llevar a cabo éste trabajo de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xii
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	6
CAPÍTULO I.....	7
REVISIÓN DE LA LITERATURA Y CONCEPTOS.....	7
CAPÍTULO II.....	13
DESCRIPCIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO	13
2.1 Panel solar.....	14
2.1.1 Modelado matemático	17
2.1.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	21
2.1.3 Buck Boost converter	23
2.1.3.1 Operación como convertidor tipo Buck.....	25
2.1.3.2 Operación como convertidor tipo Boost	26
2.1.3.3 Análisis del convertidor Buck – Boost en CC	27
2.2 Batería	32
2.2.1 Tecnología de almacenamiento de energía en baterías.....	33
2.2.2 Tipos de Baterías.....	33
2.2.3 Modelado matemático batería.....	34
2.2.3.1 Modelo matemático batería de Plomo-ácido (lead-acid).....	35
2.2.3.2 Modelo matemático batería de Iones de Litio (lithium-ion)	36
2.2.3.3 Modelo matemático batería de Níquel-Cadmio y Níquel-hierro-híbrido	36
2.2.4 Características de carga y descarga	37
2.2.5 Modelado matemático del efecto de temperatura sobre las baterías.....	39

2.2.5.1 Modelado para batería de Iones de litio (lithium-ion)	39
2.2.6 Efecto de envejecimiento	41
2.3 Controlador Proporcional Integral (PI)	42
2.4 Filtros Pasivos	44
2.4.1 Filtro configurado como Pasa Bajas	44
2.4.2 Filtro Pasa Bajas LC	45
2.5 Filtro Activo de Potencia	47
2.5.1 Convertidores de Potencia	48
2.5.2 Topologías de conexión de los FAP	50
2.5.2.1 FAP conectado en serie	50
2.5.2.1 FAP conectado en paralelo	50
2.5.3 Configuración del filtro activo	51
2.5.3.1 Conexión monofásica en medio puente o una sola rama	51
2.5.3.2 Conexión monofásica de puente completo o dos ramas	52
2.5.4 Selección voltaje DC	53
2.5.5 Métodos de control para compensadores activos	54
2.5.5.1 Controlador Filtro Activo de Potencia	54
2.5.6 Diagrama de bloques del Sistema	56
CAPITULO III	58
DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO SIN FAP ...	58
3.1 Panel solar	59
3.1.1 Características del panel solar	59
3.2 Control MPPT (Maximum Power Point Tracking)	60
3.3 Convertidor CC – CC de tipo Buck – Boost	61
3.4 Carga no lineal	63
3.5 Filtro LC Pasa Bajas	65
3.6 Simulación Sistema híbrido sin FAP	66
3.6.1 Características de simulación	66
3.6.1.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	68
3.6.2 Características de simulación	71
3.6.2.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	72
3.6.3 Características de simulación	75
3.6.3.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	76
CAPITULO IV	79
DESCRIPCIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (FAP), SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO Y COMPARACIÓN CON EL SISTEMA SIN FAP	79

4.1 Filtro Activo de Potencia (FAP)	80
4.2 Simulación del sistema híbrido.....	81
4.2.1 Características de simulación	82
4.2.1.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	83
4.2.2 Características de simulación	86
4.2.2.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	87
4.2.3 Características de simulación	90
4.2.3.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016) .	91
4.3 Comparación con el sistema sin FAP.....	94
4.3.1 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos sin batería y radiación solar constante.	94
4.3.1.1 Gráficas señales de corriente.....	94
4.3.1.2 Gráficas de nivel de THD	96
4.3.2 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos con batería (Duty Cicle: 0.1) y radiación solar variable.....	99
4.3.2.1 Gráficas señales de corriente.....	99
4.3.2.2 Gráficas de nivel de THD	100
4.3.3 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos con batería (Duty Cicle: Descarga) y radiación solar variable.	103
4.3.3.1 Gráficas señales de corriente.....	103
4.3.3.2 Gráficas de nivel de THD	104
CONCLUSIONES	108
RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	114
ANEXO A	115
ANEXO B	116
ANEXO C.....	117
ANEXO D.....	118
ANEXO E	119
ANEXO F	120
ANEXO G.....	121
ANEXO H.....	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ilustración Panel solar del Silicio	14
Figura 2.2. Método Czchralsky	15
Figura 2.3. Texturado oblea de Silicio	16
Figura 2.4. Contactos metálicos celda solar.....	16
Figura 2.5. Sistema Fotovoltaico.....	17
Figura 2.6. Diagrama circuito de una celda solar	18
Figura 2.7. Gráfica Voltaje vs. Corriente/ Voltaje vs. Potencia	18
Figura 2.8. Circuito equivalente celda PV y convertidor DC-DC.....	19
Figura 2.9. Características I-V y V-P; a) T fija y G variable; b) G fija y T variable.....	20
Figura 2.10. Bloque PV Array Simscape Power Systems	21
Figura 2.11. Curva de potencia con características I-V y P-V del PV	21
Figura 2.12. Diagrama de flujo algoritmo MPPT, Perturbación y Observación	22
Figura 2.13. Diagrama de flujo algoritmo MPPT, Conductancia Incremental.....	23
Figura 2.14. Diseño circuito convertidor Buck Boost	24
Figura 2.15. Operación como convertidor tipo Buck durante el periodo Tr1 encendido.....	25
Figura 2.16. Operación como convertidor tipo Buck durante el periodo Tr1 apagado	25
Figura 2.17. Operación como convertidor tipo Boost durante el periodo Tr2 encendido.....	26
Figura 2.18. Operación como convertidor tipo Boost durante el periodo Tr2 apagado	27
Figura 2.19. Convertidor Buck - Boost CC-CC	28
Figura 2.20. Convertidor Buck - Boost CC-CC	28
Figura 2.21. Operación convertidor Buck - Boost CC-CC	29
Figura 2.22. Operación convertidor Buck - Boost CC-CC	29
Figura 2.23. Formas de onda convertidor Buck - Boost CC-CC	30
Figura 2.24. Bloque Battery Simscape Power Systems	34
Figura 2.25. Circuito equivalente batería.....	35
Figura 2.26. Características típicas de descarga	37
Figura 2.27. Características típicas de Carga baterías lead-acid, li-ion, NiMH, NiCD.....	38
Figura 2.28. Carga y descarga exponencial de baterías	39
Figura 2.29. Diagrama de bloques PI.....	43
Figura 2.30. Acción controlador PI	43
Figura 2.31. Señal Filtro Pasa Bajas.....	44
Figura 2.32. Circuito LC Filtro Pasa Bajas	45
Figura 2.33. Diagrama de flujo FAP	47
Figura 2.34. Diagrama de flujo FAP	48
Figura 2.35. Esquema convertidor con fuente de intensidad controlada	49
Figura 2.36. Esquema convertidor con fuente de tensión controlada	49
Figura 2.37. Circuito equivalente FAP en serie	50
Figura 2.38. Circuito equivalente FAP en paralelo	51
Figura 2.39. Conversor en configuración de medio puente	52
Figura 2.40. Conversor en configuración de puente completo	52
Figura 2.41. Diagrama activación del dispositivo de potencia en el conversor	53
Figura 2.42. Diagrama de bloques Sistema Híbrido.....	57
Figura 3.1. Bloque de panel solar en SIMULINK.....	59
Figura 3.2. Bloque algoritmo MPPT en SIMULINK.....	60

Figura 3.3. Bloque Matlab Function, algoritmo MPPT en SIMULINK.....	60
Figura 3.4. Bloque Buck-Boost converter en SIMULINK	61
Figura 3.5. Configuración bloque Buck-Boost converter en SIMULINK.....	62
Figura 3.6. Bloque carga no lineal en SIMULINK.....	63
Figura 3.7. Configuración carga no lineal en SIMULINK	64
Figura 3.8. Configuración Filtro LC en SIMULINK.....	65
Figura 3.9. Señal corriente I_a RP y THD I_a	68
Figura 3.10. Señal corriente I_b RP y THD I_b	68
Figura 3.11. Señal corriente I_c RP y THD I_c	69
Figura 3.12. Señal Potencia P	69
Figura 3.13. Señal Potencia Q.....	70
Figura 3.14. Señal corriente I_a RP y THD I_a	72
Figura 3.15. Señal corriente I_b RP y THD I_b	72
Figura 3.16. Señal corriente I_c RP y THD I_c	73
Figura 3.17. Señal Potencia P	73
Figura 3.18. Señal Potencia Q.....	74
Figura 3.19. Señal corriente I_a RP y THD I_a	76
Figura 3.20. Señal corriente I_b RP y THD I_b	76
Figura 3.21. Señal corriente I_c RP y THD I_c	77
Figura 3.22. Señal Potencia P	77
Figura 3.23. Señal Potencia Q.....	78
Figura 4.1. Bloque FAP en SIMULINK	80
Figura 4.2. Configuración FAP en SIMULINK	81
Figura 4.3. Señal corriente I_a RP y THD I_a	83
Figura 4.4. Señal corriente I_b RP y THD I_b	83
Figura 4.5. Señal corriente I_c RP y THD I_c	84
Figura 4.6. Señal Potencia P	84
Figura 4.7. Señal Potencia Q.....	85
Figura 4.8. Señal corriente I_a RP y THD I_a	87
Figura 4.9. Señal corriente I_b RP y THD I_b	87
Figura 4.10. Señal corriente I_c RP y THD I_c	88
Figura 4.11. Señal Potencia P	88
Figura 4.12. Señal Potencia Q.....	89
Figura 4.13. Señal corriente I_a RP y THD I_a	91
Figura 4.14. Señal corriente I_b RP y THD I_b	91
Figura 4.15. Señal corriente I_c RP y THD I_c	92
Figura 4.16. Señal Potencia P	92
Figura 4.17. Señal Potencia Q.....	93
Figura 4.18. Señal del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, I_{abc} RP	94
Figura 4.19. Señal del sistema con FAP, sin batería, radiación solar constante, I_{abc} RP	95
Figura 4.20. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. I_a RP	96
Figura 4.21. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. I_b RP	97
Figura 4.22. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. I_c RP	97

Figura 4.23. Señal del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Carga), radiación solar variable, labc RP	99
Figura 4.24. Señal del sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Carga), radiación solar variable, labc RP	100
Figura 4.25. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. la RP	101
Figura 4.26. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. lb RP	101
Figura 4.27. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. lc RP	102
Figura 4. 28. Señal del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, la RP	103
Figura 4.29. Señal del sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, labc RP	104
Figura 4.30. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. la RP	105
Figura 4.31. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. lb RP	105
Figura 4.32. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. lc RP	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros conocidos de la red.....	11
---	----

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y evaluación de desempeño a través de simulación de un sistema híbrido que incluye un arreglo de paneles solares, un banco de baterías, y una carga de tipo no lineal. El sistema está conectado a la red pública de provisión de energía eléctrica mediante el inversor que hace el papel de filtro activo de potencia que es capaz de compensar el desbalance de cargas, el factor de potencia y las corrientes armónicas, para incrementar la calidad de energía, inyectando corrientes sinusoidales prácticamente balanceadas y con un nivel bajo de THD. En el diseño, el sistema fotovoltaico es la principal fuente de energía y la carga no lineal se usa para recrear el efecto de consumo de energía disponible de la fuente cuando el banco de baterías está completamente cargado. El control del inversor está basado en la teoría de potencia reactiva instantánea y el control del recurso renovable para obtener la máxima potencia en el algoritmo MPPT de tipo observación y perturbación. El funcionamiento de este sistema se ha verificado usando el software Matlab/Simulink.

PALABRAS CLAVE: Filtro Activo de Potencia; Sistema Híbrido; Fotovoltaico; Calidad de energía; Teoría PQ.

ABSTRACT

This work presents the design and performance evaluation through simulation of a hybrid system that includes an array of solar panels, a battery bank, and a non-linear load. The system is connected to the public electric power supply network by means of the inverter that plays the role of active power filter that is capable of compensating load imbalance, power factor and harmonic currents, to increase the power quality, injecting sinusoidal currents practically balanced and with a low level of THD. In the design, the photovoltaic system is the main source of energy and the non-linear load is used to recreate the effect of energy consumption available from the source when the battery bank is fully charged. The control of the inverter is based on the theory of instantaneous reactive power and the control of the renewable resource to obtain the maximum power in the MPPT algorithm of observation and disturbance type. The operation of this system has been verified using the Matlab / Simulink software.

KEYWORDS: Active Power Filter; Hybrid System; Photovoltaic; Energy quality; PQ theory.

INTRODUCCIÓN

Depender del petróleo para generar energía eléctrica cada vez se vuelve menos rentable y preocupante a la vez, pues este recurso natural no renovable de a poco se está consumiendo y surge la necesidad desde algunos años atrás de pensar en formas alternativas para su generación. El mundo moderno con el desarrollo tecnológico depende de la energía eléctrica puntualmente, lo que genera más demanda de la misma; esto trae como consecuencia un incremento en el consumo por parte de la población (Ángeles, et al., 2005). Para abastecer esta demanda se han construido millonarios proyectos de generación energética usando recursos naturales como el agua y el viento, pero llegar a ciertas zonas demanda un gasto público considerable, además lugares que están aislados de la red siguen usando combustibles fósiles para generar energía, aquí se puede mencionar los generadores Diésel que pueden resultar rentables tanto para la economía, pero no para el medio ambiente. El crecimiento industrial es un factor que determina un mayor consumo de recurso energético que preocupa, pues los recursos para abastecer la demanda cada vez son menos sobre todo si hablamos de los no renovables.

La denominada Crisis Energética (Ángeles, et al., 2005), es un problema ya de varios años atrás, incluso de la década pasada, que nos afecta a todos, el costo para generar energía eléctrica y transmitirla es alto y esto lo cubren los abonados, tomando en cuenta lo antes mencionado surge la necesidad de buscar alternativas. Una de estas es implementar programas de eficiencia energética, que ahorren energía usando dispositivos y métodos que optimicen el consumo e inducir conciencia social de solo consumir lo estrictamente necesario. Otra alternativa es usar energía de fuentes naturales tales como, solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, etc. Cerca de los centros de demanda, difiriendo la construcción de grandes plantas de producción eléctrica y reduciendo la necesidad de extender las redes de transmisión.

“Ecuador posee un 51.78% de energía renovable, los retos sobre el cambio de la matriz energética ya son una realidad. La importante inversión realizada por el Gobierno Nacional se presenta ante la ciudadanía con acciones concretas, fundamentalmente con la puesta en marcha de las obras emblemáticas, que han contribuido -hasta el momento- a reemplazar el consumo de combustible fósiles por un 51,78% en la producción de energía renovable, lo cual representa 13.638,89 gigavatios hora (GWh)”. (ARCONEL, 2016).

Dicho lo anterior surge la problemática al momento de querer integrar sistemas de energía renovable a la red de distribución de energía eléctrica que aporten calidad de energía, convirtiéndose en un reto que se tiene que superar, si bien es cierto existen proyectos de generación de energía mediante recursos renovables, estos se encuentran conectados a la

red de transmisión, esto debido a que la red de distribución no está diseñada para soportar flujo de potencia (corriente) bidireccional.

Se ha evidenciado que la red no está preparada para soportar el exceso de carga ruidosa conocida como distorsión armónica producida por cargas no lineales por ejemplo las cocinas de inducción (Gavilanez Ortiz, 2015) que durante los últimos años del gobierno anterior se propuso introducir entre los abonados a la red. Actualmente, gran parte de la carga es de tipo no lineal y los convertidores eléctricos de las cargas de tipo continua en hogares e industria aportan con armónicos que pueden crear serios problemas de calidad de potencia en la red de distribución. Los filtros activos de potencia son generalmente usados para corregir estos problemas en la red, sin embargo, esto implica un costo adicional. Se considera en este trabajo que es posible implementar un algoritmo de control que permita utilizar un inversor como un filtro activo de potencia (FAP) o Active Power Filter por sus siglas en inglés (APF) sin realizar cambios importantes en el hardware del convertidor. De esta manera el inversor será capaz de:

- 1) Ingresar energía activa desde la fuente de energía renovable a la red
- 2) Compensar armónicos y desbalances en el punto de conexión común.
- 3) Optimizar el uso de la batería para dar soporte de calidad de energía incluso cuando el recurso renovable no esté presente.

En este documento se describe el proceso de diseño y simulación en varios capítulos. En el capítulo 1 se realiza una revisión de literatura relacionada con los sistemas híbridos de generación de energía eléctrica, clasificándolos en sistemas que no poseen control, los que, si poseen, así como también sistemas que operan de manera aislada y los que se interconectan con la red pública, se menciona también los trabajos realizados con sistemas que poseen filtro activo de potencia integrado.

En el capítulo 2 se presentan las alternativas disponibles para generación de energía mediante recursos renovables, tales como paneles solares, turbinas eólicas, además la descripción teórica y el modelado matemático de los componentes del sistema híbrido propuesto.

En el capítulo 3 se presenta la descripción de los bloques que conforman el sistema híbrido y la simulación del mismo sin el FAP y con varios escenarios propuesto en el software Simulink de Matlab(Mathworks, 2016), obteniendo las gráficas de la señal de voltaje y corriente, así como también el nivel de armónicos en el punto PCC.

En el capítulo 4 se presenta el control de calidad, que se realiza mediante el sistema ya con Filtro Activo de Potencia, se describe el bloque FAP y se ejecuta una simulación del mismo, en los mismos escenarios que se realizó en el capítulo 3; posterior se realiza una comparación de los sistemas para evaluar el comportamiento de las señales de corriente en las tres fases y el nivel de armónicos en las mismas. Finalmente se obtienen las conclusiones generadas luego de haber ejecutado este proyecto y se escribe unas recomendaciones referentes a esta línea de investigación para su futuro desarrollo.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar y simular un sistema de control de calidad de energía integrado en el inversor de un sistema de generación híbrido PV-Batería conectado a la red pública.

Objetivos Específicos

- Modelar matemáticamente la conexión de un banco de paneles solares a un enlace DC usando un convertidor tipo buck controlado bajo un algoritmo de máxima extracción de potencia (MPPT).
- Modelar matemáticamente el control del inversor de interface con la red pública incluyendo el control de calidad de energía.
- Simular el sistema de control propuesto bajo varias condiciones en Simscape Power System de Simulink Matlab.(Mathworks, 2016)

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LA LITERATURA Y CONCEPTOS

Los sistemas de energía híbridos aprovechan las fuentes de energía primaria como la solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz y biomasa, entre otras. Cuando un sistema combina varias de estas fuentes tiene la ventaja de presentar mayor equilibrio, estabilidad y proporciona calidad de energía; incluso cuando hay variación de factores climáticos. Hacer una revisión del estado del arte implica revisar trabajos que estén relacionados.

En (Bernal-Agustín & Dufo-López, 2009) se presenta la simulación y optimización de un sistema híbrido de generación de energía mediante fuentes renovables, se menciona las alternativas que se pueden combinar para integrar el sistema híbrido, las mismas que pueden ser fotovoltaico por sus siglas en inglés photovoltaic (PV)-Viento-batería y (PV)-diésel-batería. También se menciona los sistemas de almacenamiento que típicamente son baterías, menciona además los problemas que se presentan al momento de optimizar los sistemas, estos pueden ser la no linealidad de algunos componentes del sistema. En el artículo se presenta la simulación y las técnicas de optimización, así como también las herramientas que existen y el diseño de un sistema híbrido de tipo aislado (stand-alone).

En (Bajpai & Dash, 2012) se realiza una revisión sobre los sistemas híbridos de generación mediante energía renovable operando de manera aislada, principalmente se enfoca en analizar el dimensionamiento, la optimización, la administración de la energía y el modelado de los sistemas, tales como sistemas PV, sistemas de almacenamiento de energía, convertidores de tipo MPPT, Buck/Boost, y cargadores de baterías.

En (Hirose & Matsuo, 2012) se propone un sistema híbrido de generación de energía aplicando técnicas avanzadas del control y alimentado por energía eólica, solar almacenamiento en baterías y un generador Diésel, este sistema opera en modo aislado es decir no se conecta a la red pública de energía eléctrica. Los experimentos de laboratorio realizados demuestran que la amplitud y fase del voltaje de salida AC son regulados correctamente por el sistema propuesto.

En (Lin, et al., 2011) se presenta un sistema híbrido de generación energética, el mismo que se compone de energía solar, eólica, generador diésel y un controlador de energía inteligente. Su usa Simulink para realizar las simulaciones del sistema. El sistema inteligente consta de una RBFN (Radial basis function network), una mejorada ENN (Elman neural network), para lograr obtener la máxima potencia se usa el algoritmo MPPT.

En (Acuna, et al., 2014) se describe un filtro activo de potencia implementado con un inversor de cuatro líneas voltaje-fuente usando un esquema de control predictivo, el uso de este inversor compensa los componentes armónicos, como también las cargas desbalanceadas generadas por cargas no lineales de una fase.

En (Pinto, et al., 2007) presenta un filtro activo implementado en un sistema trifásico a cuatro líneas que compensa los problemas de calidad de energía y también sirve de interface entre las fuentes de energía renovables y la red eléctrica pública. La etapa inversión está basada en un inversor de dos niveles y cuatro líneas y su control está basado en la teoría de la potencia reactiva instantánea (PQ). El filtro es capaz de compensar el factor de potencia, desbalance, y corriente de armónicos. Además, sirve de interfaz para interconexión de las fuentes de energía renovable y a la red eléctrica inyectando corrientes sinusoidales prácticamente balanceadas con baja distorsión armónica total o por sus siglas en ingles Total Harmonic Distortion (THD)

En (Thangaraj & Gopalasamy, 2016) se presenta una nueva estrategia de control para interconectar un sistema de generación de energía eléctrica mediante energía solar y solucionar los problemas que se generan al momento de la interconexión tales como armónicos, regulación de voltaje, etc. Se usa el algoritmo MPPT para obtener la máxima potencia del sistema solar y un convertidor CD/CD es implementado para mantener un voltaje constante CD. El filtro activo se usa para proveer calidad de energía a la red eléctrica.

En (Neves, et al., 2009) se presenta un filtro activo de potencia con derivación monofásica combinado con el algoritmo de seguimiento de pico de potencia máximo o por sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracking (MPPT) conectado a un arreglo de paneles solares, el control del filtro activo está basado en la teoría de Potencia Reactiva instantánea (teoría PQ). El sistema es capaz de compensar el factor de potencia y los armónicos, al mismo tiempo y usando el mismo inversor se inyecta energía proveniente de los paneles solares a la red eléctrica.

En (Rao, 2013) se presenta una estrategia de control novedosa para lograr los máximos beneficios de los inversores de interconexión de red cuando se instala en un sistema de distribución trifásico de cuatro hilos. El inversor está configurado para comportarse como un dispositivo multifunción que incorpora la función de filtro activo de potencia. Así se logra compensar los problemas que se generan al interconectar sistemas de generación de energía mediante fuentes renovables con la red de distribución.

En (Balasubramanian & Palani, 2016) se presenta la simulación y la evaluación de desempeño de usar un Filtro Activo de potencia para mejorar la calidad de energía usando la teoría PQ. Pensado para un escenario de un sistema de distribución trifásico y diferentes tipos de cargas no lineales. El propósito del filtro es la eliminación paralela del 5to y 7mo armónico. Se discute además el principio de compensación y el comportamiento del filtrado.

En (Philip et al., 2016) se presenta la implementación de un algoritmo de control para un sistema autónomo híbrido compuesto por paneles fotovoltaicos, generador Diésel y batería. El sistema trata con las variaciones de energía naturales que generan los arreglos de paneles fotovoltaicos por sus siglas en inglés Photovoltaic (PV) y también proporciona calidad de energía. Se presenta además el sistema de almacenamiento de energía mediante banco de baterías. El algoritmo es usado para balancear las cargas, eliminar los armónicos en un sistema trifásico a cuatro hilos con cargas lineales y no lineales.

En (Arul, et al., 2015) se presenta una revisión de estrategias de control para sistemas híbridos de generación de energía, se realiza un estudio de sistemas operando de manera autónoma y conectados a la red pública, se analiza las interfaces de interconexión mediante BUS CA, se discute también los esquemas de control para los sistemas de estabilización, además la calidad de energía y la correcta entrega de energía hacia las cargas.

En (Madaci, et al., 2016) se presenta el control de un sistema autónomo híbrido que incluye paneles fotovoltaicos, turbina de viento, generador Diésel y carga fantasma. Estos sistemas están conectados mediante un BUS al sistema trifásico a través de un convertidor CD-CA. La estrategia de administración de energía está diseñada para supervisar el sistema híbrido y la energía suministrada por cada elemento, el sistema de almacenamiento de energía y la carga fantasma que se usa cuando existe una sobrecarga en los sistemas de energía renovable y la batería está completamente cargada. Un modelado dinámico de los componentes del sistema híbrido es presentado en este trabajo, junto con el algoritmo de control MPPT de los sistemas eólicos y fotovoltaicos. La efectividad de los algoritmos de control presentados en este trabajo está verificada usando el software de simulación SIMULINK de MATLAB(Mathworks, 2016).

A continuación, en la Tabla 1.1 se presenta un resumen donde se clasifica el estado del arte de la problemática que se está tratando en este trabajo de fin de titulación.

Tabla 1.1 Parámetros conocidos de la red

	Generación Híbrida PV-batería/ PV-turbina eólica-batería stand-alone	Generación híbrida- algoritmos de control- MPPT,VSC,PCC/stand-alone	Generación Híbrida conectado a la red pública de distribución de energía eléctrica	Generación Optimizada
Control and Implementation of Standalone Solar Photovoltaic hybrid System (Philip, J., Jain, C., Kant, K., Singh, B., Mishra, S., Chandra, A., & Al-Haddad, K. 2016).	x			
Control Strategies for a hybrid renewable energy system: A review (Arul, P. G., Ramachandaramurthy, V. K., & Rajkumar, R. K. 2015).		x		
Desing and control of a stand-alone hybrid power system (Madaci, B., Chenni, R., Kurt, E., & Hemsas, K. E. 2016).	x	x		
3-Phase 4-Wire Shunt Active Power Filter with Renewable Energy Interface (Pinto, J. G., Pregitzer, R., Monteiro, L. F. C., & Afonso, J. L. 2007).				x
Power Quality Analysis and Enhancement of grid connected Solar energy			x	x

system (Thangaraj, K., & Gopalasamy, S. 2016).				
Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution Levels With Power-Quality Improvement Features (Rao, P. B. 2013).			x	x
Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review (Rao, P. B. 2013).	x			
Neural-Network-Based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system (Rao, P. B. 2013).		x		x
Improved Active Power Filter Performance for Renewable Generation Systems (Rao, P. B. 2013).				x
Single-Phase Shunt Active Filter Interfacing Renewable Energy Sources with the Power Grid (Neves, P., Gonçalves, D., Pinto, J. G., Alves, R., & Afonso, J. L. 2009).			x	x
Simulation and Performance Evaluation of Shunt Hybrid Power Filter for Power Quality Improvement Using PQ Theory (Balasubramanian, R., & Palani, S. 2016).				x

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN Y MODELADO MATEMÁTICO COMPONENTES DEL SISTEMA HÍBRIDO

2.1 Panel solar

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable, y consecuentemente inagotable. Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en utilizable como energía eléctrica. (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006).

Un panel solar se encuentra formado por la unión de varias células solares, las mismas que son dispositivos formados por una lámina de material semiconductor generalmente de silicio cristalino; cuando la luz incide sobre la célula los fotones rompen el par electrón – hueco. El campo eléctrico de la unión los separa para evitar que se recombinen, llevando los electrones a la zona “n” y los huecos a la zona “p”. Mediante un conductor externo, se conecta la capa negativa a la positiva, generándose de esta manera un flujo de electrones (corriente eléctrica). Esta energía generada se conoce como: **Energía Solar Fotovoltaica.**(Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

Efecto Fotovoltaico: Proceso mediante el cual la energía luminosa produce cargas positivas y negativas en dos semiconductores próximos de distinto tipo (P o N).

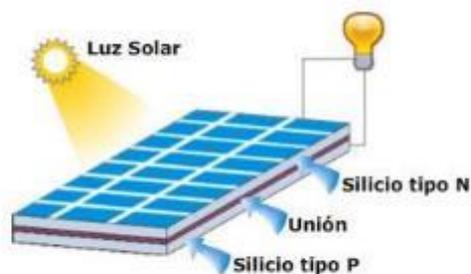


Figura 2.1. Ilustración Panel solar del Silicio

Fuente: (www.areatecnologia.com, n.d.)

Elaboración: (www.areatecnologia.com, n.d.)

Materiales Usados

El material que realiza la conversión fotovoltaica con más eficiencia es el silicio (Si). El proceso de conversión para producir materiales semiconductores cuando estos no cuentan intrínsecamente con esta propiedad, se conoce como dopado. Generalmente el silicio es dopado con boro.

Para realizar el dopado del material se debe cumplir un proceso llamado Método Czchralsky, el mismo que se describe a continuación.

- Se introduce el silicio en un crisol con impurezas de boro, que se calienta a altas temperaturas para obtener una masa fundida.
- Cuando el material está en estado líquido, se introduce una varilla con germen de silicio en un extremo, que al ponerse en contacto con la masa empieza a solidificarse. La varilla tiene un movimiento de rotación y a la vez desciende lentamente obteniendo un lingote cilíndrico.



Figura 2.2. Método Czchralsky

Fuente: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

Elaboración: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

El lingote obtenido se corta mediante sierras precisas, para crear obleas de un espesor aproximado de 0.3 mm.

El paso siguiente es formar la unión "p-n", mediante la difusión de impurezas tipo "n" a altas temperaturas. La profundidad de la capa "n" depende de la temperatura y duración de proceso. Ahora ya se tiene una unión "p-n" en el interior de la celda capaz de producir energía eléctrica.

La superficie de la oblea pulida puede llegar a reflejar hasta una tercera parte de la luz incidente, para evitar esto se crea una superficie rugosa formada por pirámides microscópicas que hacen rebotar el rayo hacia el interior de la celda.



Figura 2.3. Texturado oblea de Silicio

Fuente: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

Elaboración: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

El próximo paso es formar los contactos metálicos, usando técnicas de serigrafía con pastas conductoras en ambas caras de la oblea. Los contactos de la cara iluminada tienen forma de rejilla para permitir que la luz entre en el semiconductor, y en la cara posterior cubren toda la superficie.



Figura 2.4. Contactos metálicos celda solar

Fuente: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

Elaboración: (Méndez Muñiz & Cuervo García, 2006)

Finalmente se aplica una película anti reflectante a la superficie para disminuir aún más la reflexión de la celda; así junto con el texturado se consigue una pérdida de solo un 8 a 10 %.

Sistemas Fotovoltaicos

En la Figura 2.5 se puede apreciar un esquema de los componentes de un sistema fotovoltaico.

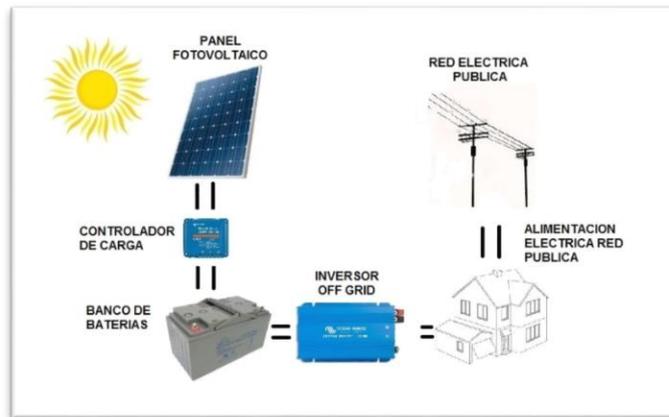


Figura 2.5. Sistema Fotovoltaico

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

- **Generador Fotovoltaico:** Capta y convierte la radiación solar en corriente eléctrica mediante celdas fotovoltaicas.
- **Baterías:** Almacenan la energía eléctrica producida por el generador fotovoltaico para ser usada en periodos donde la demanda excede la capacidad de producción del generador fotovoltaico.
- **Regulador de carga:** Protege y garantiza el correcto mantenimiento de la carga de la batería y evita sobretensiones que puedan generar daños.
- **Inversor:** Encargado de transformar la corriente continua producida por el panel solar (generador fotovoltaico) en corriente alterna, para alimentar las cargas o interconectarse con la red de distribución pública de energía eléctrica.

