



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA (MPPT) EN PANELES SOLARES

Jairo Alberto Cuéllar Guarnizo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Bogotá, Colombia
2019



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA (MPPT) EN PANELES SOLARES

Jairo Alberto Cuéllar Guarnizo

Trabajo de Investigación presentado como requisito para optar el título de: Magíster en Ingeniería
Electrónica

DIRECTOR

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón, PhD.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Bogotá, Colombia
2019

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS.....	8
DEDICATORIA	9
AGRADECIMIENTOS	10
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN	12
1. 1. JUSTIFICACIÓN.....	12
1. 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
1. 3. LIMITACIONES Y ALCANCES.....	15
1. 4. OBJETIVOS.....	16
1.4.1. Objetivo general	16
1.4.2. Objetivos Específicos	16
1. 5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO	16
1. 6. ESTADO DEL ARTE	17
1. 7. MARCO REFERENCIAL	21
1.7.1. Efecto Fotoeléctrico o Fotovoltaico	21
1.7.2. Panel Solar.....	22
1.7.3. Punto de Máxima Potencia (MPP)	22
1.7.4. Convertidores conmutados	24
1.7.5. Girador de Potencia	25
1.7.6. Control en modos deslizantes (SMC).....	26
PANELES SOLARES Y RECURSO SOLAR	27
2.1. RECURSO SOLAR (Perfiles de radiación solar)	27
2.1.1. Recurso Solar en Villavicencio	27
2.1.2. Recurso Solar en Bogotá D.C.....	29
2.2. MODELOS DEL PANEL SOLAR.....	31
2.3. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO SOLAR	33
2.4. SIMULACIONES	34
CONVERTIDOR BOOST CUADRÁTICO.....	38

3.1.	MODELO CONMUTADO	38
3.2.	RÉGIMEN ESTACIONARIO DEL CONVERTIDOR	41
3.3.	MODELO PROMEDIADO	43
3.4.	MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL	43
3.5.	DISEÑO DEL CONVERTIDOR Y CONDICIONES DE CARGA	44
3.6.	SIMULACIONES EN LAZO ABIERTO	48
	SEGUIMIENTO AL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT)	52
4.1.	MÉTODO PERTURBAR Y OBSERVAR	52
4.1.1.	P&O con Perturbación de radiación solar	55
4.1.2.	P&O con Perturbación de Temperatura.....	57
4.2.	MÉTODO CONDUCTANCIA INCREMENTAL	58
4.2.1.	Conductancia Incremental con perturbación de radiación solar.....	60
4.2.2.	Conductancia Incremental con perturbación de Temperatura	61
4.3.	GIRADOR DE POTENCIA CON CONTROL EN MODOS DESLIZANTES	63
4.3.1.	G – Girador con perturbación de radiación solar	65
4.3.2.	G – Girador con perturbación de Temperatura.....	67
	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN	70
5.1.	IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL DEL CONVERTIDOR BOOST CUADRÁTICO	70
5.1.1.	Circuito Driver para MOSFET	70
5.1.2.	Diseño del circuito impreso.....	71
5.2.	ALGORITMOS IMPLEMENTADOS.....	72
5.2.1.	Función P&O.....	73
5.2.2.	Función Conductancia Incremental:.....	74
5.2.3.	Función modos deslizantes.....	75
5.3.	EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO	76
5.3.1.	El convertidor en lazo abierto.....	76
5.3.2.	Control mediante el algoritmo de P&O.....	78
5.3.3.	MPPT de conductancia incremental.....	81
5.3.4.	Control en modos deslizantes.....	84
5.4.	EXPERIMENTACIÓN CON PANEL SOLAR.....	86
5.4.1.	Perturbar y Observar	86
5.4.2.	Conductancia Incremental.....	87

5.4.3. Control en modos deslizantes.....	88
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	90
6.1. CONTRIBUCIONES DEL PROYECTO	90
6.2. TRABAJOS FUTUROS.....	91
6.3. CONCLUSIONES.....	91
BIBLIOGRAFÍA.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de un generador PV.....	14
Figura 2. Efecto Fotoeléctrico.	21
Figura 3. Funcionamiento Celda Solar.....	22
Figura 4. P vs V con T. variable.....	23
Figura 5. Punto de potencia máxima.....	23
Figura 6. Convertidor de potencia Generalizado.....	24
Figura 7. Girador de Potencia.....	25
Figura 8. Radiación Solar Departamento del Meta.	28
Figura 9. Horas de brillo Solar Departamento del Meta.	28
Figura 10. Promedio Mensual de Radiación en Bogotá.	30
Figura 11. Horas de brillo en Bogotá.	30
Figura 12. Circuito Equivalente Celda Solar Ideal.....	32
Figura 13. Circuito Equivalente Celda Solar Rs y Rp.....	33
Figura 14. Módulo BLD20-36P. Fuente Autor.	34
Figura 15. Corriente Vs Voltaje. Fuente Autor.	35
Figura 16. Potencia Vs Voltaje. Fuente Autor.	35
Figura 17. PSIM Módulo Fotovoltaico	36
Figura 18. PSIM Voltaje y Potencia de salida.....	37
Figura 19. Convertidor Boost Cuadrático	38
Figura 20. Convertidor Boost Cuadrático ON.....	39
Figura 21. Convertidor Boost Cuadrático OFF	40
Figura 22. Formas de Onda para V_{L1} e I_{L1}	45
Figura 23. Formas de Onda para V_{L2} e I_{L2}	45
Figura 24. Formas de Onda para V_{C2} y V_{C1}	46
Figura 25. Modelo Simulink Convertidor Cuadrático.....	48
Figura 26. Señales en Lazo Abierto Simulink.....	49
Figura 27. Circuito Boost Cuadrático PSIM	50
Figura 28. Señales de voltaje en Lazo Abierto PSIM	51
Figura 29. Señales de corriente en Lazo Abierto PSIM	51
Figura 30. Algoritmo MPPT P&O.	53
Figura 31. Simulación MPPT en PSIM.....	54
Figura 32. Voltajes del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.	55
Figura 33. Corrientes del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.....	56
Figura 34. Potencias in/out del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.....	56
Figura 35. Voltajes del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.	57
Figura 36. Corrientes del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.....	57
Figura 37. Potencias in/out del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.....	58

Figura 38. Algoritmo de Conductancia Incremental.	59
Figura 39. Voltajes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.	60
Figura 40. Corrientes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.	61
Figura 41. Potencias in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.	61
Figura 42. Voltajes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.....	62
Figura 43. Corrientes in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.	62
Figura 44. Potencias in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.	63
Figura 45. Convertidor Boost en modo desizante.	64
Figura 46. Voltajes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.	66
Figura 47. Corrientes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.....	66
Figura 48. Potencias en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.	67
Figura 49. Voltajes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.....	67
Figura 50. Corrientes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.	68
Figura 51. Potencia in/out en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.	68
Figura 52. Driver del MOSFET.	71
Figura 53. Diseño PCB Convertidor Boost cuadrático.	71
Figura 54. Convertidor Boost cuadrático.	72
Figura 55. Señal PWM del MOSFET.	77
Figura 56. Voltaje de entrada en lazo abierto.....	77
Figura 57. Voltaje de salida en lazo abierto.	78
Figura 58. Ejercicio experimental MPPT – P&O.....	79
Figura 59. Voltaje entrada y salida MPPT – P&O.	80
Figura 60. Señal PWM, MPPT – P&O.	80
Figura 61. Voltaje entrada y salida MPPT – P&O con perturbación.	81
Figura 62. Ejercicio experimental MPPT – P&O.....	82
Figura 63. Voltaje entrada y salida Conductancia Incremental en estado estable.....	82
Figura 64. Señal PWM, Conductancia Incremental.	83
Figura 65. Voltaje entrada y salida Conductancia Incremental con perturbaciones.....	83
Figura 66. Convertidor en modo deslizamiento.	84
Figura 67. Voltaje de entrada y salida en Control en modos deslizantes.	84
Figura 68. Señal PWM control en modos deslizantes.	85
Figura 69. Voltaje de entrada y salida control en modos deslizantes.....	85
Figura 70. Pruebas con paneles solares y el Convertidor Boost Cuadrático.	86
Figura 71. Variación del PWM frente a perturbaciones (P&O).	87
Figura 72. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (P&O).	87
Figura 73. PWM frente a perturbaciones (Conductancia Incremental).....	88
Figura 74. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (Conductancia Incremental).	88
Figura 75. PWM y voltaje de salida frente a perturbaciones (Modo deslizante).	89
Figura 76. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (Modo deslizante).....	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Historia de la Tecnología fotovoltaica.	18
Tabla 2. Horario promedio de Radiación en Villavicencio.	29
Tabla 3. Horario promedio de Radiación en Bogotá.	31
Tabla 4. Características Módulo BLD20-36P	33
Tabla 5. Valores de Referencia Panel Solar a Simular.....	34
Tabla 6. Criterios de Diseño Boost Cuadrático	47
Tabla 7. Sensor de corriente ACS712.	79

DEDICATORIA

A mi hermosa familia: María Marcela, Ana Sofía, Miguel Antonio, Simón Alejandro y Antonella, pues sin el apoyo, comprensión y cariño que me brindan, este logro no hubiese sido posible. Ellos son el motor que me impulsa a mejorar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios, quien dio todo lo necesario para que este proyecto saliera adelante.

A mi muy amada esposa Marcela Lozano, quien sacrificó tiempo, y sabe Dios cuántas cosas más, para que yo pudiera sacar adelante la Maestría.

A mi madre, que con su sonrisa y palabras de aliento, siempre inspira tranquilidad, paciencia y ganas de continuar a pesar de todas las adversidades. Por tu apoyo incondicional, mil gracias madre.

Al profesor Carlos Andrés Torres Pinzón, que con su paciencia, buen consejo y gran conocimiento, procuró siempre lo mejor para sacar adelante esta empresa.

A la Universidad Santo Tomás y particularmente al equipo académico de la Maestría en Ingeniería Electrónica, quienes son responsables de la creación de tan excelente programa.

A todos los compañeros de estudio, particularmente a Milton Ricardo Rojas Luna, quienes con su amistad, contribuyeron a hacer este reto muy llevadero.

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT) EN PANELES SOLARES

RESUMEN

Los convertidores conmutados CC/CC aplicados a los sistemas fotovoltaicos, son el eje de esta investigación. En la primera parte del trabajo, se sustenta la importancia de este tipo de trabajos, se presenta un estado del arte sobre convertidores CC/CC y los algoritmos MPPT, además de la metodología de trabajo, así como los objetivos y la justificación del trabajo. Seguidamente, se discute sobre el recurso solar. Se presenta una consulta y análisis de datos recolectados, acerca del potencial energético en Villavicencio y en Bogotá. También se estudian los modelos matemáticos de los paneles solares, y la forma más apropiada de simularlos mediante software. Al final se presentan resultados de simulaciones en PSIM sobre los paneles solares y su comportamiento. Los convertidores conmutados, son objeto de análisis de este trabajo. Se muestran las simulaciones del circuito del convertidor en PSIM, además del modelo matemático del convertidor en simulink. Se presenta también un desarrollo matemático del régimen de estado estable y del régimen transitorio. Se muestran también los resultados sobre simulaciones en lazo abierto del convertidor.

Se estudiaron tres algoritmos para el modelo del convertidor CC/CC. Se inició con los algoritmos P&O y Conductancia Incremental, y por último el control en modos deslizantes. Se presentan los resultados de simulaciones, además de imágenes de las señales que describen el comportamiento de los circuitos. La experimentación se describe en la parte final del documento. Se implementaron los tres algoritmos MPPT sobre un microcontrolador, tomando como variables la intensidad y voltaje de salida del panel. Por último, se presenta un apartado de conclusiones y de discusión de los resultados obtenidos en el proyecto, frente a las limitantes del trabajo y comparando con los dispositivos actuales de los convertidores de potencia.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Algunos autores sustentan que el recurso energético convencional del planeta está en descenso cada vez más, la gran demanda debido a la población y sus necesidades, está alcanzando un tope (Poggi-Varaldo et al., 2009). Todo esto, sin mencionar que los cambios climáticos, paradójicamente ocasionados por el consumo desmesurado de combustibles fósiles, afectan a todos y cada uno de los habitantes del planeta.

Las razones anteriores, hacen necesaria la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías que mejoren la forma en que el hombre genera energía para sí mismo, sin afectar el ambiente, o el clima, sin residuos peligrosos, de una forma renovable y económica, tal y como lo señala nuevamente (Poggi-Varaldo et al., 2009, p. 20).

1. 1. JUSTIFICACIÓN

El consumismo, la sobrepoblación mundial, el calentamiento global, son factores que pueden llevar al planeta entero, tarde o temprano, a un posible descalabro energético. Los combustibles fósiles son un recurso no renovable; las formas tradicionales de generación como hidroeléctricas, termoeléctricas, plantas nucleares, etc. Tienen un amplio impacto ambiental y por lo general es un impacto negativo, según lo expuesto por (Mejia et al., 2010). Debido a estas razones, es muy importante, no solo a nivel local, sino a escala mundial, realizar investigación en el campo de las energías renovables y limpias.

Teniendo en cuenta lo anterior y tal como lo menciona (Poggi-Varaldo et al., 2009): “... existen muchas razones para que se utilicen las fuentes alternativas de energía, siendo las energías renovables las que deberían ser una prioridad política en los países en desarrollo. Es el momento de priorizar y enfocar los esfuerzos científicos y económicos en la investigación y el desarrollo de tecnologías de generación de energías limpias y ambientalmente sostenibles”. Estos hechos dieron origen a este proyecto de investigación, cuyo principal objetivo fue mejorar la eficiencia de un generador fotovoltaico por medio de un algoritmo de control MPPT (Maximum Power Point Tracking) aplicado al convertidor conmutado CC/CC seleccionado, y contribuir así con la mejora del medio ambiente y salud del planeta entero.

Un convertidor conmutado tipo Boost Cuadrático, presenta grandes características en cuanto a eficiencia; sumado a esto, las posibles pero poco estudiadas aplicaciones fotovoltaicas de este tipo de convertidor, contribuyen a que el dispositivo implementado aporte nuevas aplicaciones y nuevas estrategias en el tema de las energías alternativas y específicamente en los generadores fotovoltaicos. Hay que tener en cuenta que los algoritmos para seguir el punto máximo de operación se enfocan en

variar las características del convertidor conmutado de potencia, para mantener la potencia en su punto máximo, por lo que los resultados observados en el capítulo 5 de este documento se enfocan en mostrar lo anteriormente mencionado.

1. 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas energéticos que tradicionalmente utiliza el ser humano para satisfacer sus necesidades básicas, en su mayoría, son costosos, poco eficientes y ambientalmente insostenibles, además de esto, la quema indiscriminada de combustibles derivados del petróleo y los métodos tradicionales de generación de la energía eléctrica han afectado negativamente al planeta, tal es el punto de vista de (Murdoch & Reynoso, 2013) y (Ruiz C et al., 2010).

De manera paralela, las energías alternativas y renovables no son más una novedad y se han convertido en una necesidad para la humanidad de acuerdo a lo expuesto por (Castellanos, 2013). El autor Chávez & Torres, (2014), también sugiere que la búsqueda de alternativas de generación de energía no solo beneficia a la población humana actual sino a muchas generaciones futuras pues el impacto ambiental será tan positivo que se podrá mejorar las condiciones del ambiente y empezar a revertir el impacto negativo. Se hizo entonces imperativo plantear la posibilidad de buscar nuevas alternativas para generar energía, de una forma limpia, segura y saludable para el planeta, ya que éste, es el único conocido por el hombre capaz de albergar vida.

Los generadores fotovoltaicos suelen estar acoplados a un inversor de voltaje que se encarga de convertir la corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) con el objetivo de usarlo en los domicilios de las personas, donde normalmente utilizan corriente alterna. Se debe contar con un sistema de almacenamiento o baterías para carga, puesto que la energía del sol no es constante y se debe planear qué hacer en caso de ausencia de luz solar, según lo indica (Murdoch & Reynoso, 2013). El esquema involucra un controlador de carga, el cual, funciona en su mayoría de veces utilizando un algoritmo MPPT, que se encarga de encontrar el mejor punto de operación de la fuente (panel solar), según las condiciones del entorno y hace que el sistema fotovoltaico sea mucho más eficiente. En la *Figura 1* se observa un detallado esquema de bloques de un generador fotovoltaico. De acuerdo a una de las empresas más reconocidas en la industria de PV (WebSolar, 2015): Los circuitos de control de Seguimiento Punto de Máxima Potencia (MPPT por sus siglas en inglés), son capaces de encontrar un punto en el que la fuente de energía (PV) opera de forma más eficiente (con poca pérdida de energía), y luego proceder a cargar las baterías, todo es según lo que indica (Bastidas Rodriguez et al., 2014).

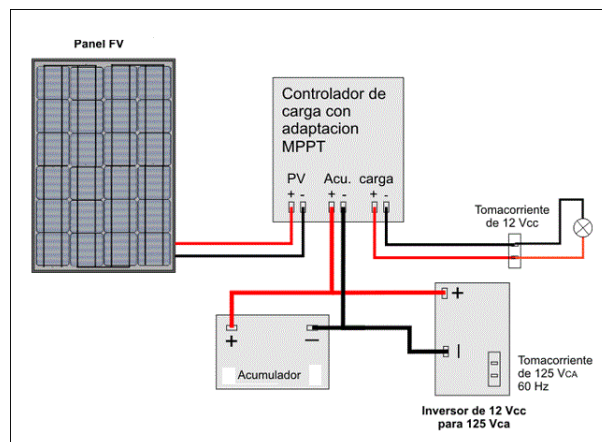


Figura 1. Diagrama de un generador PV.

Fuente: (Riosolar, 2015)

Los generadores fotovoltaicos utilizan paneles solares cuya eficiencia energética es pobre, ya que un valor típico de los paneles solares actuales oscila entre el 15% y 21% comercialmente hablando, en laboratorios o ambientes espaciales y especiales, este valor puede incrementar hasta 40%, según el estudio realizado por (Green et al., 2016). Este problema se incrementa aún más con la variación de la radiación solar, dependiendo del lugar en el que se esté ubicado en el globo terráqueo, dependiendo también de las condiciones atmosféricas y climáticas de acuerdo a lo enunciado por (Abid et al., 2014) y (Mejía et al., 2014). El uso de los controladores MPPT, permite mejorar esta eficiencia. Tomando como base lo expresado por (Morales, 2010), la eficiencia de un sistema PV, depende de los tres subsistemas electrónicos y/o eléctricos que lo componen: El panel, el inversor (en el caso que lo haya) y el controlador MPPT, de esos 3 subsistemas, la eficiencia más simple de manipular es la del controlador MPPT, sin incrementar mucho el costo del sistema y mejorando notablemente la eficiencia del generador fotovoltaico en general, esta misma opinión se refuerza con lo manifestado por (Mejía et al., 2014).

Existen en la actualidad una gran cantidad de algoritmos para encontrar el MPP; en la literatura se encuentran descritos múltiples métodos de seguimiento al MPP en un sistema fotovoltaico que se estudiaron en el capítulo 4 de este documento. Uno de dichos algoritmos es el método de Perturbación y Observación (P&O), el cual, según (Mejía et al., 2014), consiste en realizar variaciones en voltajes de salida y evaluar la potencia entregada, modificar según sea si la potencia es mayor o menor, además del método de conductancia incremental, cuyas variaciones toman en cuenta la conductancia del circuito y se valen de eso para evaluar la potencia de salida.

1. 3. LIMITACIONES Y ALCANCES

Este proyecto muestra como resultado un convertidor CC/CC conmutado de potencia, a manera de prototipo y controlado mediante un microcontrolador Arduino Nano, con la posibilidad de reprogramar el algoritmo de control siempre que así lo desee el administrador del dispositivo. El prototipo es funcional y tuvo un comportamiento afín a las simulaciones presentadas en este mismo documento. En total se programaron tres algoritmos de control: el P&O y conductancia incremental, y un control en modos deslizantes, cuyos resultados experimentales se relacionan en el capítulo 5 de este documento.

La selección de material apropiado para construir un estado del arte objetivo y muy específico se convirtió en un factor de dificultad para el desarrollo del proyecto debido al alto volumen de información relevante relacionada con el tema de estudio. La cantidad de información existente en la literatura es tal, que sin ayuda de gestores de búsqueda y organización como Mendeley, hubiera sido imposible determinar los más importantes autores en el tema de los convertidores de potencia CC/CC o de los algoritmos MPPT.

Todo trabajo de investigación requiere indiscutiblemente una financiación económica, bien sea de parte de la Universidad o de los investigadores, por lo que el recurso económico termina convirtiéndose, lamentablemente, en una limitación, pues se entra a contar con los recursos del investigador estudiante. Si bien es cierto la Universidad tiene la contrapartida por la asesoría del proyecto y por la disposición de los equipos, no hay un apoyo económico específico al proyecto. Otra dificultad evidente, fue el traslado del recurso humano entre ciudades, esto se debe a que el lugar de residencia del investigador principal, no corresponde con el domicilio de la Universidad Santo Tomás, por lo que el desplazamiento entre las ciudades de Bogotá y Villavicencio se convirtió en un inconveniente. Lo anterior redunda directamente en el tiempo que el investigador debía tener disponible para ejecutar el proyecto y lamentablemente ocasionó un retraso indeseado en la planeación del proyecto. La disponibilidad de los equipos de laboratorio, sobre todo los equipos de electrónica y los de energías renovables como los paneles y convertidores, fue otro de los factores determinantes a la hora de ejecutar este trabajo. Al no contar con disposición de los equipos apropiados en la ciudad del domicilio, el investigador dedicó tiempo sobre todo los fines de semana para poder hacer las verificaciones experimentales. Dicha dificultad, terminó afectando una vez la planeación del proyecto, pues es evidente que la línea de tiempo del proyecto se dilató y ocasionó dedicación de tiempo mayor a la planificada inicialmente.

1. 4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares mediante el uso de convertidores conmutados de CC/CC.

1.4.2. Objetivos Específicos

- 1) Obtener modelos de los perfiles de radiación solar y de carga en las instalaciones de la sede principal de la Universidad Santo Tomás.
- 2) Realizar el análisis y dimensionado del convertidor conmutado de CC/CC para el sistema de control MPPT.
- 3) Modelar el sistema panel fotovoltaico-Convertidor de potencia como un único sistema, con el fin de generar una herramienta de diseño de controladores.
- 4) Diseñar, analizar y evaluar una estrategia de control clásico y una de control avanzado para realizar MPPT en el sistema panel-convertidor.
- 5) Modelar y simular el sistema panel fotovoltaico-Convertidor de potencia en lazo cerrado utilizando la herramienta apropiada (Matlab, PSIM), con el fin de obtener las características dinámicas del sistema ante perturbaciones climáticas y de perfil de carga.
- 6) Comprobar experimentalmente las estrategias de control MPPT en el convertidor conmutado diseñado.

1. 5. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La ejecución de este proyecto de investigación se llevó a cabo en torno a los objetivos descritos en él mismo. Cada uno de los cuales estuvo vinculado a un conjunto de tareas, cuyas descripciones, interrelaciones, metodología de trabajo, investigadores responsables y participantes, son descritos con detalle a continuación.