2.1.1 Modelado matemático

El modelo que se describe a continuación usa cinco parámetros: una fuente de corriente I_L (light-generated current), un diodo (I_d), dos resistencias en serie R_s , y resistencia de derivación (shunt resistance R_{sh}) para representar la irradiancia y dependencia de la temperatura,

además de características del módulo de corriente y voltaje (I-V).(Gow & Manning, 1999). La fuente de corriente produce la corriente i_{ph} , (véase la Figura 2.6) que depende de la radiación incidente G ; a través del diodo fluye la corriente i_D , la corriente i_{pv} , cuyo flujo hacia la carga es la diferencia entre i_{ph} y i_D , y es reducida por la resistencia R_{sh} que representa la resistencia de celda y la conexión entre ellas.(Rezkallah, 2016)

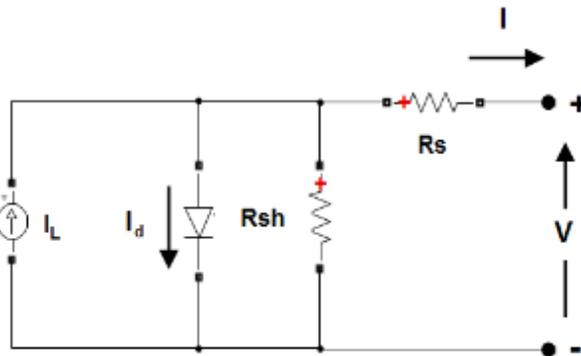


Figura 2.6. Diagrama circuito de una celda solar
Fuente: (Gow & Manning, 1999)
Elaboración: (Gow & Manning, 1999)

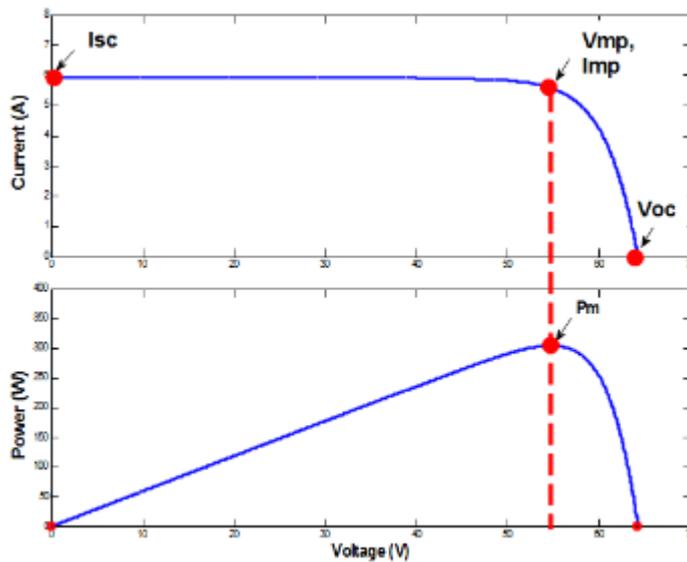


Figura 2.7. Gráfica Voltaje vs. Corriente/ Voltaje vs. Potencia
Fuente: (Gow & Manning, 1999)
Elaboración: (Gow & Manning, 1999)

Las características de I-V del diodo para una celda son definidas por las siguientes ecuaciones:

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} * nI * N_{cell} \quad (2)$$

Donde:

- I_d = Corriente del diodo (A)
- V_d = Voltaje del diodo (V)
- I_0 = Corriente de Saturación del diodo (A)
- nI = Factor ideal del diodo, un número cercano a 1.0
- k = Constante de Boltzman = $1.3806e^{-23} J * K^{-1}$
- q = Carga del electrón = $1.6022e^{-19} C$
- T = Temperatura de la celda (K)
- N_{cell} = Número de celdas conectadas en serie en un panel

El sistema de conversión fotovoltaico está basado en bloques como se muestra en la Figura 2.8, la misma que consiste del bloque PV y el convertidor CC-CC (boost converter).

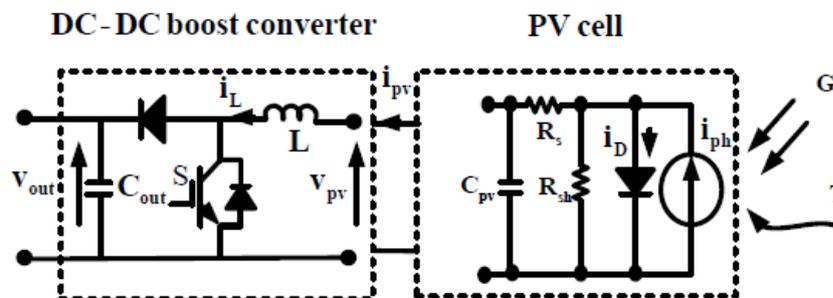


Figura 2.8. Circuito equivalente celda PV y convertidor DC-DC

Fuente: (Rezkallah, 2016)

Elaboración: (Rezkallah, 2016)

Como se puede observar en la Figura 2.9, la potencia que proporciona el arreglo de paneles solares depende de la temperatura en las celdas y la insolación. Esta decrece cuando la temperatura aumenta, como también cuando la insolación decrece. La potencia de salida del PV está determinada por el voltaje y la corriente, por lo tanto, para maximizarla es necesario buscar el máximo punto de potencia (Maximum Power Point-MPP) controlando el voltaje o la corriente independientemente. (Rezkallah, 2016)

$$P_{pv} = v_{pv} * i_{pv} \quad (3)$$

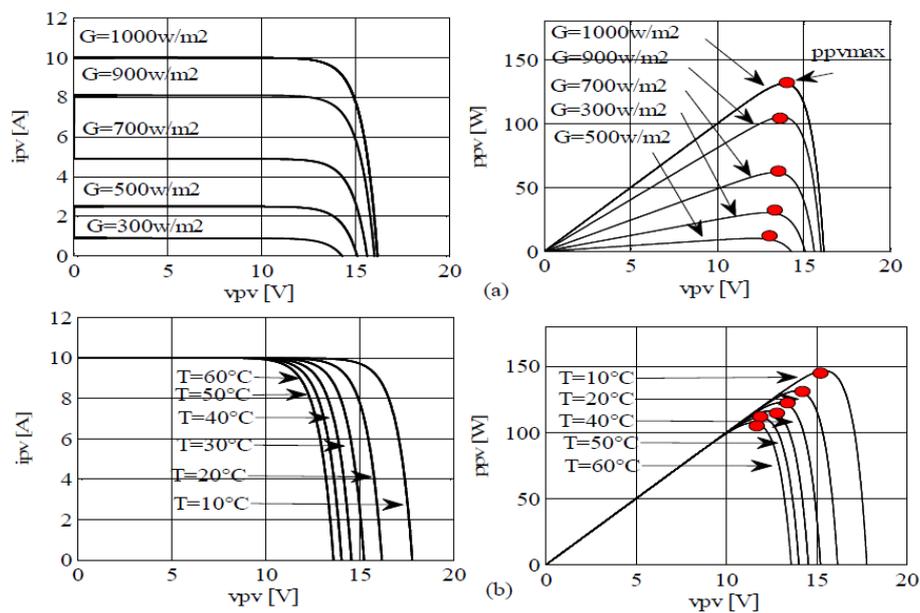


Figura 2.9. Características I-V y V-P; a) T fija y G variable; b) G fija y T variable

Fuente: (Gow & Manning, 1999)

Elaboración: (Gow & Manning, 1999)

En este trabajo se realiza la simulación del sistema híbrido mediante la herramienta Simulink de Matlab, usando la librería Simscape la misma que ofrece el "Tool Box" Power Systems, en la cual podemos encontrar el bloque de panel solar llamado "PV Array".

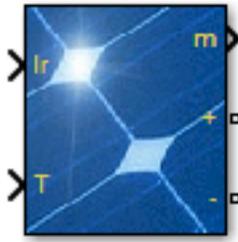


Figura 2.10. Bloque PV Array Simscape Power Systems

Fuente: (Gow & Manning, 1999)

Elaboración: (Gow & Manning, 1999)

2.1.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Es un algoritmo implementado en inversores fotovoltaicos (PV) para ajustar continuamente la impedancia proveniente del panel solar y así mantener operando el sistema en el punto de potencia máximo o cerca de este en condiciones variables, como el cambio de irradiancia solar, temperatura y carga. (MathWorks, 2017)

Los ingenieros que desarrollan inversores solares implementan este algoritmo para maximizar la potencia generada por los sistemas fotovoltaicos. Los algoritmos controlan el voltaje para asegurar que el sistema funcione en el punto máximo de potencia (voltaje pico) e la curva de voltaje – potencia como se muestra en la figura 2.11. (MathWorks, 2017)

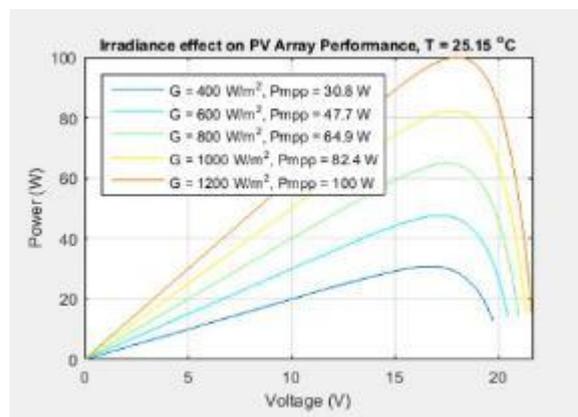


Figura 2.11. Curva de potencia con características I-V y P-V del PV

Fuente: (MathWorks, 2017)

Elaboración: (MathWorks, 2017)

Existen tres tipos de algoritmos MPPT (MathWorks, 2017):

- 1. Perturbación y Observación:** Este algoritmo altera los valores de voltaje para asegurarse que se está manteniendo en el punto máximo de potencia. Si bien existen variantes de este algoritmo a continuación (Figura 2.12) se presenta un diagrama de flujo básico del mismo.

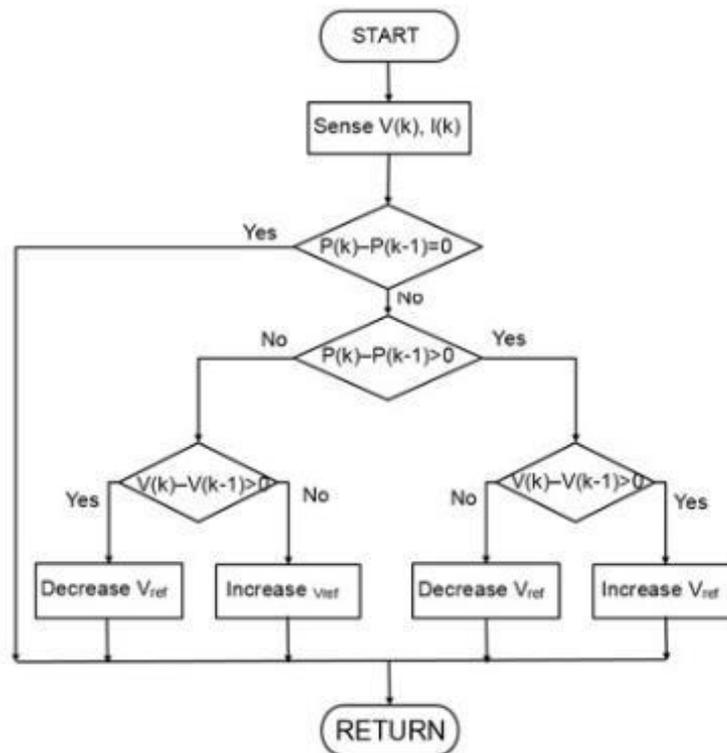


Figura 2.12. Diagrama de flujo algoritmo MPPT, Perturbación y Observación

Fuente: (MathWorks, 2017)

Elaboración: (MathWorks, 2017)

- 2. Conductancia Incremental:** El algoritmo que se presenta en la Figura 2.13, compara la conductancia incremental con la conductancia instantánea en un sistema fotovoltaico. Dependiendo del resultado, aumenta o disminuye la tensión hasta que se alcanza el punto de máxima potencia (MPP). A diferencia del algoritmo anterior P&O, el voltaje permanece constante una vez que se alcanza MPP.

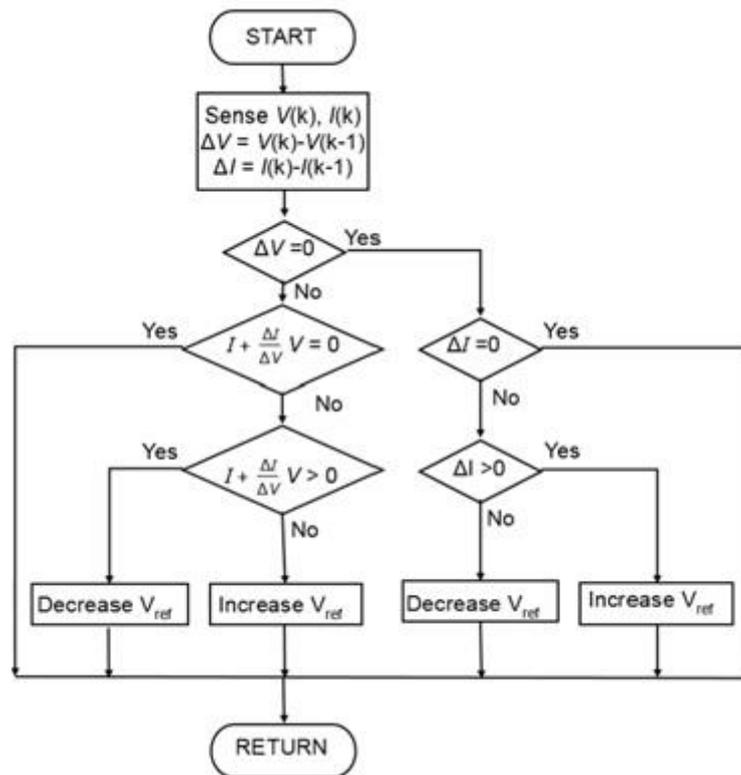


Figura 2.13. Diagrama de flujo algoritmo MPPT, Conductancia Incremental

Fuente: (MathWorks, 2017)

Elaboración: (MathWorks, 2017)

- 3. Voltaje fraccional en circuito abierto:** Este algoritmo se basa en el principio de que la tensión máxima del punto de potencia es siempre una fracción constante de la tensión de circuito abierto. El voltaje de circuito abierto de las celdas en el sistema fotovoltaico se mide y se usa como entrada al controlador.

Para el caso del sistema que se está proponiendo en este proyecto, se usará el algoritmo MPPT P&O (Perturbación y Observación) ya que el sistema está pensado para operar en domicilios con varias cargas conectadas, además se interconectará a la red pública y estará expuesto a variables que perturban el voltaje de la red, por lo tanto, es importante controlar el mismo y asegurar la máxima potencia suministrada a la carga.

2.1.3 Buck Boost converter

Un convertidor Buck – Boost es un tipo de fuente de alimentación conmutada que combina los principios del convertidor Buck y Boost en un solo circuito. Al igual que otros diseños de

fuentes de alimentación en modo de conmutación o por sus siglas en inglés Switched Mode Power Supplies (SMPS), proporciona una tensión de salida de CC regulada desde una entrada de CA o CC.(Coates, 2013)

El convertidor Buck produce una salida CC en un rango que va desde 0V hasta un valor inferior al voltaje de entrada. El convertidor Boost produce un voltaje de salida dentro de un rango comprendido entre el valor de voltaje de entrada, hasta un valor mucho mayor al mencionado.

Existen varias aplicaciones para este tipo de convertidores, tales como, los sistemas que incorporan el uso de baterías, donde el voltaje de entrada puede variar ampliamente, iniciando con carga completa y disminuyendo gradualmente a medida que se agota la carga de la batería. Con carga completa, donde el voltaje de la batería puede ser más alto de lo que realmente necesita el circuito que está siendo alimentado, un regulador de tipo Buck sería ideal para mantener la tensión de suministro constante. Sin embargo, a medida que la carga disminuye, la tensión de entrada cae por debajo del nivel requerido por el circuito y la batería debe desecharse o recargarse; en este punto, la alternativa ideal sería el regulador de tipo Boost.(Coates, 2013)

Combinando estos diseños de convertidores es posible obtener un circuito regulador que pueda hacer frente a un amplio rango de voltajes de entrada ya sean superiores o inferiores a los que necesita el circuito. Afortunadamente tanto los convertidores de tipo Buck como el tipo Boost usan componentes similares; solo es necesario unos reajustes dependiendo del voltaje de entrada.(Coates, 2013)

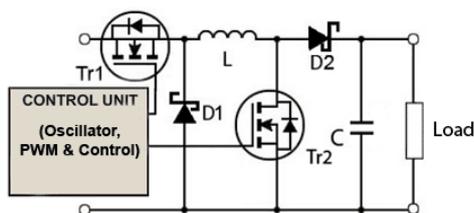


Figura 2.14. Diseño circuito convertidor Buck Boost

Fuente: (Coates, 2013)

Elaboración: (Coates, 2013)

En la figura 2.14, podemos apreciar como los componentes comunes de los circuitos Buck y Boost se combinan. Se agrega una unidad de control que detecta el nivel de voltaje de entrada y luego selecciona la acción de circuito apropiada.(Coates, 2013)

2.1.3.1 Operación como convertidor tipo Buck

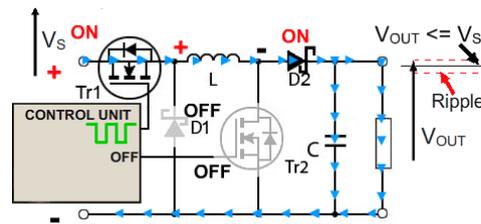


Figura 2.15. Operación como convertidor tipo Buck durante el periodo $Tr1$ encendido

Fuente: (Coates, 2013)

Elaboración: (Coates, 2013)

En la figura 2.15 se muestra el circuito convertidor operando en modo Buck. En este modo $Tr2$ se apaga y $Tr1$ se enciende y apaga mediante una onda cuadrada de alta frecuencia procedente de la unidad de control. Cuando la compuerta $Tr1$ está en alto, la corriente fluye a través de L , cargando su campo magnético, cargando C y alimentando la carga. El diodo Schottky $D1$ se apaga debido a la tensión positiva en su cátodo. (Coates, 2013)

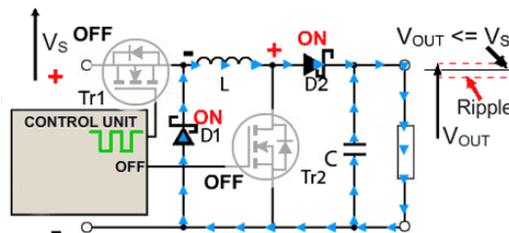


Figura 2.16. Operación como convertidor tipo Buck durante el periodo $Tr1$ apagado

Fuente: (Coates, 2013)

Elaboración: (Coates, 2013)

En la figura 2.16 se muestra el flujo de corriente durante la operación del circuito en modo Buck cuando la unidad de control apaga $Tr1$. La fuente de corriente inicial es ahora el inductor L . Su campo magnético se está colapsando, la parte posterior e.m.f. generado por el campo colapsado invierte la polaridad del voltaje a través de L , que enciende $D1$ y la corriente fluye a través de $D2$ y la carga. A medida que la corriente debida a la descarga de L disminuye, la

carga acumulada en C durante el periodo de conexión de Tr1 ahora también se suma a la corriente que fluye a través de la carga, manteniendo el voltaje de salida (V_{out}) razonablemente constante durante el periodo de inactividad. Esto ayuda a mantener la amplitud de onda a un mínimo y V_{out} cerca del valor del voltaje de la fuente (V_s). (Coates, 2013)

2.1.3.2 Operación como convertidor tipo Boost

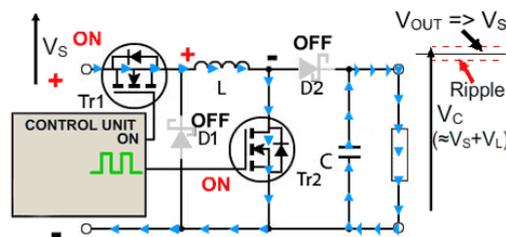


Figura 2.17. Operación como convertidor tipo Boost durante el periodo Tr2 encendido

Fuente: (Coates, 2013)

Elaboración: (Coates, 2013)

En modo convertidor Boost, como se observa en la figura 2.17, Tr1 se enciende continuamente y la onda cuadrada de alta frecuencia se aplica a la compuerta Tr2. Durante los periodos de encendido cuando Tr2 está conduciendo, la corriente de entrada fluye a través del inductor L y a través de Tr2, directamente hacia el terminal negativo de suministro cargando el campo magnético alrededor de L. Mientras esto sucede, D2 no puede conducir ya que su ánodo está retenido en potencial de tierra por el Tr2 altamente conductor. En el periodo de activación, la carga se suministra por completo mediante la carga existente en el capacitor C, acumulada en los ciclos oscilatorios previos. La descarga gradual de C mientras se da el periodo de activación (y su posterior recarga) representa la cantidad de fluctuación de alta frecuencia en la tensión de salida, que tiene un potencial de aproximadamente $V_s + V_L$. (Coates, 2013)

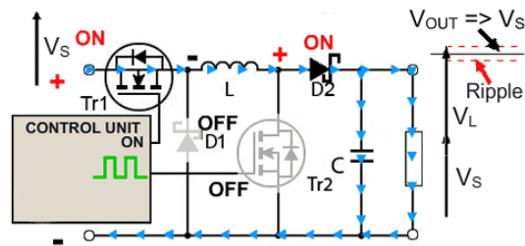


Figura 2.18. Operación como convertidor tipo Boost durante el periodo Tr2 apagado

Fuente: (Coates, 2013)

Elaboración: (Coates, 2013)

En la figura 2.18, podemos observar que al comienzo del periodo de desconexión de Tr2, L está cargado y C está parcialmente descargado. El inductor L ahora genera un respaldo de e.m.f. y su valor que depende de la tasa de cambio de corriente como interruptores Tr2 de y sobre la cantidad de inductancia que posee la bobina; por lo tanto, la parte posterior e.m.f puede ser cualquier voltaje en un amplio rango, dependiendo del diseño del circuito. Se puede notar particularmente que la polaridad del voltaje a través de L ahora se ha invertido, y así se agrega a la tensión de entrada VS que da un voltaje de salida que es al menos igual o mayor que el voltaje de entrada. D2 ahora está polarizado hacia adelante, por lo que la corriente del circuito suministra la corriente de carga y, al mismo tiempo, vuelve a cargar el condensador a $V_S + V_L$, listo para el siguiente periodo de encendido de Tr2. (Coates, 2013)

2.1.3.3 Análisis del convertidor Buck – Boost en CC

Los convertidores de tipo Buck – Boost, permiten que el voltaje de salida sea mayor o menor que el voltaje de entrada, en función del conmutador D. En la figura 2.19 se muestra la configuración del convertidor en modo conmutador. (Mohan, 2012)

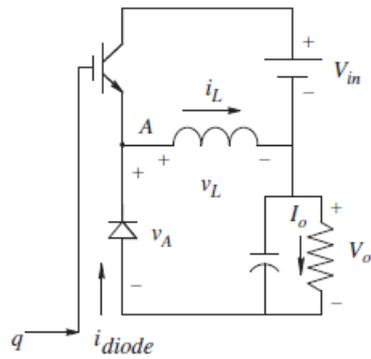


Figura 2.19. Convertidor Buck - Boost CC-CC

Fuente: (Mohan, 2012)

Elaboración: (Mohan, 2012)

Donde el polo de potencia de conmutación se implementa como se aprecia en la figura 2.19. Convencionalmente, para hacer que la potencia fluya de izquierda a derecha, el convertidor de aumento de potencia se aprecia en la figura 2.19.

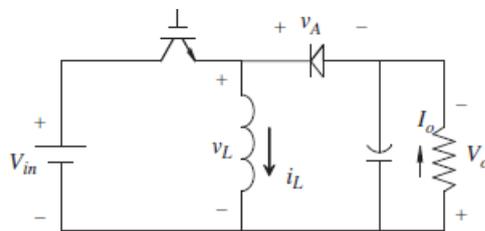


Figura 2.20. Convertidor Buck - Boost CC-CC

Fuente: (Mohan, 2012)

Elaboración: (Mohan, 2012)

Como se muestra en la figura 2.20, al encender el transistor se aplica el voltaje de entrada a través del inductor de manera que v_L es igual a V_{in} , y la corriente aumenta linealmente, incrementando la energía en el inductor.

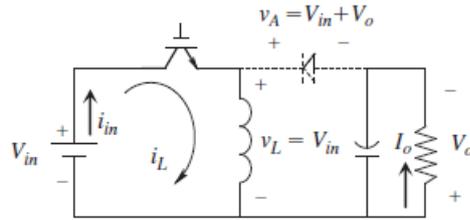


Figura 2.21. Operación convertidor Buck - Boost CC-CC

Fuente: (Mohan, 2012)

Elaboración: (Mohan, 2012)

Al desactivar el transistor, la corriente del inductor que fluye a través del diodo, como se muestra en la figura 2.21, transfiere el aumento de energía en el inductor durante el estado anterior del transistor a la salida.

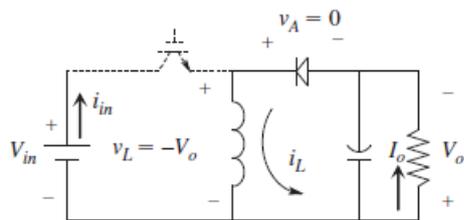


Figura 2.22. Operación convertidor Buck - Boost CC-CC

Fuente: (Mohan, 2012)

Elaboración: (Mohan, 2012)

La función de conmutación del transistor se muestra en la figura 2.22, con una relación de trabajo en estado estacionario D . La forma de onda v_A se muestra en la figura 2.22. Dado que el voltaje promedio en el inductor en el estado estable de CC es cero, el v_A promedio es igual al voltaje de salida V_o . La tensión del inductor fluctúa entre dos valores: V_{in} y $-V_o$, como se representa en la figura 2.22. Dado que el voltaje promedio del inductor es cero, las áreas de voltaje por segundo durante los dos subintervalos son iguales en magnitud y opuestas en signo. (Mohan, 2012)

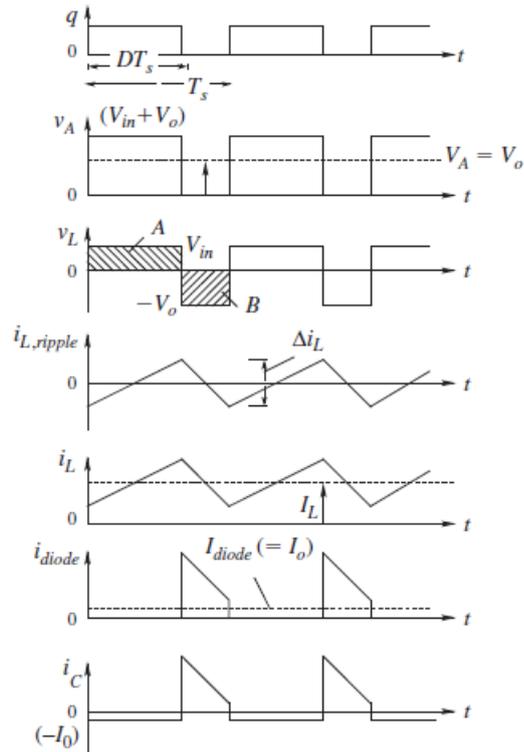


Figura 2.23. Formas de onda convertidor Buck - Boost CC-CC

Fuente: (Mohan, 2012)

Elaboración: (Mohan, 2012)

La relación de tensión de entrada / salida puede obtenerse mediante la forma de onda de v_A o v_L como se observa en la figura 2.23. Usando la forma de onda v_L cuyo promedio es cero en el estado estable de CC. (Mohan, 2012)

Por lo tanto.

$$DV_{in} = (1 - D)V_0 \quad (4)$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{D}{1 - D} \quad (5)$$

La corriente del inductor consiste en un valor promedio, que depende de la carga de salida, y un componente de ondulación que depende de v_L : (Mohan, 2012)

$$i_L(t) = I_L + i_{L,ripple}(t) \quad (6)$$

Donde como se muestra en la figura 2.23, $i_{L,ripple}(= \frac{1}{L} \int v_L \cdot d\tau)$, cuyo valor promedio es cero, consiste en segmentos lineales, que se elevan cuando v_L es positivo y cae cuando v_L es negativo. La onda pico-pico se puede calcular usando el área A o B, (Mohan, 2012)

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_{in} (DT_s) = \frac{1}{L} V_0 (1 - D) T_s \quad (7)$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchoff en la figura 2.19 o 2.20, la corriente promedio del inductor, es igual a la suma de los promedios de corriente de entrada y los promedios de corriente de salida (considere que la corriente promedio del capacitor es cero en estado estático en CC), (Mohan, 2012)

$$I_L = I_{in} + I_0 \quad (8)$$

Igualando las potencias de entrada y salida,

$$V_{in} I_{in} = V_0 I_0 \quad (9)$$

Y usando la ecuación 5,

$$I_{in} = \frac{V_0}{V_{in}} I_0 = \frac{D}{1 - D} I_0 \quad (10)$$

Por lo tanto, usando las ecuaciones 8 y 9, tenemos:

$$I_L = I_{in} + I_0 = \frac{1}{1 - D} I_0 = \frac{1}{1 - D} \frac{V_0}{R} \quad (11)$$

Superponiendo el promedio y los componentes de onda, la forma de onda de la corriente del inductor se muestra en la figura 2.23.