- Tarea 1: Búsqueda bibliográfica sobre los temas de la investigación propuesta: modelado de paneles solares, convertidores CC/CC para utilización en paneles, diseño de controladores MPPT y técnicas de control.
- Tarea 2: Análisis y recolección de información sobre las condiciones de radiación solar y perfiles de carga en la sede principal de la Universidad Santo Tomás y de la ciudad de Villavicencio (Meta).
- Tarea 3: Análisis, diseño y dimensionado electrónico del convertidor de voltaje CC/CC.
- Tarea 4: Modelado y simulación del generador fotovoltaico adaptado al convertidor CC/CC.
- Tarea 5: Diseño de la estrategia de control para el seguimiento al punto de máxima potencia en paneles solares.
- Tarea 6: Diseño de herramientas para análisis y simulación (Matlab, PSIM) del sistema panel fotovoltaico y Convertidor de potencia en lazo cerrado, para obtener las características dinámicas del sistema ante perturbaciones climáticas y de perfil de carga.
- Tarea 7: Evaluación cualitativa de las estrategias de control MPPT en el convertidor conmutado diseñado.
- Tarea 8: Redacción y construcción del documento final de la investigación.

Este trabajo de investigación se elaboró según indicaciones dadas por la Universidad Santo Tomás y por el director del proyecto, en cuanto al tiempo de inicio y duración. El mes 1, corresponde al mes que inicia a correr una vez el anteproyecto fue aprobado por el comité de evaluación de proyectos de grado y se dio vía libre para iniciar el desarrollo de la investigación, se culminó la investigación luego de 1 año de trabajo como se planeó, a pesar que dicho periodo de tiempo no fue continuo.

1. 6. ESTADO DEL ARTE

La mayoría de generadores eléctricos basados en energías alternativas, dependen de un fenómeno físico con una frecuencia bastante definida, por ejemplo: Mareas, Viento, etc. Según (Torres et al., 2008) y (Rodriguez Meza & Cervantes Cota, 2005), se puede plantear todo un tema de discusión frente a cuál de las formas de generación de energía es más eficiente y sencilla de utilizar, sin embargo algunos autores como (Mejia et al., 2010) plantean: “Los avances en la electrónica de potencia y la

aplicación de materiales más eficientes para la construcción de paneles solares, hacen de este tipo de energía una de las más importantes para el futuro.”. Sentando el precedente que la energía generada por medio de paneles solares es una realidad científica actual y dándole la importancia que se merece.

Los generadores fotovoltaicos dependen de un fenómeno cuyo comportamiento es poco controlable por el ser humano de acuerdo a lo indicado por (Abid et al., 2014) y respaldado por (Ruiz C et al., 2010), por lo que se definió entonces como objeto de estudio de este proyecto de investigación, la mejor forma de controlar y hacer seguimiento al punto de máxima potencia (MPP) en la etapa del convertidor CC/CC en generadores con paneles solares, dado que el fenómeno que produce la energía no es posible controlarlo, pero sus efectos sí. Además los circuitos adaptados al generador como los inversores y convertidores pueden ser controlados para que el punto de operación del generador siempre esté alrededor del MPP de acuerdo a lo especificado por (Mejia et al., 2010) y (Abid et al., 2014).

A continuación, en la *Tabla 1*, se podrá observar la evolución histórica desde que el efecto fotoeléctrico fue observado por primera vez, hasta la utilización en el siglo XX y XXI de la energía solar fotovoltaica.

Tabla 1. Historia de la Tecnología fotovoltaica.

Tomado de (Torres et al., 2008)

AÑO	DESCRIPCIÓN
1839	Becquerel, físico francés, descubre el efecto fotovoltaico.
1877	Se observa el efecto fotovoltaico en selenio sólido. Se construye la primera célula de selenio.
1921	Albert Einstein gana el Premio Nobel por sus teorías explicativas sobre el efecto fotoeléctrico.
1954	Se publican los resultados del descubrimiento de células solares de silicio con una eficiencia del 4,5%.
1958	El 17 de marzo se lanza el Vanguard I, el primer satélite alimentado con energía solar fotovoltaica. Ese mismo año se lanzan los satélites Explorer III, Vanguard II y Sputnik-3: todos ellos alimentados con energía solar fotovoltaica.

1960	Se consiguen células fotovoltaicas que alcanzan una eficiencia del 14%.
1962	Se lanza el satélite Telstar, que fue el primer satélite comercial de telecomunicaciones.
1963	En Japón se instala un sistema fotovoltaico de 242 W en un faro.
1973	La Universidad de Delaware construye “Solar One”, una de las primeras viviendas con energía solar fotovoltaica.
1974-1977	Se fundan las primeras compañías de energía solar.
1981	Vuela el “Solar Challenger”, un avión no tripulado abastecido con energía solar fotovoltaica. Se instala en Jeddah, Arabia Saudita, una planta desalinizadora por ósmosis inversa abastecida por un sistema fotovoltaico de 8 kW.
1983	La producción mundial de energía solar fotovoltaica supera los 21,3 MW, y las ventas superan los 250 millones de dólares. El Solar Trek, un vehículo alimentado por energía solar fotovoltaica (1 kW) atraviesa Australia: 4000 km en 20 días. Se construye una planta de energía solar fotovoltaica de 6 MW en California, en una extensión de 120 acres.
1992	Se instala un sistema fotovoltaico de 1,5 kW en Lago Hoare, Antártida, con baterías de 2,4 kWh. Se utiliza para abastecer el equipamiento de un laboratorio, iluminación, PCs e impresoras y un pequeño horno microondas.
1996	El “Ícaro”, un avión no tripulado movido por energía solar fotovoltaica, Sobrevuela Alemania. Las alas y la zona de cola están recubiertas de 3000 células super eficientes con una superficie de 21 m ² .
2000	Estación espacial internacional, la energía utilizada viene de 16 estructuras de 72 metros de envergadura por 12 metros de ancho, 864 metros cuadrados de paneles solares en cada una de ellas.
2005	Tratado de Kioto
2005	Auge de las energías alternativas, creación de grandes plantas generadoras en USA, Canadá, la UE y los países más industrializados invierten en I&D sobre el tema.
2015	Las pruebas de laboratorio arrojan eficiencias cercanas al 24%, lo que permite la reducción del tamaño de los paneles y por lo tanto el aumento en la energía generada.
Hacia el futuro...	Eficiencias mucho más altas, investigación en nuevos materiales para la fabricación paneles fotovoltaicos.

Es evidente, según (Torres et al., 2008) que el desarrollo de esta tecnología ha tenido su tiempo en la historia, hace más de un siglo se ha venido estudiando su comportamiento e investigando la manera de mejorar y hacer más eficiente este tipo de generación de energía, la cual no solo es simple y fácil de generar, sino que no involucra turbinas ni elementos con componentes mecánicos que tienden al desgaste por fricción, al ruido y a necesitar mucho más mantenimiento que un generador fotovoltaico convencional.

En la actualidad los convertidores conmutados de CC/CC, han redefinido la electrónica de potencia convencional, la cual se centraba en el uso de semiconductores en potencias media o alta. La aparición de muchas nuevas tecnologías, la necesidad abrumadora de utilizar fuentes de generación eléctrica eficientes y limpias, han catapultado el desarrollo y el estudio de las fuentes conmutadas y en particular los convertidores CC/CC según lo señalado por (Martinez Salamero et al., 2009).

A continuación se presenta un listado de las estrategias de control más comunes en lo que a los algoritmos MPPT se refiere, es importante señalar que en un circuito convertidor con MPPT, es básicamente, un controlador (análogo o digital), que modifica el ancho del pulso o ciclo útil del convertidor conmutado de potencia CC/CC, según lo que se desee lograr (Ruiz C et al., 2010, p. 1).

- **Perturbar y Observar:** Según el autor Ruiz C et al., (2010, p. 2), el método de perturbar y observar, es un algoritmo aplicado a distintos tipos de convertidores de potencia y tiene un principio muy simple, el cual consiste en realizar comparaciones de potencias a medida que se hacen variaciones de carga para aumentar o disminuir el voltaje del generador. Es de esperar que las variaciones del voltaje se obtengan al variar el ciclo útil del convertidor de potencia. En capítulos posteriores, este método fue estudiado en detalle y fue uno de los implementados en el circuito producto de este trabajo.
- **Conductancia Incremental:** El método de conductancia incremental, se fundamenta en un análisis al detalle de la gráfica P vs V , y del comportamiento de la variación de la potencia por unidad de voltaje. Con respecto al método anterior de perturbar y observar, se tiene una respuesta más acertada cuando los cambios de temperatura en el panel fotovoltaico son rápidos. Por lo tanto la conductancia incremental, permite tener una mejor respuesta y estabilidad del MPP en el convertidor, según lo indicado por (Mejía et al., 2014). Al igual que el método descrito con anterioridad, se desarrolló un estudio detallado y la implementación del algoritmo, los resultados obtenidos se pueden observar en el capítulo 4 y 5 de este documento.

Se hace entonces importante señalar, que el estudio antes mostrado como estado del arte, fundamentó la investigación realizada, puesto que, existen en la actualidad muchos algoritmos MPPT, sin embargo la combinación de dichos métodos y distintos convertidores, es el aporte más relevante evidenciado en este trabajo.

1. 7. MARCO REFERENCIAL

Los principales conceptos y teorías con las que se trabajó en este proyecto de investigación se encuentran en las siguientes páginas. El objeto de esto, es contextualizar al lector, sobre la temática y orientar en la búsqueda de referencias bibliográficas actualizadas sobre el tema, logrando entre otras cosas dar el suficiente soporte conceptual básico y fundamental en cualquier trabajo de investigación.

1.7.1. Efecto Fotoeléctrico o Fotovoltaico

El principal fenómeno físico y en el cual se fundamenta la generación de energía a partir de la luz solar, es el efecto fotoeléctrico. Según lo referido en (Poggi-Varaldo et al., 2009), este fenómeno ocurre cuando se excita un material semiconductor determinado, en el que existe una unión PN, con algún tipo de luz, esta excitación hace que en las terminales de la unión se genere una pequeña variación en el nivel de tensión la cual, dependiendo del arreglo de celdas solares interconectadas, se puede aprovechar para generar una gran cantidad de energía que puede satisfacer parte de la demanda de la humanidad.

De acuerdo a (Rodriguez Meza & Cervantes Cota, 2005), el efecto fotoeléctrico, es el principio de funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. Dicho efecto ha sido objeto de estudio desde finales del siglo XIX, el descubrimiento oficial fue atribuido al científico Heinrich Hertz en 1887.

El fenómeno consiste en que al incidir un haz de luz que está conformado por fotones, sobre un material con unas características específicas, se genera una pequeña tensión o diferencia de potencial en las terminales de dicho material, lo anterior de acuerdo a (Murdoch & Reynoso, 2013). En la *Figura 2*, se puede observar un diagrama sencillo de la descripción del efecto fotoeléctrico.

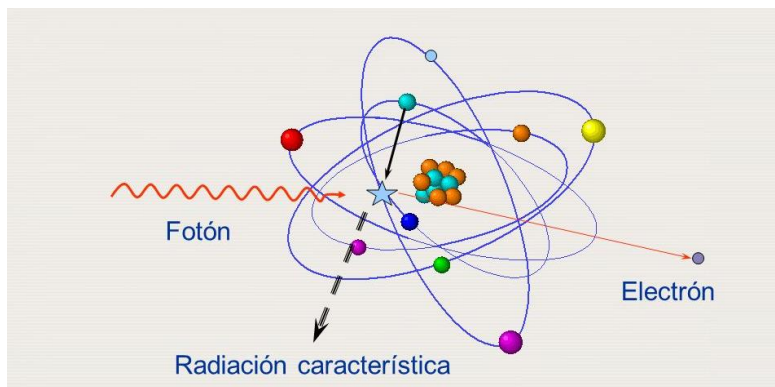


Figura 2. Efecto Fotoeléctrico.

Tomado de (Cruz Boscá & Buendía, 2009)

1.7.2. Panel Solar

De acuerdo a los siguientes autores (Torres et al., 2008), Armando, Chávez, & Luis, 2014 y (Murdoch & Reynoso, 2013), un panel solar, es un elemento semiconductor fabricado para generar energía eléctrica a partir de luz solar que incide directamente en su cara superior, esto debido al efecto fotoeléctrico. Lastimosamente, es un método poco eficiente, costoso en relación a otras formas de generación, además que tiene un impacto ambiental negativo, un aspecto positivo a señalar es que requiere poco mantenimiento una vez instalado y calibrado para su mejor operación.

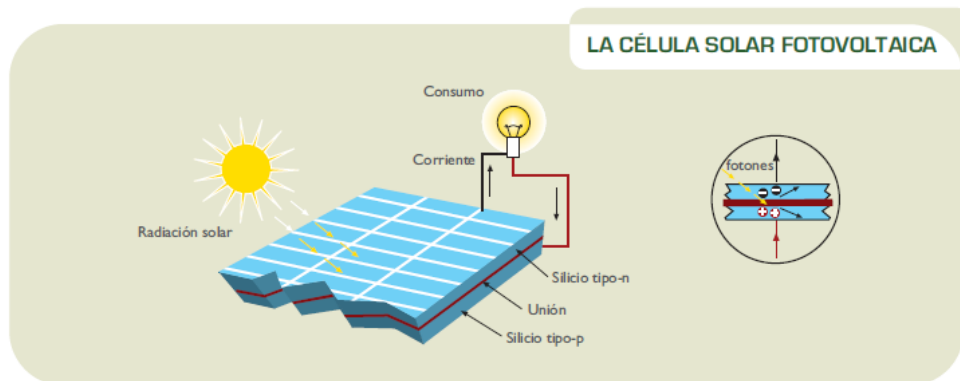


Figura 3. Funcionamiento Celda Solar.

Tomado de (Torres et al., 2008)

Un panel solar está conformado por un arreglo considerable de celdas solares independientes, fabricadas en su mayoría con Silicio (Si) dopado con algún otro elemento que permite mejorar sus cualidades, según (Ruiz C et al., 2010). Dichas celdas se pueden configurar en serie o en paralelo, según los valores de voltaje e intensidad que se deseen obtener del panel solar. En la

Figura 3, se puede observar y detallar la estructura y funcionamiento de un panel solar fotovoltaico.

1.7.3. Punto de Máxima Potencia (MPP)

Tal y como se estableció en apartados anteriores, los paneles solares tienen una respuesta en tensión o intensidad, altamente dependiente de algunas variables de entrada, particularmente la radiación solar y la temperatura. De acuerdo a estas condiciones no inherentes a los paneles, solo existe un punto de máxima potencia (MPP) para cada valor de radiación (G) y de Temperatura (T), tal y como se muestra entonces en la *Figura 4*.

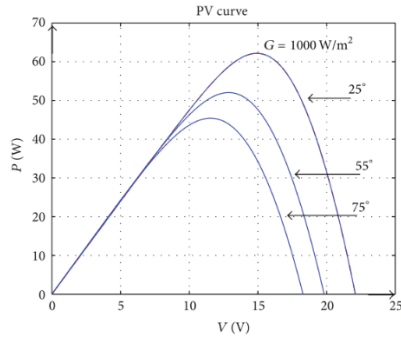


Figura 4. P vs V con T. variable.

Tomado de (Abid et al., 2014)

Debido a estas inestables condiciones, los paneles solares suelen tener curvas características muy particulares, en la *Figura 5* se relacionan gráficas de los distintos puntos de operación en los cuales ocurre máxima transferencia de potencia en el panel solar.

Basados en estas curvas de carga, fue posible realizar un ajuste de las condiciones de carga, tomando en cuenta que la corriente y voltaje de los paneles se ve afectada por condiciones atmosféricas, por lo que entonces ajustar condiciones de carga fue la opción escogida, refiriéndose a carga como el convertidor conmutado CC/CC, de esta forma se pudo adaptar continuamente el convertidor conmutado, de forma tal que la potencia entregada por el panel solar siempre esté al máximo.

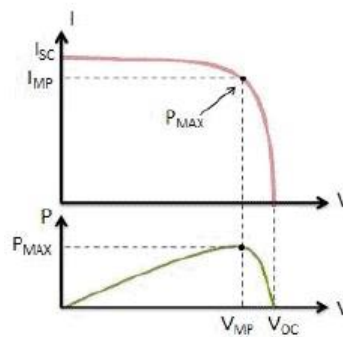


Figura 5. Punto de potencia máxima

1.7.4. Convertidores conmutados

La electrónica de potencia ha tenido una evolución fuerte impulsada sobre todo por el auge que se está viendo en la implementación de sistemas de generación de energía renovable y no convencional, la aplicación de los conceptos y elementos presentes en la electrónica de potencia varía desde los dispositivos más comunes, hasta aplicaciones aeroespaciales o de transmisión de alta potencia, según lo descrito por el autor citado (Hart, 2001, p. 2).

En el concepto de Rashid (2001, p. 13), los convertidores conmutados se encargan de modificar niveles de tensión e intensidad, según lo que se pretenda, es decir si se necesita obtener AC a partir de CC, el convertidor emplea los dispositivos semiconductores necesarios para hacerlo. Este tipo de convertidores comúnmente se conocen como inversores de potencia y son ampliamente usados en los generadores fotovoltaicos, dado que el uso convencional de la energía a nivel mundial es para energía eléctrica en AC. Los convertidores típicos son: Convertidor CC/CC (objeto de estudio de este proyecto), Convertidor AC/CC (Fuentes reguladas), Convertidores CC/AC (Inversores), convertidores AC/AC (Rectificadores). Cualquiera de estos convertidores, obedece al siguiente diagrama de bloques:

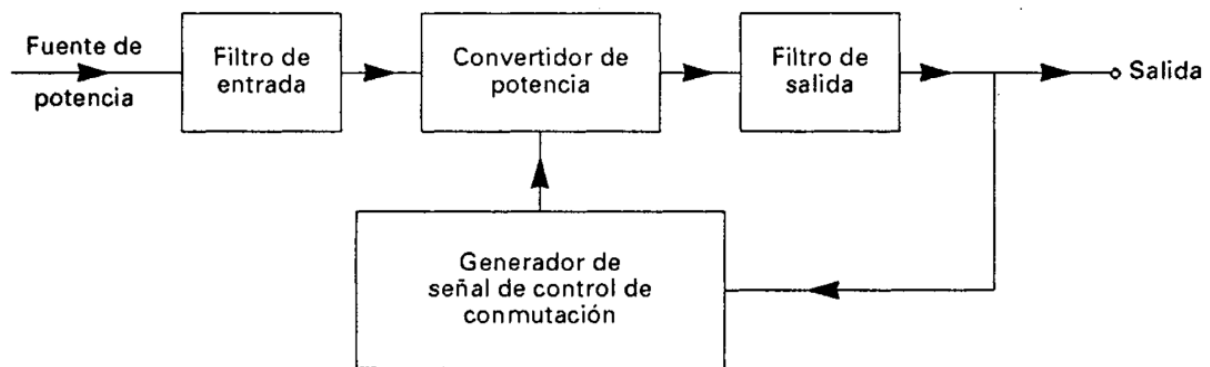


Figura 6. Convertidor de potencia Generalizado.

Tomado de (Rashid, 2001)

Los circuitos convertidores, han sido un avance en la electrónica de potencia de tamaño considerable. Es casi inevitable que se encuentre un convertidor, cualquiera que sea su naturaleza en un elemento eléctrico/electrónico actual. En el campo de las energías renovables cuya fuente principal suele ser de naturaleza continua, los convertidores CC/CC, tienen un fuerte campo de investigación en lo referente al mejoramiento del diseño de los convertidores y a la afinación de las técnicas de control que se usan para mantener, lo más estable posible, el nivel de potencia en la carga.

Las redes circuitales más típicas de convertidores conmutados aparecen descritas a continuación:

Tipo Boost: Es una de las redes circuitales más comúnmente empleada para estudios de investigación y aplicaciones en energías renovables. La característica más importante es que eleva la señal de voltaje de entrada del convertidor.

Tipo Buck: La característica más importante de este convertidor es la capacidad de reducir el voltaje de entrada a la red, por lo que se emplea bastante en el tema de regulación de voltaje.

Tipo Buck - Boost: La característica más importante de este convertidor es la capacidad de operar como un elevador o como un reductor del voltaje de entrada a la red, es un convertidor que se puede considerar nuevo en aplicaciones de energías no convencionales.

Tipo Boost Cuadrático: La característica más importante es que eleva el voltaje de entrada a la red, inversamente proporcional al cuadrado del porcentaje del ciclo de trabajo, este convertidor es el utilizado en este trabajo.

1.7.5. Girador de Potencia

Un convertidor de potencia conmutado puede considerarse un girador de potencia si se analiza desde el siguiente punto de vista:

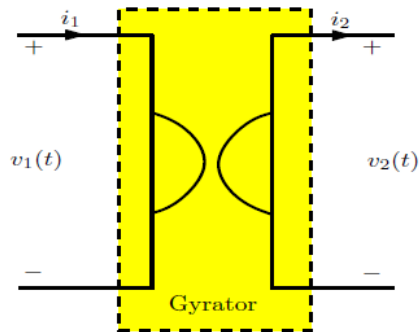


Figura 7. Girador de Potencia.

Tomado de (Cid-Pastor et al., 2007)

Se entiende entonces que lo resaltado en amarillo, es la red circuital de 4 puertos, y se considera el girador de potencia, para el caso de este proyecto, será el convertidor conmutado de potencia. El concepto propio se basa en la siguiente expresión matemática y de la cual se desprenden algunos de los giradores más comunes y cuyo comportamiento puede ser aprovechado para la búsqueda de los máximos de potencia (Haroun & Aroudi, 2017). La relación existente entre los puertos de entrada y salida es la siguiente:

$$P1 = P2$$

$$V1 * I1 = V2 * I2$$

$$I1 = gV2, \quad I2 = gV1 \quad (1)$$

$$V1 = rI2, \quad V2 = rI1 \quad (2)$$

Las ecuaciones 1 y 2, definen el concepto fundamental del girador de potencia, tanto que el caso de las ecuaciones 1, se refiere al girador de conductancia o *g – gyrator*, y las ecuaciones 2, se refiere al girador por resistencia o *r – gyrator*. En apartados posteriores, se utilizó este concepto para implementar una solución en la búsqueda del punto de máxima de potencia, teniendo en cuenta que los algoritmos típicos se pueden utilizar para hallar bien sea la conductancia o la resistencia, el girador de potencia se ajusta y sintoniza como acople de impedancias mediante una estrategia de control. En el caso de este proyecto se utilizó el modo de control en modos deslizantes para dicha sintonización y los resultados obtenidos se pueden observar en el capítulo 5 de este documento.

1.7.6. Control en modos deslizantes (SMC)

El control en modos deslizantes, es un método no lineal de control por realimentación. Se basa en definir una superficie de deslizamiento, representada matemáticamente por una función $s(x)$, dicha función está definida por algunas de las variables de estado. La función $s(x)$, a la larga se comporta como una función de error cuyo valor en régimen permanente va a ser cero. Lo que se busca es que la variable o variables a controlar tienda o tiendan a converger a la superficie de deslizamiento definida y por consiguiente en estado estable.

CAPÍTULO 2

PANELES SOLARES Y RECURSO SOLAR

El conjunto de los dispositivos que se encuentran presentes en un generador fotovoltaico, se pueden trabajar mediante modelamiento matemático, ya que, como muchos fenómenos, se modelan mediante ecuaciones matemáticas. En la primera parte de este capítulo, se muestran algunas formas de modelar un panel solar o un conjunto de paneles solares mediante las herramientas apropiadas de simulación. Es importante describir el recurso solar en términos de cantidad de energía, esto se expondrá brevemente en lugares geográficos específicos y mediante el uso de bases de datos climáticas específicas tanto nacionales como internacionales; luego, se procederá a simular un panel solar típico mediante un software de simulación apropiado para tal fin como el Matlab o el PSIM.