La corriente del diodo es cero, excepto cuando conduce la corriente del inductor, como se aprecia en la figura 2.23. En CC en estado estático, la corriente promedio I_C a través del capacitor es cero, por lo tanto mediante la ley de corrientes de Kirchhoff, la corriente promedio del diodo es igual a la corriente de salida. En la práctica, el capacitor del filtro es grande para alcanzar el voltaje de salida CC ($V_0(t) \cong V_0$). Por lo tanto, para la corriente de frecuencia de ondulación, la ruta a través del condensador ofrece una impedancia mucho más pequeña que a través de la resistencia de carga, por lo tanto, justifica la suposición de que el componente de ondulación de la corriente de diodo fluye completamente a través del capacitor. (Mohan, 2012)

Esto es.

$$i_C(t) \cong i_{diode,ripple}(t) \quad (12)$$

En la práctica, el voltaje cae a través del capacitor ESR y el ESL domina sobre la caída de voltaje $\frac{1}{C} \int i_C dt$ a través de C. La gráfica de i_C en la figura 2.23 se puede usar para calcular la ondulación en el voltaje de salida. (Mohan, 2012)

2.2 Batería

El almacenamiento de energía y su administración se han convertido en temas de importancia en los países que han puesto énfasis en la producción de energía proveniente de recursos renovables. Las tecnologías en almacenamiento cumplen un papel vital en el futuro de la energía limpia, garantizando seguridad y continua entrega al consumidor, esto tomando en cuenta sistemas conectados y aislados de la red pública de distribución de energía eléctrica. Además, la necesidad del almacenamiento de energía será mayor en el futuro, el problema de asegurar calidad de energía esta evidenciado actualmente pues la baja calidad genera pérdidas eléctricas que se traducen en decrementos económicos para los estados de gobierno y que afectan también a los pobladores. (Hall & Bain, 2008)

2.2.1 Tecnología de almacenamiento de energía en baterías

Entre las principales tecnologías se puede destacar, el sistema de almacenamiento de energía en batería (BESS), el sistema de control y acondicionamiento de energía (C-PCS), y el sistema de protección para baterías y sistema de control (C-PCS) denominado rest of plant.(Divya & Østergaard, 2009)

2.2.2 Tipos de Baterías

Las baterías están compuestas de celdas apiladas donde la energía química es convertida a eléctrica y viceversa. El voltaje deseado de la batería, así como los niveles de corriente se obtienen conectando eléctricamente las celdas en serie y en paralelo. Se clasifican en términos de sus capacidades de energía y potencia, aunque existen varios tipos, las capacidades de potencia y la energía no son independientes y se modifican durante su diseño. Otras características importantes son la eficiencia, tiempo de vida (determinada por el número de ciclos), temperatura de operación, profundidad de descarga (las baterías generalmente no se descargan completamente), auto descarga y densidad de energía.(Divya & Østergaard, 2009)

Actualmente, se está evidenciando un importante desarrollo en la tecnología de las baterías, varios tipos de baterías se han creado y algunas de estas están disponibles comercialmente, mientras otras están en proceso experimental. Las baterías usadas en sistemas de potencia hasta el momento son de ciclo profundo (similares a las usadas en autos eléctricos), con rangos de capacidad desde 17 a 40 MWh y rango de eficiencia alrededor del 70 a 80 %. Algunas tecnologías de baterías son más apropiadas para ser usadas en sistemas de potencia y esas se mencionan a continuación.(Divya & Østergaard, 2009)

Plomo ácido (Lead acid)

Este tipo de baterías están conformadas por dos electrodos de plomo, y se suelen usar en autos eléctricos y en sistemas de potencia. Con respecto a su funcionamiento, en el proceso de carga, el sulfato de plomo se convierte en plomo metal en el cátodo; por otra parte, en el ánodo se produce la formación de óxido de plomo. En el proceso de descarga, se realiza el proceso anterior de manera invertida.

Iones de Litio (Lithium ion – Li ion)

Dispone de un ánodo de grafito, mientras que el cátodo funciona a partir de óxido de cobalto, óxido de manganeso. No permiten la descarga y son capaces de alcanzar potencias elevadas, aunque son sensibles a cambios de temperatura. En el proceso de carga, los átomos de litio en el cátodo se convierten en iones y se trasladan a través del electrolito hacia el ánodo de carbón (grafito) donde se combinan con electrones externos y se depositan entre las capas de carbón como átomos de litio, este proceso ocurre de manera inversa en el proceso de descarga.

Níquel – Cadmio (NI-CD)

Funcionan a partir de un ánodo de cadmio y un cátodo compuesto por hidróxido de níquel. Por su parte, el electrolito se conforma de hidróxido de potasio. Se pueden recargar una vez agotada su vida útil, aunque disponen de poca capacidad.

Níquel – Hierro (NI-FE)

Se conforman por filas de tubos compuestos por acero niquelado, los cuales contenían hidróxido de níquel. El ánodo contiene acero niquelado con polvo de óxido ferroso. Son de fabricación simple, bajo costo y pueden sobrecargarse o descargarse reiteradas veces sin perder su capacidad inicial.

2.2.3 Modelado matemático batería

Para la simulación del almacenamiento de energía en este trabajo se usa el bloque “Battery” disponible en Simscape Power Systems de Simulink-Matlab(Mathworks, 2016).

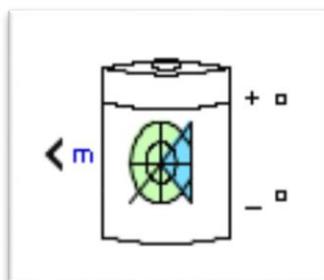


Figura 2.24. Bloque Battery Simscape Power Systems

Fuente: (Mathworks, 2017)

Elaboración: (Mathworks, 2017)

El bloque de baterías implementa un modelo dinámico genérico parametrizado para representar los tipos más populares de baterías recargables.(Mathworks, 2017)

En la figura 2.25 se muestra el circuito equivalente del bloque de baterías.

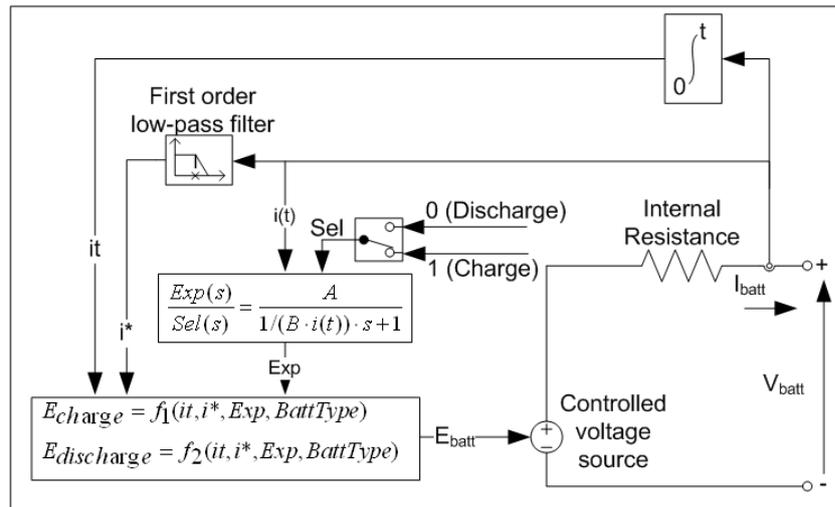


Figura 2.25. Circuito equivalente batería

Fuente: (Mathworks, 2017)

Elaboración: (Mathworks, 2017)

2.2.3.1 Modelo matemático batería de Plomo-ácido (lead-acid)

- Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (13)$$

- Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (14)$$

2.2.3.2 Modelo matemático batería de Iones de Litio (lithium-ion)

- Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (15)$$

- Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (16)$$

2.2.3.3 Modelo matemático batería de Níquel-Cadmio y Níquel-hierro-híbrido

- Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (17)$$

- Carga ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it| + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (18)$$

En las ecuaciones:

- E_{Batt} es el voltaje no lineal, en V.
- E_0 es el voltaje constante, en V.
- $Exp(s)$, es la zona dinámica exponencial, en V.
- $Sel(s)$, representa el modo de la batería, es decir. $Sel(s) = 0$ durante la descarga, $Sel(s) = 1$ durante la carga.
- k es la constante de polarización, en Ah^{-1} , o resistencia de polarización en Ohms.
- i^* es la corriente dinámica a baja frecuencia, en A.
- i es la corriente de la batería, en A.
- it es la capacidad extraída, en Ah.
- Q es la capacidad máxima de la batería, en Ah.
- A es el voltaje exponencial, en V.
- B es la capacidad exponencial, en Ah^{-1} .

2.2.4 Características de carga y descarga

Los parámetros del circuito equivalente se pueden modificar para representar un tipo de batería en particular, basándose en sus características de descarga. Una curva de descarga típica consta de tres secciones.

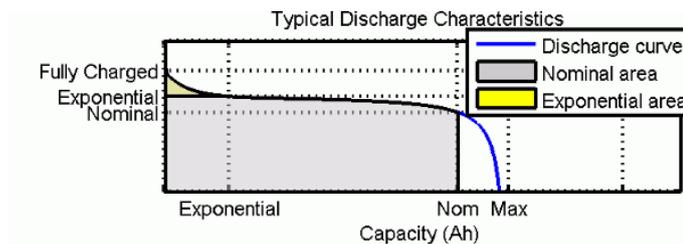


Figura 2.26. Características típicas de descarga

Fuente: (Mathworks, 2017)

Elaboración: (Mathworks, 2017)

La primera sección representa el decremento exponencial de voltaje cuando la batería está cargada. La caída de voltaje depende del tipo de batería. La segunda sección muestra la carga que puede ser extraída hasta que el voltaje sea menor que el voltaje nominal. Finalmente, la tercera sección representa la batería descargada totalmente, cuando el voltaje cae rápidamente.

Cuando la corriente de la batería es negativa, la batería se recarga siguiendo una característica de carga.

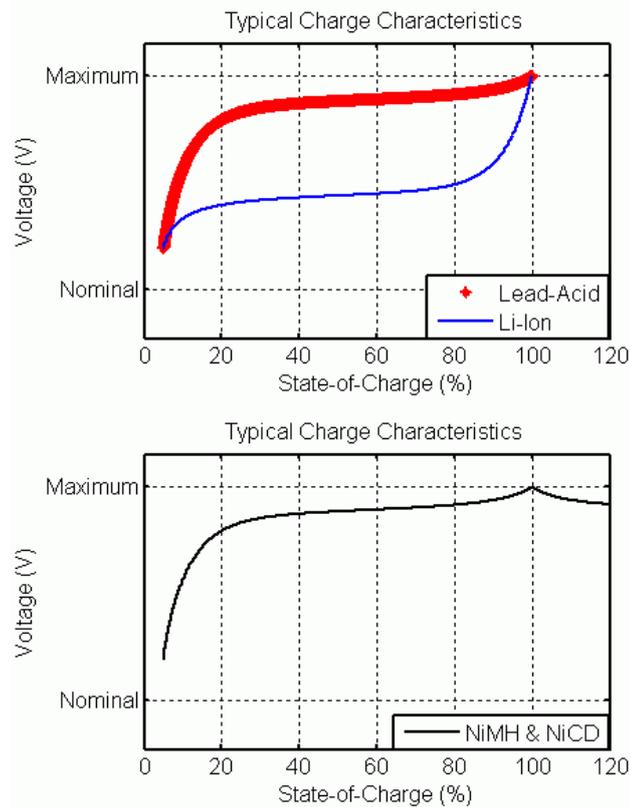


Figura 2.27. Características típicas de Carga baterías lead-acid, li-ion, NiMH, NiCD

Fuente: (Mathworks, 2017)

Elaboración: (Mathworks, 2017)

Los parámetros del modelo se derivan de las características de descarga y se asume que son las mismas para el proceso de carga.

La función de transferencia $\text{Exp}(s)$ representa el fenómeno de histéresis para los tipos de baterías mencionados en párrafos anteriores durante los ciclos de carga y descarga. El voltaje incrementa exponencialmente cuando la batería está cargándose, independientemente del estado de carga. Cuando la batería está descargándose, el voltaje decrece exponencialmente inmediatamente.

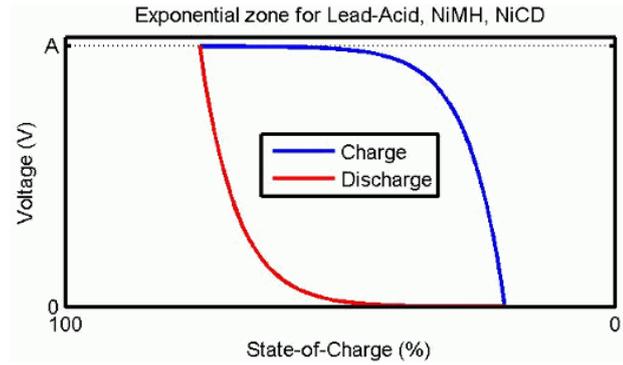


Figura 2.28. Carga y descarga exponencial de baterías

Fuente: (Mathworks, 2017)

Elaboración: (Mathworks, 2017)

2.2.5 Modelado matemático del efecto de temperatura sobre las baterías

2.2.5.1 Modelado para batería de Iones de litio (lithium-ion)

Los impactos de la temperatura sobre los parámetros del modelo se representan por las siguientes ecuaciones.

- Descarga ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} \cdot (i^* + it) + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (19)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i \quad (20)$$

- Carga ($i^* < 0$)

$$f_1(it, i^*, i, T, T_a) = E_0(T) - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{it + 0.1 \cdot Q(T_a)} \cdot i^* - K(T) \cdot \frac{Q(T_a)}{Q(T_a) - it} + A \cdot \exp(-B \cdot it) - C \cdot it \quad (21)$$

$$V_{batt}(T) = f_1(it, i^*, i, T, T_a) - R(T) \cdot i, \quad (22)$$

Con

$$E_0(T) = E_0|_{T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T}(T - T_{ref}) \quad (23)$$

$$K(T) = K|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (24)$$

$$Q(T_a) = Q|_{T_a} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} \cdot (T_a - T_{ref}) \quad (25)$$

$$R(T) = R|_{T_{ref}} \cdot \exp\left(\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right), \quad (26)$$

Donde:

- T_{ref} es la temperatura ambiente nominal, en kelvin K.
- T es la temperatura de la celda, en kelvin K.
- T_a es la temperatura ambiente, en kelvin K.
- E/T es el coeficiente de temperatura de voltaje inverso, en V/K.
- α es la constante de Arrhenius para la resistencia de polarización.
- β es la constante de Arrhenius para la resistencia interna.
- $\Delta Q/\Delta T$ es el coeficiente de temperatura máxima, en Ah/K.
- C es la pendiente nominal de la curva de descarga, en V/Ah. Para baterías de iones de litio con curvas de descarga menos pronunciadas, este parámetro se establece en 0

La temperatura interna, T , en cualquier en cualquier tiempo, t , esta expresado como:

$$T(t) = L^{-1}\left(\frac{P_{loss}R_{th} + T_a}{1 + s \cdot t_c}\right), \quad (27)$$

Donde:

- R_{th} es la resistencia térmica, de la celda a temperatura ambiente ($^{\circ}C/W$).
- t_c es la constante térmica temporal, de la celda a temperatura ambiente (s).
- P_{loss} es el total de calor generado (W) durante el proceso de carga y descarga, dado por:

$$P_{loss} = (E_0(T) - V_{batt}(T)) \cdot i + \frac{\partial E}{\partial T} \cdot i \cdot T \quad (28)$$

2.2.6 Efecto de envejecimiento

Para las baterías de iones de litio, el efecto del envejecimiento (a través del ciclo de vida) sobre su capacidad y resistencia interna, se representa por las siguientes ecuaciones:

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (Q_{BOL} - Q_{EOL}) Si \frac{k}{2} \neq 0 \\ Q(n-1) & para \text{ el resto} \end{cases} \quad (29)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} - \varepsilon(n) \cdot (R_{BOL} - R_{EOL}) Si \frac{k}{2} \neq 0 \\ R(n-1) & para \text{ el resto} \end{cases} \quad (30)$$

Con:

$$n = kT_h \quad (k = 1,2,3, \dots \infty) \quad (31)$$

Donde:

- T_h es la duración de medio ciclo en s. Un ciclo completo se obtiene cuando la batería esta descargada y se carga o viceversa.
- Q_{BOL} es la capacidad máxima en Ah, al inicio de su vida útil (BOL), a temperatura ambiente nominal.
- Q_{EOL} es la capacidad máxima de la batería en Ah, al final de su vida útil (EOL), a temperatura ambiente nominal.
- R_{BOL} es la resistencia interna de la batería en ohms al BOL, a temperatura ambiente nominal.
- R_{EOL} es la resistencia interna de la batería en ohms al EOL, a temperatura ambiente nominal.
- ε es el factor de envejecimiento de la batería. Este factor es igual a cero y la unidad al BOL y EOL, respectivamente.

El factor de envejecimiento de la batería, ε es expresado como:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0.5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right) & \text{Si } \frac{k}{2} \neq 0 \\ \varepsilon(n-1) & \text{Para el resto} \end{cases} \quad (32)$$

Donde:

- DOD es la profundidad de descarga (%), luego de medio ciclo de duración.
- N es el número máximo de ciclos y está dado por:

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\varepsilon} \cdot \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \cdot (I_{dis-ave}(n))^{-\gamma_1} \cdot (I_{ch-ave}(n))^{-\gamma_2} \quad (33)$$

Donde:

- H es el número de ciclos.
- ε es el factor exponencial para DOD.
- ψ es la constante de Arrhenius para el número de ciclos.
- $I_{dis-ave}$ es el promedio de corriente de descarga en A, durante medio ciclo de duración.
- I_{ch-ave} es el promedio de corriente de carga en A, durante medio ciclo de duración.
- γ^1 es el factor exponencial para la corriente de descarga.

γ^2 es el factor exponencial para la corriente de carga.

2.3 Controlador Proporcional Integral (PI)

Un sistema de control puede ser representado gráficamente por un diagrama de bloques, tales diagramas indican la interrelación existente entre los distintos componentes del sistema. Todas las variables del sistema se enlazan entre sí por medio de bloques funcionales, los mismos que determinan que operación matemática el sistema produce a la salida sobre la señal de entrada.

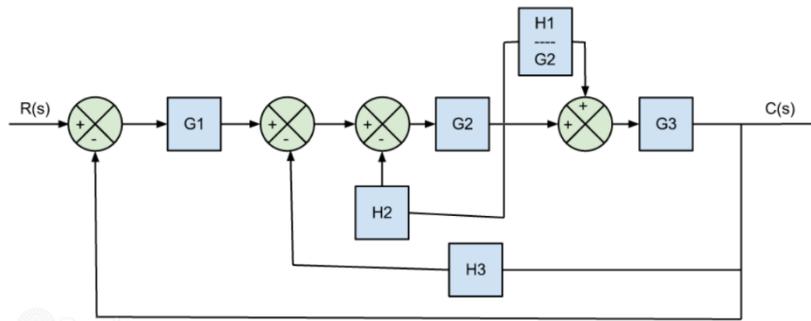


Figura 2.29. Diagrama de bloques PI

Fuente: (Guzmán, 2015)

Elaboración: (Guzmán, 2015)

Un control PI es la estructura más usual, la introducción de la acción integral es la forma más simple de eliminar el error en régimen permanente. Otro caso en el que es común utilizar la estructura PI es cuando el desfase que introduce el proceso es moderado. La acción derivativa, más que una mejora en esta situación es un problema ya que amplifica el ruido existente.

Se recomienda también la acción PI cuando hay retardos en el proceso, ya que, en este tipo de procesos la acción derivativa no resulta apropiada. Un tercer caso en el que se debería prescindir de la acción derivativa es cuando el proceso está contaminado con niveles de ruido elevado. (Guzmán, 2015)

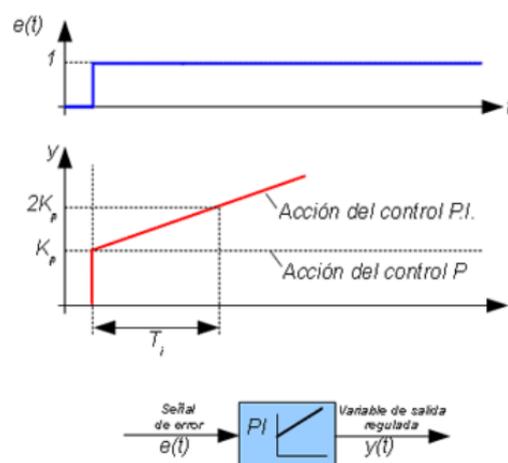


Figura 2.30. Acción controlador PI

Fuente: (Guzmán, 2015)

Elaboración: (Guzmán, 2015)

El controlador PI ideal tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{u(s')}{e(s')} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s'} \right] = \frac{K_c (T_i s' + 1)}{T_i s'} = \frac{K_c s' + K_c / T_i}{s'} \quad (34)$$

Esta función de transferencia puede ser expresada en términos de la ganancia proporcional y de la ganancia integral como se hace normalmente en algunos controladores comerciales. La función de transferencia para el controlador PI queda expresada de la siguiente manera:(Marín, 2005)

$$\frac{u(s')}{e(s')} = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s'} \right] = K_p + \frac{K_i}{s'} \quad (35)$$

2.4 Filtros Pasivos

Los filtros son un conjunto de elementos resistivos, inductivos y capacitivos que forman un circuito resonante capaz de desviar las corrientes armónicas de la fuente ya sea rechazándolas o absorbiéndolas, para el caso de nuestro proyecto los filtros configurados en paralelo son los más utilizados.

2.4.1 Filtro configurado como Pasa Bajas

Un filtro paso bajas rechaza señales de frecuencias superiores a una establecida, de nominada frecuencia de corte (f_c)

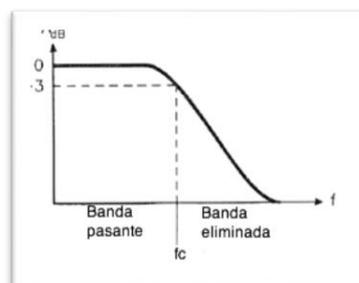


Figura 2.31. Señal Filtro Pasa Bajas

Fuente: (Gonzales-Longatt, 2006)

Elaboración: (Gonzales-Longatt, 2006)

Los filtros paso bajo de primer orden; poseen una función de transferencia de la forma:

$$H(j\omega) = \frac{k}{1 + \frac{j\omega}{\omega_c}} \quad (36)$$

El máximo valor de $|H(j\omega)| = |K|$ y recibe el nombre de ganancia del filtro. Si nos fijamos en el exponente de ω en el denominador es $+1$, de tal manera que $|H(j\omega)|$ decrece con la frecuencia, a esto se le conoce como filtro paso bajo.

La función de la magnitud y la fase en función de la frecuencia resulta:

$$|H(j\omega)| = \frac{|K|}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}} \quad (37)$$

$$\angle H(j\omega) = -\frac{|K|}{K} \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (38)$$

2.4.2 Filtro Pasa Bajas LC

El circuito de la Figura 2.32, corresponde a la configuración LC de un filtro pasa bajas de segundo orden:

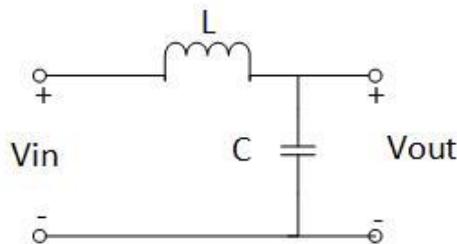


Figura 2.32. Circuito LC Filtro Pasa Bajas

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

La función de transferencia es:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + S^2 LC} \quad (39)$$

En el dominio de la frecuencia:

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - \omega^2 LC} \quad (40)$$

La pulsación de corte es:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (41)$$

La frecuencia de corte es:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (42)$$

Si $\omega \ll \omega_c$ el término $\omega^2 LC$ es despreciable y $G \approx 1$, en cuanto al desfase entre la entrada y la salida, resulta cercano a 0° .

Si $\omega \gg \omega_c$ el término $\omega^2 LC$ es dominante y la ganancia se expresa mediante la ecuación:

$$G = - \frac{1}{\omega^2 LC} \quad (43)$$

El desfase entre la entrada y la salida tiende a 180° debido a la inversión de signo.

Para ω en el rango de ω_c se produce **el efecto de resonancia**, el denominador tiende a cero y, por tanto, la ganancia al infinito.

En la práctica las resistencias parásitas en el filtro y el efecto de la carga en la salida, que se supone fundamentalmente resistiva, provocan que dicha respuesta infinita teórica no se cumpla, sin embargo, sí se puede tener una ganancia considerable en el punto de resonancia.

2.5 Filtro Activo de Potencia

Un filtro activo de potencia (FAP) es un dispositivo eléctrico basado en el inversor de voltaje, y adaptado para eliminar distorsión armónica, además compensa total o parcialmente la energía reactiva, equilibra las corrientes de fase y cancela la corriente del neutro.

Comparado con los sistemas de compensación de distorsiones armónicas, posee una ventaja y es su adaptabilidad a la variación en la carga conectada sin tener que alterar el diseño.

Un FAP se caracteriza por contar con cinco bloques: almacenamiento de energía, dispositivos de potencia para el proceso de conmutación, acondicionamiento de señal, controlador, y enlace de corriente a la línea.

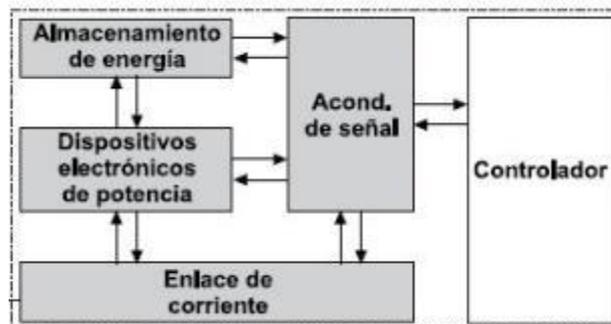


Figura 2.33. Diagrama de flujo FAP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

El bloque de almacenamiento y los dispositivos electrónicos de potencia forman al convertidor de potencia, mediante la conmutación de los dispositivos electrónicos se controla el flujo de energía entre el elemento almacenador y el enlace de corriente. Los dispositivos de potencia se comportan como conmutadores permitiendo el flujo bidireccional.

En cuanto al enlace de corriente, se conforma generalmente por una inductancia (bobina) que permite la transferencia de energía entre el convertidor y la red.

El controlador compara la corriente distorsionada y una corriente de referencia para obtener la corriente de compensación, esta se muestrea para obtener las señales de activación de los dispositivos de potencia, realiza un análisis del factor de potencia, y también garantiza que el

voltaje en el dispositivo de almacenamiento no supere su punto máximo, logrando así mantenerlo en un punto de operación adecuado.

El sistema de acondicionamiento de señal nos permite tomar las señales requeridas para el controlador y en este punto se transforman las señales de corriente y voltaje a niveles adecuados ya sea disminuyendo o amplificando su nivel para que sean detectados, comparados y modulados.

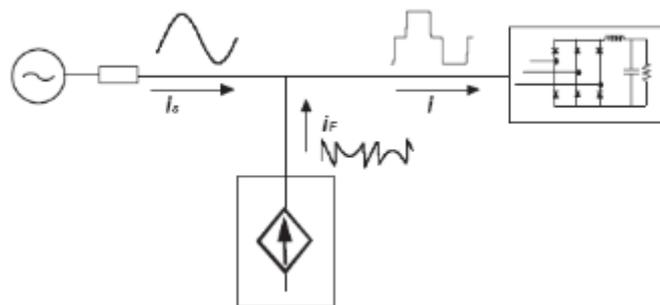


Figura 2.34. Diagrama de flujo FAP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

2.5.1 Convertidores de Potencia

La estructura del convertidor de potencia depende únicamente de cual sea el dispositivo de almacenamiento de energía, un condensador o una bobina, dicho esto tenemos:

Convertidor con fuente de intensidad controlada, el almacenamiento en este caso se basa en una bobina, es el más robusto pero el control de corriente se torna dificultoso, además diseñar bobinas que cumplan con este fin resulta costoso y su tamaño se torna una limitante.

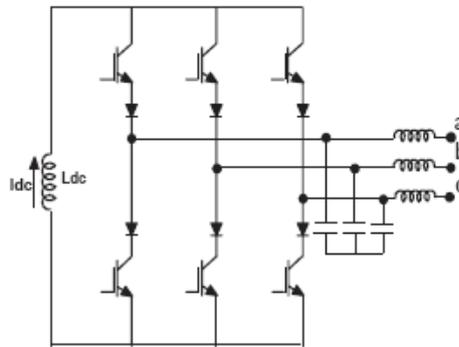


Figura 2.35. Esquema convertidor con fuente de intensidad controlada
 Fuente: Cristian Ortiz Celi
 Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Convertidor con fuente de tensión controlada, esta configuración usa un condensador como dispositivo de almacenamiento, estos guardan la energía (voltaje) haciendo que el control sea más sencillo, este convertidor es más eficiente, pues su diseño es más simple, es menos costoso fabricarlo y su tamaño es conveniente.

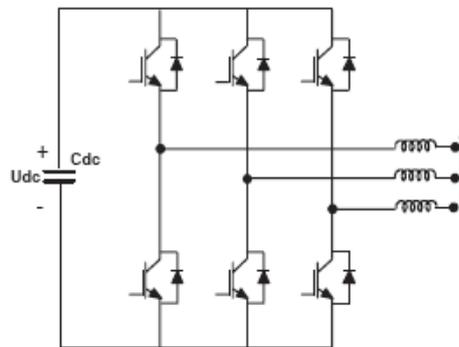


Figura 2.36. Esquema convertidor con fuente de tensión controlada
 Fuente: Cristian Ortiz Celi
 Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Ambos convertidores necesitan un dispositivo para enlazarse a la línea, este enlace generalmente se realiza mediante bobinas de acople, en el caso del convertidor con fuente de intensidad se necesita adicionar capacitores para aislar la resonancia causada por el dispositivo de almacenamiento.

En cuanto al convertidor con fuente de tensión como usa una bobina de acople para realizar el enlace, este se convierte en una fuente de intensidad.

2.5.2 Topologías de conexión de los FAP

2.5.2.1 FAP conectado en serie

Esta configuración se usa para aislar la fuente de alimentación y carga comportándose como una fuente de tensión dependiente de la tensión de alimentación regulando de esta manera los armónicos producidos por la carga.

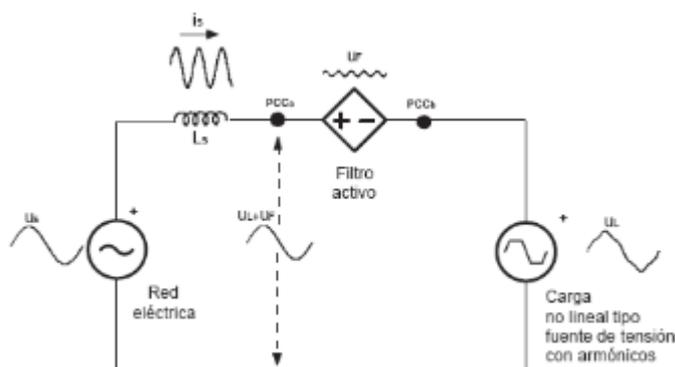


Figura 2.37. Circuito equivalente FAP en serie

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Cuando la carga genera distorsiones armónicas de corriente se debe adicionar un filtro pasivo en paralelo, ya que el filtro activo se comporta como un circuito abierto, la corriente de la carga se verá obligada a pasar a través del filtro pasivo.

Para el diseño del FAP se debe considerar dar soporte a la corriente de la carga, además debe estar protegido para que no le afecte una posible corriente de corto en la carga.

2.5.2.1 FAP conectado en paralelo

En esta configuración el filtro simula una fuente dependiente que genera corriente para compensar las corrientes armónicas producidas en la carga.

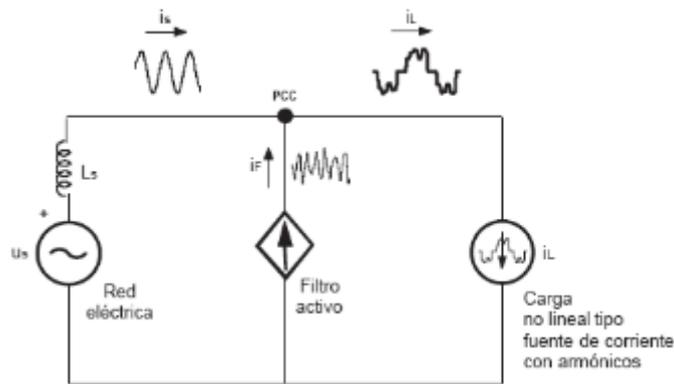


Figura 2.38. Circuito equivalente FAP en paralelo

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Para inyectar una corriente que compense la generada por la carga se debe hacer una medición de la corriente instantánea de la carga y compararla con la sinusoidal pura generada por la fuente y obtener el complemento.

La configuración en paralelo se diseña también para la corriente de la carga, pero únicamente para compensación, se debe proteger también para casos de cortocircuito, aunque este fenómeno no le afectara en la misma medida que al filtro conectado en serie.

2.5.3 Configuración del filtro activo

Para configurar el filtro activo de potencia se debe considerar a qué tipo de red se conectará, ya sea, monofásica, bifásica o trifásica.

2.5.3.1 Conexión monofásica en medio puente o una sola rama

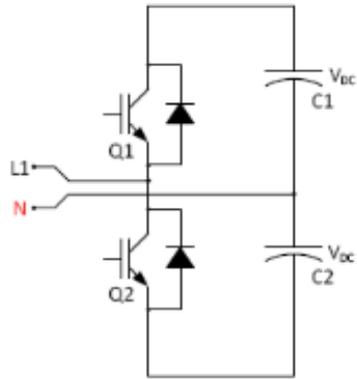


Figura 2.39. Conversor en configuración de medio puente

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Es la configuración más sencilla y la más usada, consta de dos dispositivos eléctricos de potencia y dos capacitores. En este caso la compensación se realiza solo a los armónicos de la línea. Aunque no se corrigen los efectos que circulan por el neutro estos se reducen.

2.5.3.2 Conexión monofásica de puente completo o dos ramas

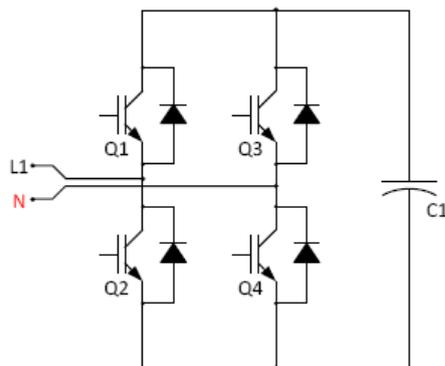


Figura 2.40. Conversor en configuración de puente completo

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Esta configuración consta de cuatro dispositivos de potencia, dos para la línea, dos para el neutro y solo un dispositivo de almacenamiento. Este filtro compensa distorsiones tanto en la línea como en el neutro.

Si analizamos la conmutación de la rama superior, tenemos un circuito en serie RLC conectado en paralelo con la fuente de alimentación y la carga.

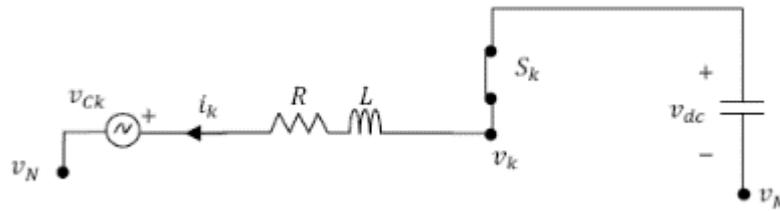


Figura 2.41. Diagrama activación del dispositivo de potencia en el convertidor

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

El voltaje entre el punto de unión y neutro queda determinado por

$$V_r = R i_k + \frac{L di_k}{dt} + V_{dc} \quad (44)$$

Donde:

- V_r = Voltaje en la rama del filtro
- R = Resistencia de la bobina
- i_k = Corriente de la rama en el instante k
- L = Inductancia
- V_{dc} = Voltaje en el banco del capacitor
- di_k = Derivada de la corriente en el instante k

2.5.4 Selección voltaje DC

El voltaje DC asociado con las funciones de conmutación del inversor son las variables de control que logran que la corriente entregada por el FAP siga dentro del rango de referencia.

Tomando esto en consideración el voltaje en el lado DC debe ser mayor al pico de voltaje del lado AC (V_f) del FAP.

2.5.5 Métodos de control para compensadores activos

Los dispositivos electrónicos, poseen numerosas cargas no lineales que han sido frecuentes desde la llegada de la electrónica de potencia. Estos dispositivos han aportado mayor eficiencia y flexibilidad bajo varios rangos de aplicación, tanto en corriente alterna como en corriente directa. Sin embargo, la contaminación de armónicos creada por la excesiva conmutación de estos dispositivos en la red se traduce en problemas preocupantes.

Para el propósito de compensación de armónicos, corrientes reactivas y desbalanceadas, se han propuesto varias topologías de acondicionamiento y sus respectivas estrategias de control. Estos dispositivos generalmente se los conoce como Filtros Activos de Potencia, Filtros Pasivos de Potencia, y Filtros Híbridos de Potencia. En cuanto a las estrategias de control, se puede mencionar la teoría de potencia instantánea (PQ), el método de referencia síncrono (DQ), y la teoría de potencia conservativa por sus siglas en inglés (CPT). (Mortezaei, et al., 2014)

La teoría PQ y el algoritmo de control DQ, han sido ampliamente implementados en el acondicionamiento de potencia, especialmente en las últimas dos décadas. La teoría de potencia conservativa se considera una novedad y una alternativa para el diseño y control de compensadores activos. (Mortezaei et al., 2014)

En este trabajo el FAP que se está proponiendo está basado en la teoría PQ, desarrollada por el profesor Akagi et al. Y se ha decidido direccionar hacia esta teoría pues existe más respaldo teórico y experimental el mismo que está documentado y referenciado en este proyecto. Mencionando esto a continuación se describe la teoría PQ y sus fundamentos matemáticos.

2.5.5.1 Controlador Filtro Activo de Potencia

En 1983 el profesor Akagi et al. Propusieron la Teoría General de la Potencia Reactiva Instantánea en circuitos trifásicos; además la Teoría de Potencia Reactiva Instantánea o teoría $p - q$. Fue desarrollada inicialmente para sistemas trifásicos a tres hilos y una breve mención sobre sistemas con tres fases y neutro. Esta teoría se basa en los valores instantáneos

provenientes de sistemas trifásicos con o sin línea de neutro, y es válido tanto para estado estático o transitorio. La teoría p-q consiste en la transformación algebraica (Transformada de Clarke) de los valores trifásicos de voltaje y corriente en las coordenadas a-b-c; hacia las coordenadas α - β -0, acorde a las expresión (26), donde x puede ser voltajes (v) o corrientes (i). (Akagi & Kanazawa, 1983)

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (45)$$

Luego de aplicar la transformación, los componentes de la teoría p-q son calculados mediante las expresiones (46-48), donde p es la potencia instantánea real, q es la potencia instantánea imaginaria (por definición) y p0 es la potencia de secuencia 0 instantánea.

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (46)$$

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta \quad (47)$$

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (48)$$

Normalmente, sólo el promedio del valor de potencia real (p) es deseable, los otros componentes de potencia se pueden compensar mediante el FAP. Para calcular las corrientes de referencia que el FAP debería inyectar es necesario separar los componentes requeridos de los no requeridos. Los componentes no requeridos, p_x y q_x , son usados para determinar las corrientes de compensación en las coordenadas α - β -0, mediante las expresiones (49, 50).

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ q_x \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$i_{c0} = i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c) \quad (50)$$

Las corrientes de compensación en las coordenadas a-b-c son determinadas aplicando la transformada inversa de Clarke a las corrientes que se encuentran en las coordenadas α - β -0, se demuestra en la ecuación (51).

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Terminado el proceso de cálculos sólo una de las tres corrientes de referencia es usada para controlar el inversor. Aparte de los componentes de potencia instantáneos definidos por la teoría p-q, existe un componente denominado *preg*, el mismo que es usado para regular el voltaje del capacitor en el lado DC del FAP. La etapa de regulación se completa con el controlador proporcional y el error entre el voltaje de referencia (V_{ref}) y el voltaje medido en el lado DC del inversor (V_{DC}). El componente *preg* se incluye en el valor de *px* y se calcula mediante la ecuación (52)

$$P_{reg} = k_p (V_{ref} - V_{DC}) \quad (52)$$

2.5.6 Diagrama de bloques del Sistema

A continuación, en la Fig. 2.38 se presenta el diagrama de bloques del sistema híbrido, el mismo que incluye las partes principales etiquetadas para una mejor comprensión. Podemos destacar en este diagrama, el arreglo de paneles solares, la etapa de control mediante algoritmo MPPT, el inversor de potencia que convierte la energía generada por la fuente renovable en CD hacia CA, y de esta manera poder ser inyectada a la red y hacia la carga en el punto PCC. Se destaca también la etapa de almacenamiento en batería para suministrar energía al sistema incluso cuando el recurso renovable no esté disponible.

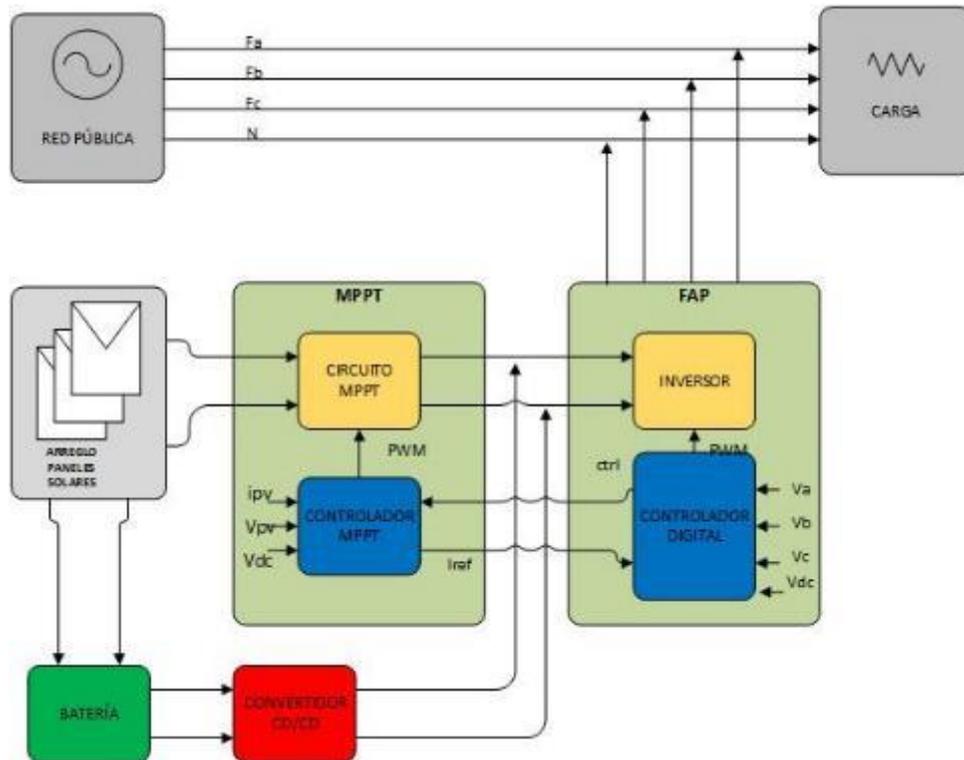


Figura 2.42. Diagrama de bloques Sistema Híbrido

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

CAPITULO III

DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO SIN FAP

3.1 Panel solar

El primer bloque del sistema es el arreglo de paneles solares que son la fuente de generación de energía, cabe destacar que en el primer escenario de simulación se inyecta una irradiación solar constante igual a 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C , además no incluye el almacenamiento de energía en el banco de baterías; mencionamos también que este capítulo describe la simulación del sistema sin en filtro activo de potencia (FAP), para posterior realizar una comparativa con el sistema que ya incluye la etapa de filtrado y almacenamiento de energía.

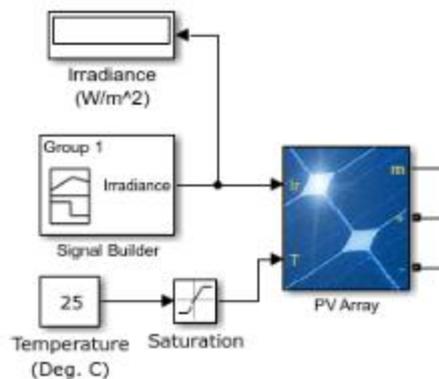


Figura 3.1. Bloque de panel solar en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

3.1.1 Características del panel solar

- Potencia máxima: 213.15 W
- Voltaje de circuito abierto: 36.3 V
- Voltaje en el punto máximo de potencia: 29 V
- Coeficiente de temperatura del voltaje en circuito abierto: -0.32399
- Celdas por módulo: 60
- Corriente en cortocircuito: 7.84 A
- Corriente en el punto máximo de potencia: 7.35 A
- Coeficiente de temperatura de la corriente en cortocircuito: 0.026995

3.2 Control MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Este algoritmo usado para garantizar la máxima potencia proveniente del recurso renovable a través del panel solar ya se describió en el capítulo anterior y sus características de simulación se presentan a continuación

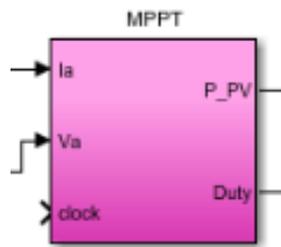


Figura 3.2. Bloque algoritmo MPPT en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En la Figura 3.2 podemos apreciar el bloque en Simulink del algoritmo MPPT y se destaca las variables de entrada necesarias para ser controladas estas son, la corriente y voltaje generadas por el panel solar y a la salida tenemos la potencia del panel solar y el trabajo realizado por este bloque de control. Dentro del bloque es necesario destacar que se incluye un bloque denominado "Matlab Function", que nos permite escribir el código necesario para ejecutar el algoritmo MPPT de tipo observación y perturbación que ya se mencionó en el capítulo anterior y es precisamente el elegido para operar dentro de nuestro sistema. En la figura 3.3 se puede observar el bloque donde se genera el algoritmo.

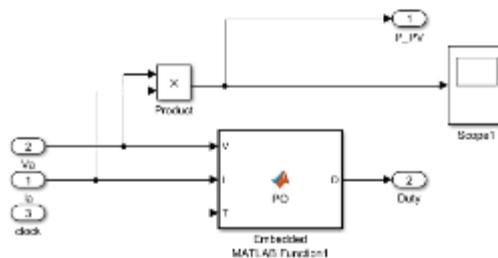


Figura 3.3. Bloque Matlab Function, algoritmo MPPT en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

3.3 Convertidor CC – CC de tipo Buck – Boost

Este tipo de convertidor nos permite obtener un voltaje a su salida mayor o menor que el voltaje de entrada, esto se puede conseguir ya que este tipo de convertidor tiene una característica de conmutación entre dos distintos tipos de operación tal como su nombre lo indica, si se establece en tipo Buck se puede obtener a la salida un voltaje entre 0V y un voltaje inferior al voltaje de entrada; y por otro lado si se establece en tipo Boost, se puede obtener un voltaje a la salida igual al voltaje de entrada o superior al mismo, la descripción más detallada de este tipo de convertidor se puede encontrar en el capítulo II de este trabajo.

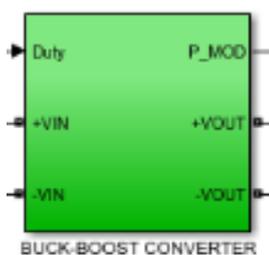


Figura 3.4. Bloque Buck-Boost converter en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En la figura 3.4 se puede apreciar el bloque usado en nuestro sistema y se evidencia las variables de entrada y salida que posee.

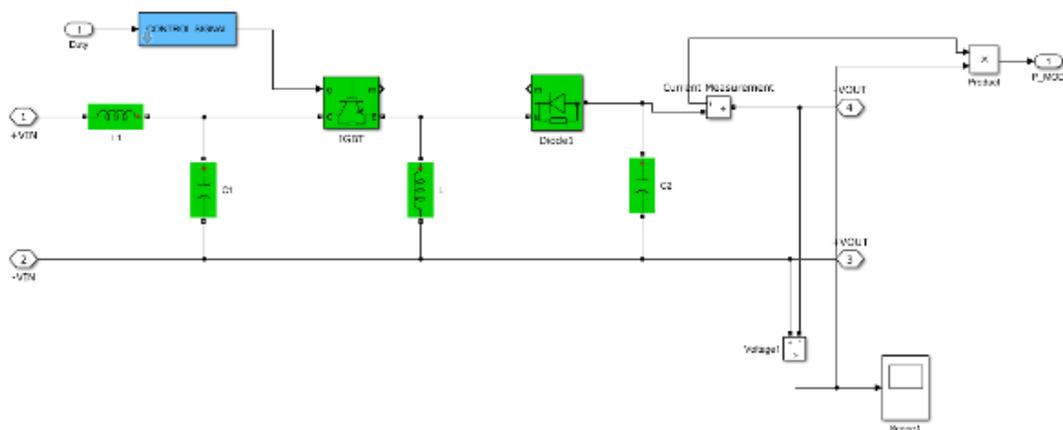


Figura 3.5. Configuración bloque Buck-Boost converter en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En la figura 3.5 se muestra la configuración del convertidor y a continuación se describe sus variables tanto de entrada como de salida:

- Duty: Esta variable de entrada toma los valores obtenidos del bloque de control MPPT, para ser aplicados a una señal de control que tiene una frecuencia de 1000 Hz y un ciclo de operación de 0.5.
- +Vin: Esta variable recibe los datos de voltaje positivo provenientes del arreglo de paneles solares y se inyecta al circuito del convertidor.
- -Vin: Esta variable recibe el voltaje negativo proveniente del arreglo de paneles solares y se inyecta al circuito del convertidor.
- P_Mod: Nos entrega a la salida del bloque la potencia resultante.
- +Vout: Nos devuelve el voltaje positivo luego del proceso de conversión
- -Vout: Nos devuelve el voltaje negativo posterior al proceso de conversión.

La descripción de los componentes que conforman al convertidor de tipo Buck – Boost se realiza a continuación y se evidencian en la figura 3.5:

- Inductor L1: $1000e^{-6} H$
- Capacitor C1: $2000e^{-6} F$
- IGBT:
 - Resistencia: $0.00001 Ohms$
 - Tensión directa: $2.5 V$
 - Resistencia de conmutación: $1e^5 Ohms$

- Inductor L: $47e^{-6} H$
- Diodo 1:
 - Resistencia: $0.00001 Ohms$
 - Tensión directa: $0.8 V$
 - Resistencia de conmutación: $1e^4 Ohms$
 - Capacitancia de conmutación: $1e^{-4} F$
- Capacitor C2: $2000e^{-6} F$

3.4 Carga no lineal

A continuación, se realiza la descripción de la carga no lineal inyectada a la red, la misma que simula los escenarios que se pueden presentar en la red causada por artefactos conectados a la misma. En la figura 3.6 se observa el bloque en Simulink correspondiente a la carga no lineal y como el sistema es aplicado a un sistema de red pública trifásico, se evidencia también esta característica.

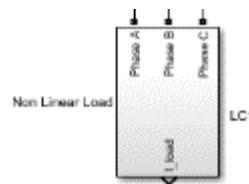


Figura 3.6. Bloque carga no lineal en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Para realizar la descripción de este bloque es necesario observar cómo está constituido y precisamente esto se presenta a continuación en la figura 3.7

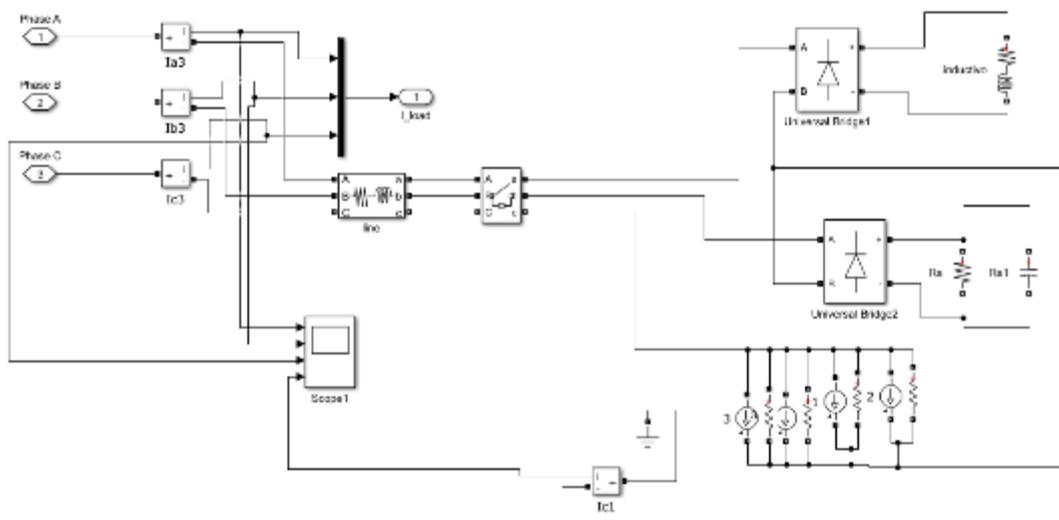


Figura 3.7. Configuración carga no lineal en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Podemos observar tres fases, las mismas que se han denominado: Phase A, Phase B, Phase C. Se ha inyectado una perturbación en cada una de estas de la siguiente manera:

- Phase A: Como se aprecia en la figura 3.7 en la primera fase se agrega una carga inductiva para perturbar la red, con las siguientes características:
 - Universal Bridge 1: Este puente de diodos consta de 2 brazos y al cual se conecta un circuito RL en serie con los siguientes componentes:
 - Resistor: $3\ \text{Ohms}$
 - Inductor: $5e^{-3}\ \text{H}$
- Phase B: En la segunda fase se incluye una carga resistiva con las siguientes características:
 - Universal bridge 2: Este puente de diodos posee 2 brazos y está conectado a un circuito RC en paralelo con los siguientes componentes:
 - Resistor: $3\ \text{Ohms}$
 - Capacitor: $1000e^{-6}\ \text{F}$
- Phase C: En la tercera fase se procede a perturbar la red mediante la inyección de armónicos, con las siguientes características:
 - Primer armónico:
 - Amplitud pico: $50\ \text{A}$
 - Frecuencia: $60\ \text{Hz}$

- Resistor: 1000000000 *Ohms*
- Segundo armónico:
 - Amplitud pico: 17 *A*
 - Frecuencia: 180 *Hz*
 - Resistor: 1000000000 *Ohms*
- Tercer armónico:
 - Amplitud pico: 10 *A*
 - Frecuencia: 300 *Hz*
 - Resistor: 1000000000 *Ohms*
- Cuarto armónico:
 - Amplitud pico: 7 *A*
 - Frecuencia: 420 *Hz*
 - Resistor: 1000000000 *Ohms*

3.5 Filtro LC Pasa Bajas

Seguido se presenta la configuración del filtro pasa bajas de tipo LC usado en nuestro proyecto y que se encuentra conectado en paralelo con cada fase del sistema en el punto PCC. En la Figura 3.8 se puede observar el circuito realizado en Simulink de Matlab.

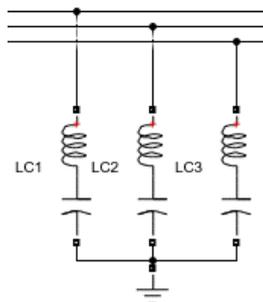


Figura 3.8. Configuración Filtro LC en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

El funcionamiento y todas sus características se encuentran explicados en el capítulo II de este trabajo. Para realizar el cálculo de los valores de L y C se usó la ecuación (42), correspondiente a la frecuencia de corte que en nuestro caso la hemos establecido en 200Hz y un valor de inductancia de 5mH, realizando el despeje en la ecuación (42) hemos obtenido el valor de capacitor a usar que es de $126.6e^{-6} F$.

3.6 Simulación Sistema híbrido sin FAP

A continuación, se presenta las capturas de las simulaciones realizadas en distintos escenarios y configuraciones del sistema híbrido.

Escenarios y configuraciones del sistema híbrido:

- Sistema híbrido sin FAP, sin batería y radiación solar constante
- Sistema híbrido sin FAP, con batería (duty cycle: Carga = 0.1) y radiación solar variable
- Sistema híbrido sin FAP, con batería (duty cycle: Descarga = 0.9) y radiación solar variable

3.6.1 Características de simulación

- Sin batería
- Radiación solar constante
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 4 minutos
- Factor de potencia: -0.9324
- Fase a:
 - Magnitud: 57.61
 - Ángulo: 112.4
- Fase b:
 - Magnitud: 60.61
 - Ángulo: -7.841
- Fase c:
 - Magnitud: 58.92

- Ángulo: -130.

3.6.1.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

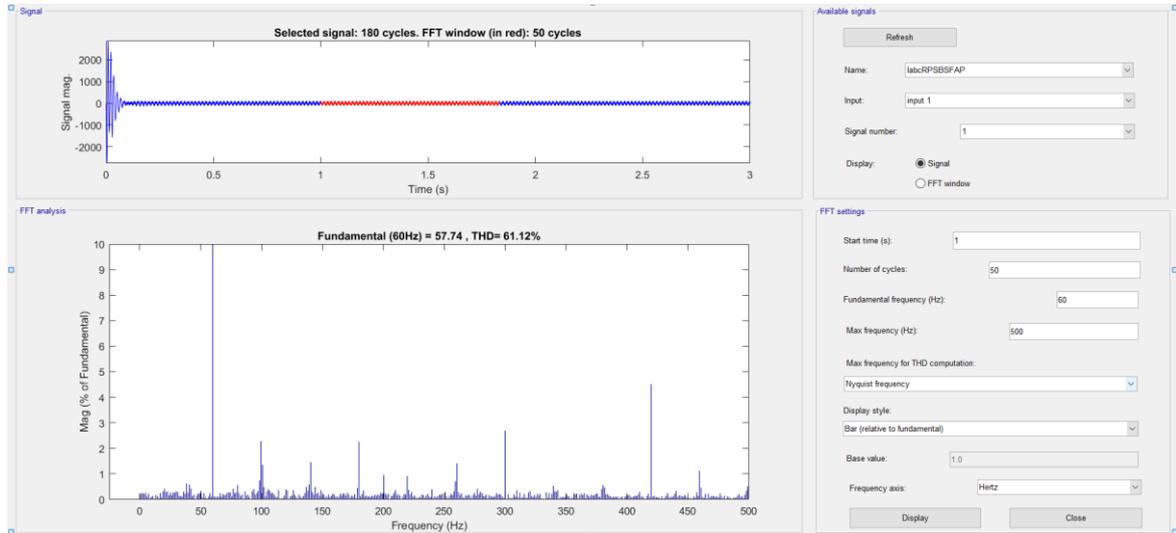


Figura 3.9. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

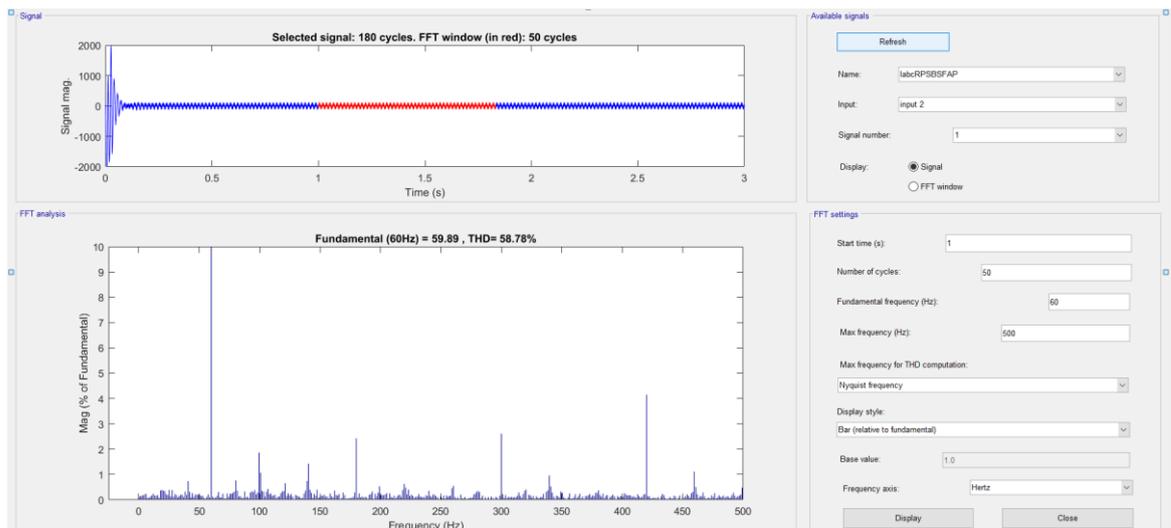


Figura 3.10. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

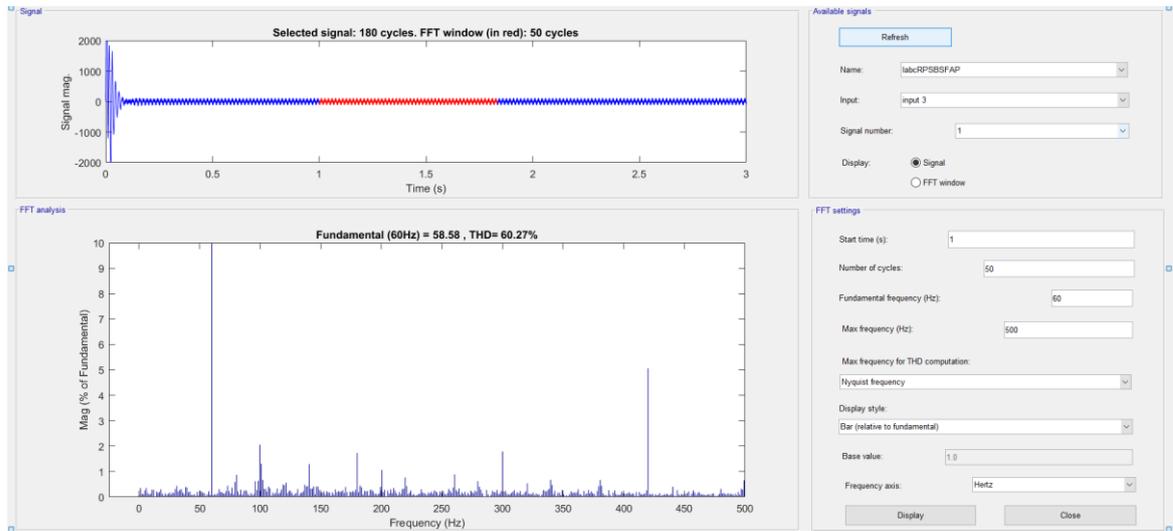


Figura 3.11. Señal corriente I_c RP y THD I_c

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

$$\text{POTENCIA } P = -3.511e^4$$

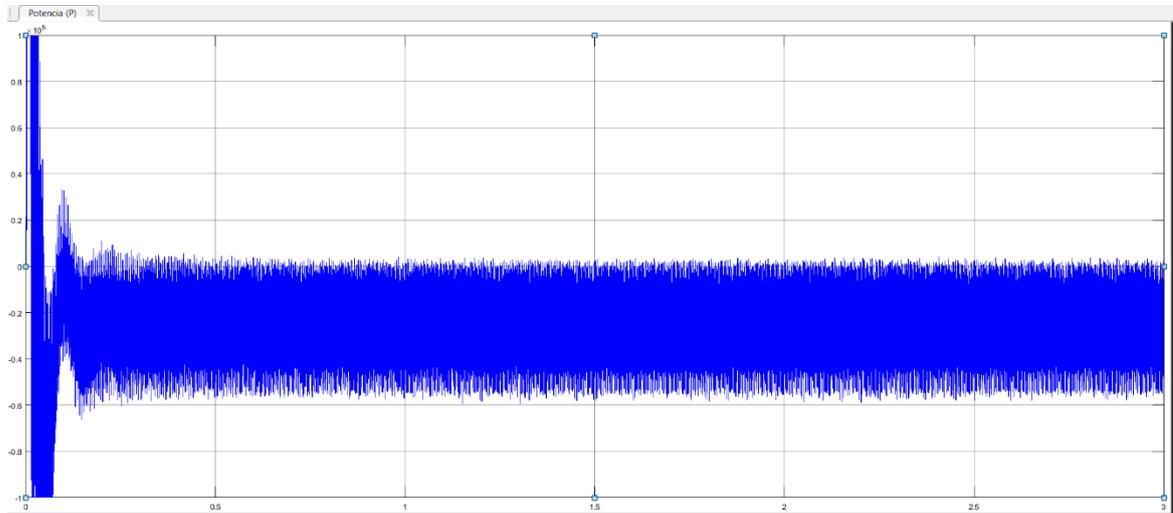


Figura 3.12. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = $1.361e^4$

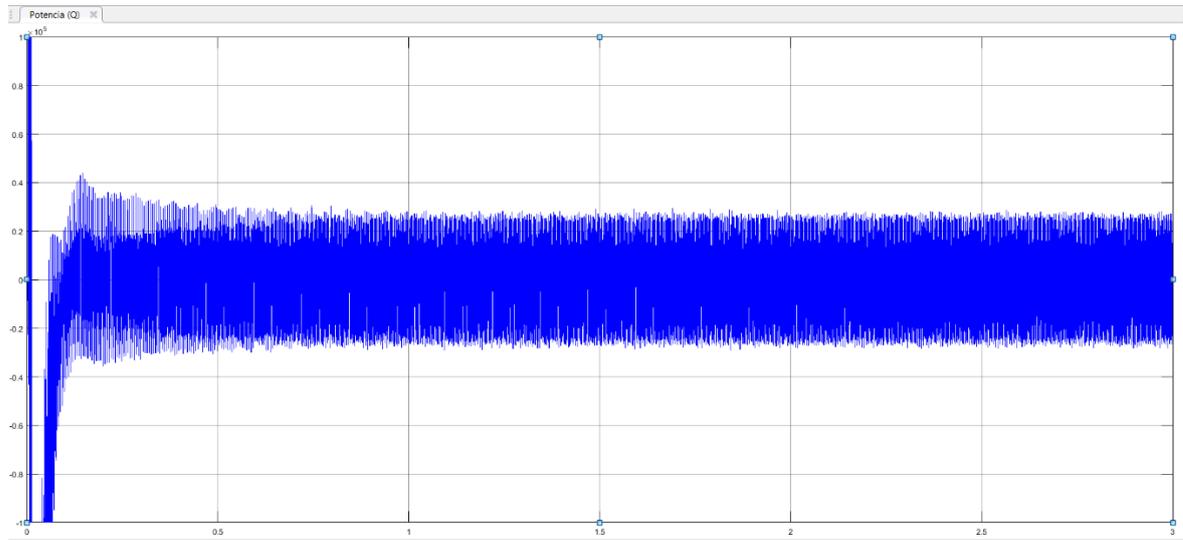


Figura 3.13. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

3.6.2 Características de simulación

- Con Batería
- Duty cycle: Carga
- Radiación solar variable
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 4:57.2 minutos
- Factor de potencia: -0.9915
- Fase a:
 - Magnitud: 101.9
 - Ángulo: 112.7
- Fase b:
 - Magnitud: 121.4
 - Ángulo: -4.629
- Fase c:
 - Magnitud: 117.2
 - Ángulo: -134.1