2.1. RECURSO SOLAR (Perfiles de radiación solar)

Colombia cuenta con niveles importantes de radiación solar. Dado que el proyecto se está desarrolló conjuntamente en la ciudad de Villavicencio y en Bogotá, se ha procedido a caracterizar las dos ciudades, según la disponibilidad energética proveniente del sol. Debido a eso se analizaron principalmente tres aspectos: Promedio Mensual de Radiación, datos que pueden indicar cuales son los meses en los que hay mayor disponibilidad de energía; Promedio Mensual de Brillo Solar, en cuyo caso indica cuántas horas de sol hay mensualmente y por último, se analizó en detalle un horario mensual que detalla las 24 horas del día y su comportamiento según la disponibilidad del sol.

2.1.1. Recurso Solar en Villavicencio

El promedio anual de la radiación solar global es de 4,7 kWh/m² en la ciudad de Villavicencio Meta. De acuerdo a la información consultada, el mes más bajo en radiación solar es marzo con 4,3 kWh/m², tal y como se indica en la siguiente figura.

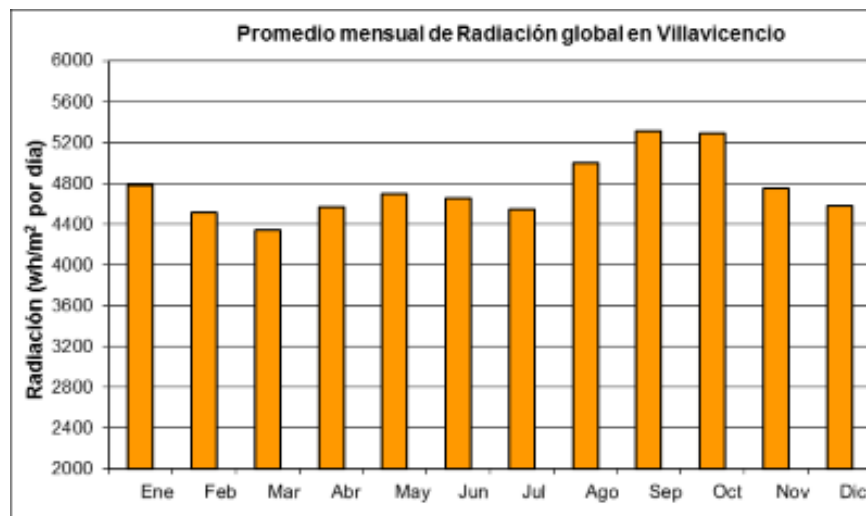


Figura 8. Radiación Solar Departamento del Meta.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

Es necesario y se debe tener muy en cuenta las horas promedio de brillo solar que hay por día, de tal manera que se pueda determinar si el recurso solar es suficiente para la demanda energética que se tendrá en los alrededores de la ciudad de Villavicencio. A continuación, se incluye una figura con la información relacionada a las horas de brillo del sol.

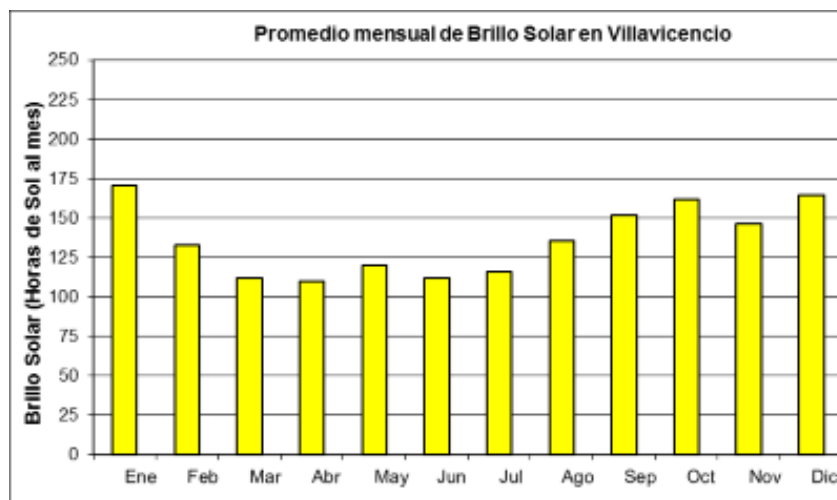


Figura 9. Horas de brillo Solar Departamento del Meta.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

Según la información obtenida del atlas interactivo del IDEAM, tanto las horas de brillo solar (HBS) como la radiación solar que se observó, el mes más desfavorable para generar energía a partir del Sol es el mes de marzo. El atlas interactivo del IDEAM, muestra datos específicos diarios y mensuales acerca de la cantidad de energía disponible, dicha información permite describir el recurso solar en Villavicencio y sus cercanías, como suficiente para alimentar un proyecto de generación de energía mediante generadores fotovoltaicos.

Tabla 2. Horario promedio de Radiación en Villavicencio.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

ESTACION ICA (VILLAVICENCIO)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m ²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
1-2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
2-3	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
3-4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
4-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
5-6	0,1	0,1	0,1	0,7	1,6	1,4	0,5	0,4	1,6	3,8	2,5	0,6
6-7	38,5	32,9	35,1	53,8	58,5	64,1	52,0	53,7	77,3	100,6	86,0	60,1
7-8	186,1	145,5	134,0	167,8	169,3	181,1	171,7	175,4	245,6	281,1	271,1	246,3
8-9	384,5	311,1	270,0	304,0	303,0	338,9	316,9	332,8	425,7	483,5	451,0	445,9
9-10	602,6	500,6	426,6	466,8	451,5	490,3	439,2	482,1	594,9	660,9	642,8	616,6
10-11	758,7	656,2	540,9	572,0	549,6	578,8	554,5	588,8	648,5	720,2	715,9	723,8
11-12	743,9	709,7	591,5	614,9	615,4	631,2	591,5	624,3	663,6	701,8	683,8	671,5
12-13	723,3	646,1	630,0	627,4	604,6	593,3	606,9	606,1	721,5	672,7	656,5	667,6
13-14	618,2	583,4	597,8	555,5	510,2	481,8	490,9	566,2	676,5	586,3	538,2	531,6
14-15	484,2	462,8	488,8	431,8	444,4	404,9	451,9	472,5	519,0	449,9	386,5	420,6
15-16	315,7	327,0	326,8	302,9	295,7	289,6	338,8	331,0	356,3	281,1	252,7	301,3
16-17	167,7	170,4	176,9	152,5	148,4	149,6	179,0	179,3	171,1	123,1	108,4	128,5
17-18	40,0	46,9	44,0	31,6	32,2	33,1	43,4	44,5	30,9	15,1	11,7	21,0
18-19	0,6	0,6	0,3	0,2	0,2	0,4	0,6	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3
19-20	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
20-21	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
21-22	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
22-23	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
23-0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2
Acumulada diaria	5064,0	4593,4	4262,9	4282,0	4184,6	4238,5	4237,7	4457,7	5132,8	5080,5	4807,2	4835,8

Entre 0 y 200 (Wh/m²)
 Entre 200 y 400 (Wh/m²)
 Entre 400 y 600 (Wh/m²)
 Entre 600 y 800 (Wh/m²)
 Mayor a 800 (Wh/m²)

2.1.2. Recurso Solar en Bogotá D.C

Para el caso de Bogotá, se puede observar en la *Figura 10*, que el valor pico de radiación solar, es menor que en el caso de Villavicencio.

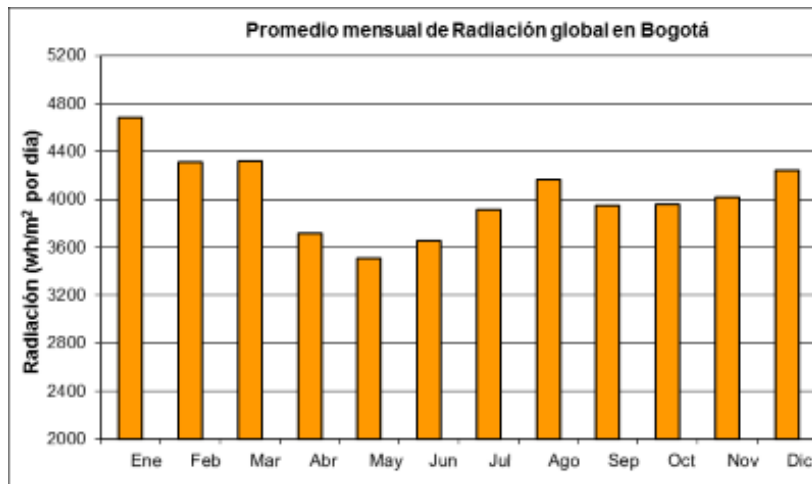


Figura 10. Promedio Mensual de Radiación en Bogotá.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

El valor para las horas de brillo solar, es muy similar al presentado en Villavicencio, esto se debe pues a que la ubicación geográfica de las 2 ciudades es muy cercana, por lo tanto el sol está presente un determinado número de horas muy similar.

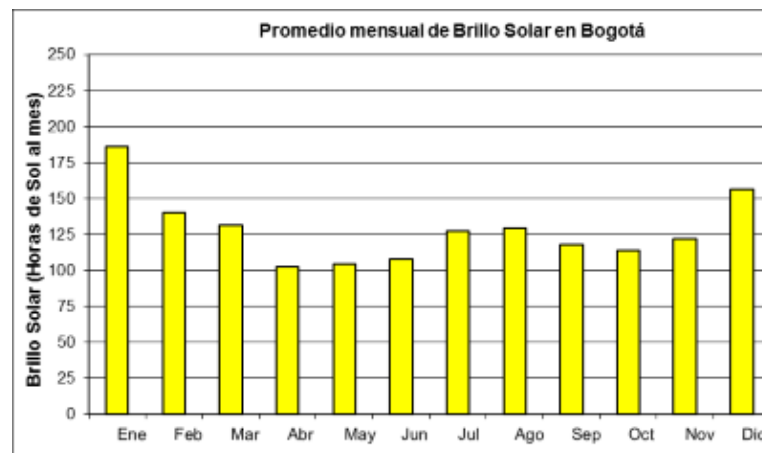


Figura 11. Horas de brillo en Bogotá.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

Los horarios promedio con valor de radiación incluidos en la *Tabla 5*, evidencian una vez más, que en cuanto a recurso solar, la mejor opción es la ciudad de Villavicencio, sin embargo con los valores

presentados en Bogotá, se puede garantizar el funcionamiento de un generador fotovoltaico, dado que su operación también depende de los parámetros con los que se diseña.

Tabla 3. Horario promedio de Radiación en Bogotá.

Tomado de (IDEAM & UPME, 2015)

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m ²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	458,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2

Entre 0 y 200 (Wh/m²)
 Entre 200 y 400 (Wh/m²)
 Entre 400 y 600 (Wh/m²)
 Entre 600 y 800 (Wh/m²)
 Mayor a 800 (Wh/m²)

2.2. MODELOS DEL PANEL SOLAR

En el marco referencial de este mismo documento, se ha definido lo que es un panel solar. En este apartado, se describirá un poco más en detalle cada uno de los aspectos presentes en los paneles solares y se procederá a adaptar en un software de simulación, un modelo matemático que se comporte de acuerdo a las condiciones establecidas de diseño y obviamente sea muy preciso en cuanto a la emulación del comportamiento de los paneles reales. El fin de realizar el estudio de los paneles solares, tiene sentido en la medida que son ellos la fuente de generación en todo sistema fotovoltaico y se comportan como una planta que puede ser controlada empleando estrategias clásicas y modernas.

Una celda solar, es una unión PN fabricada con un material semiconductor específico, generalmente silicio (Si), por lo que su comportamiento es similar al de los diodos rectificadores. Sumado a esto, se podría afirmar que las celdas solares son fuentes de corriente, conectadas en paralelo a un diodo (modelo de unión PN) y que la fuente de corriente depende entonces de la radiación solar y de la temperatura.

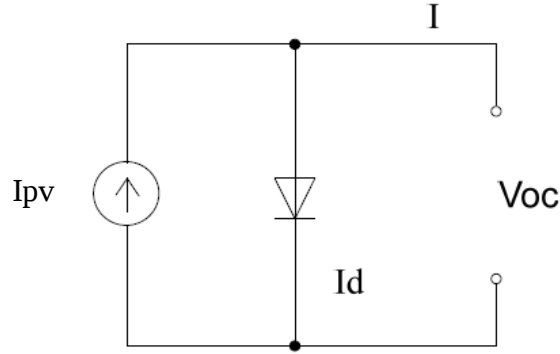


Figura 12. Circuito Equivalente Celda Solar Ideal

Tomando entonces las ecuaciones equivalentes y una técnica de análisis de circuitos muy básica, se puede afirmar que la corriente de la carga “I”, se comporta así:

$$I = I_{pv} - I_d$$

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{kT_c A}} - 1 \right)$$

$$I = I_{pv} - I_0 (e^{38,9V} - 1) \quad (3)$$

La ecuación (3), estaría expresando la corriente en la carga de una celda solar ideal a una temperatura ambiente de 25°. I_0 , representa la corriente de saturación inversa en la unión PN. Existen en la literatura modelos matemáticos de mayor exactitud, dichos modelos incluyen una pequeña resistencia que aparece entre las celdas solares, ya sea que se conecten en serie o paralelo. Por esta razón, algunos modelos de las celdas incluyen resistencias pequeñas como R_s o R_p según sea el caso. Esta relación matemática puede verse en detalle en las ecuaciones (4) que han incluido las resistencias en serie y paralelo y que se acercan más a lo que realmente ocurre dentro de una celda solar.

$$I = I_{pv} - I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{kT_c A}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad (4)$$

$$V_d = V + IR_s$$

Estas expresiones matemáticas permiten analizar las celdas solares de una manera más exacta, se han obtenido del circuito mostrado por la *Figura 13*, además, se hace necesario aclarar que una celda solar, produce cerca de 0.5 V, por lo normalmente en un módulo se agrupan y conectan en serie o paralelo sea que se desee aumentar intensidad o voltaje. La resistencia shunt o paralelo, se incluye para dar mayor exactitud al modelo matemático, sin embargo, en la mayoría de los casos se considera mucho más grande que el voltaje del diodo o de la celda, por lo que casi siempre la corriente en la rama de R_p es nula.

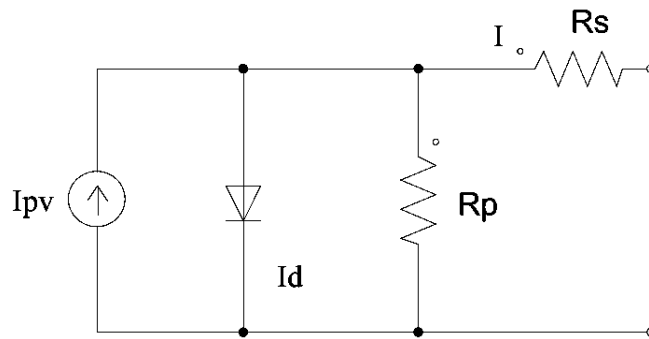


Figura 13. Circuito Equivalente Celda Solar R_s y R_p

2.3. DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO SOLAR

Actualmente, la Universidad Santo Tomás, cuenta en su laboratorio de electrónica con un módulo solar de 20W, de referencia BLD 20-36P y con tecnología policristalina. Tomando en cuenta que se necesita diseñar el convertidor de manera apropiada y que ofrezca una potencia de 60W, se procede a conectar los paneles como un arreglo de 3 en paralelo. Todo esto con el fin de convertir la planta de un solo panel de 20W en una de 60W con tres paneles. A continuación, se puede observar las características de cada uno de los paneles que se utilizaron en la implementación de laboratorio.

Tabla 4. Características Módulo BLD20-36P

MODULO SOLAR BLD 20-36P	
Max. Potencia (P_{max})	20 W
Max. Voltaje (V_{mp})	17,5V
Max. Corriente (I_{mp})	1,15 A
Voltaje de Circuito Abierto (V_{oc})	21,6 V
Corriente de Corto Circuito (I_{sc})	1,3 A

Dimensiones	476 x 350 x 25 mm
Peso	2 kg
Tecnología de Celda	Policristalino

Esta red descrita con anterioridad, sería la solución para implementar la planta solar junto con el convertidor, en el momento en que las pruebas de laboratorio se hagan. Al conectar los 3 módulos en paralelo, se logró una potencia en el MPP de 60W, por otra parte, la corriente en MPP será de 3,45 A y la corriente de Corto sería 3,9 A.



Figura 14. Módulo BLD20-36P. Fuente Autor.

En el apartado siguiente se procede a simular empleando el software PSIM, los paneles o módulos acorde con las características indicadas en la Tabla 6 y que se puede observar en la Figura 14.

2.4. SIMULACIONES

El análisis de las curvas de carga de las celdas o paneles solares, permitirá identificar claramente cuál es el punto de máxima potencia (MPP) del panel o incluso del arreglo fotovoltaico, de ahí la importancia de las curvas de carga. Tomando en cuenta los circuitos mostrados en el apartado anterior, y las características de los módulos solares que se van a utilizar, se pueden considerar las siguientes como las curvas que describe un panel solar con determinadas características.

Tabla 5. Valores de Referencia Panel Solar a Simular

CARACTERÍSTICA	VALOR SIMULADO
Número de Celdas	36

Potencia Máxima	60 W
Voltaje en MPP	17.5 V
Amperaje en MPP	3.45 A

Curva Corriente vs Voltaje: Graficando las ecuaciones (4), se puede observar que dicha gráfica sería la curva característica de una unión PN, restada de un valor constante I_{pv} , por lo que la gráfica de este tipo de función sería muy similar a lo que se observa en la *Figura 15*.

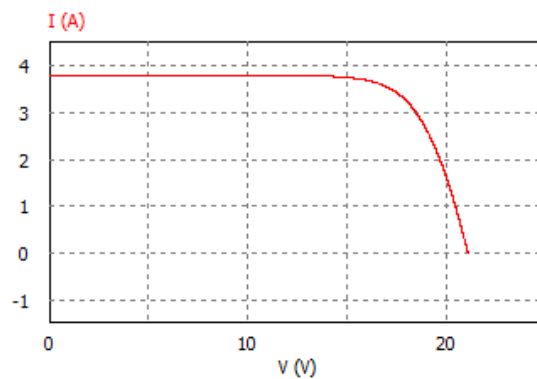


Figura 15. Corriente Vs Voltaje. Fuente Autor.

Curva Potencia vs Voltaje: Tomando en cuenta que el punto de partida para los algoritmos MPPT es conocer precisamente el punto de potencia máxima, es vital conocer la gráfica característica de la potencia contra el voltaje, gráfica que muestra el máximo punto con total claridad, tal como se observa en la *Figura 16*.

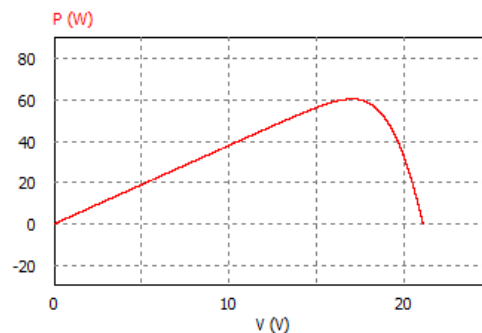


Figura 16. Potencia Vs Voltaje. Fuente Autor.

Teniendo en cuenta, las curvas características de las celdas solares, se observa claramente que, dependiendo de las condiciones, el panel entrega determinado valor de energía. El objetivo principal

de este trabajo, es pues, implementar una estrategia de búsqueda del punto de máxima potencia y que permita que el conjunto del módulo fotovoltaico opere siempre en, o en los alrededores del MPP; de esta forma, se garantiza un máximo aprovechamiento de la energía disponible y un control de carga eficiente y confiable.

Para llevar a cabo la simulación del controlador MPPT, se hace necesario incluir una etapa de simulación de un módulo fotovoltaico. En el caso del software PSIM, se utilizó el módulo ya existente en las librerías de este. El módulo solar incluido en las librerías del PSIM, permite configurar valores como el número de celdas solares, el valor de radiación solar y el valor de la temperatura, datos que son de suma importancia para la obtención de las señales de salida del módulo solar. En la Figura 17, se puede observar el módulo solar sometido a una señal variante de radiación solar, lo que provoca una señal variante de voltaje y de potencia a la salida.

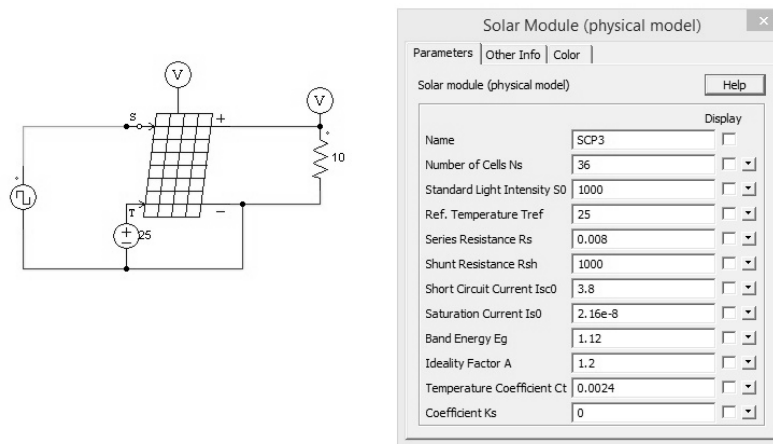


Figura 17. PSIM Módulo Fotovoltaico

Las señales de salida se comportan según las ecuaciones matemáticas dadas con anterioridad, lo que implica una variación en la potencia de salida según se puede observar en la Figura 18. Los controladores comunes de MPPT, garantizan que la salida del convertidor conmutado se encuentre al mismo nivel de potencia que la salida de los paneles solares.

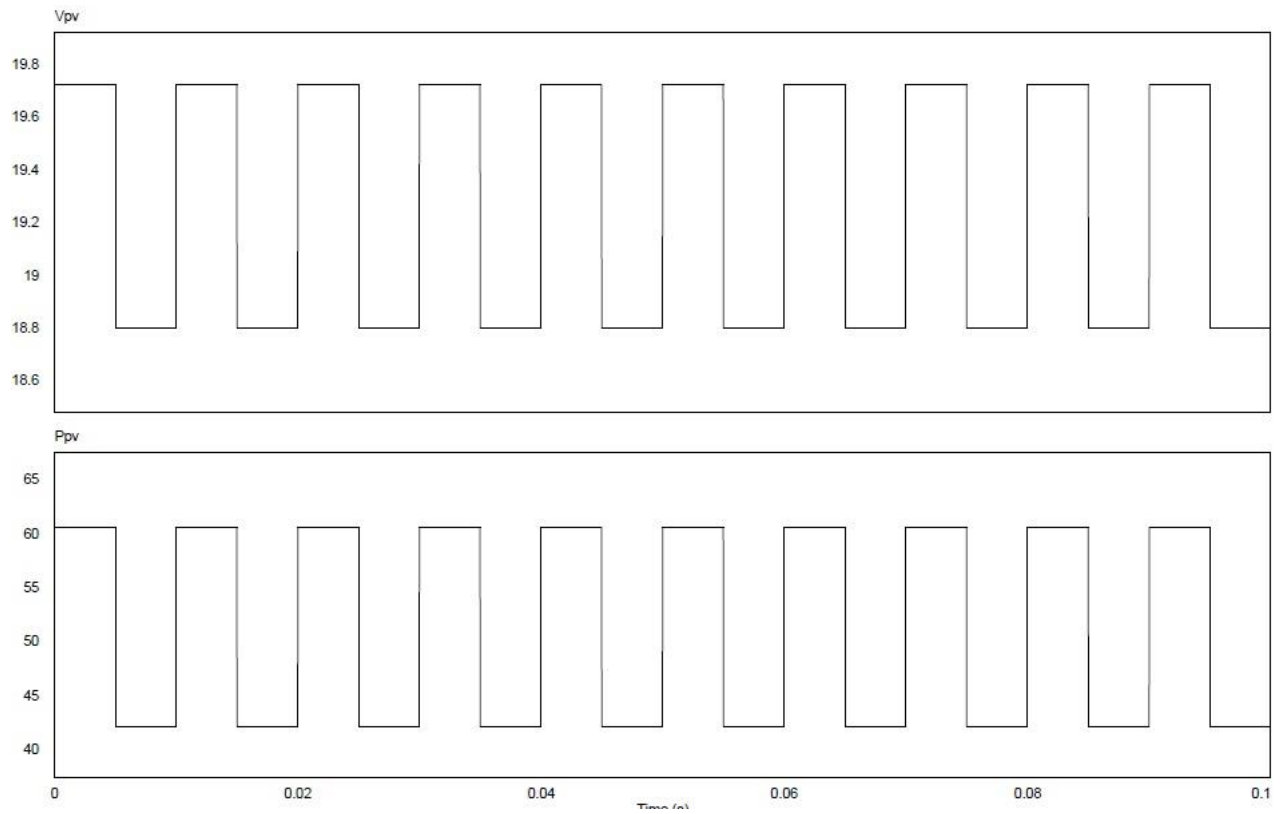


Figura 18. PSIM Voltaje y Potencia de salida

Este comportamiento es el esperado, sin embargo, la potencia de salida del panel solar, generalmente no es aprovechada en su totalidad, y depende de la naturaleza del convertidor que controla la carga del acumulador, lo que obliga a la implementación de estrategias de control que permitan seguir dicha potencia como referencia para controlar la salida del convertidor conmutado de potencia.