3.6.2.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

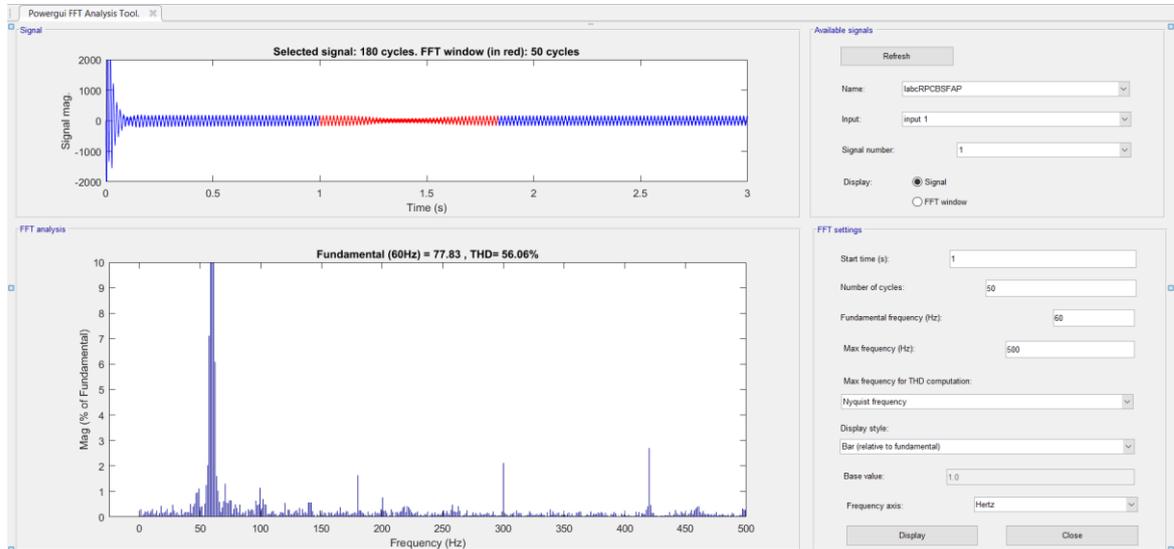


Figura 3.14. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

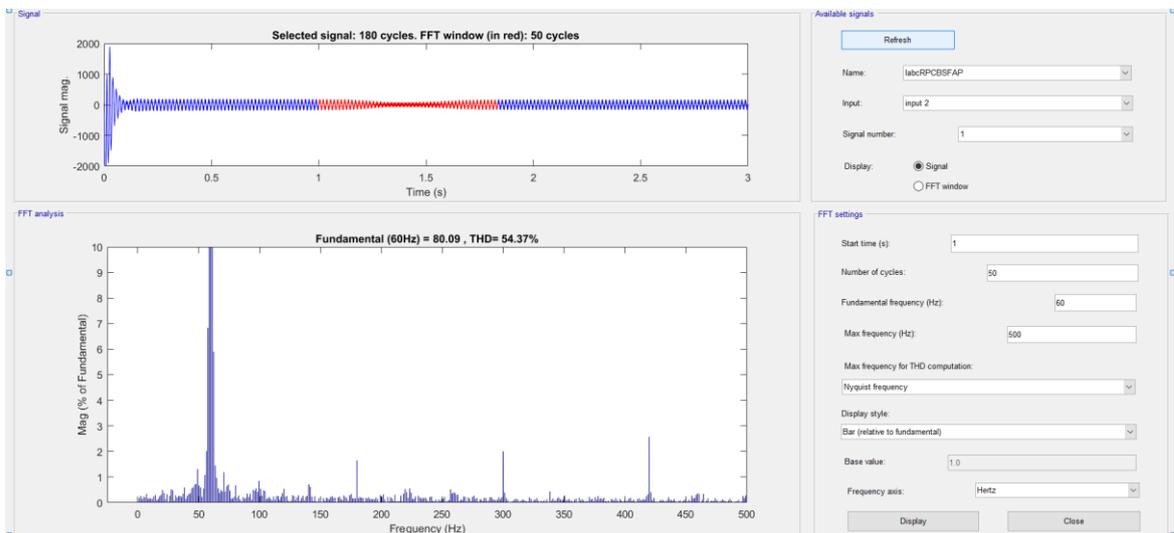


Figura 3.15. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

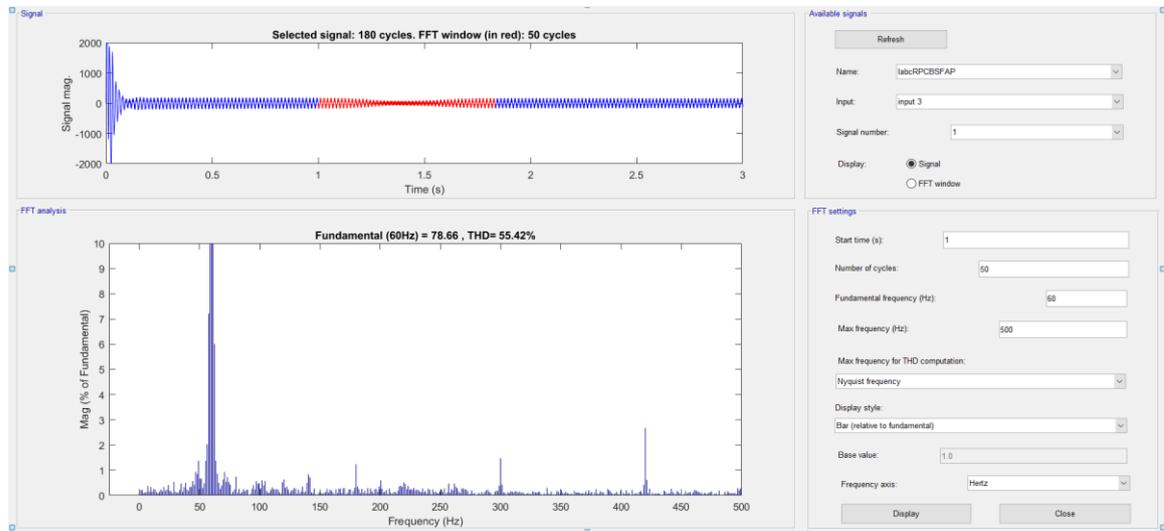


Figura 3.16. Señal corriente I_c RP y THD I_c

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

$$\text{POTENCIA } P = -5.442e^4$$

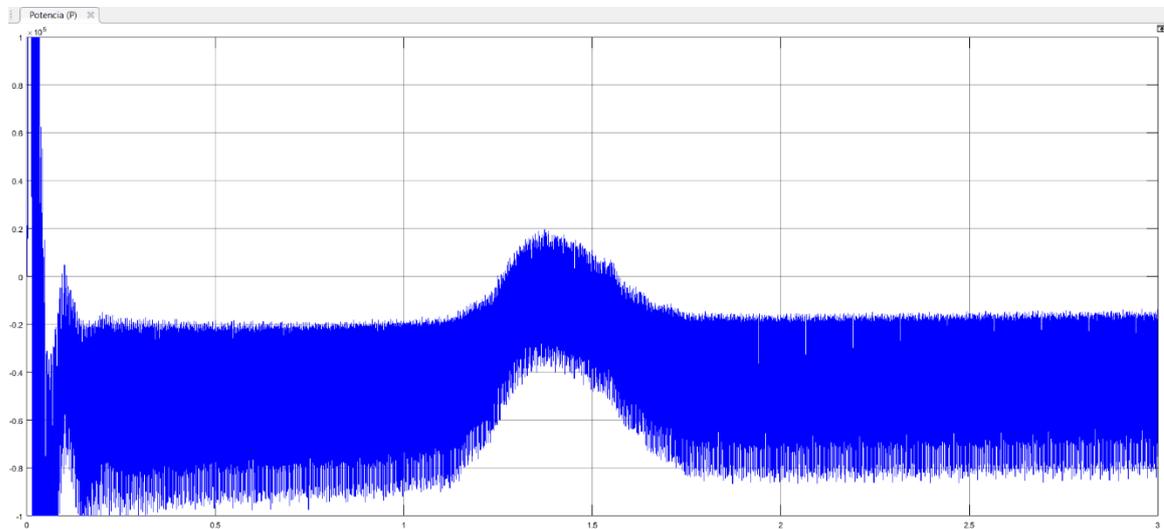


Figura 3.17. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = 7123

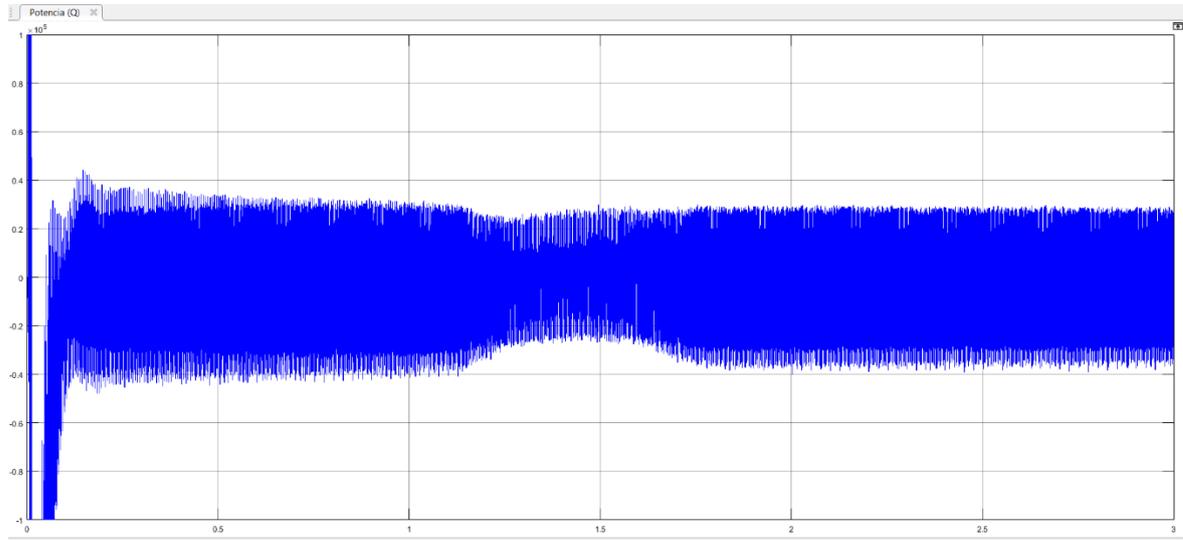


Figura 3.18. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

3.6.3 Características de simulación

- Con Batería
- Duty cycle: Descarga
- Radiación solar variable
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 4:52.75 minutos
- Factor de potencia: 0.986
- Fase a:
 - Magnitud: 469.6
 - Ángulo: -67.94
- Fase b:
 - Magnitud: 470.4
 - Ángulo: 172
- Fase c:
 - Magnitud: 469.9
 - Ángulo: 51.97

3.6.3.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

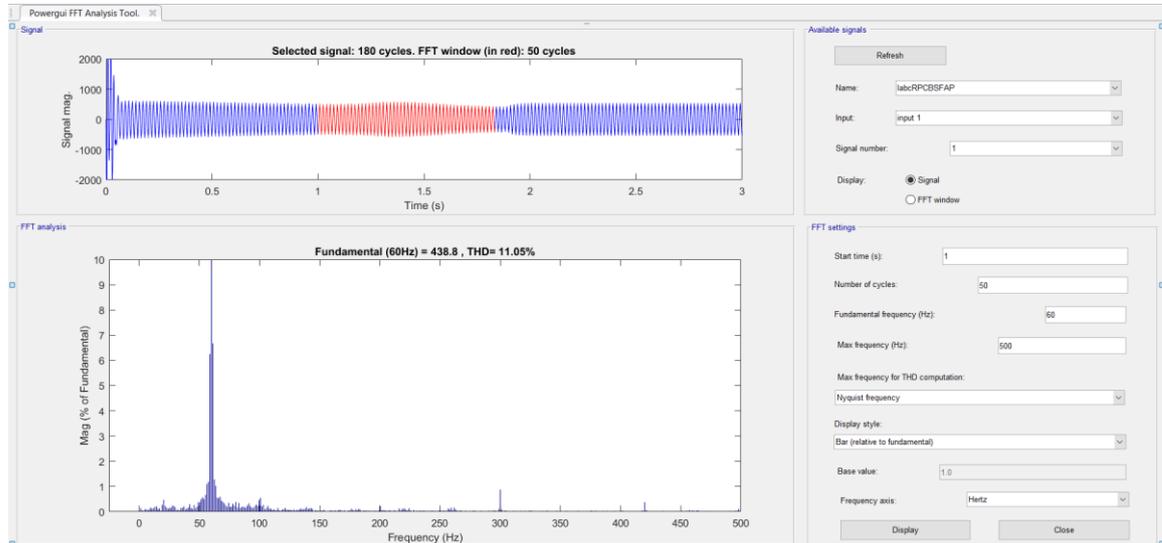


Figura 3.19. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

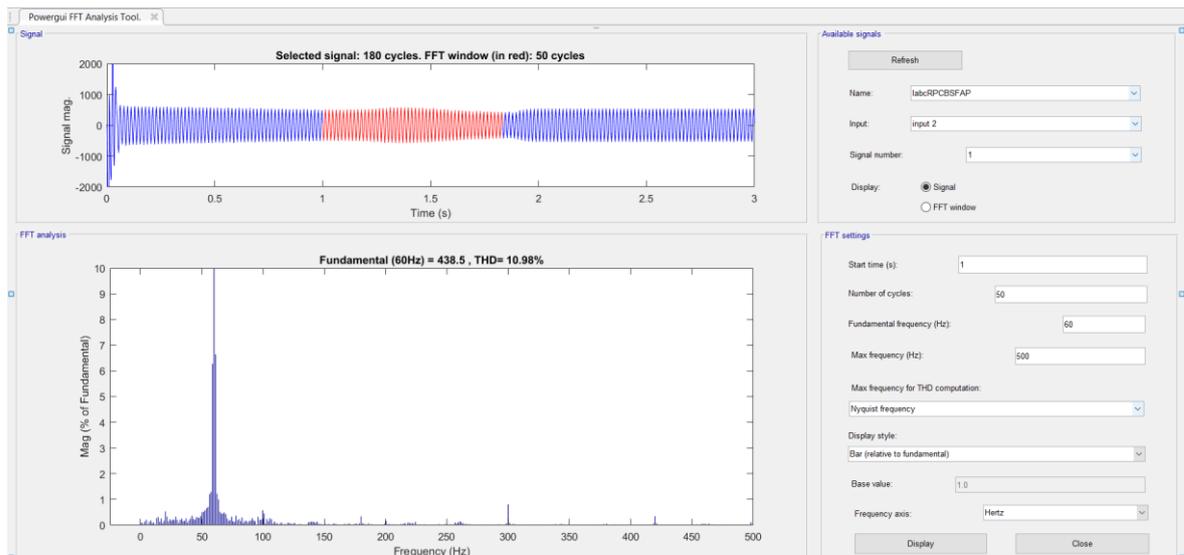


Figura 3.20. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

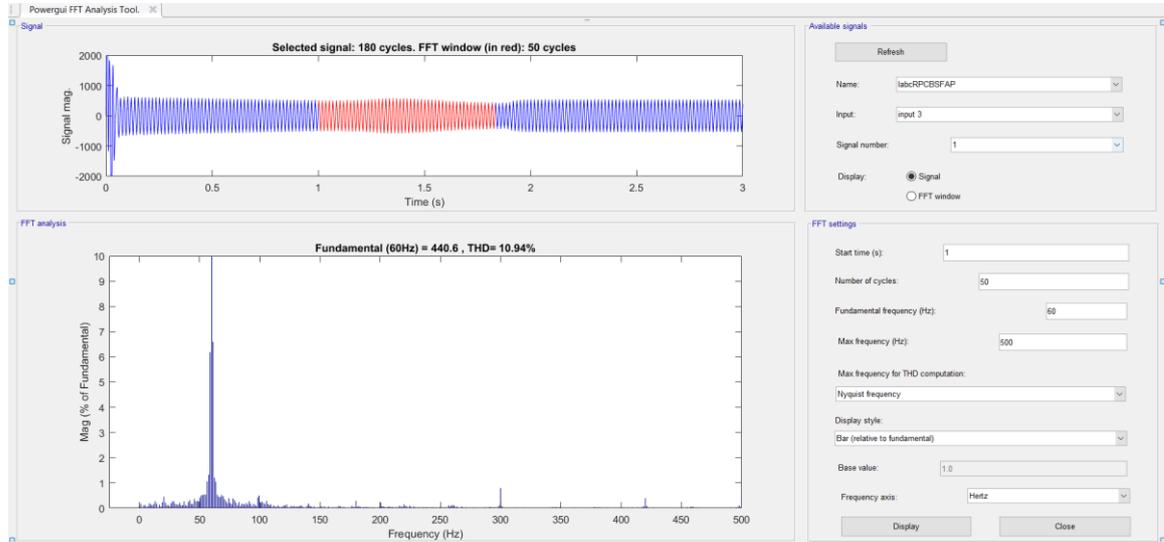


Figura 3.21. Señal corriente Ic RP y THD Ic

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA P = $1.705e^5$

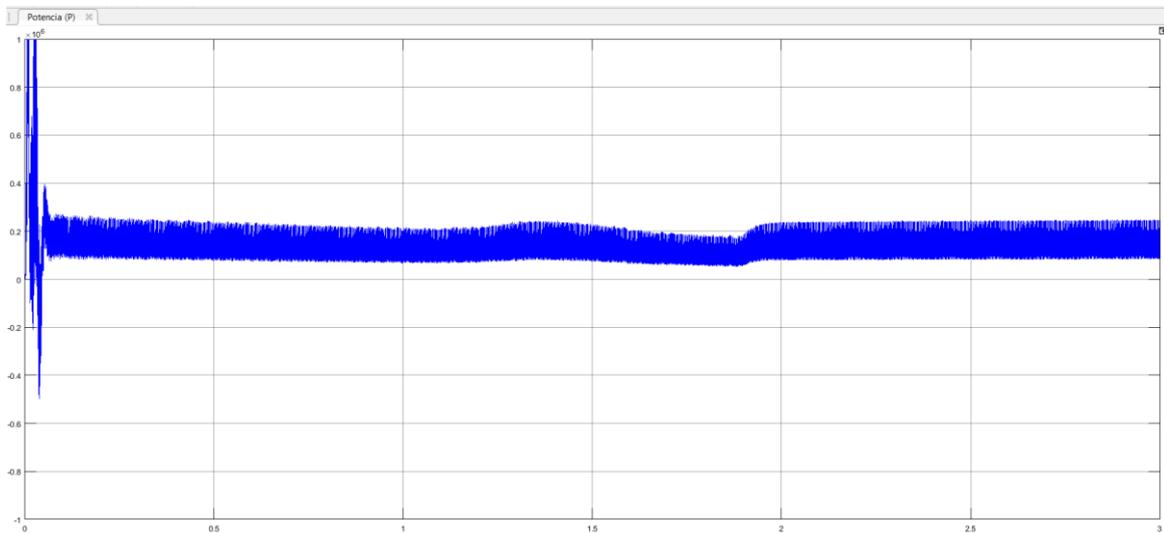


Figura 3.22. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = $2.882e^4$

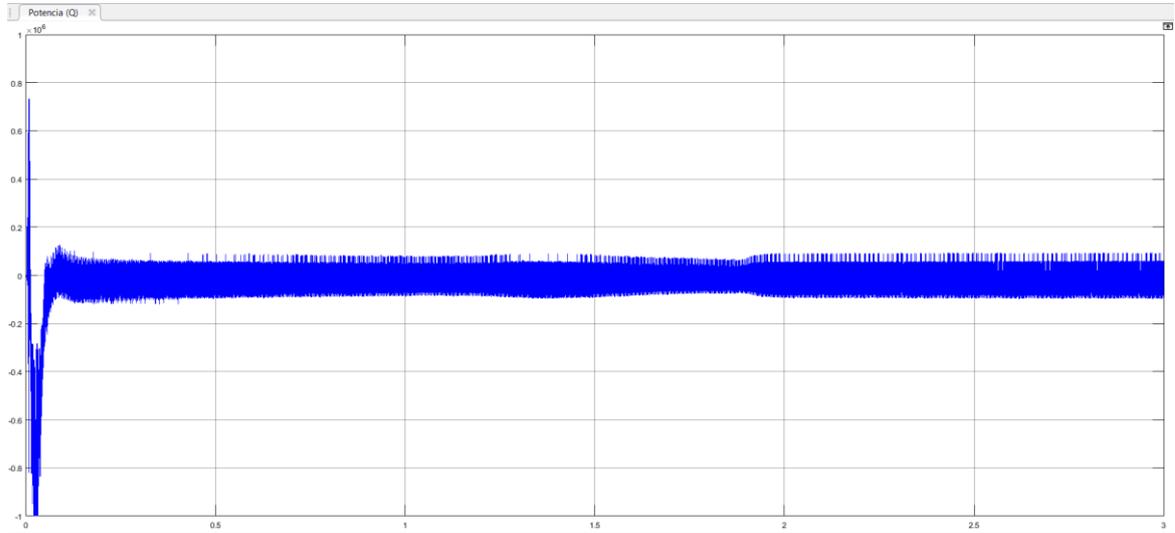


Figura 3.23. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

CAPITULO IV

DESCRIPCIÓN DEL FILTRO ACTIVO DE POTENCIA (FAP), SIMULACIÓN DEL SISTEMA HÍBRIDO Y COMPARACIÓN CON EL SISTEMA SIN FAP

4.1 Filtro Activo de Potencia (FAP)

Un filtro activo de potencia (FAP) es un dispositivo eléctrico basado en el inversor de voltaje, y adaptado para eliminar distorsión armónica, además compensa total o parcialmente la energía reactiva, equilibra las corrientes de fase y cancela la corriente del neutro. En el capítulo II se puede encontrar el fundamento teórico y matemático de este filtro de manera más profunda; a continuación, se realiza una descripción del FAP desarrollado en Simulink de Matlab. (Mathworks, 2016)

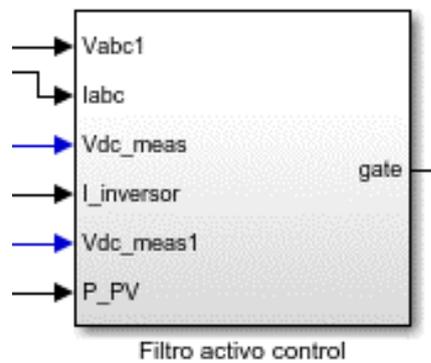


Figura 4.1. Bloque FAP en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En la figura 4.1 se observa el bloque creado en Simulink del FAP, donde se puede apreciar sus variables de entrada, y una variable de salida. En la figura 4.2, observamos la configuración y los componentes que constituyen al filtro, los mismos que describimos seguidamente.

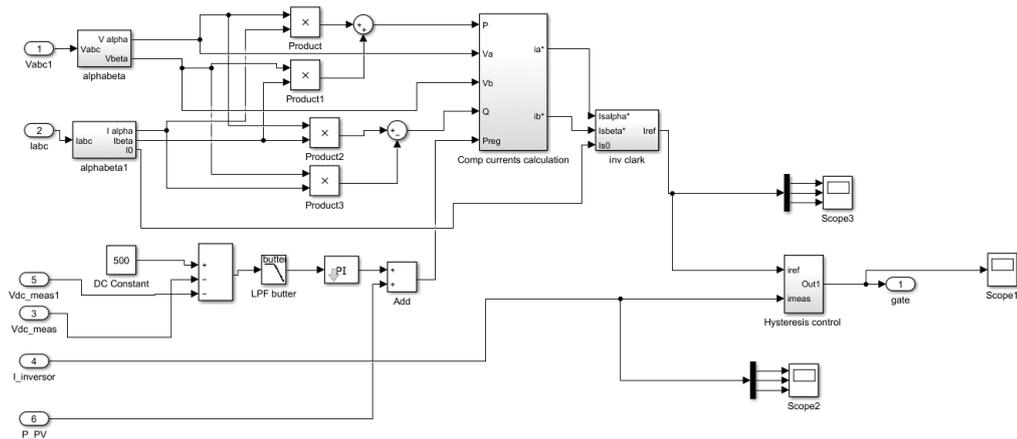


Figura 4.2. Configuración FAP en SIMULINK

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

- Vabc1: Esta variable recopila el voltaje correspondiente a las tres fases del sistema público de energía eléctrica, las mismas que se toman a la salida del transformador reductor.
- Iabc: Toma los valores de corriente proveniente de la carga no lineal y se inyectan al circuito del FAP.
- Vdc_meas: Toma el valor de voltaje medido entre la línea positiva de voltaje a la salida del convertidor y tierra.
- Vdc_meas1: Toma el valor medido entre la línea negativa del voltaje a la salida del convertidor y tierra.
- I_inversor: Recopila la corriente proveniente del puente conectado a la salida de voltaje del convertidor Buck-Boost.
- P_PV: Toma el valor de potencia del arreglo de paneles solares calculado en el bloque de control MPPT.
- Gate: Entrega el valor del control de histéresis realizado dentro del FAP.

El funcionamiento del FAP con más detalle se presenta en el capítulo II de este trabajo.

4.2 Simulación del sistema híbrido

A continuación, se presenta las capturas de las simulaciones realizadas en distintos escenarios y configuraciones del sistema híbrido.

Escenarios y configuraciones del sistema:

- Sistema híbrido con FAP, sin batería y radiación solar constante
- Sistema híbrido con FAP, con batería (duty cycle: 0.1) y radiación solar variable
- Sistema híbrido con FAP, con batería (duty cycle: 0.9) y radiación solar variable

4.2.1 Características de simulación

- Sin batería
- Con FAP
- Radiación solar constante
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 5:11.62 minutos
- Factor de potencia: 0.8523
- Fase a:
 - Magnitud: 148.2
 - Ángulo: -72.36
- Fase b:
 - Magnitud: 155.6
 - Ángulo: 170.6
- Fase c:
 - Magnitud: 158.7
 - Ángulo: 46.82

4.2.1.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

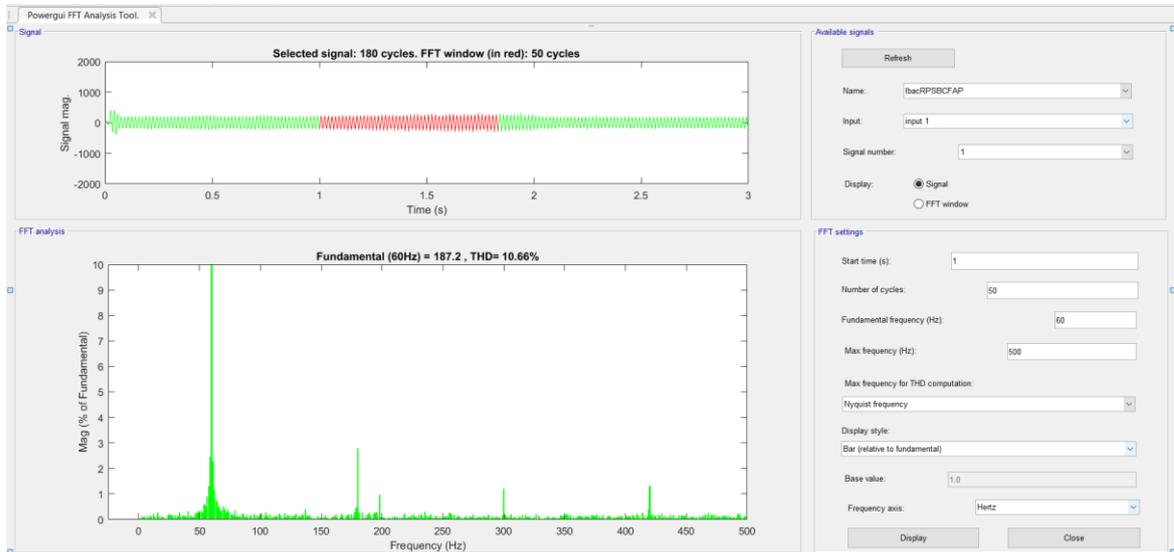


Figura 4.3. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

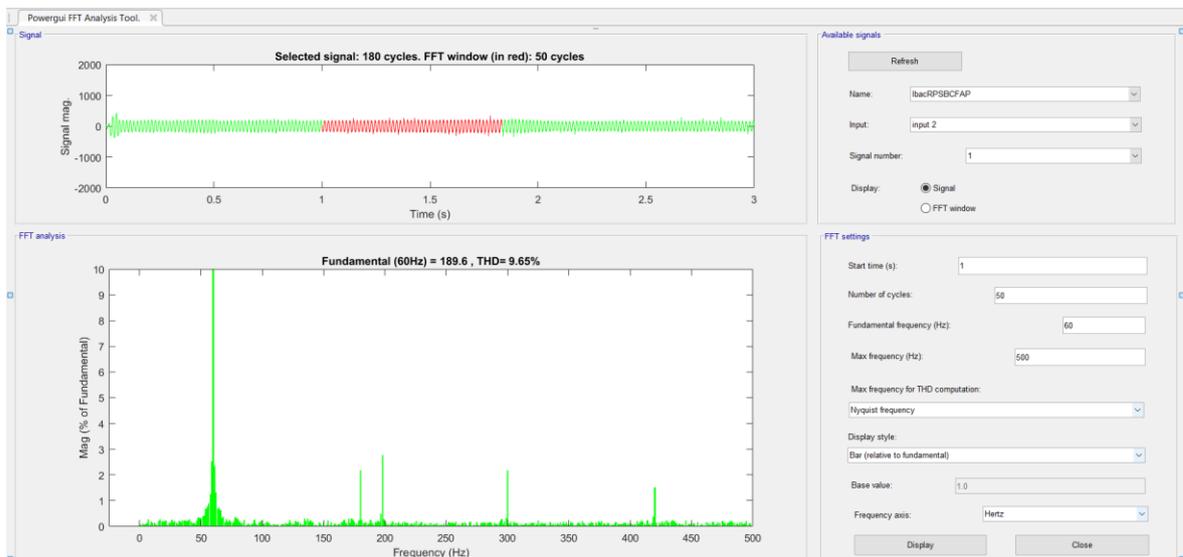


Figura 4.4. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

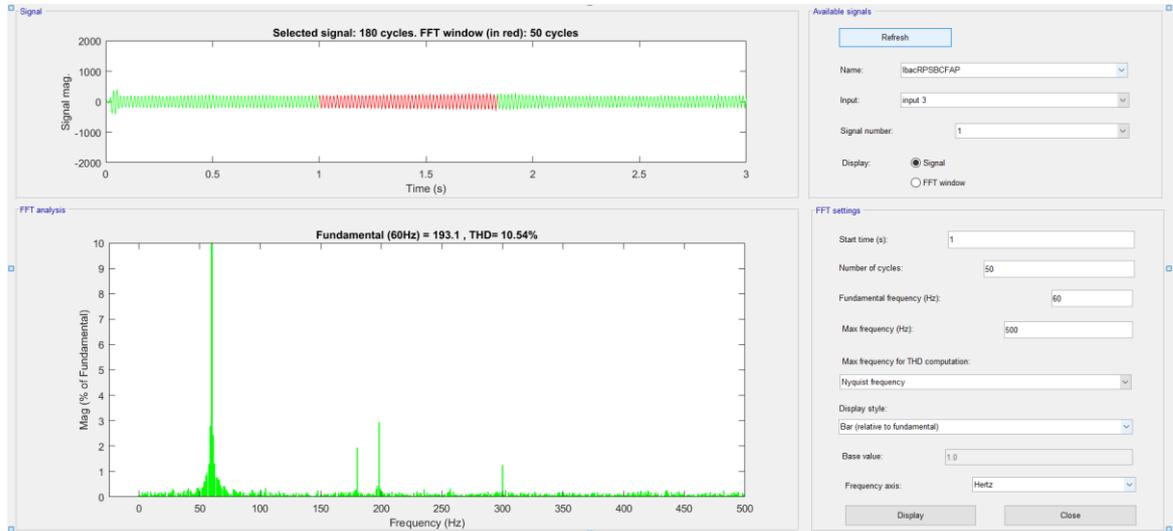


Figura 4.5. Señal corriente I_c RP y THD I_c

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA $P = 5.094e^4$

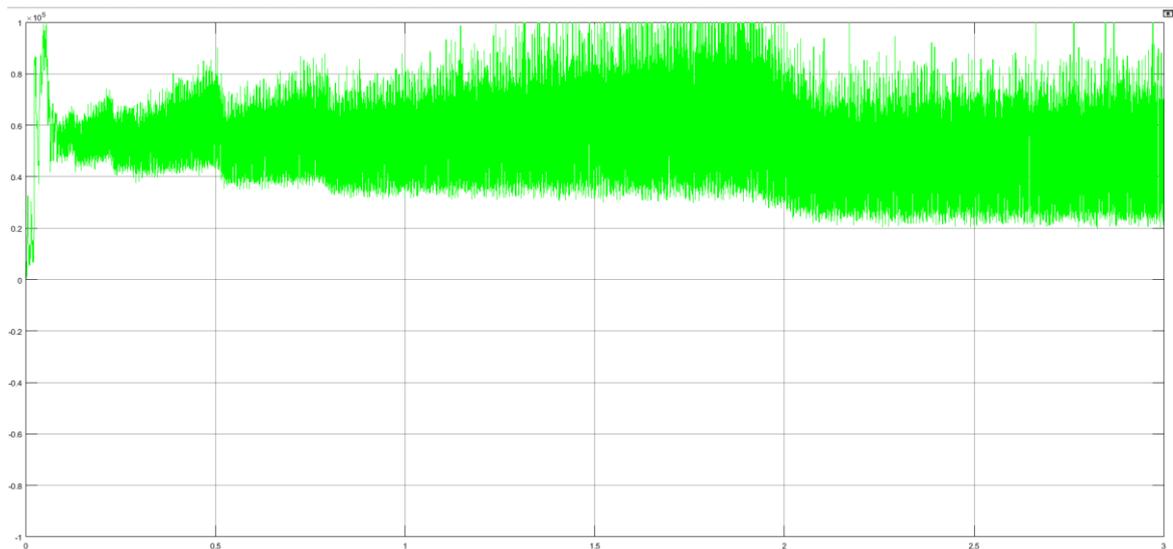


Figura 4.6. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = $-3.127e^4$

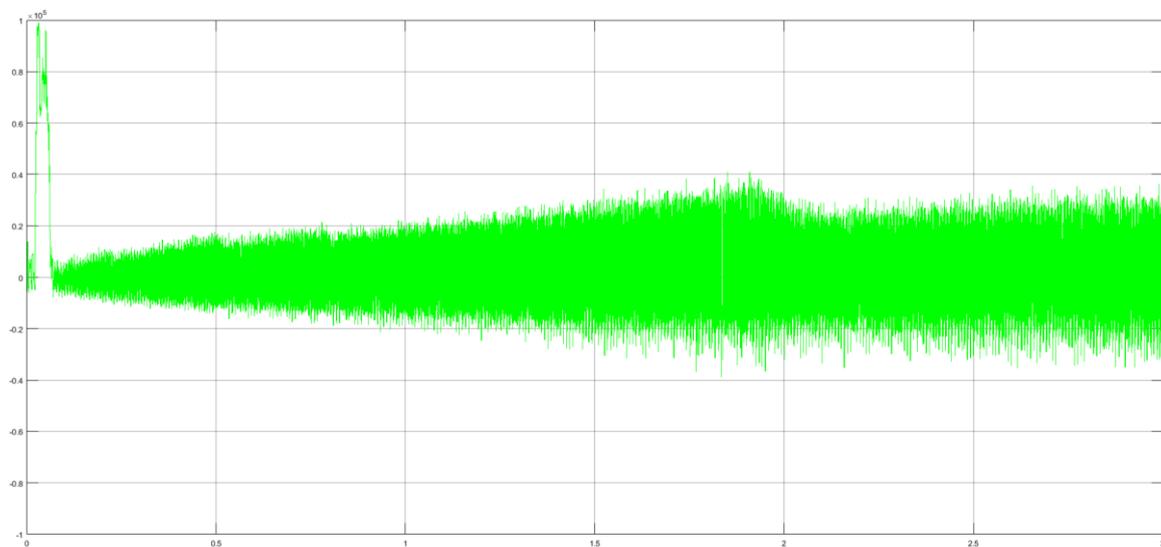


Figura 4.7. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

4.2.2 Características de simulación

- Con batería
- Duty Cycle: Carga
- Con FAP
- Radiación solar variable
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 5:42.40 minutos
- Factor de potencia: 0.9981
- Fase a:
 - Magnitud: 141.5
 - Ángulo: -71.22
- Fase b:
 - Magnitud: 150.8
 - Ángulo: 170.8
- Fase c:
 - Magnitud: 150.9
 - Ángulo: 46.76

4.2.2.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

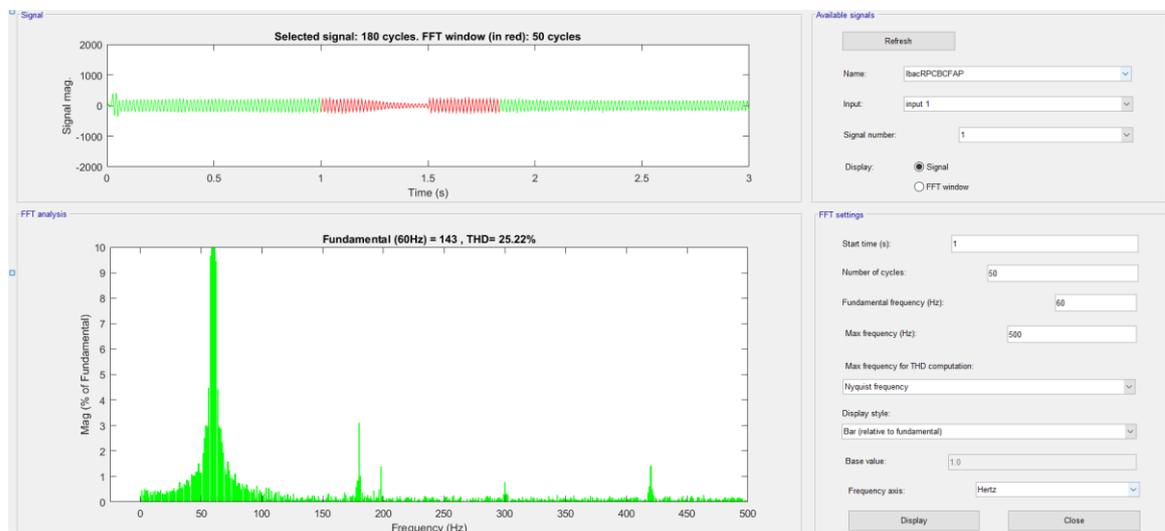


Figura 4.8. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

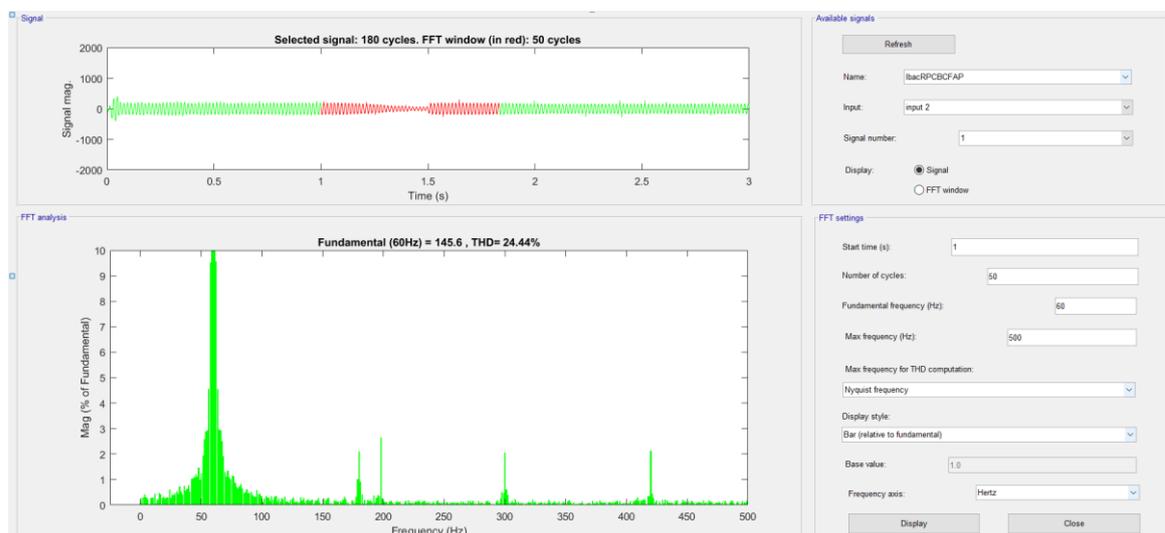


Figura 4.9. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

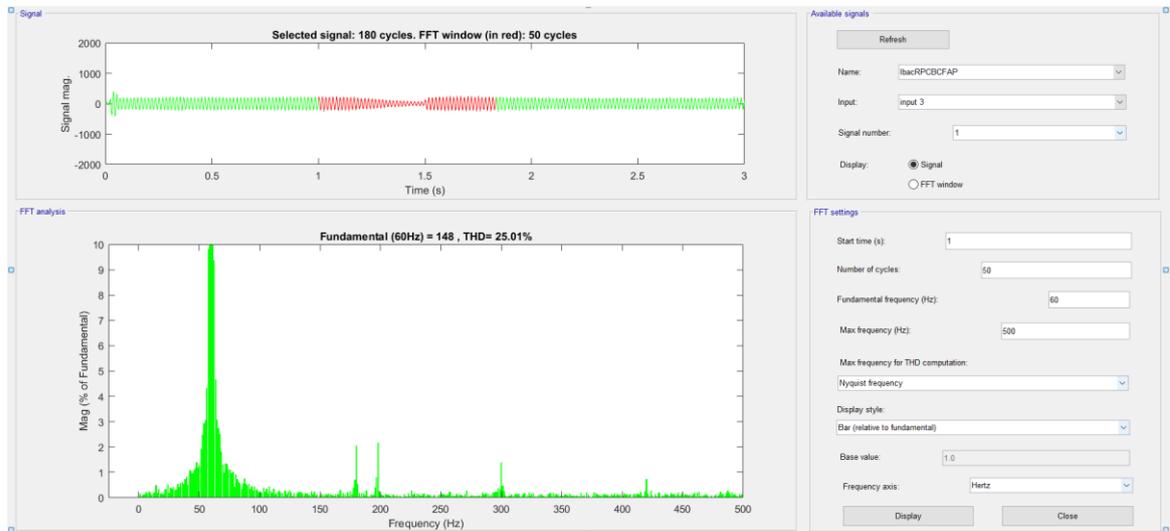


Figura 4.10. Señal corriente I_c RP y THD I_c

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA $P = 2.508e^4$

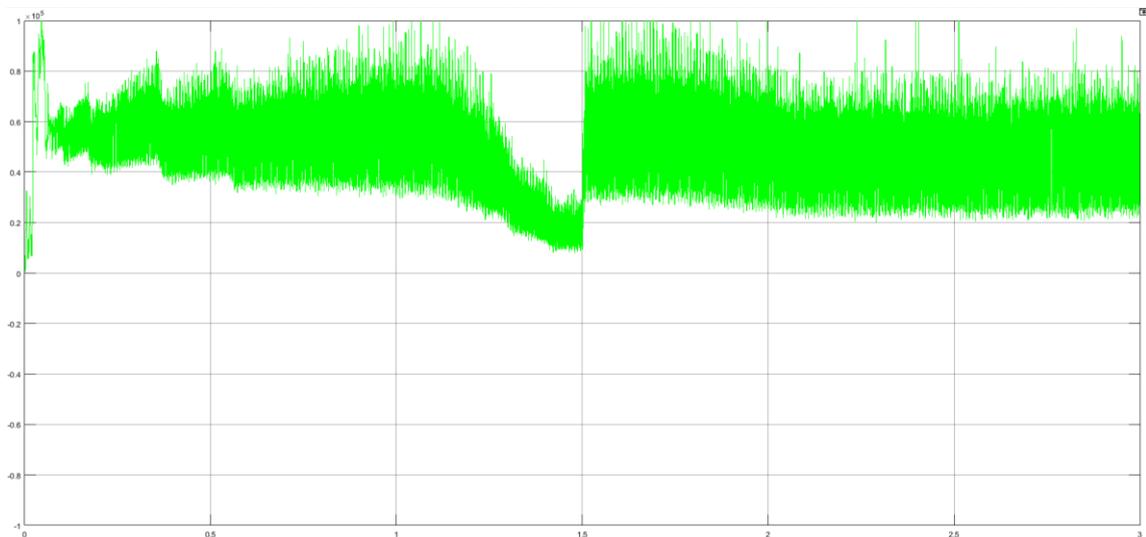


Figura 4.11. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = 1549

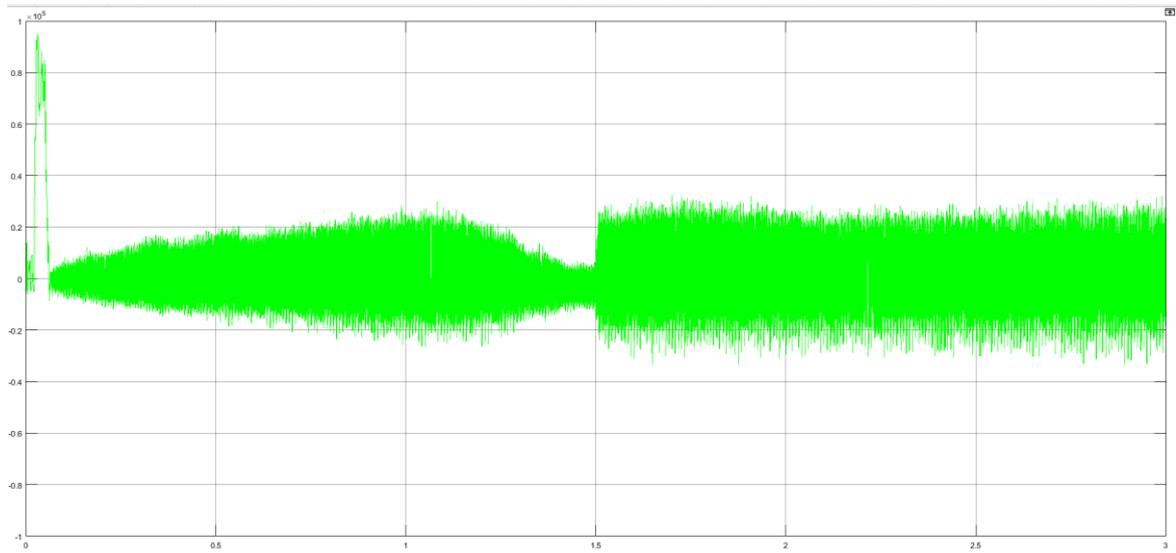


Figura 4.12. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

4.2.3 Características de simulación

- Con batería
- Duty Cycle: Descarga
- Con FAP
- Radiación solar variable
- Tiempo de para de la simulación: 3 segundos
- Tiempo real de simulación: 5:42.40 minutos
- Factor de potencia: 0.9987
- Fase a:
 - Magnitud: 198
 - Ángulo: -75.67
- Fase b:
 - Magnitud: 235.5
 - Ángulo: 165.5
- Fase c:
 - Magnitud: 222.7
 - Ángulo: 36.56

4.2.3.1 Capturas de la simulación realizada en Simulink de Matlab(Mathworks, 2016)

FASE a

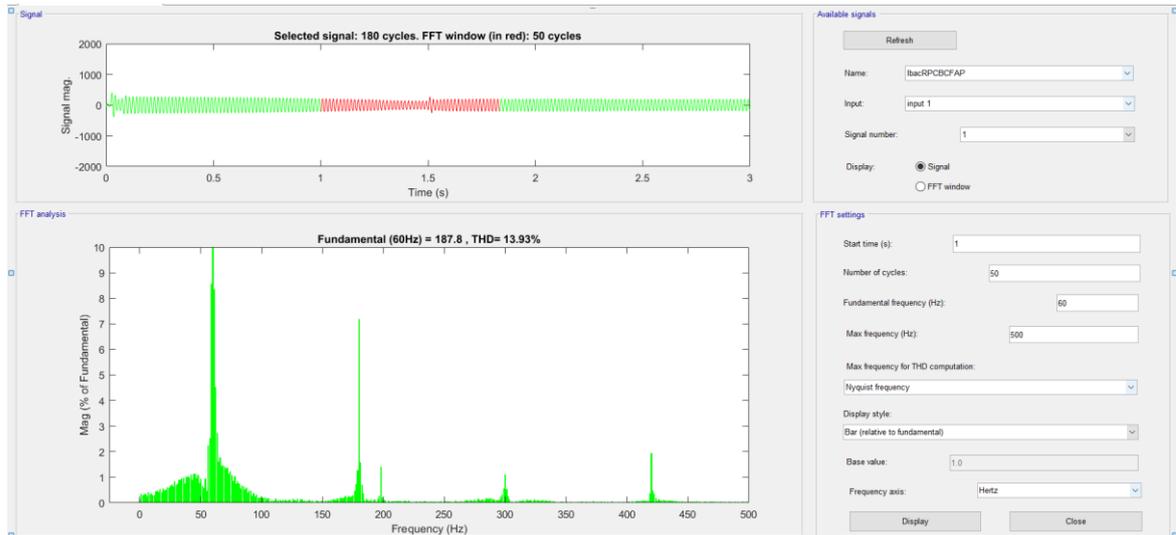


Figura 4.13. Señal corriente la RP y THD la

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

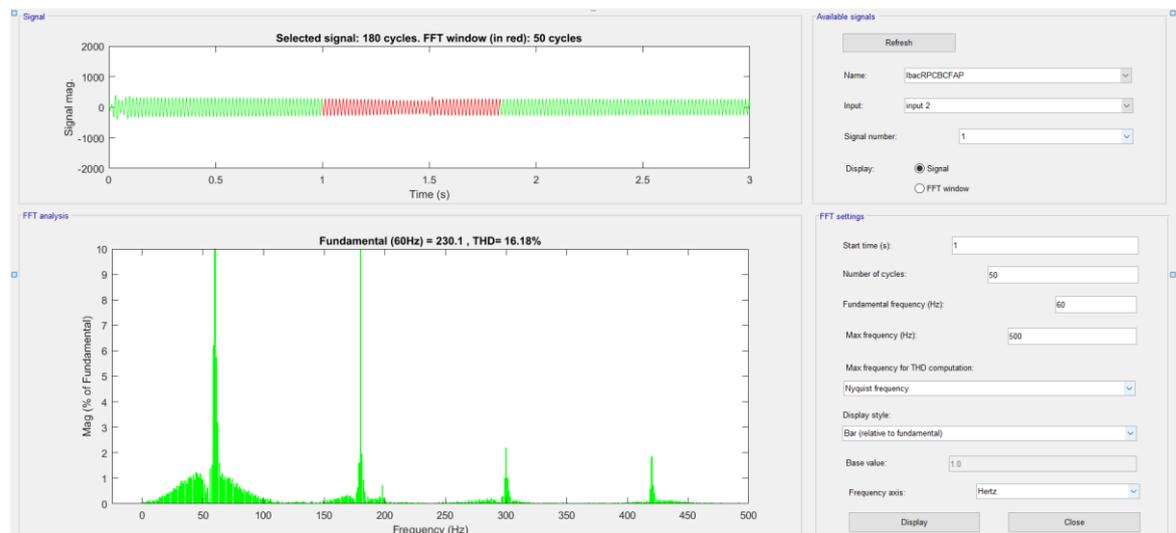


Figura 4.14. Señal corriente Ib RP y THD Ib

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

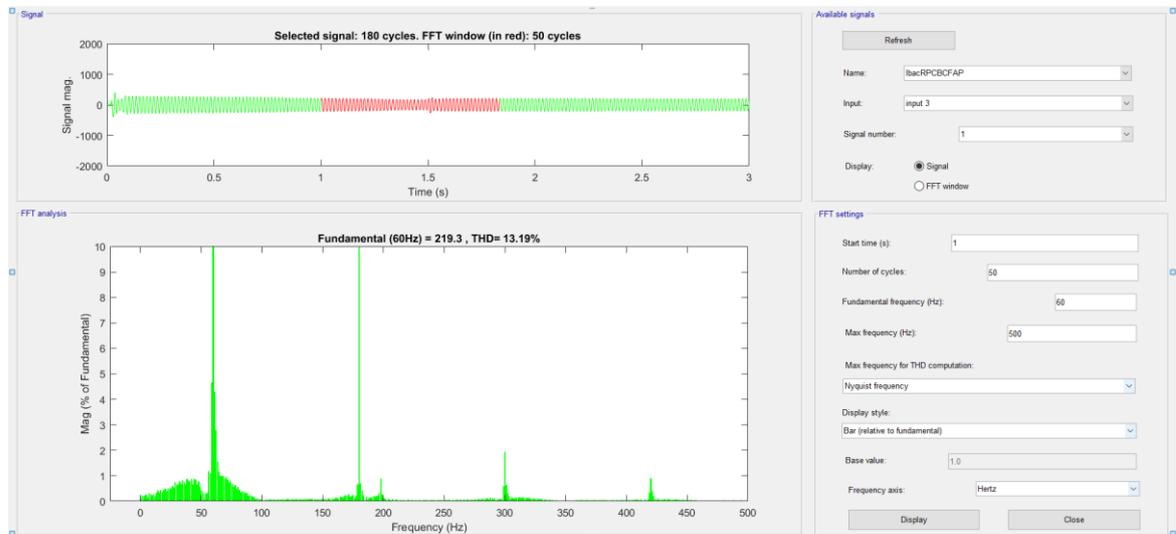


Figura 4.15. Señal corriente I_c RP y THD I_c

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA $P = 6.142^4$

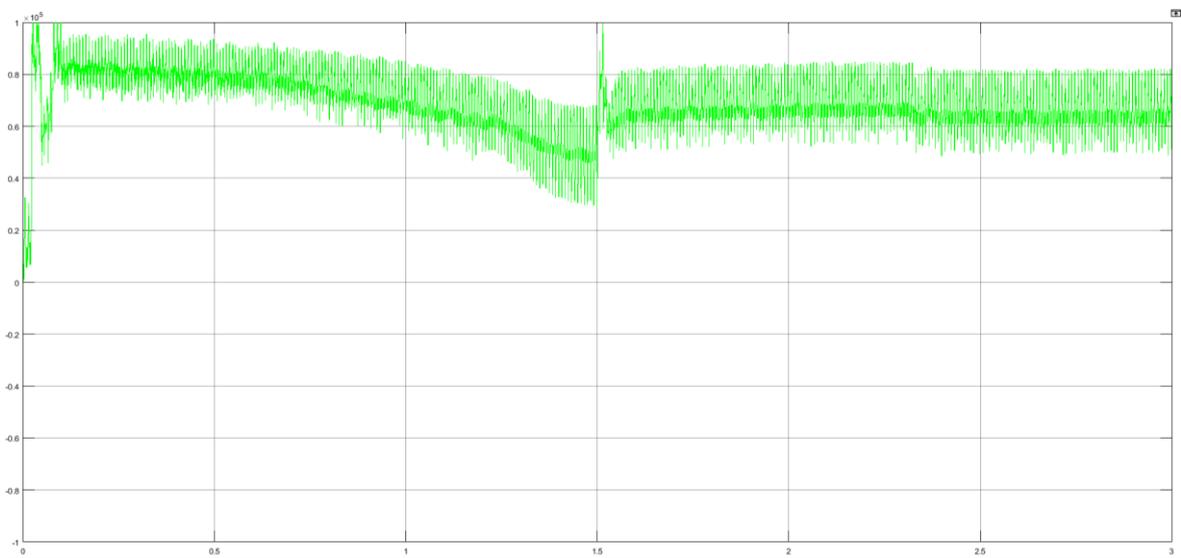


Figura 4.16. Señal Potencia P

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

POTENCIA Q = 3121

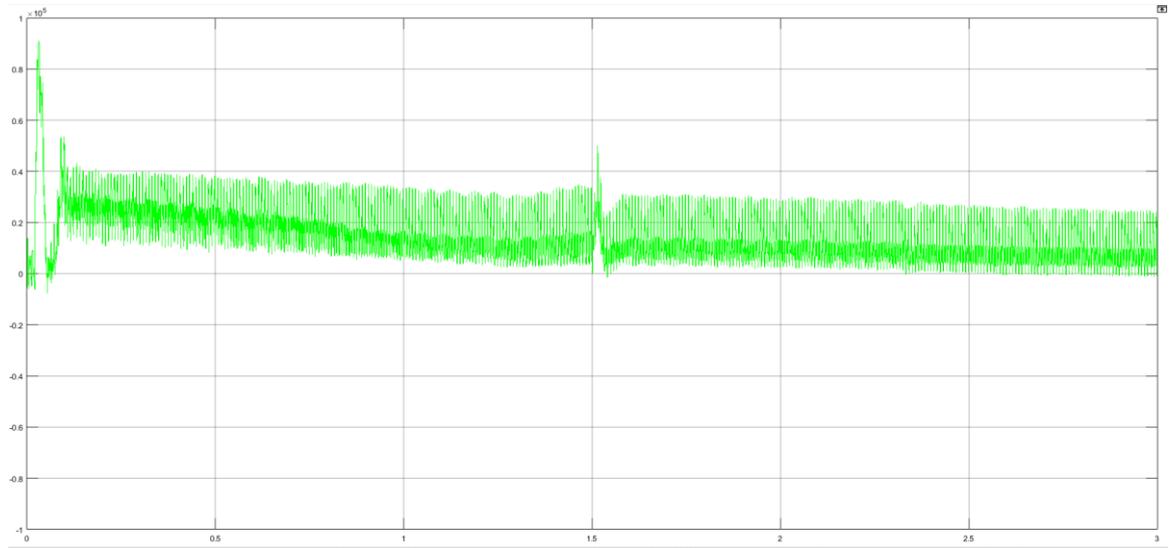


Figura 4.17. Señal Potencia Q

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

4.3 Comparación con el sistema sin FAP

En esta sección del capítulo IV se presenta las capturas de los resultados obtenidos luego de simular el sistema híbrido con las configuraciones ya mencionadas en el capítulo III y en el presente, se realiza una comparación visual y escrita de los resultados.

4.3.1 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos sin batería y radiación solar constante.

4.3.1.1 Gráficas señales de corriente

Se presenta a continuación las capturas de las gráficas obtenidas en la simulación, cabe destacar que se está mostrando el estado estable del sistema, más no los estados transitorios de corriente de cada fase, posterior se realiza un comentario comparando el comportamiento de estas señales.