CAPÍTULO 3

CONVERTIDOR BOOST CUADRÁTICO

En el siguiente capítulo, se procede a describir, modelar y diseñar en estado estable el convertidor conmutado de potencia que se utilizó para el desarrollo de este trabajo de grado. Existen gran cantidad de convertidores que cumplen, básicamente, la misma función y es actuar como un acople de impedancias entre la salida del panel y la salida DC del sistema fotovoltaico. Sin embargo cada red, tiene una característica específica (Elevar, reducir, adaptar, etc.). El convertidor que se utilizó en este proyecto es el convertidor Boost Cuadrático (Torres P. et al., 2009), convertidor en el que el voltaje de salida sigue una relación proporcional al inverso del cuadrado del ciclo de trabajo. Dicho convertidor se construyó teniendo en cuenta el comportamiento estático del mismo, y en los siguientes apartados se modela con el objetivo de implementar la mejor estrategia de control a utilizar para poder implementar un MPPT.

Los convertidores conmutados de potencia, tienen una característica bastante llamativa y es que sus valores en estado estacionario, nunca dependen del valor de los elementos almacenadores de energía como los capacitores e inductores, por lo que se puede proceder a simular con cualquier valor, y el resultado esperado debe ser el mismo a cuando ya el convertidor se encuentre diseñado con los requerimientos de la carga.

3.1. MODELO CONMUTADO

El modelo matemático del convertidor, se puede obtener analizando el circuito mostrado por la Figura 19, en los 2 modos de operación ON ($u = 1$) y OFF ($u = 0$). A continuación, se presenta el análisis matemático correspondiente y la obtención de las ecuaciones de estado que ayudan a modelar el convertidor.

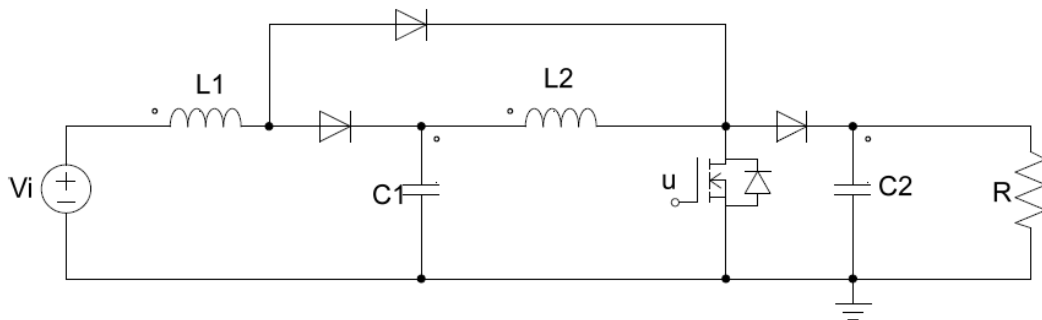


Figura 19. Convertidor Boost Cuadrático

El modo de operación ON, se puede observar en la Figura 20, y a partir de esa configuración, el análisis de circuitos arroja los resultados que se discutirán en adelante.

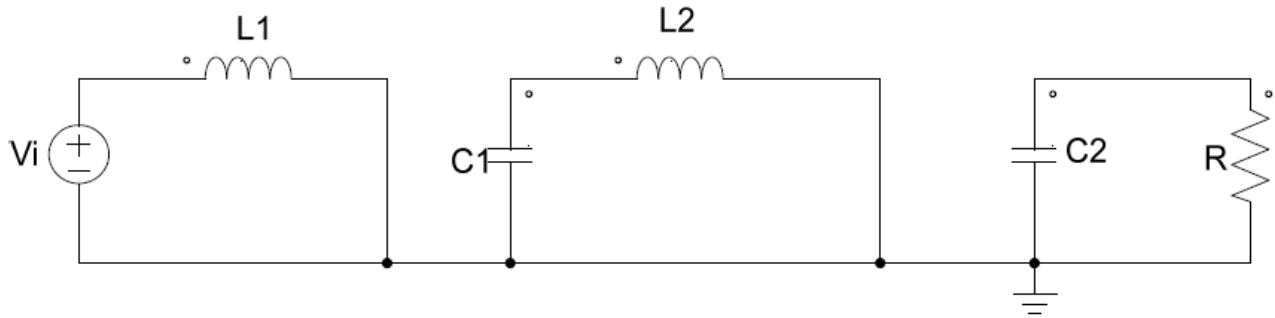


Figura 20. Convertidor Boost Cuadrático ON

Se analiza la malla de entrada teniendo en cuenta, que en régimen transitorio, la señal DC de la entrada al convertidor se comporta como una función del tiempo (v_i).

$$v_i = v_{L1}$$

$$v_i = L1 \frac{di_{L1}}{dt}$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_i}{L1}$$

En la malla intermedia de acuerdo al análisis de ley de voltajes, se tiene lo siguiente:

$$v_{C1} = v_{L2}$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{v_{C1}}{L2}$$

En la misma malla intermedia de acuerdo al análisis de ley de corrientes, lo siguiente:

$$i_{C1} = -i_{L2}$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = -\frac{i_{L2}}{C1}$$

Para la malla de salida, se tiene el siguiente análisis:

$$i_{C2} = -i_R$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = -\frac{v_{C2}}{RC2}$$

Cuando la señal binaria $u = 0$, el modo de operación del convertidor es OFF. La Figura 21 muestra el circuito equivalente que se debe analizar para las variables de estado faltantes.

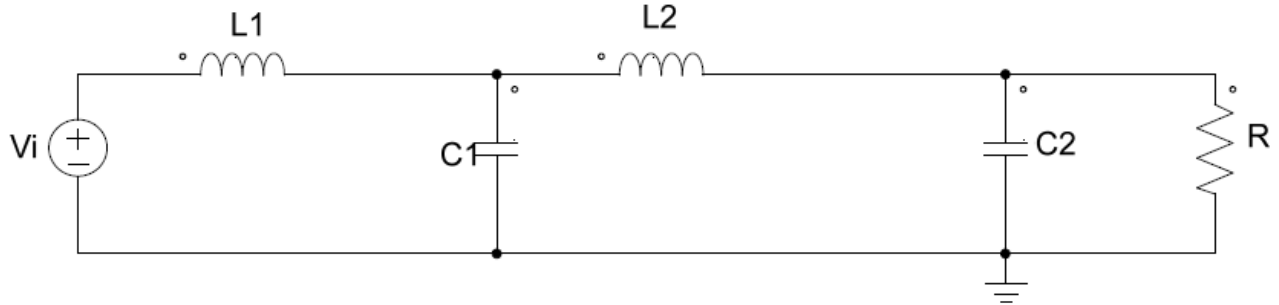


Figura 21. Convertidor Boost Cuadrático OFF

El análisis circuital de acuerdo a la Ley de Voltajes en la malla de entrada es el siguiente:

$$v_i = v_{L1} + v_{C1}$$

$$v_i = L1 \frac{di_{L1}}{dt} + v_{C1}$$

$$\frac{di_{L1}}{dt} = \frac{v_i - v_{C1}}{L1}$$

Para la malla de salida se tiene el siguiente análisis:

$$i_{L2} = i_{C2} + i_R$$

$$i_{L2} = C2 \frac{dv_{C2}}{dt} + \frac{v_{C2}}{R}$$

$$\frac{dv_{C2}}{dt} = \frac{i_{L2}}{C2} - \frac{v_{C2}}{RC2}$$

Analizando la malla central, se puede obtener las ecuaciones de los elementos C1 y L2, analizando por ley de voltajes:

$$-v_{C1} + v_{L2} + v_{C2} = 0$$

$$\frac{di_{L2}}{dt} = \frac{v_{C1} - v_{C2}}{L2}$$

Analizando por ley de corrientes se obtiene lo siguiente:

$$i_{L1} = i_{C1} + i_{L2}$$

$$\frac{dv_{C1}}{dt} = \frac{i_{L1} - i_{L2}}{C1}$$

Las ecuaciones de estado para el modelo conmutado sería el presentado en el conjunto de ecuaciones 3.

$$\begin{aligned}\frac{di_{L1}}{dt} &= \frac{v_i}{L1} - \frac{v_{C1}}{L1}(1 - u) \\ \frac{di_{L2}}{dt} &= \frac{v_{C1}}{L2} - \frac{v_{C2}}{L2}(1 - u) \\ \frac{dv_{C1}}{dt} &= \frac{i_{L1}}{C1}(1 - u) - \frac{i_{L2}}{C1} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} &= \frac{i_{L2}}{C2}(1 - u) - \frac{v_{C2}}{RC2}\end{aligned}\tag{5}$$

Tomando como base el modelo conmutado del convertidor, se puede implementar un modelo en el simulink que obedezca al comportamiento dinámico esperado y cuyos resultados de simulación se discutirán en un apartado siguiente.

3.2. RÉGIMEN ESTACIONARIO DEL CONVERTIDOR

Para las ecuaciones que rigen el régimen de estado estacionario del convertidor conmutado, se debe efectuar un procedimiento matemático en donde se iguala la derivada a 0 y se reemplaza la señal $u(t)$ por el ciclo de trabajo, el cual se representa por la letra “D”. Por ejemplo, en el caso de la ecuación de la derivada de la intensidad del inductor 1, se tiene lo siguiente:

$$\frac{V_i}{L1} - \frac{V_{C1}}{L1}(1 - D) = 0$$

$$V_{C1} = \frac{V_i}{1 - D}\tag{6}$$

Analizando la ecuación obtenida para la derivada de la intensidad del inductor 2, se tendrá entonces:

$$\frac{V_{C1}}{L2} - \frac{V_{C2}}{L2} (1 - D) = 0$$

$$V_{C2} = \frac{V_{C1}}{1 - D}$$

Se puede reemplazar la ecuación 4, para la expresión de V_{C2} , obteniendo lo siguiente:

$$V_{C2} = \frac{V_i}{(1 - D)^2} \quad (7)$$

Para el caso de la derivada del voltaje capacitor 2, se obtienen las siguientes expresiones matemáticas:

$$\frac{I_{L2}}{C2} (1 - D) - \frac{V_{C2}}{RC2} = 0$$

$$I_{L2} = \frac{V_{C2}}{R(1 - D)}$$

Reemplazando la expresión 5 en la anterior se obtiene lo siguiente:

$$I_{L2} = \frac{V_i}{R(1 - D)^3} \quad (8)$$

Ya como último análisis se tiene la diferencial del voltaje en el capacitor 1 igualada a 0 de la siguiente manera:

$$\frac{I_{L1}}{C1} (1 - D) - \frac{I_{L2}}{C1} = 0$$

$$I_{L1} = \frac{I_{L2}}{(1 - D)}$$

Reemplazando la expresión 6, en la anterior se obtiene la ecuación indicada en la expresión 7.

$$I_{L1} = \frac{V_i}{R(1 - D)^4} \quad (9)$$

Las expresiones 4, 5, 6 y 7 son las expresiones que rigen el comportamiento en estado estacionario del convertidor cuadrático y permitirán validar el modelo que se implemente en el simulador y en el laboratorio.

3.3. MODELO PROMEDIADO

El modelo promediado se obtiene con el fin de desestimar cualquier comportamiento dinámico rápido del sistema y aproximando el sistema, un poco más, a un modelo lineal de baja frecuencia. El modelo promediado se obtiene intercambiando la señal binaria $u(t)$, por su correspondiente ciclo de trabajo ($d(t)$). Por lo que el conjunto de las ecuaciones 3, se convierten en las siguientes:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\bar{i}_{L1}}{dt} &= \frac{\bar{v}_i}{L1} - \frac{\bar{v}_{C1}}{L1}(1-d) \\
 \frac{d\bar{i}_{L2}}{dt} &= \frac{\bar{v}_{C1}}{L2} - \frac{\bar{v}_{C2}}{L2}(1-d) \\
 \frac{d\bar{v}_{C1}}{dt} &= \frac{\bar{i}_{L1}}{C1}(1-d) - \frac{\bar{i}_{L2}}{C1} \\
 \frac{d\bar{v}_{C2}}{dt} &= \frac{\bar{i}_{L2}}{C2}(1-d) - \frac{\bar{v}_{C2}}{RC2}
 \end{aligned} \tag{10}$$

3.4. MODELO DE PEQUEÑA SEÑAL

Es necesario linealizar el modelo del convertidor conmutado para proceder a evaluar el comportamiento del sistema. Las estrategias de control que se van a implementar, se pueden llevar a cabo en el modelo linealizado de una manera más sencilla. En el procedimiento matemático se hace necesario considerar las componentes de estado estable (componentes DC) y la componente de pequeña señal; además se tendrá presente que la señal de entrada en estado estacionario ha alcanzado un valor estable, por lo que no se consideraría una parte alterna sino únicamente su componente de DC. Según lo anterior, se debe entonces tener en cuenta lo siguiente:

$$\bar{i}_{L1} = \tilde{i}_{L1} + I_{L1}$$

$$\bar{i}_{L2} = \tilde{i}_{L2} + I_{L2}$$

$$\bar{v}_{C1} = \tilde{v}_{C1} + V_{C1}$$

$$\bar{v}_{C2} = \tilde{v}_{C2} + V_{C2}$$

$$d = \tilde{d} + D$$

$$v_i = V_i$$

Haciendo los correspondientes reemplazos y agrupando componentes de pequeña señal y componentes de DC, se obtienen distintas expresiones para cada uno de estos casos. Las ecuaciones diferenciales que describen el sistema linealizado son las relacionadas como el grupo de ecuaciones 9.

$$\begin{aligned}
\frac{d\tilde{i}_{L1}}{dt} &= -\frac{(1-D)}{L1}\tilde{v}_{c1} + \frac{V_i}{(1-D)L1}\tilde{d} \\
\frac{d\tilde{i}_{L2}}{dt} &= \frac{\tilde{v}_{c1}}{L2} - \frac{(1-D)}{L2}\tilde{v}_{c2} + \frac{V_i}{L2(1-D)^2}\tilde{d} \\
\frac{d\tilde{v}_{c1}}{dt} &= \frac{(1-D)}{C1}\tilde{i}_{L1} - \frac{\tilde{i}_{L2}}{C1} - \frac{V_i}{RC1(1-D)^4}\tilde{d} \\
\frac{d\tilde{v}_{c2}}{dt} &= \frac{(1-D)}{C2}\tilde{i}_{L2} - \frac{\tilde{v}_{c2}}{RC2} - \frac{V_i}{RC2(1-D)^3}\tilde{d}
\end{aligned} \quad (11)$$

El modelo linealizado llevado a un espacio de estados sería el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}_{L1}} \\ \dot{\tilde{i}_{L2}} \\ \dot{\tilde{v}_{c1}} \\ \dot{\tilde{v}_{c2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{(1-D)}{L1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L2} & -\frac{(1-D)}{L2} \\ \frac{(1-D)}{C1} & -\frac{1}{C1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1-D)}{C2} & 0 & -\frac{1}{RC2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L1} \\ \tilde{i}_{L2} \\ \tilde{v}_{c1} \\ \tilde{v}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_i}{(1-D)L1} \\ \frac{V_i}{L2(1-D)^2} \\ -\frac{V_i}{RC1(1-D)^4} \\ -\frac{V_i}{RC2(1-D)^3} \end{bmatrix} \tilde{d}$$

El modelo en espacio de estados, permite hacer un análisis completo del sistema y además, evaluar el comportamiento del convertidor ante perturbaciones de entrada y carga, implementando estrategias de control con relativa facilidad. La función de transferencia del sistema modelado en espacio de estados, se puede obtener a través del Matlab, o haciendo un procedimiento algebraico un poco engorroso. Antes de proceder a realizar simulaciones sobre el modelo obtenido, conviene analizar el comportamiento en estado estable del convertidor que se describe en el apartado siguiente, dejando definidos los valores circuitales del convertidor con los que se trabaja más adelante.

3.5. DISEÑO DEL CONVERTIDOR Y CONDICIONES DE CARGA

El diseño estacionario del convertidor conmutado de potencia, obedece al comportamiento del mismo, precisamente en estado estable. Haciendo un análisis del comportamiento de las variables de estado en el tiempo, entonces se tiene lo siguiente respecto al comportamiento del voltaje y la corriente en la

inductancia 1, ver Figura 22. El análisis de estas gráficas es importante puesto que, tomando en cuenta el porcentaje de rizado de la señal de corriente en la bobina 1, y por consiguiente, considerar dicho rizado como un factor de diseño, se podría así calcular el valor del inductor.

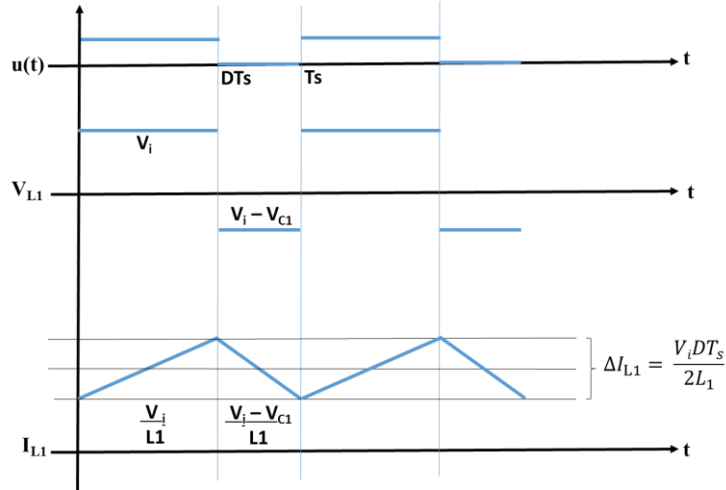


Figura 22. Formas de Onda para V_{L1} e I_{L1}

De la ecuación para la razón de cambio de la corriente, se asume, tal y como ya se mencionó, como criterio de diseño, el rizado, usado así, para el cálculo de la primera inductancia ($L1$). En análisis más profundos se podría incluso determinar un intervalo en el cuál debería estar $L1$, un valor mínimo y otro máximo.

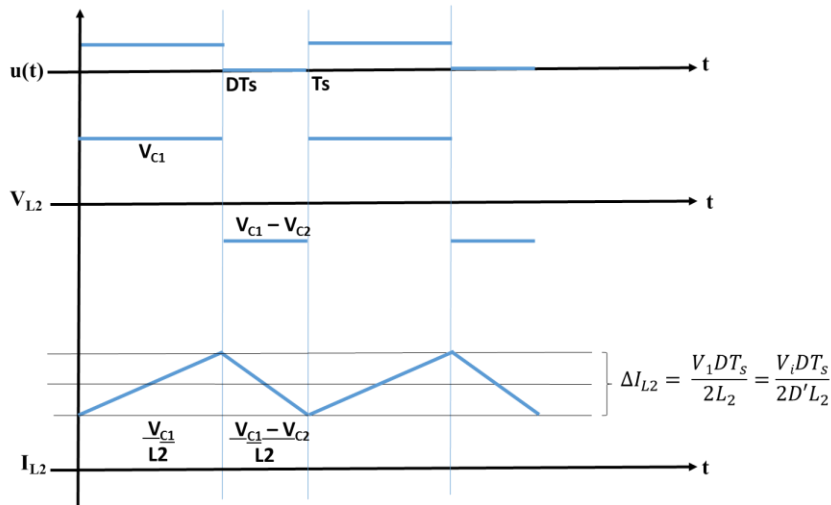


Figura 23. Formas de Onda para V_{L2} e I_{L2}

Para este caso, el criterio de diseño es el rizado de la señal de corriente del inductor 2. Dicho criterio, permite, de una manera muy precisa, el cálculo del segundo inductor del circuito del convertidor. De la ecuación para la razón de cambio de la corriente del inductor 2, y definiendo un porcentaje de rizado, se podría entonces fácilmente calcular L_2 . Un criterio similar, es el que se usa para determinar el valor de las capacitancias del convertidor conmutado, las señales a analizar en seguida son el V_{C1} y el V_{C2} , ambas obtenidas a partir del comportamiento de las variables de estado v_{C1} y v_{C2} , pero en estado estable. La figura a continuación (Figura 24) representa dichas señales.

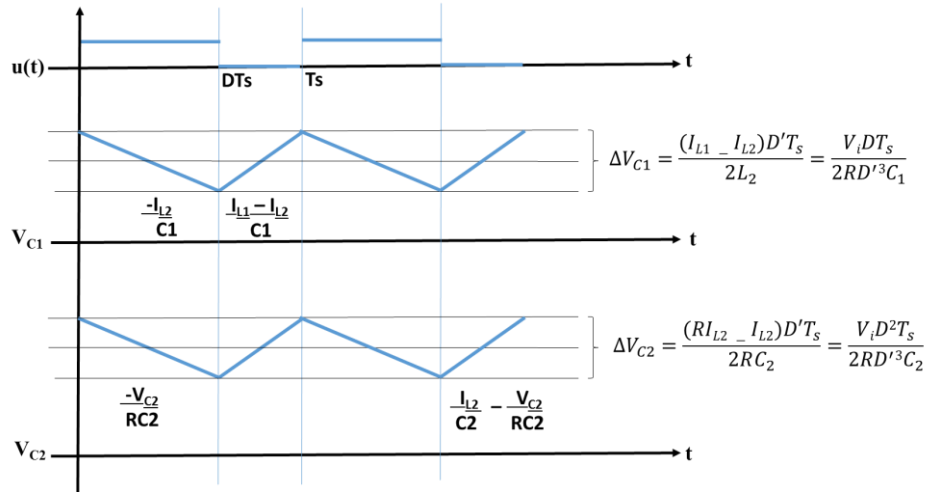


Figura 24. Formas de Onda para V_{C2} y V_{C1}

De las formas de onda antes relacionadas, se puede obtener las siguientes relaciones para el factor de rizado de cada una de las variables de estado. Este porcentaje de rizado permitirá determinar los elementos almacenadores de energía presentes en el convertidor conmutado de potencia. Las ecuaciones 10, muestran una relación matemática entre el porcentaje de rizado y el inductor o capacitor involucrado, además se observa que dichos elementos almacenadores dependerán no solo de la frecuencia de la señal u , sino también de su ciclo de trabajo.

$$\begin{aligned}\Delta I_{L1} &= \frac{DV_i}{2fL_1} \\ \Delta I_{L2} &= \frac{DV_i}{2fD'L_2} \\ \Delta V_{C1} &= \frac{DV_i}{2fRD'^3C_1}\end{aligned}\tag{12}$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{D^2 V_i}{2fRD'^3 C_2}$$

De esta manera, se pueden definir algunos criterios de diseño a partir de la carga y de las características del panel solar, como por ejemplo el voltaje en el MPP (V_i), la frecuencia de conmutación de la señal $u(t)$, la cual está definida por la frecuencia del microcontrolador que se utilizó para la implementación del dispositivo, la resistencia de carga y el ciclo de trabajo (D).