FASES a, b, c

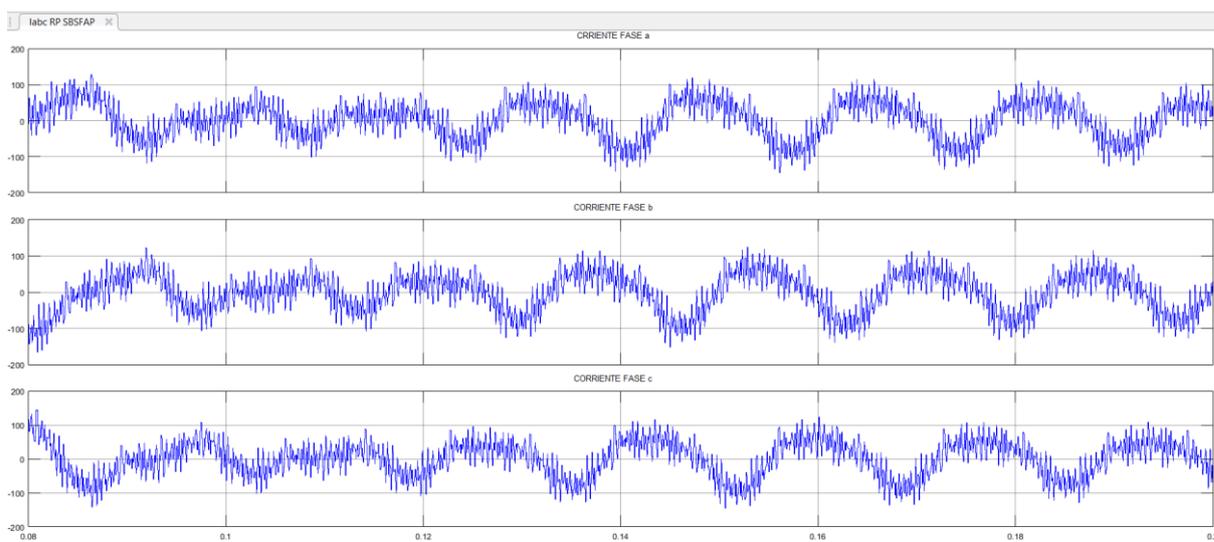


Figura 4.18. Señal del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, labc RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

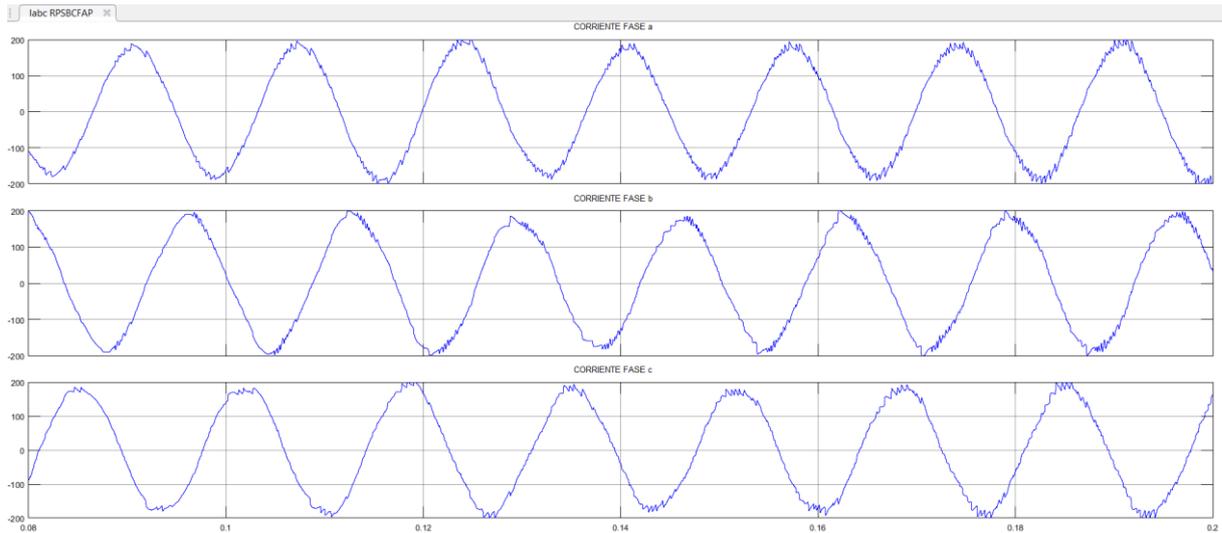


Figura 4.19. Señal del sistema con FAP, sin batería, radiación solar constante, labc RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En las figuras 4.18 y 4.19; se puede notar una diferencia en la amplitud de las corrientes correspondientes a las tres fases de la red pública de energía eléctrica y destacamos que es mayor en el caso del sistema configurado con el FAP, exactamente se encuentra entre +- 200 A y para el caso sin FAP entre +- 100 A. Se puede destacar, la evidente reducción de ruido en las corrientes de fase conectadas al sistema híbrido con FAP.

4.3.1.2 Gráficas de nivel de THD

En las siguientes gráficas se presenta la comparación de los niveles de THD correspondientes a cada una de las fases de los sistemas con y sin FAP en los diversos escenarios de simulación, las barras de color rojo le pertenecen al sistema con FAP y las de color negro al sistema sin el filtro.

Sistema sin batería, sin FAP comparado con sistema sin batería, con FAP

FASE a

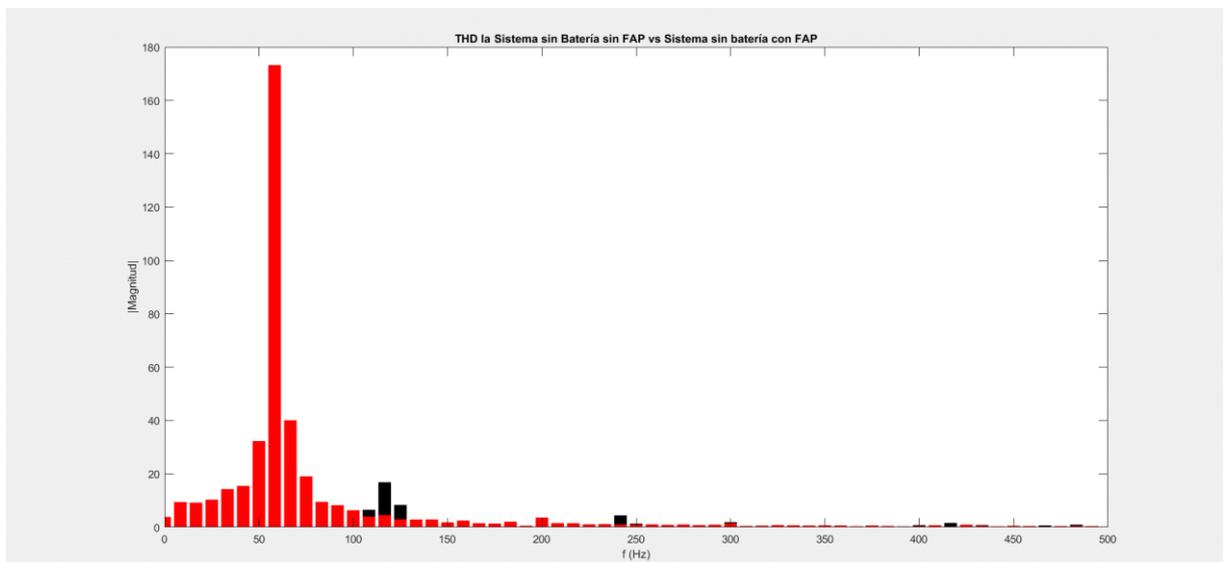


Figura 4.20. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. la RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

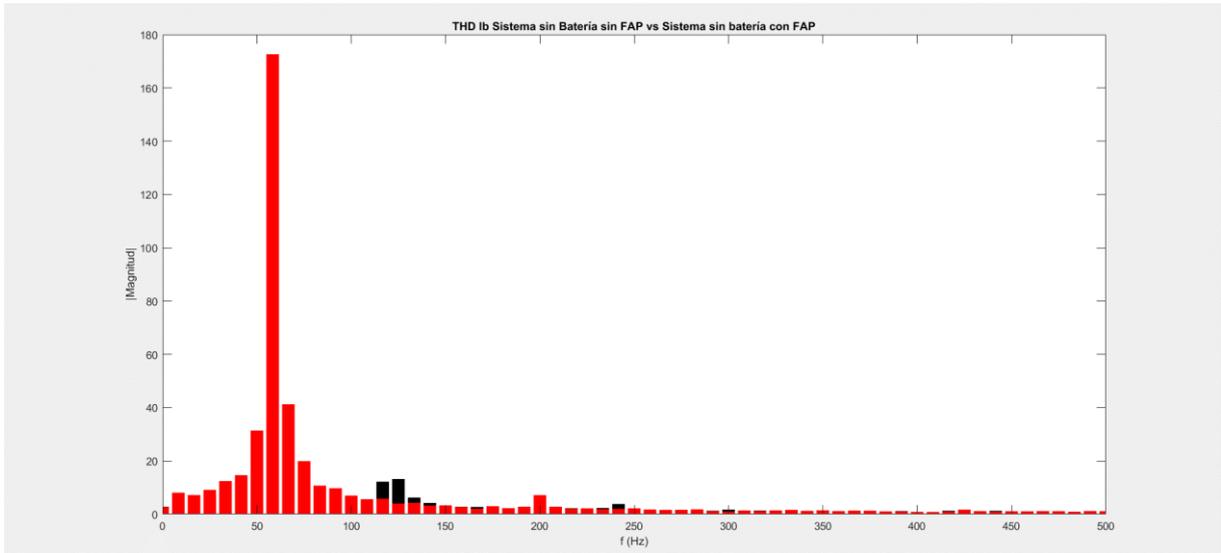


Figura 4.21. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. Ib RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

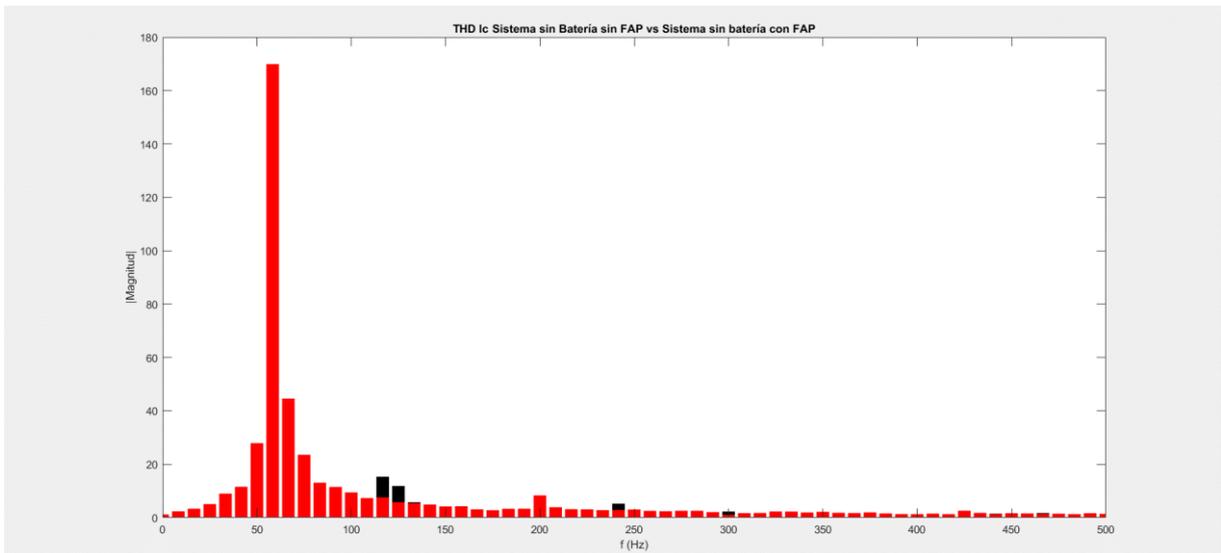


Figura 4.22. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, sin batería, radiación solar constante, contra el sistema con FAP, sin batería y radiación solar constante. Ic RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En las figuras 4.20 – 4.22, observamos los niveles de THD del sistema híbrido conectado a la red pública, ya que es un sistema trifásico se observan las gráficas correspondientes a cada una de ellas y podemos destacar que los porcentajes de THD del sistema con FAP son mucho menores al sistema sin él.

Es evidente que el sistema que se ha propuesto, es decir el sistema que integra un FAP es mucho más eficiente, además vemos que la energía se concentra alrededor de los 60Hz que es la frecuencia fundamental, y es notable la compensación de armónicos para el caso del sistema con FAP.

Presentamos a continuación un resumen de los valores de THD y factor de potencia de los sistemas comparados bajo el escenario mencionado en esta sección:

Fase a:

- Sin FAP: 61.12%
- Con FAP: 10.66%

Fase b:

- Sin FAP: 58.78%
- Con FAP: 9.65%

Fase c:

- Sin FAP: 60.27%
- Con FAP: 10.54%

Factor de Potencia:

- Sin FAP: -0.9324
- Con FAP: 0.8523

4.3.2 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos con batería (Duty Cycle: 0.1) y radiación solar variable.

4.3.2.1 Gráficas señales de corriente

En concordancia con el escenario anterior se presenta a continuación las gráficas de las corrientes de fase en el estado estable.

FASES a, b, c

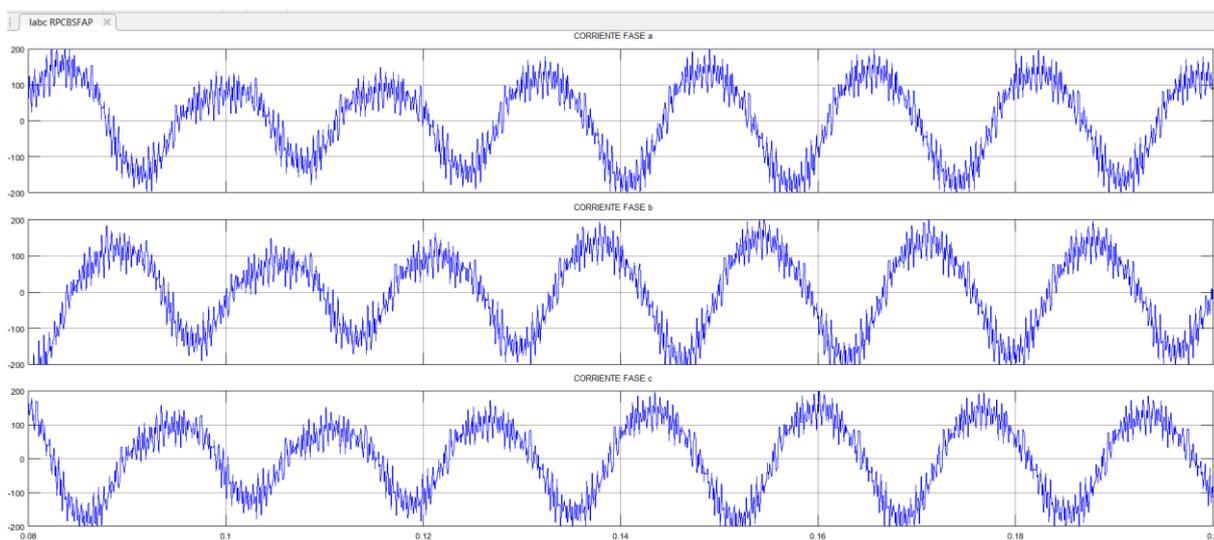


Figura 4.23. Señal del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Carga), radiación solar variable, labc RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

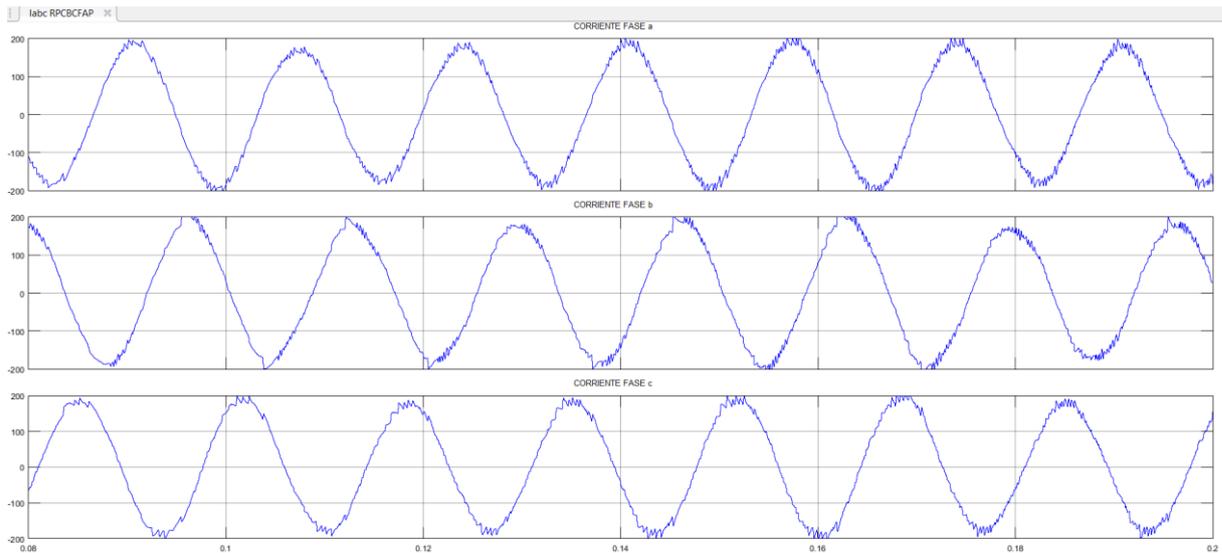


Figura 4.24. Señal del sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Carga), radiación solar variable, labc RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

Las figuras 4.23 – 4.24 corresponden a las corrientes de fase de la red pública conectada al sistema híbrido con FAP y sin el mismo, en este caso se ha realizado la simulación con radiación solar variable y con el ciclo de batería en modo carga, es decir, el recurso renovable además de aportar energía a la carga, está cargando el banco de baterías para que esta energía pueda ser usada cuando el recurso renovable no esté presente o sea insuficiente; dicho esto podemos observar que el sistema con FAP responde de mejor manera que el sistema sin el mismo, y podemos destacar que aunque la amplitud en ambos casos este alrededor de ± 200 A, existe mayor presencia de ruido en el sistema sin FAP, más no en el caso del sistema con FAP. Se obtiene una señal de corriente mucho más estable y limpia de ruido.

4.3.2.2 Gráficas de nivel de THD

Sistema con batería (Duty Cycle: carga), sin FAP comparado con sistema con batería (Duty Cycle: Carga), con FAP

FASE a

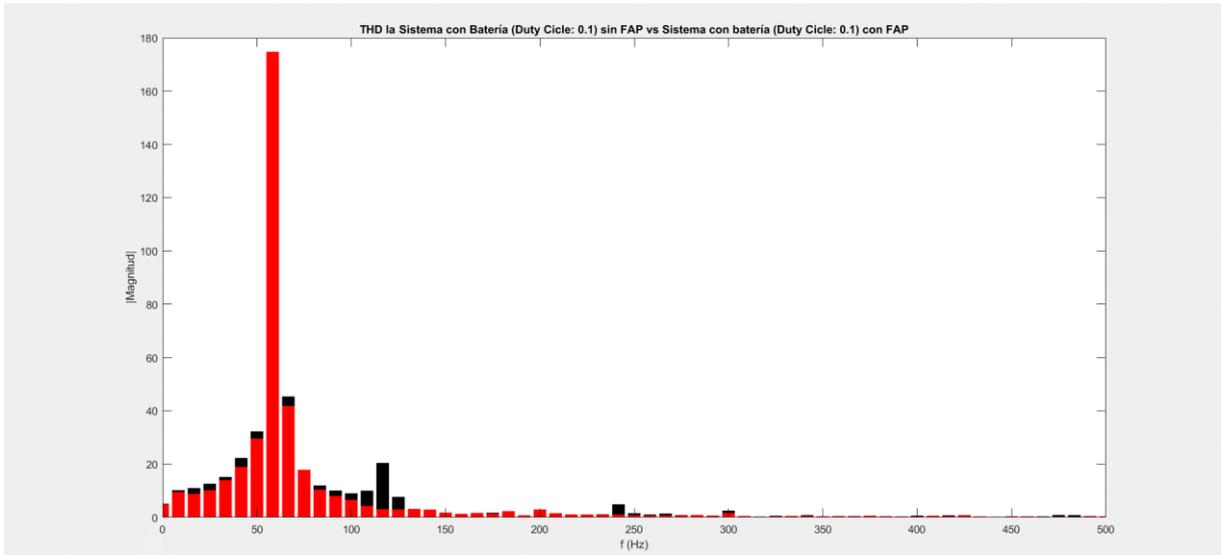


Figura 4.25. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. Ia RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

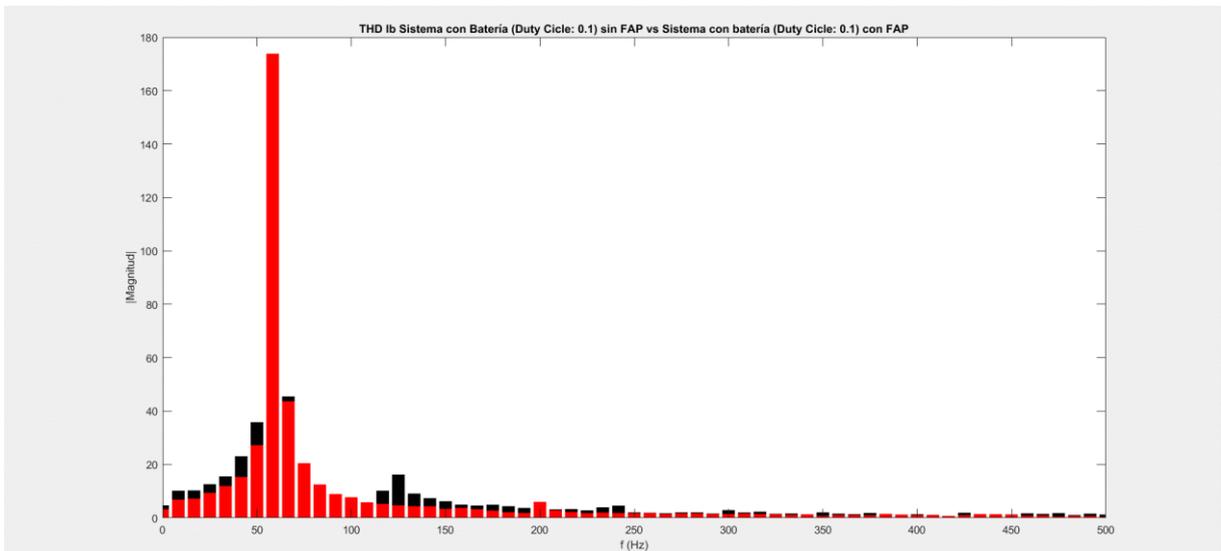


Figura 4.26. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. Ib RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

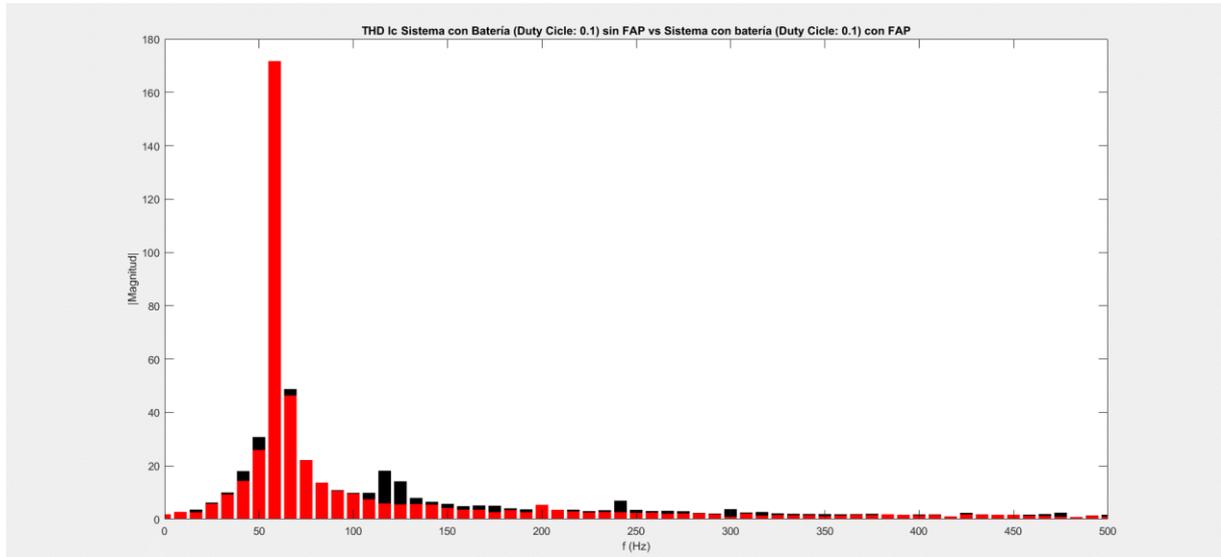


Figura 4.27. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: carga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: carga) y radiación solar variable. Ic RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En cuanto a la distorsión armónica, se puede observar en las figuras 4.40 – 4.45, que el sistema con FAP compensa muy bien los efectos producidos por cargas no lineales, llámese resistivas, capacitivas, y nos entrega niveles de THD mucho menores que el sistema sin FAP, además vemos claramente que la concentración de energía alrededor de la frecuencia fundamental (60Hz), es mayor en el sistema con FAP. Podemos destacar numéricamente a continuación los valores de THD del sistema con FAP y sin FAP en cada una de las fases y el factor de potencia:

Fase a:

- Sin FAP: 56.06%
- Con FAP: 25.22%

Fase b:

- Sin FAP: 54.37%
- Con FAP: 24.44%

Fase c:

- Sin FAP: 55.42%
- Con FAP: 25.01%

Factor de potencia:

- Sin FAP: -0.9915
- Con FAP: 0.9981

4.3.3 Comparación de las gráficas de corriente y nivel de THD del sistema híbrido sin FAP contra el sistema con FAP, ambos con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable.

4.3.3.1 Gráficas señales de corriente

Se presenta las señales de corriente de cada fase del sistema público de energía eléctrica conectado al sistema propuesto en este proyecto con y sin FAP. Se presenta las gráficas en estado estable.

FASES a, b, c

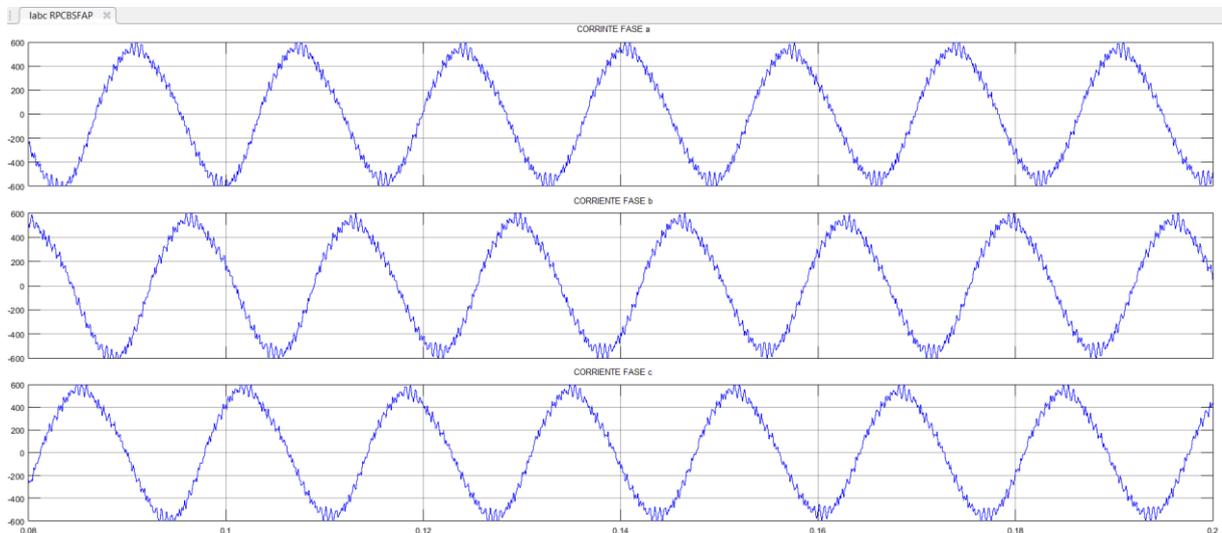


Figura 4. 28. Señal del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, la RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

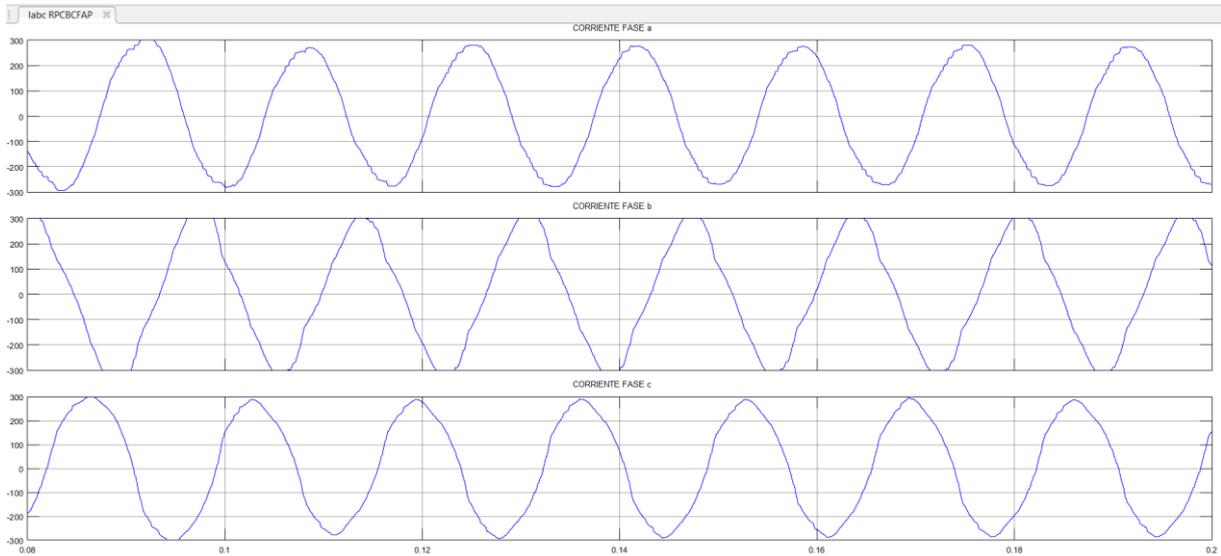


Figura 4.29. Señal del sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, labc RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

4.3.3.2 Gráficas de nivel de THD

Sistema con batería (Duty Cycle: 0.9), sin FAP comparado con sistema con batería (Duty Cycle: 0.9), con FAP

FASE a

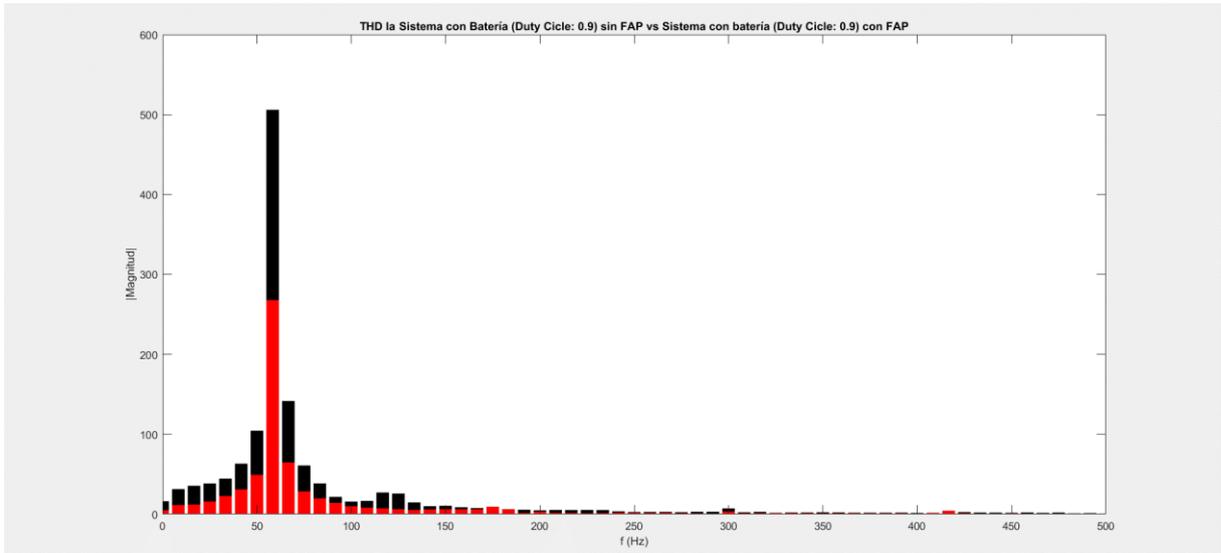


Figura 4.30. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. la RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE b