CRITERIOS DE DISEÑO	
Frecuencia de $u(t)$	62 KHz
Ciclo de trabajo (D)	50%
Recíproco de D (D')	50%
% Rizado IL1	20%
% Rizado IL2	50%
% Rizado vC1	15%
% Rizado vC2	7.5%
V_i	17.5
R	80 Ω

Tabla 6. Criterios de Diseño Boost Cuadrático

Empleando los valores de la tabla anterior y las ecuaciones 10, se puede obtener entonces un valor para L_1 , L_2 , C_1 y C_2 , que favorezca el diseño de estado estacionario del convertidor Boost Cuadrático así:

$$L_1 = \frac{DV_i}{2f\Delta L_1} = \frac{0.5 * 17.5}{2 * 62K * 0.2} = 0.245mH \approx 250\mu H$$

$$L_2 = \frac{DV_i}{2fD'\Delta L_2} = \frac{0.5 * 17.5}{2 * 62K * 0.5 * 0.5} = 0.245mH \approx 250\mu H$$

$$C_1 = \frac{DV_i}{2fRD'^3\Delta C_1} = \frac{0.5 * 17.5}{2 * 62K * 80 * 0.5^3 * 0.15} = 45.6\mu F \approx 47\mu F$$

$$C_2 = \frac{D^2 V_i}{2fRD'^3\Delta C_2} = \frac{0.5^2 * 17.5}{2 * 62K * 80 * 0.5^3 * 0.075} = 45.7\mu F \approx 47\mu F$$

Teniendo en cuenta los valores anteriormente determinados, se procede a simular en algún software apropiado y se tienen los resultados que se muestran en los apartados siguientes.

3.6. SIMULACIONES EN LAZO ABIERTO

En simulink, se ha implementado el modelo conmutado del convertidor Boost Cuadrático, el cual puede ser observado en la Figura 25.

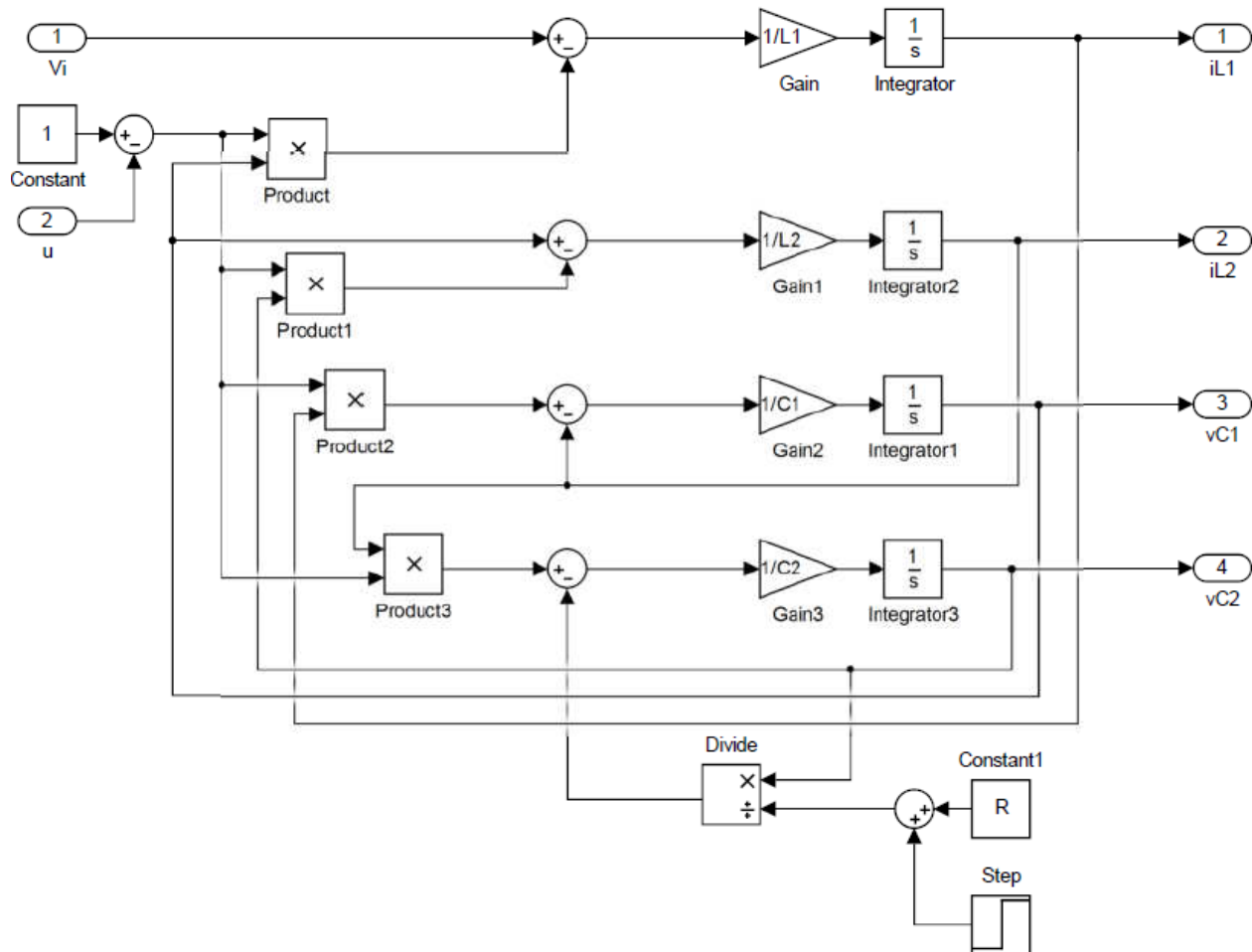


Figura 25. Modelo Simulink Convertidor Cuadrático

Las ganancias y valores utilizados en el modelo se definieron en un archivo de Matlab, el cuál alimenta el modelo matemático. Es importante señalar que los datos con los que se ha simulado estas señales se encuentran presentes en un archivo *.m, y se señalan a continuación:

```
Vi=17.5;  
C1=47e-6;  
L1=0.25e-3;  
C2=47e-6;  
L2=0.25e-3;
```

R=80;
D=0.5;

Con estos valores y verificando con las ecuaciones de estado estable (4, 5, 6, 7) para V_{C1} , V_{C2} , I_{L1} e I_{L2} se obtienen los siguientes puntos de estabilización:

$$V_{C2} = \frac{17.5}{(1 - 0.5)^2} = 70 \text{ V}$$

$$V_{C1} = \frac{17.5}{(1 - 0.5)} = 35 \text{ V}$$

$$I_{L2} = \frac{17.5}{80(1 - 0.5)^3} = 1.75 \text{ A}$$

$$I_{L1} = \frac{17.5}{80(1 - 0.5)^4} = 3.5 \text{ A}$$

De acuerdo a los valores anteriores y a las gráficas mostradas a continuación, se puede observar que el modelo implementado en simulink converge a los valores esperados y se comporta según lo esperado en estado estable.

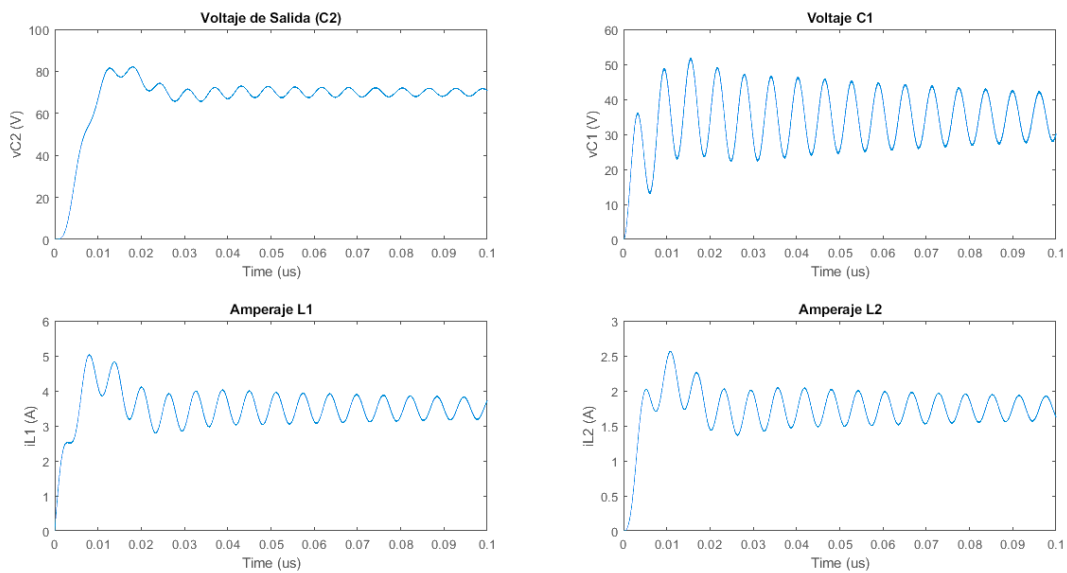


Figura 26. Señales en Lazo Abierto Simulink

Por otra parte, el Circuito del convertidor Boost Cuadrático, se ha implementado en el software PSIM, en el que también se han realizado simulaciones en lazo abierto, con las mismas características que la simulación del modelo del Matlab. Lo anterior con el fin de validar que los modelos implementados en los diferentes entornos, tienen un comportamiento similar. En la Figura 27, se puede observar el circuito eléctrico implementado en PSIM en donde ya se encuentra alimentado por el módulo fotovoltaico. Las señales de las variables de estado se pueden observar claramente en la Figura 29. Nótese que los valores de convergencia de dichas señales son exactamente los mismos que las del modelo del simulink y los obtenidos con los cálculos sobre las ecuaciones de estado estacionario, lo que garantiza que las simulaciones hechas en estos entornos, obedecen a condiciones similares de los entornos reales.

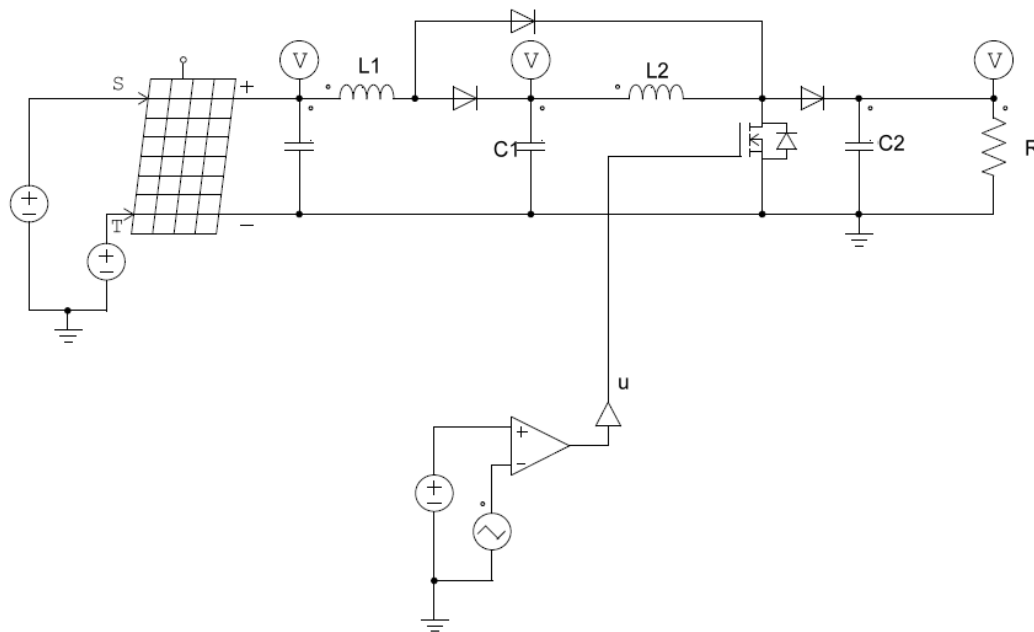


Figura 27. Circuito Boost Cuadrático PSIM

En el circuito mostrado anteriormente, se puede observar en detalle que las condiciones del recurso solar están plenas sobre el circuito; se utilizan señales de voltaje para simular la Temperatura ($T=25^{\circ}\text{C}$) y la Radiación solar ($S=1000\text{W/m}^2$), se ha utilizado también un capacitor a manera de filtro, con el fin de evitar rizados indeseados señal de salida del módulo solar.

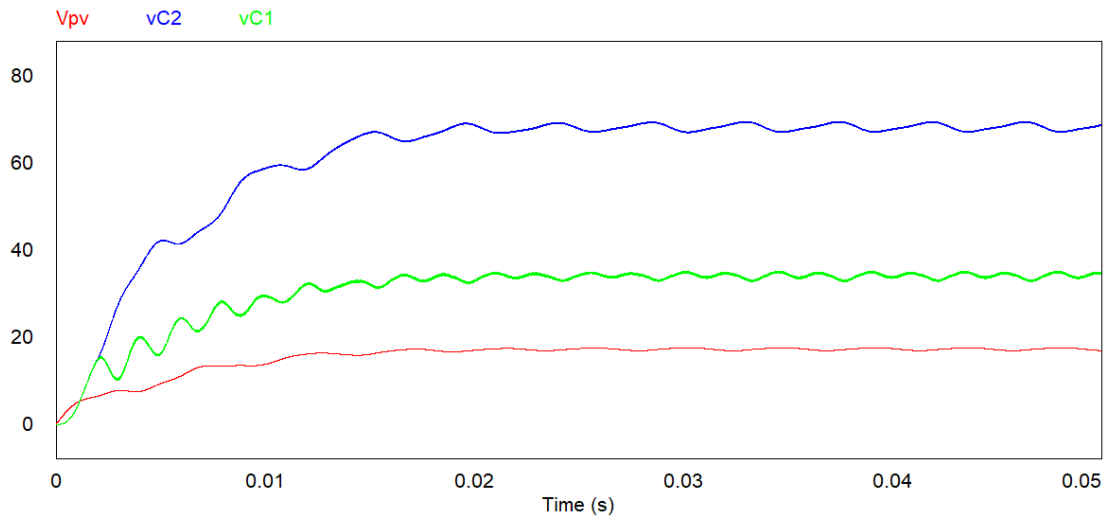


Figura 28. Señales de voltaje en Lazo Abierto PSIM

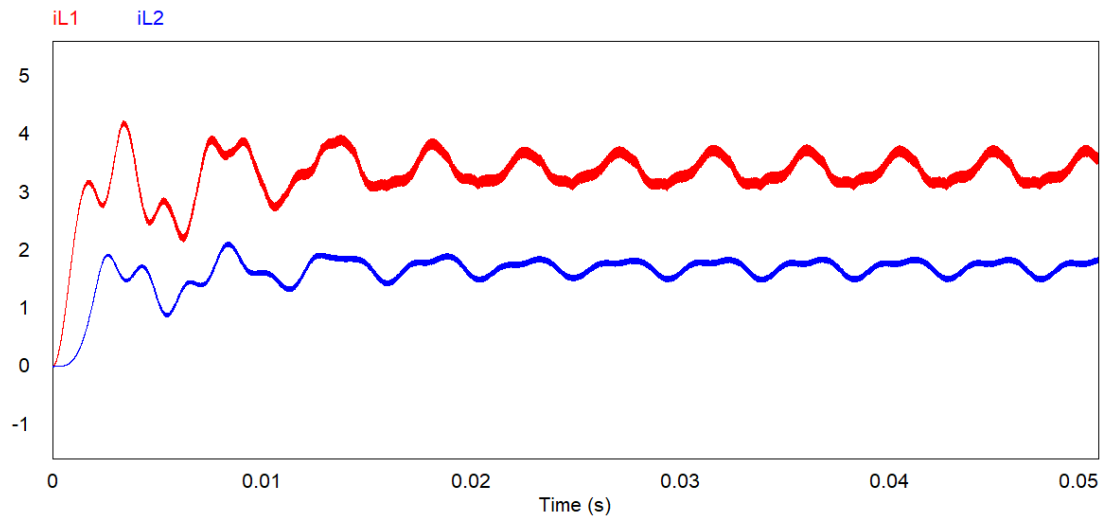


Figura 29. Señales de corriente en Lazo Abierto PSIM

Los valores de oscilación de las señales en estado estable son aproximados a los valores de los cálculos indicados anteriormente. Ambos modelos implementados, fueron utilizados para someter el convertidor a distintas perturbaciones de recurso solar, dichas perturbaciones pueden ser de temperatura o de radiación solar, y observar el comportamiento del controlador MPPT en cuanto al seguimiento de la máxima potencia del panel solar.

CAPÍTULO 4

SEGUIMIENTO AL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA (MPPT)

El auge de las energías renovables, en particular de la energía fotovoltaica, ha provocado una súbita elevación en la cantidad de desarrollos tecnológicos e investigaciones encaminados siempre al aprovechamiento máximo de la energía proveniente del sol. Tal es el caso de este proyecto de investigación, en el cual no se discute sobre la calidad de los paneles solares, sino de cómo aprovechar la cantidad total de energía que evidentemente el panel transforma en energía eléctrica.

Precisamente los convertidores conmutados de potencia, se encuentran entre los dispositivos de mayor versatilidad y usabilidad a la hora de implementar sistemas de generación, puesto que dichos dispositivos actúan como una planta para controlar de manera que el comportamiento del sistema fotovoltaico sea el deseado por el fabricante. En algunos casos, los sistemas fotovoltaicos requieren seguir un valor de referencia, dicho valor, suele ser intensidad o tensión de la carga conectada al convertidor. En el caso propio de este trabajo, la referencia no es ni la tensión ni la intensidad, es la potencia entregada por el panel solar, la tarea específica del convertidor conmutado, es permitir que la totalidad de dicha potencia llegue a la carga del sistema fotovoltaico, garantizando siempre el punto de operación del sistema de manera óptima.

Los algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia, son la opción escogida para implementar una estrategia de control a la planta del convertidor conmutado Boost Cuadrático. En este capítulo se implementaron las simulaciones de dichas estrategias y se experimentó modelando las perturbaciones tanto de temperatura como de radiación solar en una señal cuadrada de 200 Hz. Al final del capítulo se hace un análisis profundo, observando la respuesta del sistema de manera que se pueda determinar la mejor estrategia para implementar en el laboratorio.

4.1. MÉTODO PERTURBAR Y OBSERVAR

El método comúnmente conocido como P&O, se implementó en los simuladores, y se pudo observar el comportamiento en los circuitos simulados en el capítulo anterior. Es uno de los métodos mayormente utilizados a nivel mundial, dada su sencillez y facilidad para la implementación. Es muy importante aclarar también que las estrategias implementadas en este proyecto, son aplicadas al

convertidor conmutado CC/CC. Existen algunos sistemas fotovoltaicos en los cuáles se incluye la etapa del convertidor CC/CA o Inversor, y en dicha etapa también se puede implementar un control MPPT. La figura 24, muestra el algoritmo básico P&O que se ha implementado.

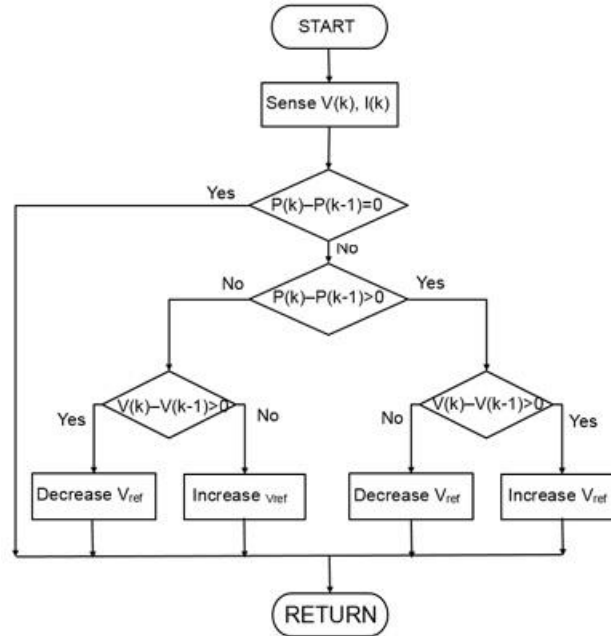


Figura 30. Algoritmo MPPT P&O.

Tomado de Mathworks, 2000.

El objetivo de este algoritmo básicamente es encontrar el voltaje en el cual el sistema tiene máxima potencia y tener dicho voltaje como una referencia del sistema de control. Obsérvese que a la salida del algoritmo, siempre se termina aumentando o disminuyendo dicho voltaje de referencia, lo que implica que a la salida del MPPT, se tiene un valor V_{ref} mediante el cual se modifica el ciclo de trabajo de la señal de control y por consiguiente obtener el voltaje deseado a la salida del sistema fotovoltaico.

El diagrama del circuito implementado en el PSIM, se puede observar en la Figura 31, ahí se puede ver claramente los puntos en los que se toma la muestra de voltaje y corriente, se llevan al bloque MPPT, dicho bloque encuentra el valor de voltaje MPPT y se calcula el error con el voltaje que el panel está arrojando para corregir así dicho voltaje.

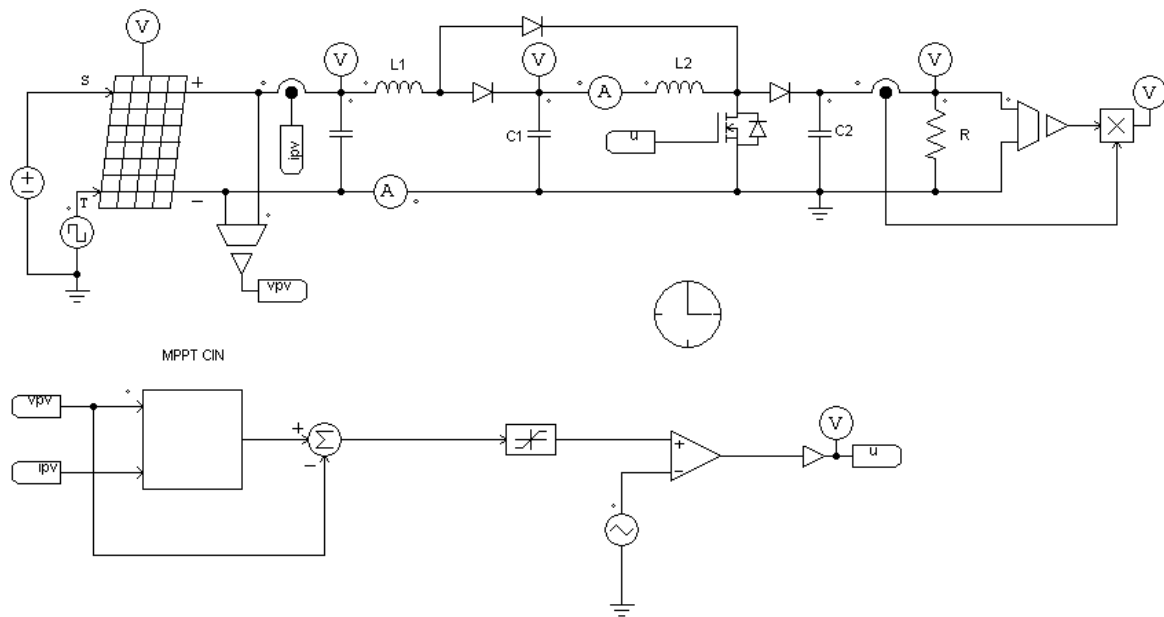


Figura 31. Simulación MPPT en PSIM

A continuación, se muestra el segmento de código que se implementó en el algoritmo MPPT de P&O:

```
float p, p_prev; // POTENCIA ACTUAL Y PREVIA
float inc = 0.8; // INCREMENTO
float i, v, v_prev, dv, dx;
v = x1; //Se lee el voltaje
i = x2; //Se lee la corriente
p = v*i; //Calcular la potencia
dx = p - p_prev; //Calcular el cambio de potencia
dv = v - v_prev; //Calcular cambio de voltaje
if(dx!=0){
    if(dx>0) {
        if(dv>0){
            v+=inc;
        }
        else{
            v-=inc;
        }
    }
    else{
        if(dv>0){
            v-=inc;
        }
    }
}
else{
    v+=inc;
}
```

```

}
v_prev = v;
p_prev = p;
y1 = v;                                     //Enviar a la salida el nuevo voltaje calculado

```

El paso siguiente fue incluir en el sistema 2 tipos distintos de perturbaciones. Una con respecto a la radiación solar que le llega al panel solar y otra respecto a la temperatura en la cual opera el mismo. En los 2 apartados siguientes, se tienen las simulaciones de los dos casos.

4.1.1. P&O con Perturbación de radiación solar

Para implementar el algoritmo MPPT en el PSIM, se usa un módulo de código en lenguaje C, que el mismo software trae implementado y que permite que, las señales se conviertan en variables, se realice el procedimiento necesario y se regrese a través de las salidas del módulo el valor deseado de V_{ref} . El circuito simulado en el capítulo anterior, se conectó a este bloque MPPT de código y se verificó que, ante perturbaciones presentes en la señal de radiación solar, la potencia generada por el panel solar, se mantiene estable a la salida del convertidor tipo Boost Cuadrático.

Las señales en las variables de estado que se generan con el convertidor Boost cuadrático operando con este algoritmo de control son las siguientes:

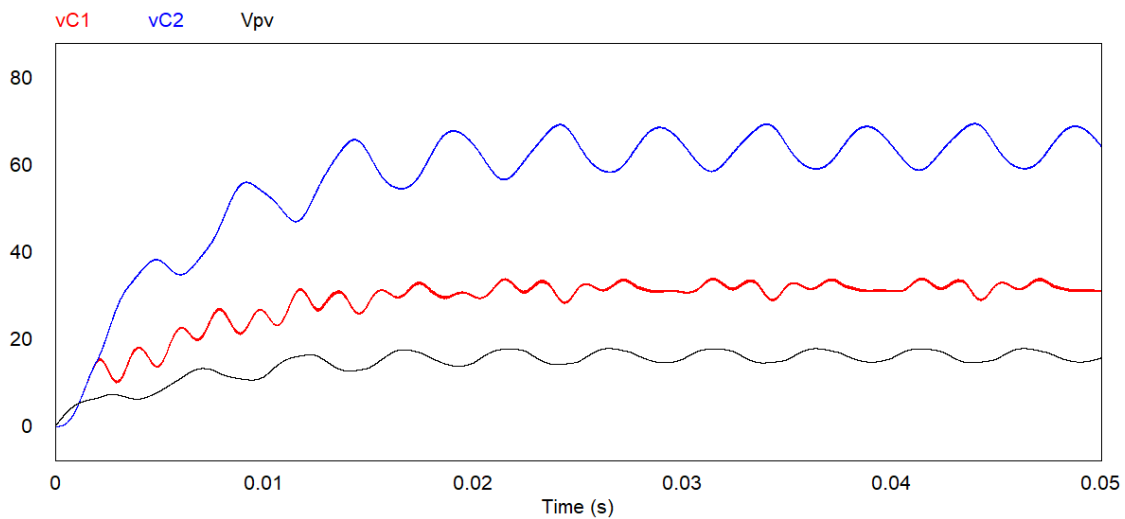


Figura 32. Voltajes del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.

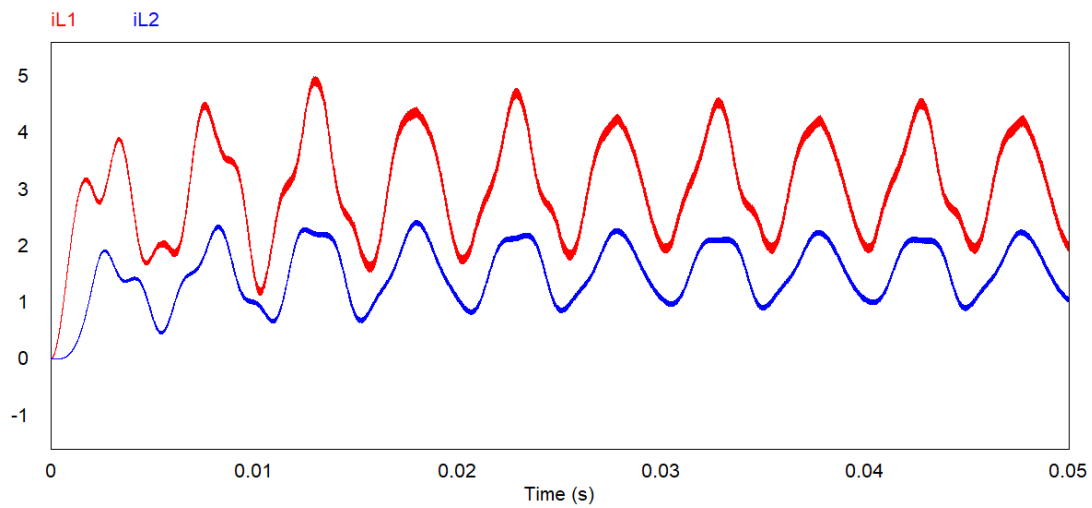


Figura 33. Corrientes del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.

La señal de potencia que se arroja a la salida y en la carga del convertidor Boost cuadrático, debe obedecer, al menos en parte a la señal de potencia máxima que entrega el panel solar. En la Figura 33, se pueden comparar dichas potencias.

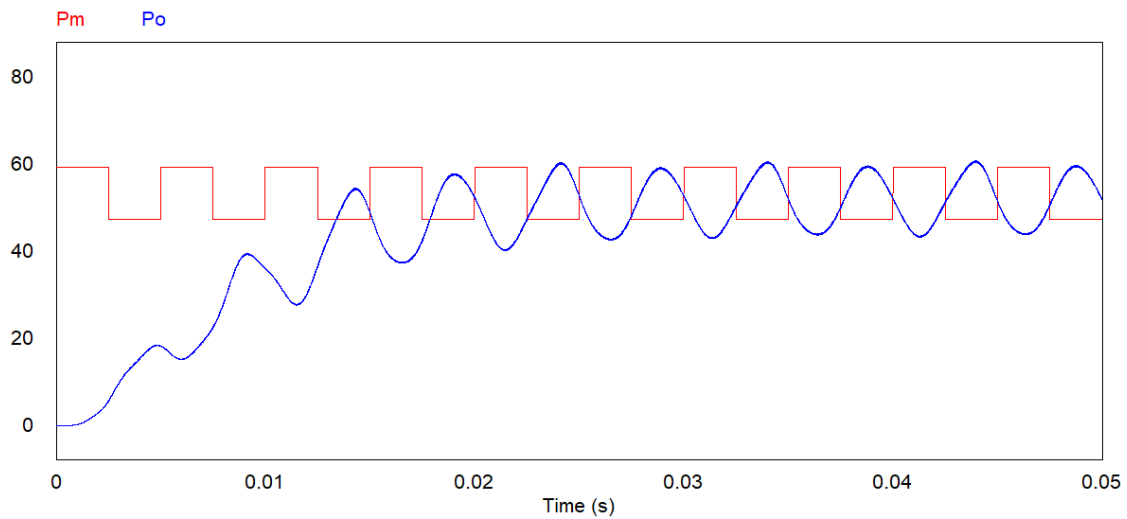


Figura 34. Potencias in/out del convertidor (P&O) con perturbación de radiación solar.

Es evidente que la señal de potencia de salida que se observa en la figura anterior, tiene un comportamiento según las perturbaciones que se incluyeron al sistema, dichas perturbaciones son de la radiación solar.

4.1.2. P&O con Perturbación de Temperatura

El comportamiento de las variables eléctricas del circuito según cambios de temperatura se puede observar a continuación, el voltaje se comporta de la siguiente manera:

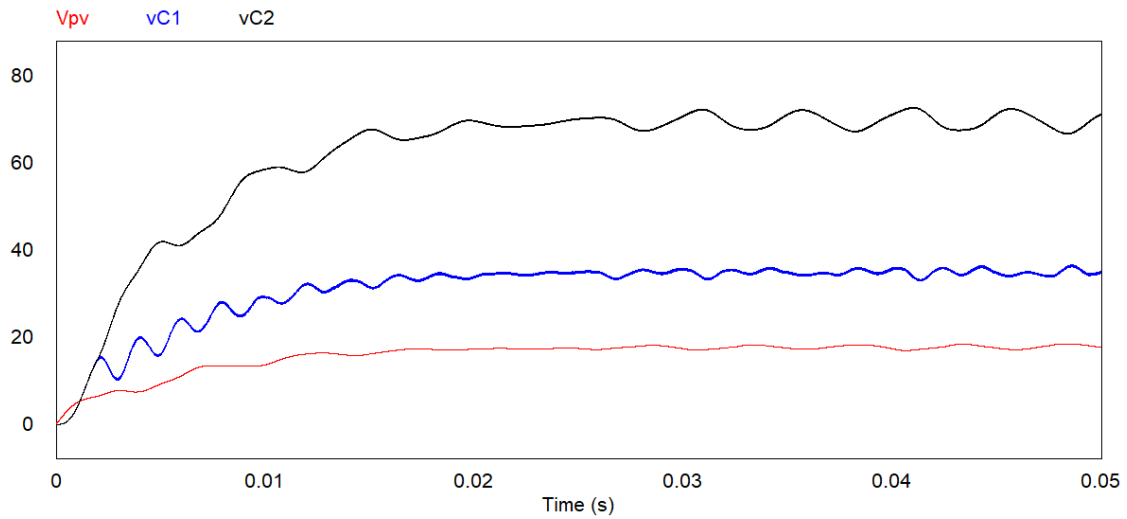


Figura 35. Voltajes del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.

La corriente del convertidor controlado por P&O, tiene ahora el siguiente comportamiento:

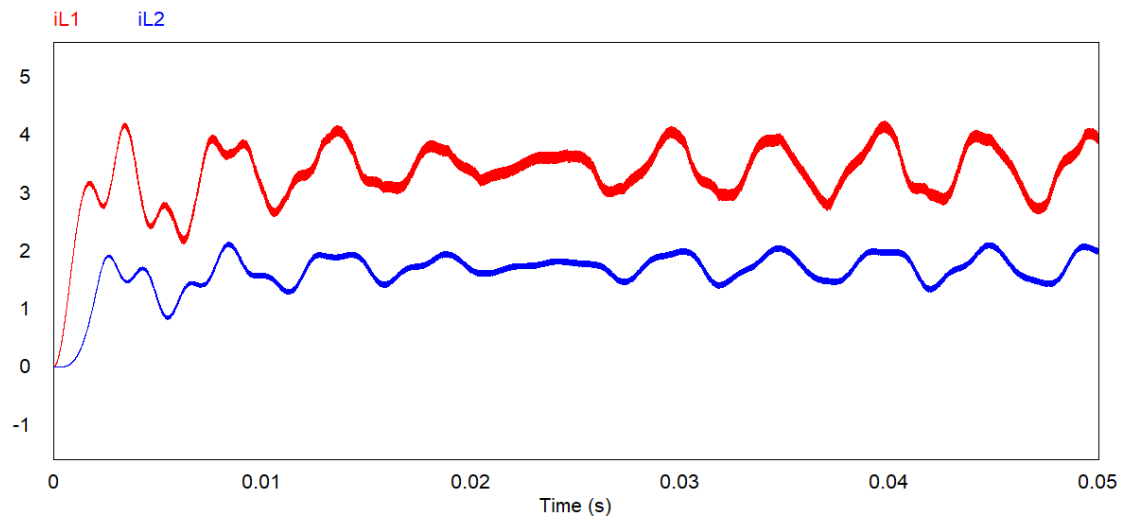


Figura 36. Corrientes del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.

Por último, la potencia del convertidor Boost cuadrático, en presencia de perturbaciones de temperatura es la presentada en la siguiente figura, se debe notar que, a pesar de las perturbaciones, el convertidor hace un seguimiento a las variaciones de potencia que se presentan en el panel solar.

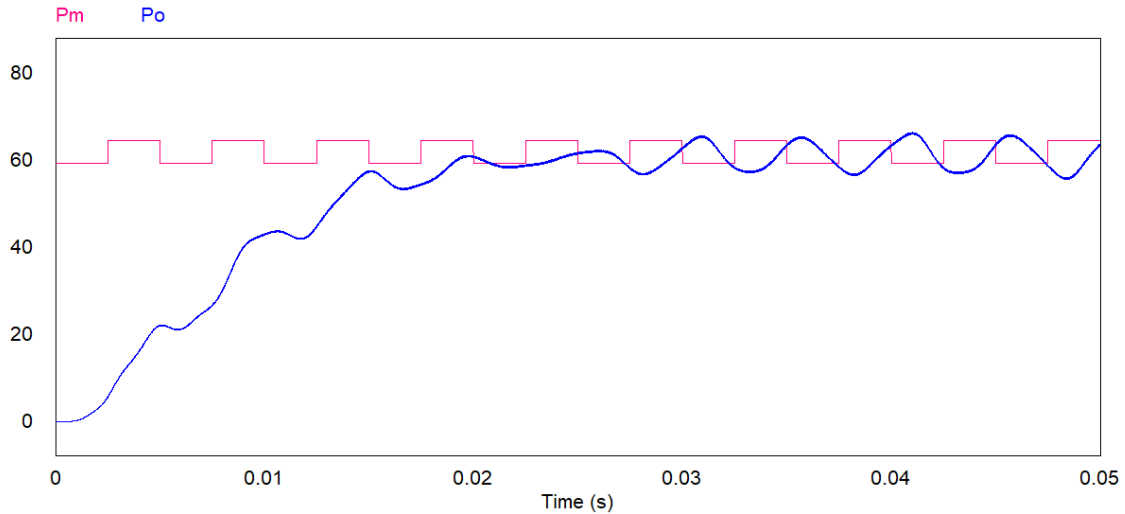


Figura 37. Potencias in/out del convertidor (P&O) con perturbación de Temperatura.

Con las variaciones de temperatura, la potencia de salida alcanza valores por fuera del rango deseado, es decir el comportamiento del algoritmo no es el mejor. Se realiza a continuación, el análisis de un algoritmo para buscar MPP llamado de conductancia incremental, esperando que la respuesta de la potencia sea mejor.

4.2. MÉTODO CONDUCTANCIA INCREMENTAL

El método de conductancia incremental se basa en medir y comparar los cambios de la intensidad respecto de la tensión del convertidor, es decir el cambio de conductancia de la siguiente manera:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + \frac{dI}{dV} V \quad (13)$$

El criterio principal de este algoritmo y su comportamiento se puede observar en el siguiente diagrama de flujo:

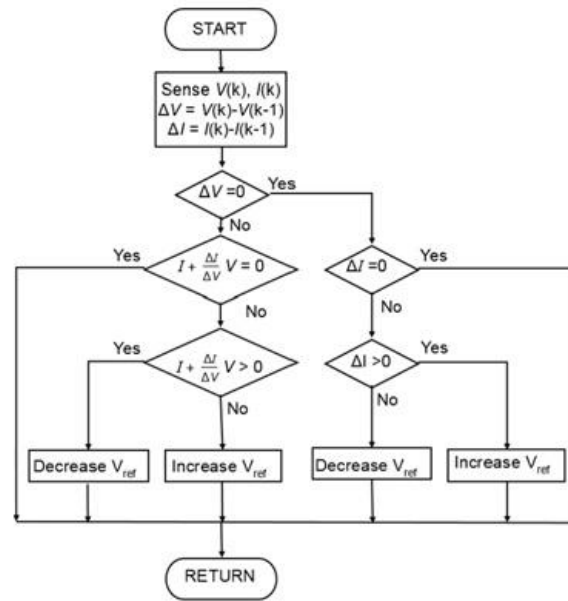


Figura 38. Algoritmo de Conductancia Incremental.

Tomado de (Mathworks, 2000)

Se inicia el algoritmo, tomando una muestra del voltaje y la corriente, luego se calcula la variación de voltaje y la de la intensidad por separado, al final se termina el algoritmo incrementando o decrementando el voltaje de referencia y por consiguiente el ciclo de trabajo. Para la implementación de este algoritmo, se usó el mismo circuito de la Figura 31, con la diferencia del código C, ahora se tiene un algoritmo de conductancia incremental, el cual se espera que mejore su comportamiento sobre todo cuando el convertidor se encuentra trabajando en condiciones de temperatura y radiación solar irregulares. El código implementado en el convertidor es el siguiente:

```

float inc = 0.8;           // incremento
float i, v, i_prev, v_prev, di, dv, dx;
v = x1;
i = x2;
di = i - i_prev;           //Se calcula el cambio de corriente
dv = v - v_prev;           //Se calcula el cambio de voltaje
dx = i + di/dv*v;          //Se calcula el cambio de conductancia
if(dv == 0){
    if(dx != 0){
        if(dx > 0) {
            v -= inc;
        } else {
            v += inc;
        }
    }
}

```

```

}else
{
    if(di != 0){
        if(di>0){
            v += inc;
        }else
        {
            v -= inc;
        }
    }
}
i_prev = i;
v_prev = v;
y1 = v;

```

4.2.1. Conductancia Incremental con perturbación de radiación solar

Las variables eléctricas del circuito del convertidor controlado por el método de conductancia incremental y ante perturbaciones de radiación solar son las siguientes:

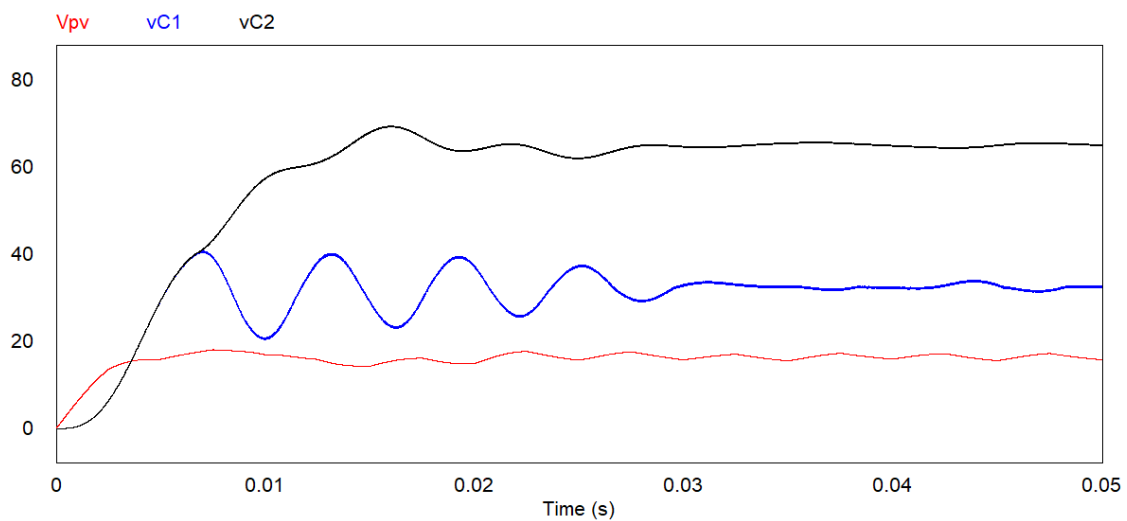


Figura 39. Voltajes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.

El comportamiento de las corrientes, evidentemente es más estable que el presentado en la Figura 34, el algoritmo de conductancia incremental, estabiliza el comportamiento de las corrientes en los inductores.

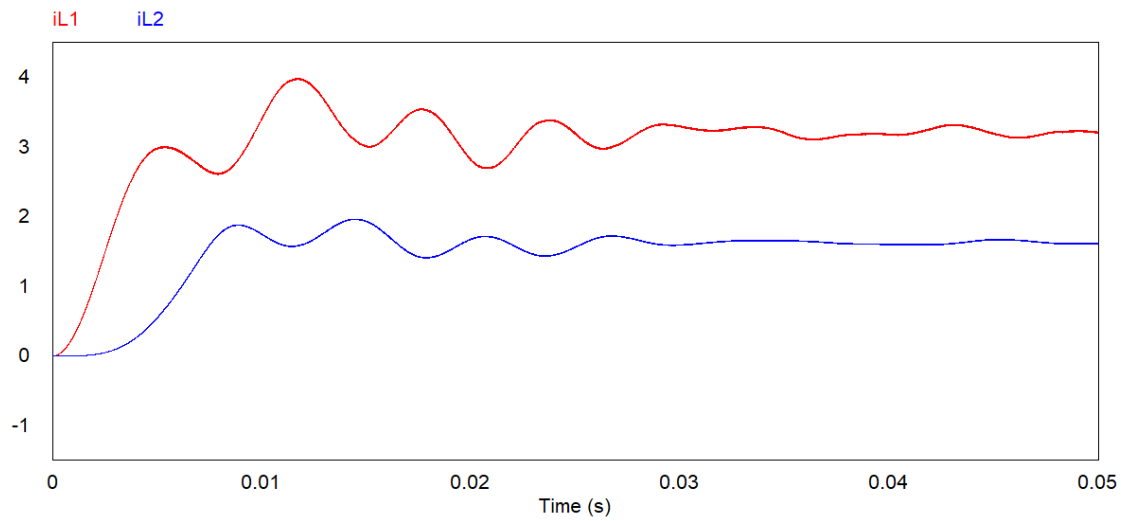


Figura 40. Corrientes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.

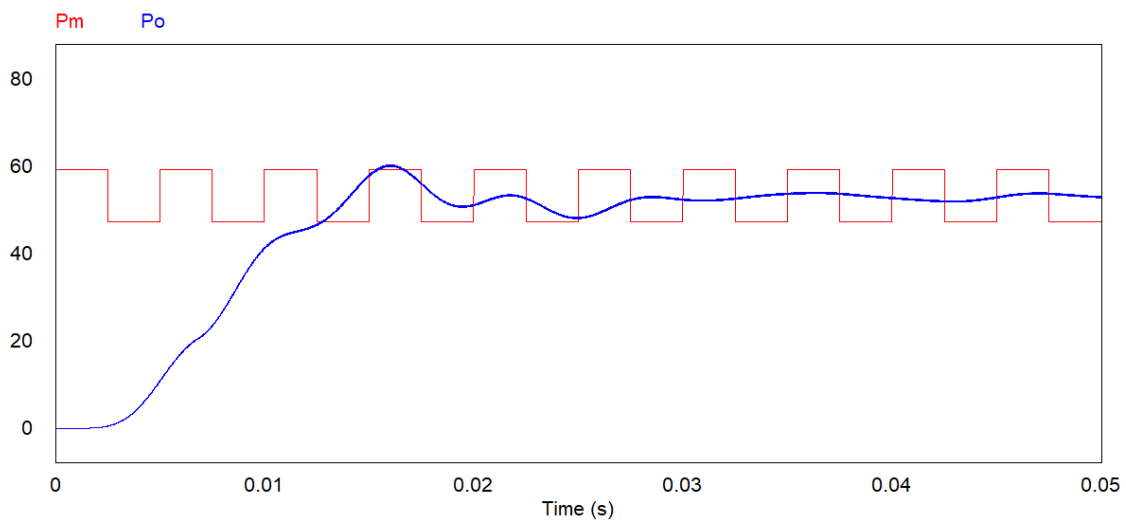


Figura 41. Potencias in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de radiación solar.