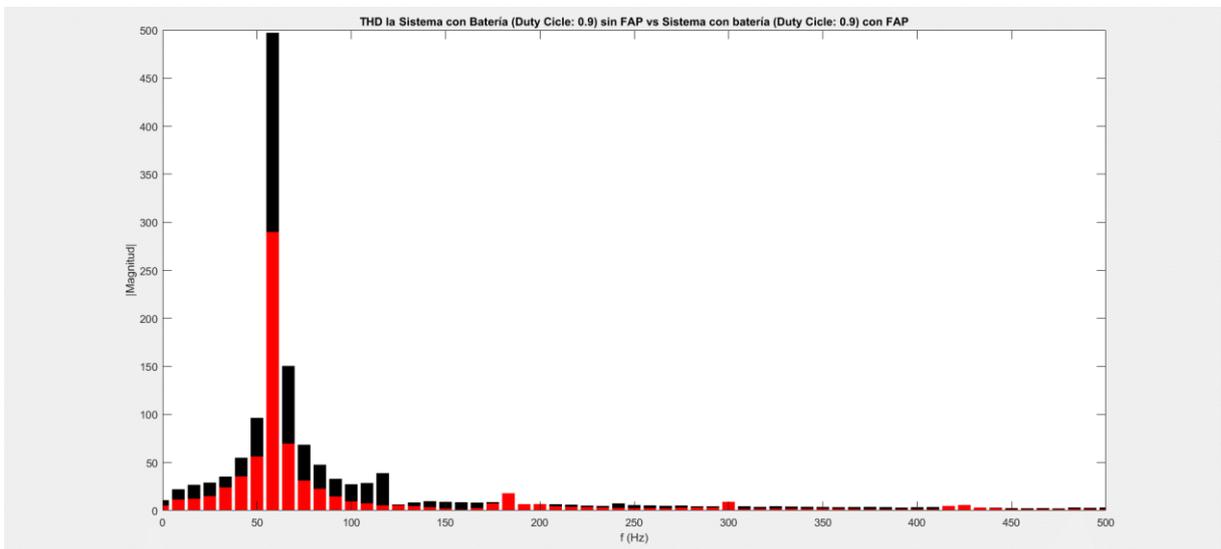


Figura 4.31. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. Ib RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

FASE c

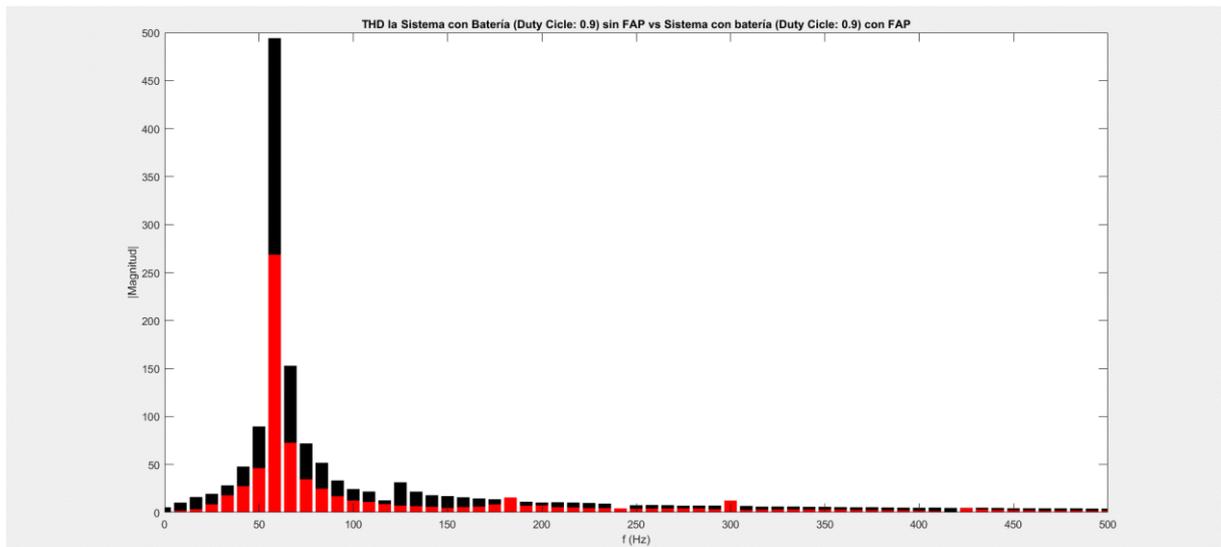


Figura 4.32. Señal, comparación magnitud THD del sistema sin FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga), radiación solar variable, contra el sistema con FAP, con batería (Duty Cycle: Descarga) y radiación solar variable. Ic RP

Fuente: Cristian Ortiz Celi

Elaboración: Cristian Ortiz Celi

En las figuras 4.30 – 4.32, se puede apreciar los niveles de THD correspondiente a los sistemas híbridos de energía con FAP y sin el mismo, pero si prestamos atención a los valores de THD del sistema con FAP (las barras de color rojo) vemos que los valores en porcentaje de la magnitud alrededor de la frecuencia fundamental son un tanto mayores que para el sistema simulado bajo el mismo escenario, pero sin FAP, esto es debido a que se está realizando la medición de los niveles de armónicos en el punto PCC del sistema, además la batería está actuando en el sistema aportando energía a las cargas y por lo tanto la red pública de energía eléctrica queda aislada, aun así los valores de THD son bajos y el factor de potencia muy cercano a la unidad (0.9987), esto nos indica que existe una gran optimización y aprovechamiento de la energía eléctrica, por lo tanto menos pérdidas de energía no aprovechada y una mayor eficiencia de trabajo en los generadores que producen la energía, en este caso los paneles solares.

A continuación, se resume los valores comparativos de los niveles de THD y factor de potencia:

Fase a:

- Sin FAP: 11.05%
- Con FAP: 13.93%

Fase b:

- Sin FAP: 10.97%
- Con FAP: 16.18%

Fase c:

- Sin FAP: 10.94%
- Con FAP: 13.19%

Factor de potencia:

- Sin FAP: 0.986
- Con FAP: 0.9987

Haciendo un resumen de las comparaciones presentadas anteriormente podemos decir a manera de introducción que el papel principal de un sistema híbrido de energía es asegurar la energía requerida por la carga y, si es posible, producir la cantidad máxima de energía de las fuentes de energía renovables, mientras se mantiene la calidad de la energía suministrada.

Considerando los valores destacados anteriormente en las comparaciones de los sistemas en los diversos escenarios, podemos evidenciar que el sistema propuesto en este trabajo, cumple con las expectativas, se puede ver señales más limpias de ruido lo que reduciría notablemente el flicker al momento que una carga no lineal entre en operación ya sea que el sistema esté conectado al hogar o la industria, destacamos además que cuando el sistema incluye un FAP las señales de corriente se tornan más balanceadas y más sinusoidales. El filtro activo también aporta la energía reactiva que demanden las cargas.

Se puede apreciar en las figuras que existe un ruido en altas frecuencias incluso en el sistema con FAP, aunque es más atenuado que el sistema sin él; esto es producido por el proceso de conmutación de los IGBTs y los picos de corriente que también se observan son causados por los retrasos en el controlador, que no es capaz de compensar las variaciones rápidas de las corrientes de carga.(Pinto et al., 2007)

CONCLUSIONES

- Una respuesta a la problemática planteada en este trabajo es sin duda el sistema propuesto, basándonos en los resultados podemos decir que cumple las expectativas, es una opción muy interesante y que se puede poner en práctica para solucionar los problemas de calidad de energía y reducir el consumo de la red pública haciendo más autónomo al recinto donde esté operando el sistema propuesto y disminuyendo factores como ruido, desbalances en las cargas y armónicos producidos por los equipos que se conectan a la red que en su mayoría son cargas de tipo no lineal.
- El algoritmo de control (MPPT) usado en este proyecto, cumple su objetivo de mantener la potencia máxima que se obtiene del recurso renovable para que el sistema opere de manera óptima incluso cuando existen variaciones de radiación solar, que se traducen en variaciones de voltaje y justamente el algoritmo MPPT usado es de tipo observación y perturbación que altera los valores de voltaje para obtener la máxima potencia.
- Tomando en cuenta los datos obtenidos en las simulaciones y las formas de onda de las señales de corriente, podemos concluir que el sistema híbrido con FAP aporta positivamente en la reducción de armónicos, con niveles de THD bajos, compensando el desbalance de las cargas y obteniéndose factores de potencia muy cercanos a la unidad lo que nos indica que se está optimizando y aprovechando el consumo de energía eléctrica, por lo tanto, existen menos pérdidas.
- En este trabajo se comprueba mediante simulación en diversos escenarios para recrear situaciones reales, que usar un FAP como interfaz entre la fuente de energía renovable, en nuestro caso paneles solares, y la red pública de energía eléctrica es muy fiable, pues el FAP tiene la capacidad de inyectar corrientes sinusoidales con bajo nivel de THD, además de compensar problemas de desbalance de cargas, corrientes armónicas generadas por cargas no lineales y mejorar el factor de potencia que eleva la eficiencia del consumo de energía.

RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos siguiendo esta línea de investigación se recomienda incluir en el sistema híbrido otra fuente que aproveche la energía renovable de la naturaleza como por ejemplo aerogeneradores y de esta manera tener mayor autonomía en el suministro de energía para depender menos de la red pública de energía eléctrica o para sistemas aislados (stand-alone).
- Se sugiere realizar la medición de armónicos en todas las etapas del sistema y no solo en el punto PCC entre la carga, la red pública y el sistema híbrido; pues cuando la batería está suministrando energía la red pública se aísla y si medimos en todas las etapas tendríamos más datos y comprobaríamos de mejor manera aun que el sistema compensa los desbalances de cargas, armónicos y factores de potencia.
- En futuros trabajos se recomienda intentar mejorar el algoritmo de control y buscar nuevas o mejorar las técnicas de conmutación para el inversor del FAP, de manera que se pueda mejorar el rendimiento de la etapa de potencia, mediante la reducción de ruido de alta frecuencia que se inyecta a la red eléctrica.
- Para lograr un rendimiento superior aún al demostrado en este trabajo, se recomienda realizar una combinación del Filtro Activo con Filtro pasivo.
- En este trabajo se usa el algoritmo MPPT para conseguir la máxima potencia proveniente del recurso renovable y se lo ha usado porque basándonos en el estado del arte de esta línea de investigación es un algoritmo que se implementa en inversores fotovoltaicos, sin embargo, se recomienda realizar una investigación de otros algoritmos que tal vez puedan entregar mejores resultados.
- En el caso de que en trabajos futuros partiendo de esta línea de investigación se proyecte materializar este sistema, se recomienda realizar un prototipo de laboratorio que incluya los bloques descritos anteriormente, para evaluar el comportamiento en escenarios controlados, para la etapa del filtro activo se puede usar una matriz de puertas programables o field programmable gate array por sus siglas en inglés (FPGA), ya que es necesario un procesamiento digital de señales (DSP), estas señales digitales se pueden obtener usando sensores de efecto Hall, para medir voltajes y corrientes. La etapa del inversor junto con el convertidor de tipo boost CC-CC se puede

implementar usando transistores de potencia de tipo IGBT, es necesario usar también un banco de baterías, una fuente DC y cargas para perturbar el sistema y observar su comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Acuna, P., Moran, L., Rivera, M., Dixon, J., & Rodriguez, J. (2014). Improved active power filter performance for renewable power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(2), 687–694. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2257854>
- Akagi, H., & Kanazawa, Y. (1983). Generalized theory of instantaneous reactive power and its application. *Electrical Engineering in ...*, 103(4), 483–490. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eej.4391030409/abstract>
- Ángeles, M. D. L., Patagónico, C. U., Rivadavia, C., & Lladser, P. G. (2005). Crisis Energética Mundial. *Colegio Universitario Patagónico*, 1–5.
- ARCONEL. (2016). Ecuador posee un 51,78% de energía renovable. Retrieved June 3, 2017, from <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>
- Arul, P. G., Ramachandaramurthy, V. K., & Rajkumar, R. K. (2015). Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 597–608. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.062>
- Bajpai, P., & Dash, V. (2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2926–2939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.009>
- Balasubramanian, R., & Palani, S. (2016). Simulation and Performance Evaluation of Shunt Hybrid Power Filter for Power Quality Improvement Using PQ Theory. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 6(6), 2603. <https://doi.org/10.11591/ijece.v6i6.12011>
- Bernal-Agustín, J. L., & Dufo-López, R. (2009). Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2111–2118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.010>
- Coates, E. (2013). Power supplies, 1–20. Retrieved from <http://www.learnabout-electronics.org>
- Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems- An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.017>

- Gavilanez Ortiz, L. (2015). *Diseño de un Sistema de Potencia para la eliminación de Distorsiones Armónicas Provocadas por Cargas Inductivas*. Escuela Superior politécnica de Chimborazo.
- Gonzales-Longatt, F. M. (2006). Respuesta en Frecuencia: Filtros. *Compare A Journal Of Comparative Education*, 4–7.
- Gow, J. A., & Manning, C. D. (1999). Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies. *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, 146(2), 193–200. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>
- Guzmán, D. (2015). Controladores PI, PD Y PID. Retrieved from <https://prezi.com/dtbslzp4t1mr/controladores-pi-pd-pid/>
- Hall, P. J., & Bain, E. J. (2008). Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12), 4352–4355. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.037>
- Hirose, T., & Matsuo, H. (2012). Standalone Hybrid Wind-Solar Power Generation System Applying Dump Power Control Without Dump Load, 59(2), 988–997.
- Lin, W. M., Hong, C. M., & Chen, C. H. (2011). Neural-network-based MPPT control of a stand-alone hybrid power generation system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(12), 3571–3581. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161775>
- Madaci, B., Chenni, R., Kurt, E., & Hemsas, K. E. (2016). Design and control of a stand-alone hybrid power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(29), 12485–12496. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.117>
- Marín, L. J. (2005). Método de Ubicación de Polos y Ceros para la Sintonización de Controladores PID, 137.
- Mathworks. (2016). Matlab. The MathWorks, Inc.
- Mathworks. (2017). Battery. Retrieved from <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/battery.html>
- MathWorks. (2017). MPPT Algorithm. Retrieved June 6, 2017, from <https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm.html>
- Méndez Muñoz, J. M., & Cuervo García, R. (2006). *Energía Solar Fotovoltaica*. *Energía Solar*

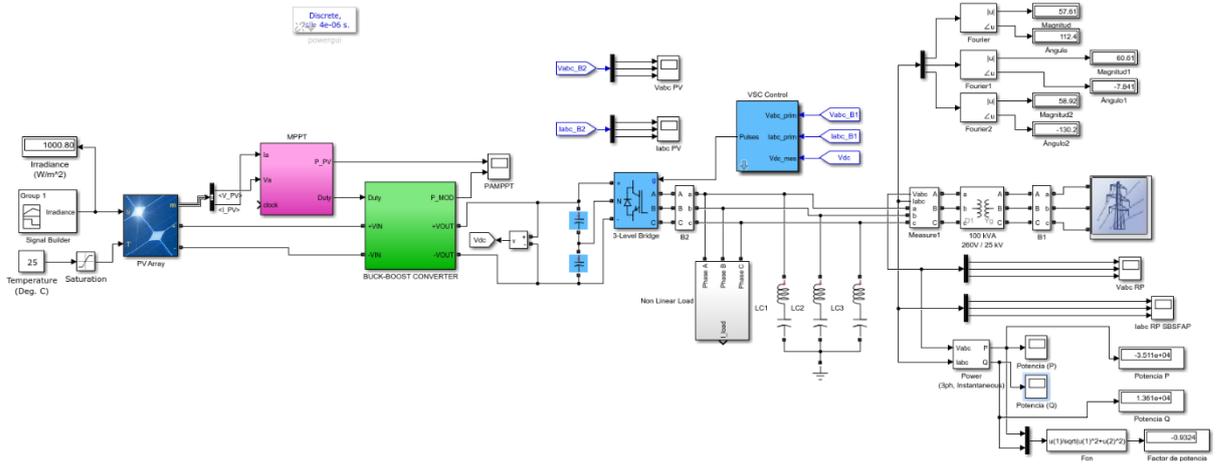
Fotovoltaica (2nd ed.). Madrid: FUNDACIÓN CONFEMETAL. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=GZh1DGUQoOUC&oi=fnd&pg=PA13&dq=paneles+solares+fotovoltaicos&ots=m5ttKVH0Ok&sig=wAjgzFkqfrnFgR7XCqOwn_-9gug#v=onepage&q&f=false

- Mohan, N. (2012). *Power Electronics*. (D. Sayre, Ed.). Minneapolis: Don Fowley.
- Mortezaei, A., Lute, C., Simões, M. G., Marafão, F. P., & Boglia, A. (2014). PQ, DQ and CPT control methods for shunt active compensators - A comparative study. *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, 2994–3001. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2014.6953807>
- Neves, P., Gonçalves, D., Pinto, J. G., Alves, R., & Afonso, J. L. (2009). Single-Phase Shunt Active Filter Interfacing Renewable Energy Sources with the Power Grid. *IEEE Conference*, 3264–3269.
- Philip, J., Jain, C., Kant, K., Singh, B., Mishra, S., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2016). Control and Implementation of a Standalone Solar Photovoltaic Hybrid System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(4), 3472–3479. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2553639>
- Pinto, J. G., Pregitzer, R., Monteiro, L. F. C., & Afonso, J. L. (2007). 3-Phase 4-Wire Shunt Active Power Filter with Renewable Energy Interface Key words. *ICREPQ'07- International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, (1), 28–30.
- Rao, P. B. (2013). Grid Interconnection of Renewable Energy Sources at the Distribution level with power quality improvement features, 26(1), 218–225.
- Rezkallah, M. (2016). *Miloud Rezkallah, 2016*. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC.
- Thangaraj, K., & Gopalasamy, S. (2016). Power Quality Analysis and Enhancement of Grid Connected Solar Energy System, (June), 1954–1961.
- www.areatecnologia.com. (n.d.). Paneles Solares. Retrieved June 6, 2017, from <http://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>

ANEXOS

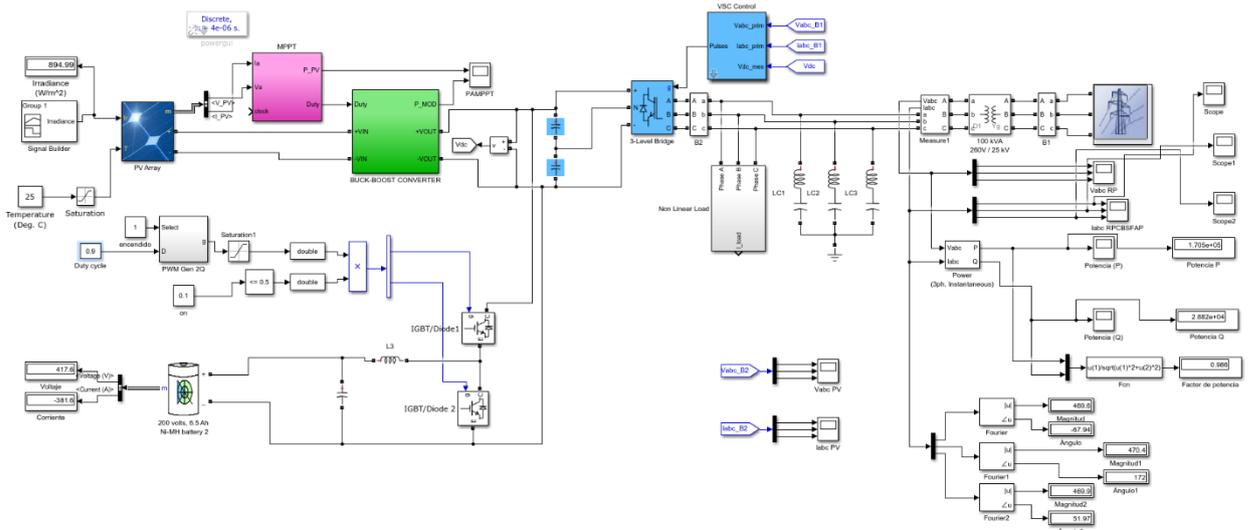
ANEXO A

DIAGRAMA DEL SISTEMA HÍBRIDO SIN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA, SIN BATERÍA, EN SIMULINK



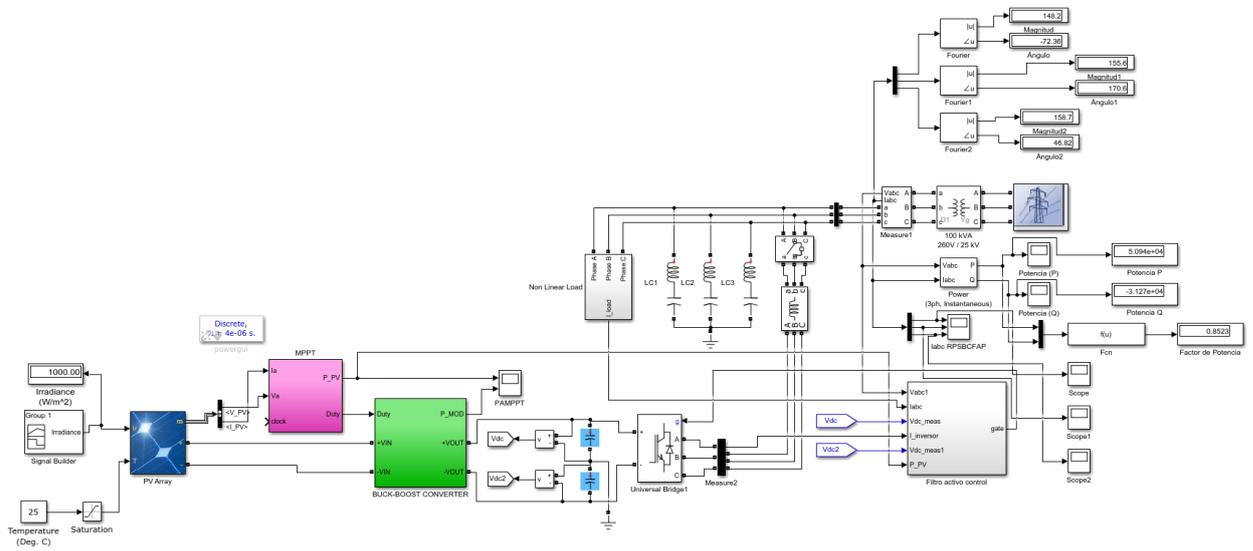
ANEXO B

DIAGRAMA DEL SISTEMA HÍBRIDO SIN FILTRO ACTIVO DE POTENCIA, CON BATERÍA, EN SIMULINK



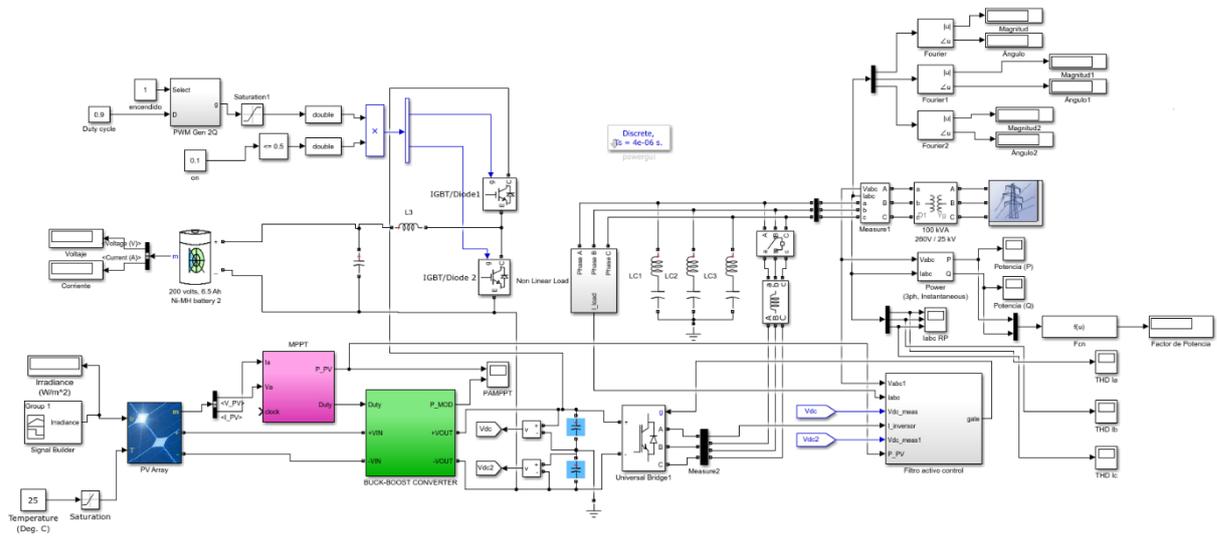
ANEXO C

DIAGRAMA DEL SISTEMA HÍBRIDO CON FILTRO ACTIVO DE POTENCIA, SIN BATERÍA, EN SIMULINK



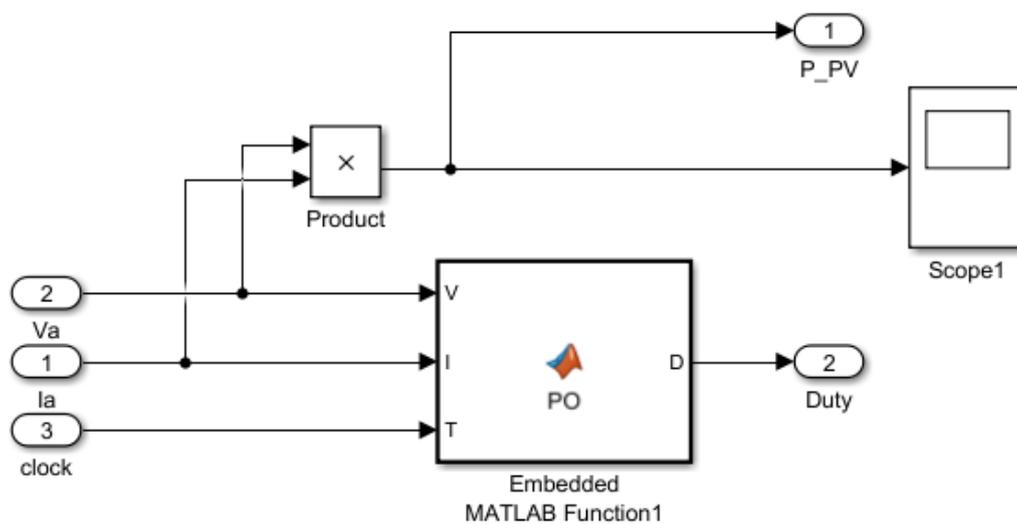
ANEXO D

DIAGRAMA DEL SISTEMA HÍBRIDO CON FILTRO ACTIVO DE POTENCIA, CON BATERÍA, EN SIMULINK



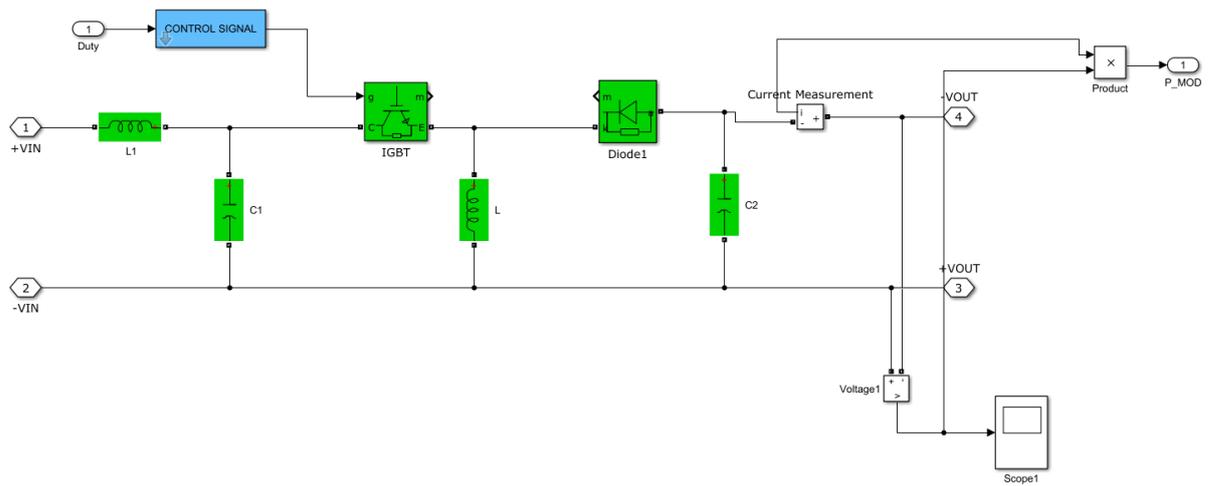
ANEXO E

DISEÑO DEL BLOQUE DEL CONTROLADOR MPPT EN SIMULINK



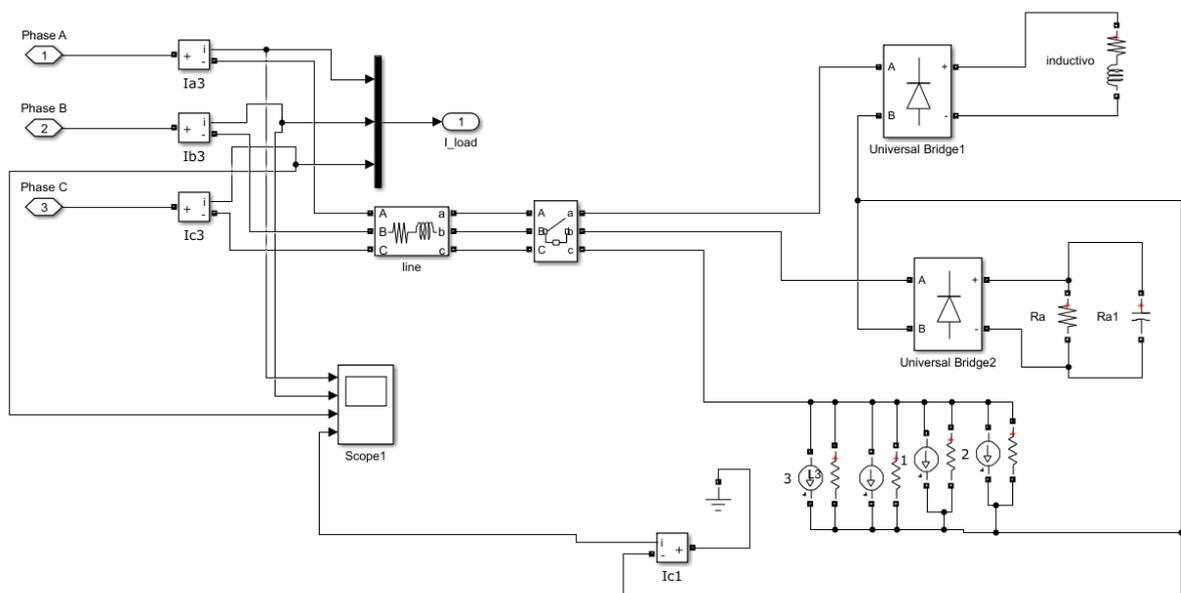
ANEXO F

DISEÑO DEL CONVERTIDOR TIPO BUCK – BOOST EN SIMULINK



ANEXO G

DISEÑO DEL BLOQUE DE CARGA NO LINEAL EN SIMULINK



ANEXO H

DISEÑO DEL BLOQUE FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN SIMULINK