El comportamiento del nuevo algoritmo de control de conductancia incremental, fue como se esperaba, la estabilización del sistema entorno al MPP cuando la perturbación es de radiación solar es muy similar al algoritmo P&O y se puede observar en la Figura 41.

4.2.2. Conductancia Incremental con perturbación de Temperatura

A continuación, se analiza el mismo algoritmo, pero con perturbaciones de temperatura en el panel solar, se puede observar el comportamiento de las variables eléctricas potencia en las siguientes figuras.

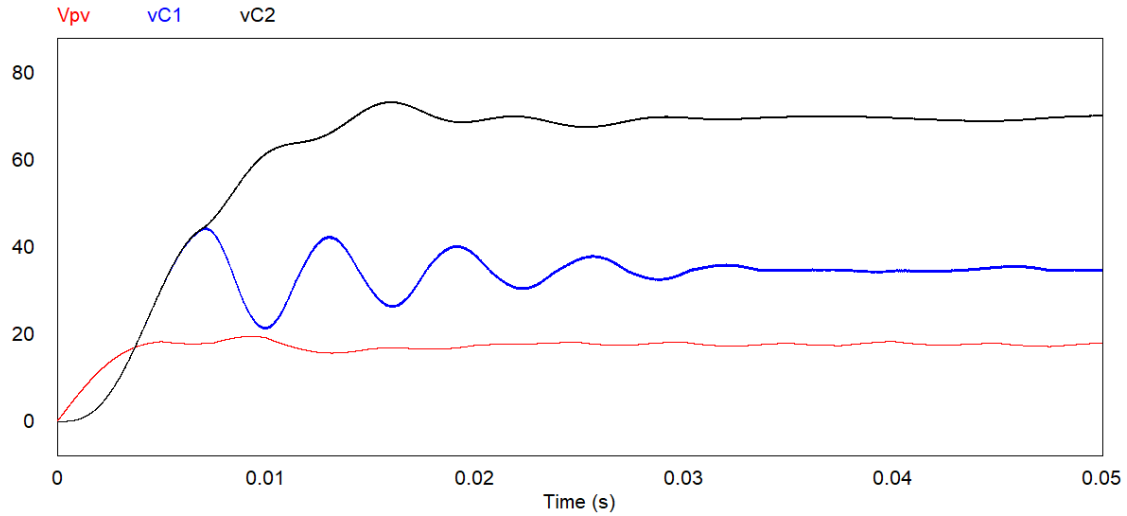


Figura 42. Voltajes del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.

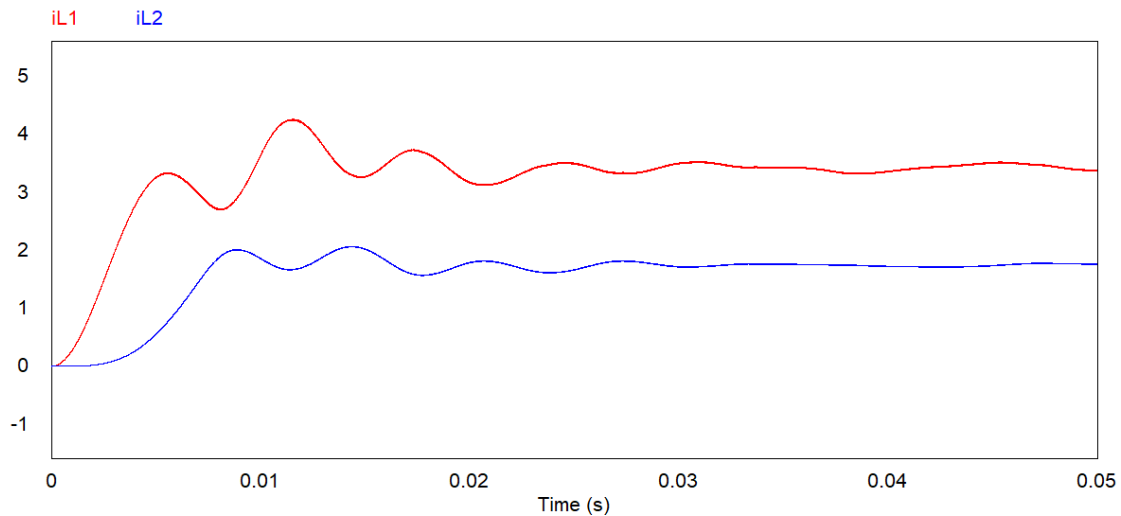


Figura 43. Corrientes in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.

La figura a continuación permite observar la potencia máxima que arroja el panel solar, comparada con la que se presenta a la salida del convertidor:

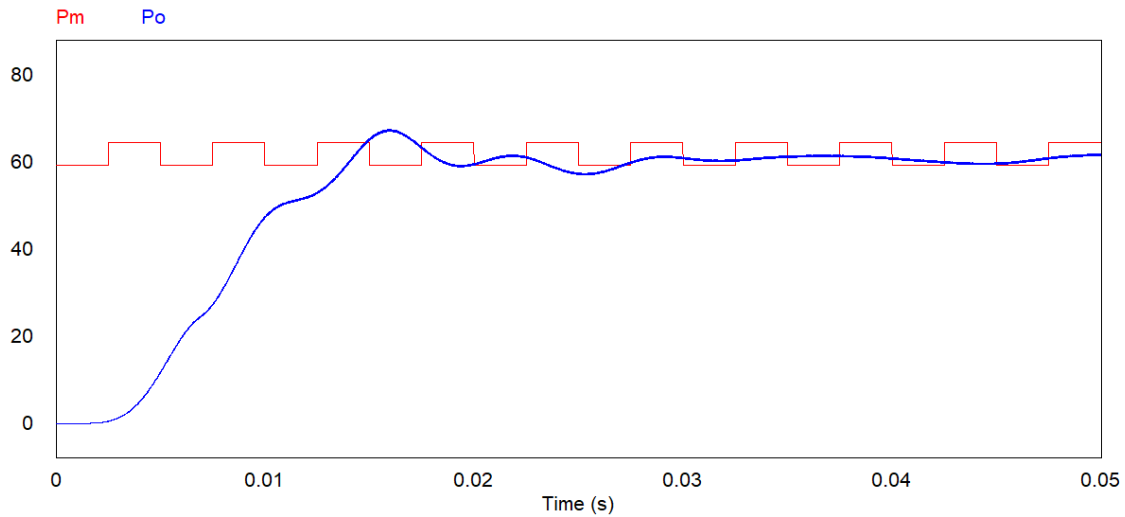


Figura 44. Potencias in/out del convertidor (C. Incremental) con perturbación de Temperatura.

Las estrategias de control presentadas hasta el momento, son muy similares en cuanto al comportamiento, tiempo de respuesta y estabilización del punto de MPP. Dado que lo presentado hasta el momento obedece al control clásico, se analizó el circuito con una estrategia de control moderno, que permitió tener un punto de comparación distinto a los ya vistos en este trabajo. Por lo tanto, en el siguiente apartado se describe lo trabajado con la estrategia de girador de potencia por control en modos deslizantes.

4.3. GIRADOR DE POTENCIA CON CONTROL EN MODOS DESLIZANTES

Tal y como se ha descrito en la fundamentación teórica, el modelo del convertidor Boost Cuadrático ahora se comporta como un girador de potencia, por lo que debe ser indiscutible que la potencia de entrada y de salida son iguales en el convertidor (Haroun & Aroudi, 2017), por lo tanto, toda estrategia que se diseñe a partir de dicha premisa, debe seguir la misma consigna que cualquier algoritmo MPPT de los que se han descrito hasta el momento. De acuerdo con la teoría de control por deslizamiento, se debe definir una superficie de deslizamiento en la cual el sistema se encontrará oscilando, alrededor del punto de equilibrio. Para definir estos parámetros, es necesario considerar que, de acuerdo con la red de 2 puertos planteados por el convertidor Boost Cuadrático, las superficies de deslizamiento dadas por el sistema serían las relacionadas en la ecuación 14, y obtenidas a partir de la figura 44 que se muestra a continuación.

$$S_1(x) = gV_{C2} - i_{pv}$$

$$S_2(x) = gV_{pv} - i_0$$
(14)

El modelo implementado en el software PSIM, se ha modificado para implementar el lazo de control con la superficie de deslizamiento 1 y retroalimentando el voltaje de la salida, en la siguiente figura se puede observar la modificación del sistema:

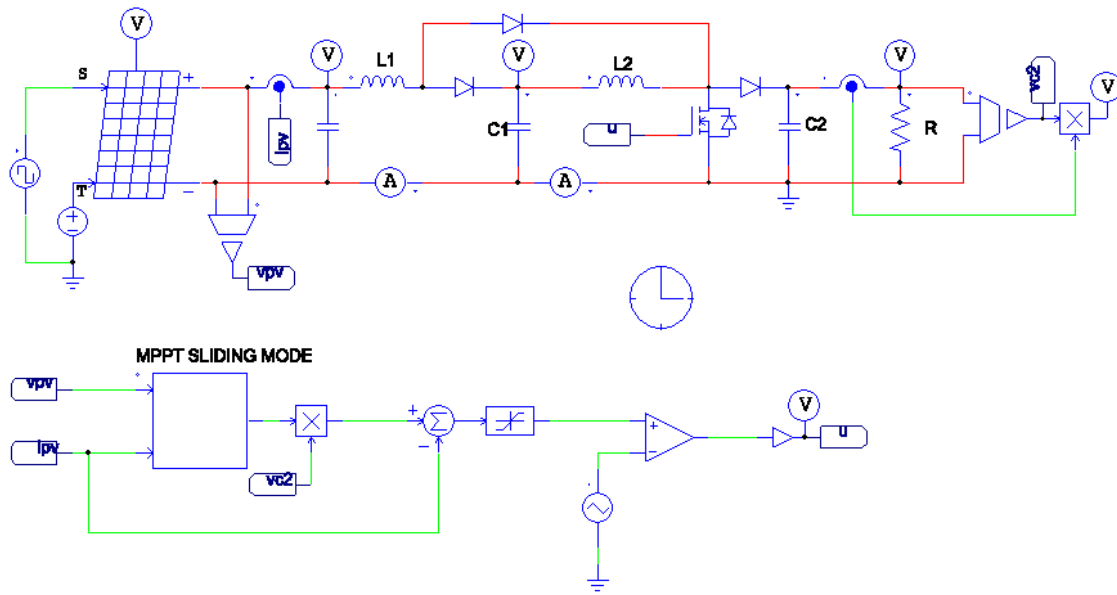


Figura 45. Convertidor Boost en modo deslizante.

En el cuadro MPPT presente en el circuito montado en PSIM, se utiliza un algoritmo MPPT para el cálculo de la conductancia en el punto de máxima potencia, el algoritmo usado es el de conductancia incremental, esto evidencia una combinación entre el algoritmo de conductancia incremental y el control en modos deslizantes, y que evidentemente mejora el comportamiento que el circuito presenta hasta el momento. Luego dicha conductancia, se aplica a la superficie definida de deslizamiento para el control del sistema. A continuación, se puede observar el código implementado para calcular el valor de la conductancia:

```
float inc = 0.8; // incremento
float i, v, i_prev, v_prev, di, dv, dx, g;
v = x1;
i = x2;
di = i - i_prev; //Se calcula el cambio de corriente
dv = v - v_prev; //Se calcula el cambio de voltaje
if(dv!=0){
    g = di/dv; //Conductancia
```

```

dx = i + g*v;          //Se calcula el cambio de conductancia
}
i_prev = i;
v_prev = v;

if(dv == 0){
    if(dx!=0){
        if(dx>0){
            v-=inc;
        }
        else
        {
            v+=inc;
        }
    }
}
else
{
    if(di != 0){
        if(di>0){
            v += inc;
        }
        else{
            v -= inc;
        }
    }
}
y1 = g;

```

La salida de la función en lenguaje C implementada, es entonces la conductancia en el punto de potencia máxima, dicho valor se multiplica por el voltaje de salida v_{C2} y comparado con la corriente del panel solar (corriente de entrada), la resta de estas 2 cantidades es el valor de error para el sistema de compensación. A continuación, se tienen las salidas presentadas por el convertidor conmutado de acuerdo con la respuesta ante las perturbaciones de radiación solar y temperatura.

4.3.1. G – Girador con perturbación de radiación solar

A continuación, se observa las señales de las distintas variables eléctricas en respuesta a perturbaciones de radiación solar en la fuente.

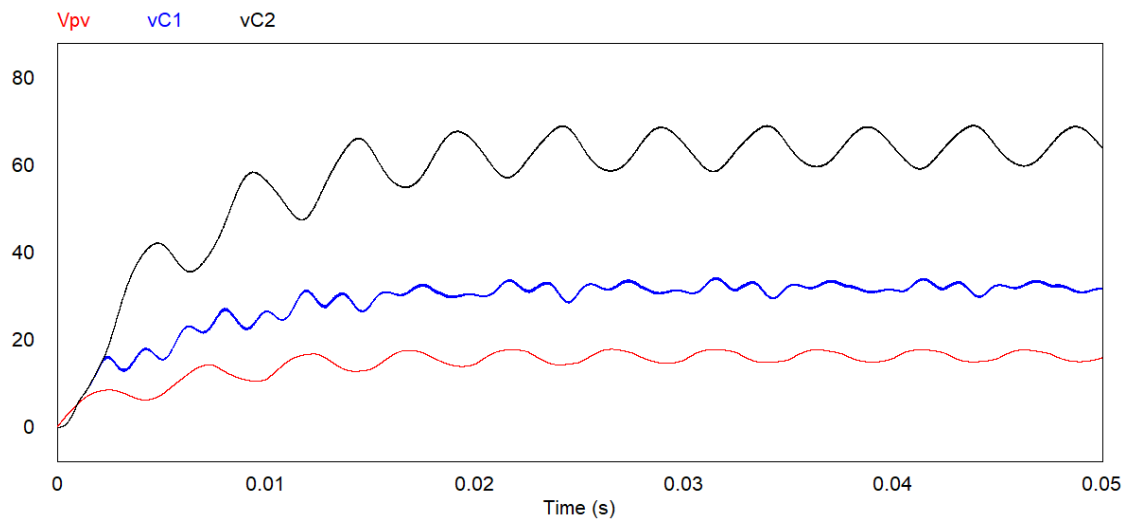


Figura 46. Voltajes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.

Para el caso de la intensidad se puede observar que hay un rizado considerable en la señal del inductor 2, lo que evidentemente se debe al nuevo proceso de conmutación y a la evaluación del error a través de la realimentación del voltaje de salida.

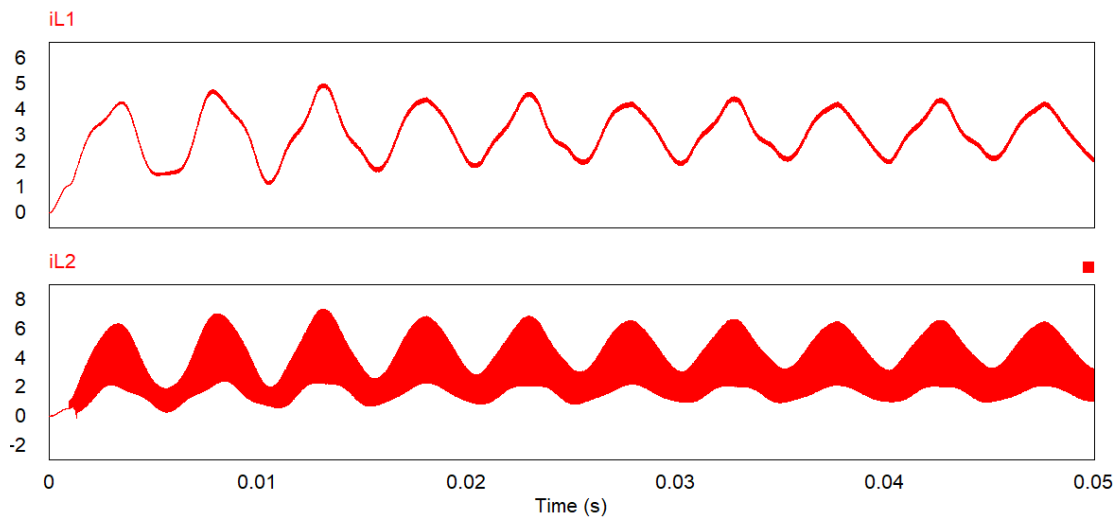


Figura 47. Corrientes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.

Como último aspecto de la simulación, se procede a evaluar las potencias de salida del convertidor, evidenciándose lo siguiente:

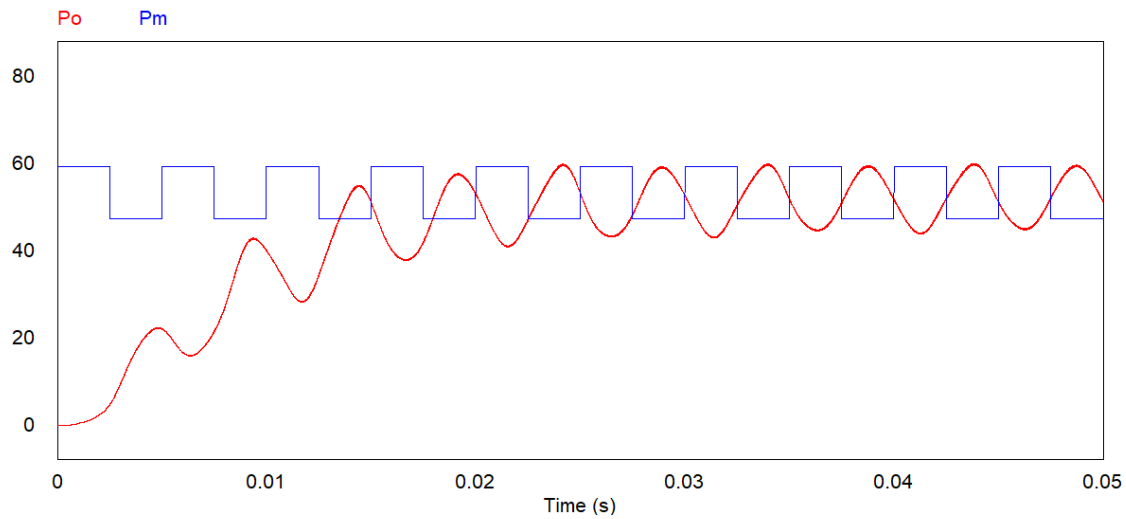


Figura 48. Potencias en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de radiación solar.

Se puede observar un comportamiento similar al convertidor controlado mediante el algoritmo MPPT de perturbar y observar.

4.3.2. G – Girador con perturbación de Temperatura

Las señales obtenidas ante este tipo de perturbación son las presentadas a continuación, nótese que la diferencia entre el comportamiento es casi nula, por lo que, independientemente si la perturbación en la fuente es causada por enfriamiento del panel o alguna sombra momentánea, el comportamiento del algoritmo es el mismo.

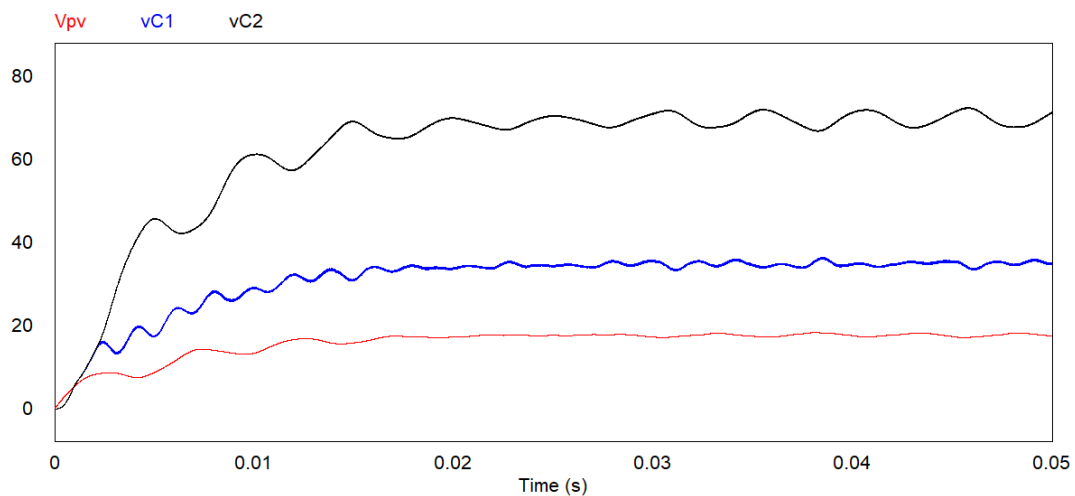


Figura 49. Voltajes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.

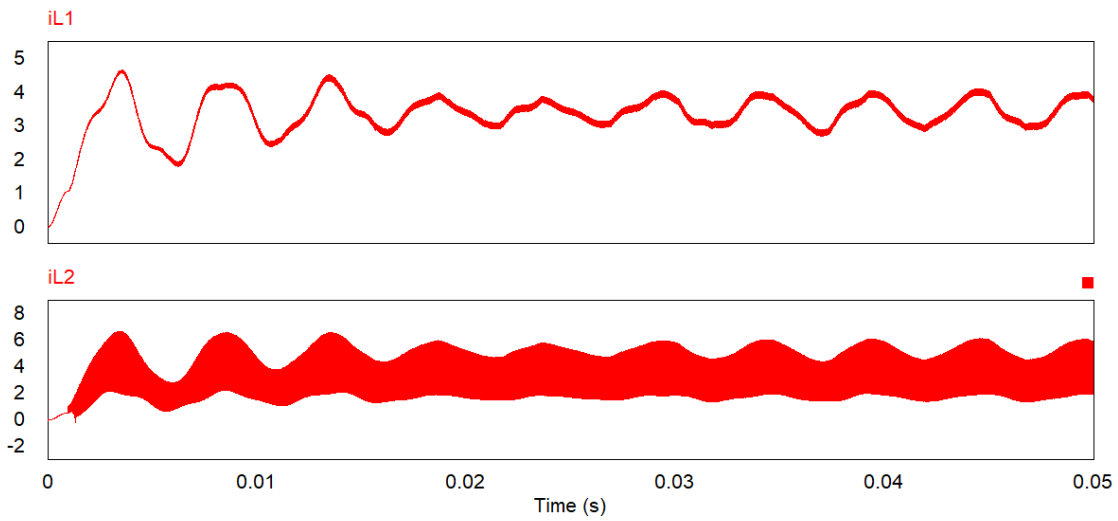


Figura 50. Corrientes en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.

En el último caso de estudio, se presenta la potencia de salida del circuito convertidor comparada con la entrada proporcionada por los generadores fotovoltaicos.

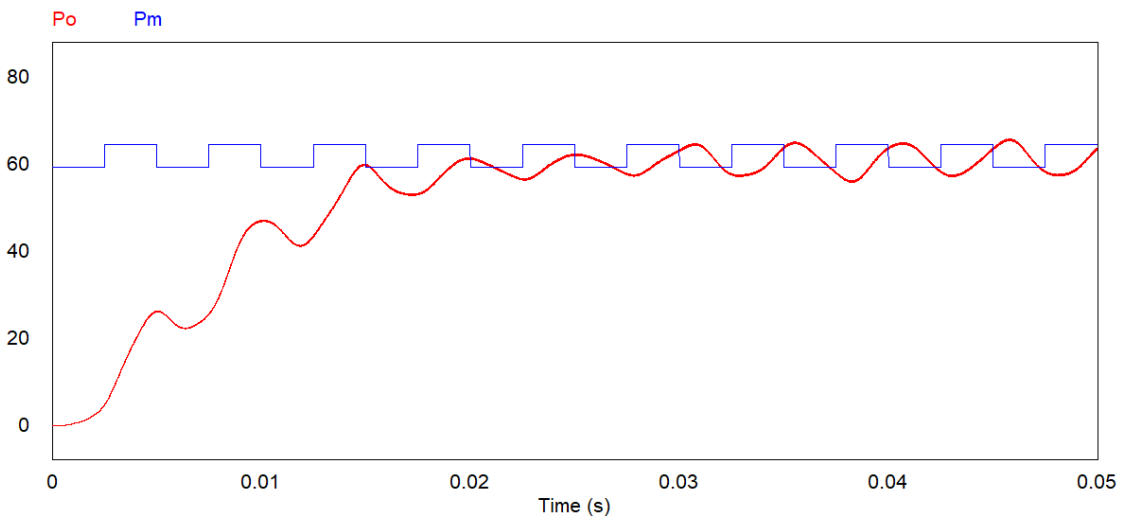


Figura 51. Potencia in/out en Convertidor en modos deslizantes con perturbación de temperatura.

Para casi la totalidad de los casos, es indiferente si la perturbación de la fuente es ocasionada por modificaciones en la radiación solar o la temperatura. Por lo que, la estrategia de control que se

seleccione, es determinante para variaciones de potencia en la fuente y su eficiencia y comportamiento depende exclusivamente de la estrategia en sí, mas no de la fuente de las perturbaciones.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

A manera de prototipo, inicialmente el convertidor Boost Cuadrático, se ensambló en un protoboard tanto la etapa de potencia como la electrónica del control. Se verificó el funcionamiento del convertidor y luego se procedió a ensamblarlo en una placa de circuito impreso cuyo diseño se describe más adelante. Particularmente, la consecución de los inductores dimensionados en el capítulo 3 y con sus valores exactos de inductancia, supuso una dificultad inicial. Se han utilizado entonces para los dos inductores, unas bobinas de núcleo de ferrita y pocas vueltas, pero de las mismas características físicas y con un valor de $250\mu H$, y los resultados del funcionamiento del convertidor según dichas características se describen en este capítulo.

5.1. IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL DEL CONVERTIDOR BOOST CUADRÁTICO

Para la implementación del circuito del convertidor se utilizaron distintos insumos electrónicos, incluyendo lo descrito en el apartado de dimensionado, en donde se describe en detalle el circuito convertidor con los valores implementados. Se implementó un driver para la compuerta del Mosfet, dado pues que el PWM generado por el microcontrolador es de una amplitud de 5V, el Mosfet necesita 12 V para conmutar. Se espera que el comportamiento de dicho circuito sea el señalado por las herramientas de simulación. Tomando en cuenta que los valores de las inductancias no se han conseguido del valor indicado en el diseño en estado estable, y que además de eso, el valor del inductor es desconocido, se espera una diferencia entre lo simulado y lo probado experimentalmente. Se debe entender también, que los valores de los inductores no afectan las señales de voltaje y corriente de los convertidores en estado estable, pero si afectan el rizado de las señales.

5.1.1. Circuito Driver para MOSFET

Tomando en cuenta los requerimientos del MOSFET utilizado (IRFP 150N), se requiere al menos un voltaje de disparo de 9V, por lo que el circuito implementado alimentó con 12V la compuerta del MOSFET. El driver implementado, utiliza transistores BJT en configuración de Push – Pull, lo que permite alimentar correctamente el transistor. En la siguiente figura, se puede observar el diagrama circuital implementado.

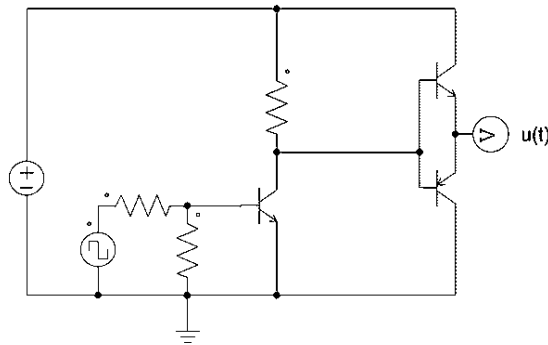


Figura 52. Driver del MOSFET.

Nótese que la salida del driver, la señal pulsante proveniente del Arduino se invierte, por lo que mediante código, se corrigió dicho desfase, es decir si el ciclo de trabajo desde el arduino es del 40%, al MOSFET le llega un ciclo de trabajo del 60%.

5.1.2. Diseño del circuito impreso

Es muy importante tener en cuenta que el circuito del convertidor Boost, es de electrónica de potencia, lo que implica en primera medida, tener ciertos requerimientos claros a la hora del diseño del PCB del circuito. En la misma placa de circuito se pretende incluir la electrónica de control y la parte de potencia, por lo que es importante que las mismas permanezcan claramente diferenciadas. Para efectos del diseño del circuito impreso, se empleó el software Livewire y PCB Wizard para el diseño de las rutas. En la Figura 53 se puede observar el diseño del PCB implementado.

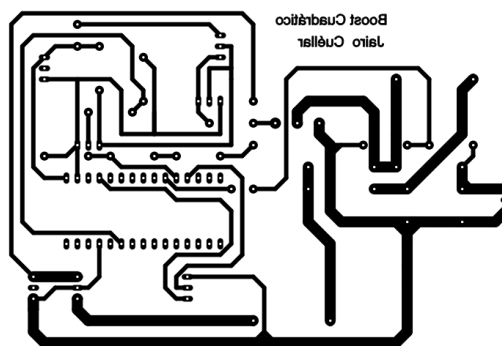


Figura 53. Diseño PCB Convertidor Boost cuadrático.

Se ha procurado seguir las recomendaciones para la fabricación de circuitos impresos, sobre todo tomando en cuenta la alta velocidad de conmutación del mismo (62 KHz). El diseño final del circuito

una vez organizados los elementos y debidamente soldados a la baquela del circuito impreso, se puede observar en la Figura 54, presente en el cuerpo de este documento.

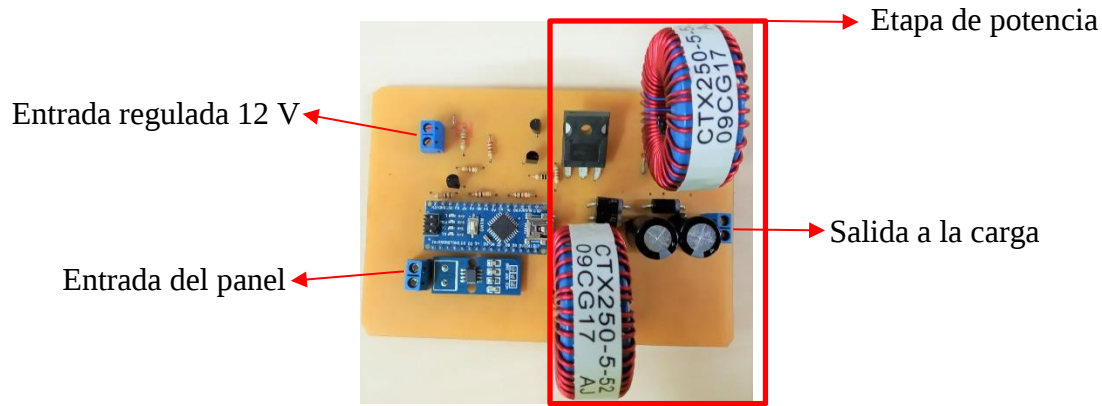


Figura 54. Convertidor Boost cuadrático.

Se puede observar claramente que el dispositivo implementado presenta una bornera de entrada para la entrada de potencia (Panel Solar), una bornera de salida para la carga (Resistencia, Banco de baterías, etc.) y una bornera para la entrada de voltaje regulado que alimenta la electrónica de control del circuito.

5.2. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

En el siguiente apartado, se mostrará la lógica de programación que se implementó en el microcontrolador para cada uno de los algoritmos antes mencionados. Cabe precisar, que la mayoría de la configuración del dispositivo es igual, solo se modifica la función MPPT, de acuerdo a la estrategia de control a implementar.

El siguiente segmento de código se encarga de la declaración de las variables a emplear en el algoritmo implementado, la configuración de puertos de entrada y salida, y de la modificación de la frecuencia del timer, para lograr frecuencias de 62 KHz en el PWM de salida:

```
int u = 3;          //PUERTO PARA SALIDA PWM
float pwm;          //CICLO DE TRABAJO VALOR DE 0 - 255 PWM
float il,vi,temp;
float p_prev = 40;  //Almacena potencia previa
float v_prev = 20;  //Voltaje Previo
float inc = 1;      //Incremento al Voltaje de Referencia
float sensib = 0.096; // Sensor de corriente
```

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A0, INPUT);          //Pin Lectura de Corriente PV
  pinMode(A1, INPUT);          //Pin Lectura Voltaje PV
  pinMode(A2, INPUT);          //Pin Lectura Voltaje Salida
  pinMode(u, OUTPUT);          //Pin Salida u(t)

  //AJUSTES DE FRECUENCIA DE LA SEÑAL U(t)
  TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x01; // La frecuencia está ajustada a 32500 hz
  TCCR2A |= _BV (WGM21) | _BV (WGM20); // Frecuencia ajustada a 62500 hz
}

```

Dentro del loop ejecutado por el microcontrolador, se hace únicamente la lectura de los puertos y el llamado a la función que se requiera, dependiendo si se controla por P&O, conductancia o modo deslizante. En lo que sigue, se encuentra el código de cada función de acuerdo al algoritmo que se desea.

5.2.1. Función P&O

```

float mppt_po(float x,float y)
{
  float i = x;
  float v = y;
  float vpv = v;
  float p = i*v;          //Calcular la potencia
  float dp = p - p_prev; //Calcular el cambio de potencia
  float dv = v - v_prev; //Calcular el cambio de voltaje
  if(dp!=0)
  {
    if(dp>0)
    {
      if(dv>0)
        v = v+inc;
      else
        v = v-inc;
    }else
    {
      if(dv>0)
        v= v-inc;
      else
        v= v+inc;
    }
  }
  pwm = 255 - 255*(vpv - v)/vpv;

  if(pwm<0)
    pwm = 0;
  if(pwm>255)
    pwm = 255;

  v_prev = v;
  p_prev = p;
}

```

```

    return pwm;
}

```

La función anteriormente mostrada y todas las demás, simplemente calculan el PWM de acuerdo al comportamiento del algoritmo que se implementa, en este caso es sencillo, porque se varía el voltaje del panel solar y se evalúa si con ese nuevo voltaje la potencia incrementa o decrementa, y según sea el caso se varía de nuevo el voltaje siempre en dirección al crecimiento de la potencia.

5.2.2. Función Conductancia Incremental:

```

float mppt_cin(float x,float y)
{
    float i, v;
    i = x;
    v = y;
    vpv = v;

    float di = i - i_prev;    //Se calcula el cambio de corriente
    float dv = v - v_prev;    //Se calcula el cambio de voltaje
    float dx = i + di/dv*v;    //Se calcula el cambio de conductancia

    if(dv == 0)
    {
        if(dx!=0)
        {
            if(dx>0)
            {
                v=v-inc;
            }
            else
            {
                v=v+inc;
            }
        }
    }
    else
    {
        if(di != 0)
        {
            if(di>0)
            {
                v=v+inc;
            }
            else
            {
                v=v-inc;
            }
        }
    }

    i_prev = i;
}

```

```

v_prev = v;
p_prev = p;

pwm = 255 - 255*(vpv - v)/vpv;

if(pwm<0)
pwm = 0;
if(pwm>255)
pwm = 255;
return pwm;
}

```

En este caso el algoritmo se comporta de forma similar al de P&O, siendo la principal diferencia, que se modifica el voltaje, no de acuerdo a la potencia, sino de acuerdo a la conductancia que el circuito va presentando.

5.2.3. Función modos deslizantes

```

float mppt_slide(float x, float y)
{
    float i, v;
    i = x;
    v = y;

    float di = i - i_prev;    //Se calcula el cambio de corriente
    float dv = v - v_prev;    //Se calcula el cambio de voltaje
    float dx = i + di/dv*v;    //Se calcula el cambio de conductancia

    if(dv == 0)
    {
        if(dx!=0)
        {
            if(dx>0)
            {
                v=v-inc;
            }
            else
            {
                v=v+inc;
            }
        }
    }
    else
    {
        if(di != 0)
        {
            if(di>0)
            {
                v=v+inc;
            }
        }
        else
    }
}

```

```

    {
        v=v-inc;
    }
}

i_prev = i;
v_prev = v;
p_prev = i*v;

float g = i/v; //Conductancia

pwm = 255*(1 - (g*v0 - i)/(g*v0));
//S = gVo - Iin

if (pwm < 0)
    pwm = 0;
if (pwm > 255)
    pwm = 255;

return pwm;
}

```

En este caso en particular, se calcula primero una conductancia mediante el algoritmo de conductancia incremental y luego se utiliza la superficie de deslizamiento para determinar el nuevo PWM del circuito del convertidor. En los siguientes apartados, se muestra los efectos de estos algoritmos en el convertidor de potencia.

5.3. EXPERIMENTACIÓN EN LABORATORIO

5.3.1. El convertidor en lazo abierto.

En el entorno del laboratorio, se ha simulado la entrada de potencia con una fuente de voltaje regulada de 0 a 18 V y 3 A. Por otra parte, el circuito del microcontrolador y del driver del mosfet, se alimentan con una fuente regulada de las mismas características, pero con un voltaje fijo de 12 V. En lazo abierto el convertidor conmutado se ha alimentado a 15 V, por la entrada de potencia y el microcontrolador inicialmente genera un PWM de 12 V de amplitud y una frecuencia de aproximadamente 62 KHz, con un ciclo de trabajo del 50%, la forma de onda del PWM se puede ver en la Figura 55.

.

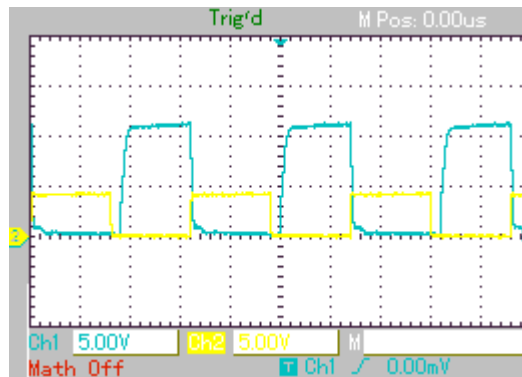


Figura 55. Señal PWM del MOSFET.

El circuito implementado, tiene el control electrónico programado en un microcontrolador Arduino NANO, el cual genera un PWM con ciclo de trabajo del 50%. Posteriormente dicha señal ingresa a una etapa de transistores NPN que conforman un driver para el MOSFET. La señal de la Figura 55, muestra el PWM de 5 V en amarillo, y el de 12 V en color azul. Nótese que el driver diseñado es inversor, por lo que cuando la señal proveniente del microcontrolador está en alto, la otra salida del driver esta en bajo. La característica inversora del driver, supone entonces que, en el cálculo del nuevo ciclo de trabajo, se tuvo en cuenta dicha situación mediante el código presente en el arduino, invirtiendo el ciclo de trabajo desde el código.

Con las características del PWM, se puede comparar la señal de voltaje de entrada a la etapa de potencia y la señal de salida, las cuáles, en estado estable están relacionadas por las ecuaciones anteriormente descritas. Por lo tanto, para un voltaje de ingreso de 12 V, el voltaje a un ciclo de trabajo del 50%, arroja un voltaje de salida de hasta 48 V. En la Figura 56 y Figura 57, se puede observar el voltaje de entrada y de salida respectivamente, del convertidor implementado.

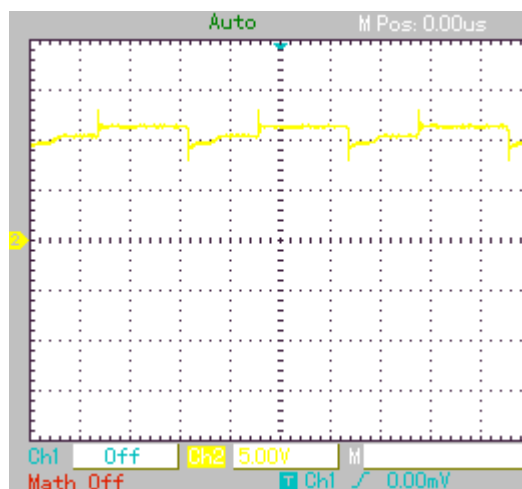


Figura 56. Voltaje de entrada en lazo abierto.

Tal y como se observa en la figura anterior, el voltaje a la entrada del convertidor se ve un poco afectado por la naturaleza oscilatoria del circuito, sin embargo, al acercarse a un promedio se puede obtener un valor cercano a 12 V. A continuación, se observa el voltaje de salida del circuito convertidor en lazo abierto.

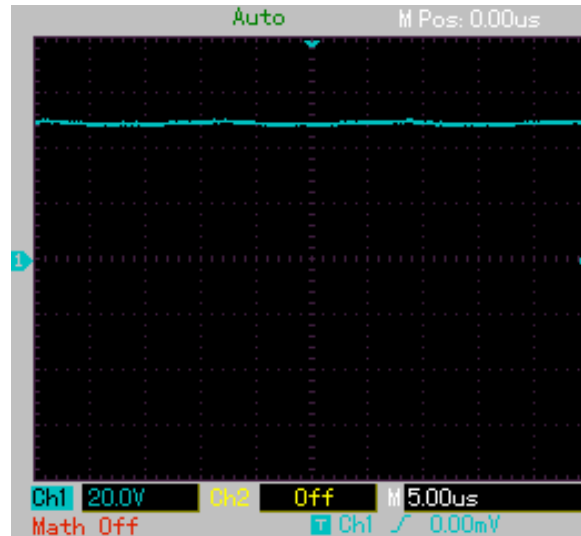


Figura 57. Voltaje de salida en lazo abierto.

El voltaje de salida para una señal de entrada de 12 V, es 48V, tal y como se observa en el osciloscopio, esto se cumple visualmente. De acuerdo a lo descrito en el capítulo de diseño y dimensionado del convertidor, se puede intuir que los valores de voltaje y corriente en estado estable obedecen a lo descrito teóricamente. Debido a esto, en el apartado siguiente se programó el microcontrolador con un algoritmo MPPT de P&O. Lo anterior se puede comprobar observando las simulaciones de lazo abierto presentes en el capítulo 3.

5.3.2. Control mediante el algoritmo de P&O.

Es necesario aclarar que la señal de entrada es de entre 0 y 17,5 V, puesto que los paneles solares proyectados para la experimentación no entregan un voltaje mayor al descrito. En los requerimientos de carga del convertidor, se trabaja con ese voltaje como el voltaje del punto de máxima potencia, además de 60W como potencia del convertidor. Sin embargo, en el ejercicio mostrado a continuación, se utiliza una señal de voltaje de una fuente regulada para modelar el voltaje del panel solar. Ese valor de voltaje, se lee en el microcontrolador mediante un divisor de tensión que realiza la equivalencia del voltaje entre 0 y 5 Voltios, valores tolerados por el Arduino Nano. Para el caso de la señal de la corriente, se utiliza un sensor de corriente de efecto Hall, de referencia ACS712, de 20 A. Dicho sensor, convierte la señal de corriente a un voltaje de 0 a 5 Voltios de acuerdo a lo indicado por la tabla siguiente.

Tabla 7. Sensor de corriente ACS712.

Corriente	Señal entregada	Sensibilidad
-20A a 0A	0 – 2.5 V	100 mV/A
0A a 20 A	2.5 – 5 V	100 mV/A

El algoritmo de perturbar y observar, se programó tomando en cuenta que al concluir con el cálculo del voltaje de la iteración “n”, se emplea el mismo voltaje de entrada para hacer una comparación con el de voltaje que se ha incrementado o decrementado según sea el caso. Es importante notar que, para calcular el voltaje del punto actual, se hace la variación del voltaje y se observa, en términos de potencia, si se incrementa o no dicho valor. A continuación se puede observar una evidencia fotográfica del convertidor funcionando en estado estable con el Algoritmo de P&O.

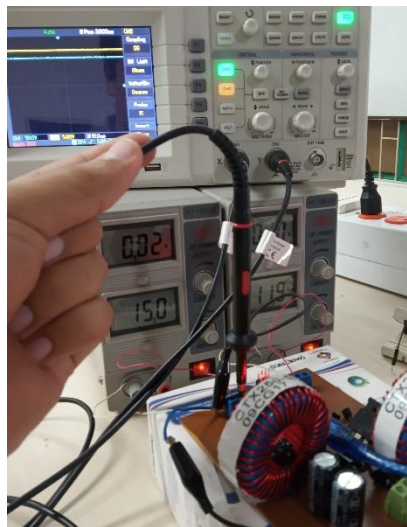


Figura 58. Ejercicio experimental MPPT – P&O.

Además en Figura 59 se puede observar la comparación de la señal del voltaje de entrada y de salida en estado estable. En donde claramente se observa la naturaleza estabilizadora del experimento y el hecho que, ante una entrada de 15 V, la salida está cercana a los 120 V.

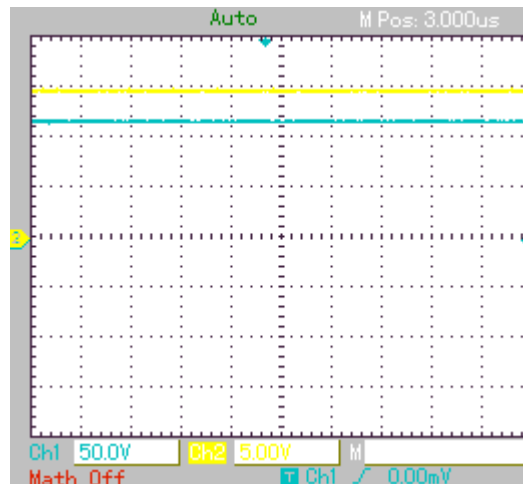


Figura 59. Voltaje entrada y salida MPPT – P&O.

Para este caso se produjo la siguiente señal de PWM es la generada por el microcontrolador. Dicha señal es de un 77% de ciclo de trabajo.

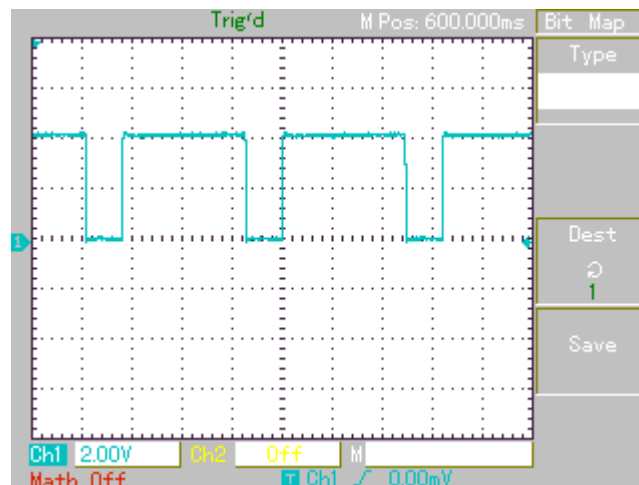


Figura 60. Señal PWM, MPPT – P&O.

En el código presente dentro del microcontrolador, se ha procedido a acotar el valor del PWM (0 – 255 equivalente a 0% y 100% de Ciclo de Trabajo) y a corregir la inversión de la señal de entrada incluida por el driver del MOSFET. Además, la corriente siempre es positiva en la entrada de potencia. Para el caso de pequeñas perturbaciones en la fuente, se ha procedido a simular dicho valor modificando el voltaje de entrada a la etapa de potencia y las señales generadas se capturaron en la figura a continuación mostrada.

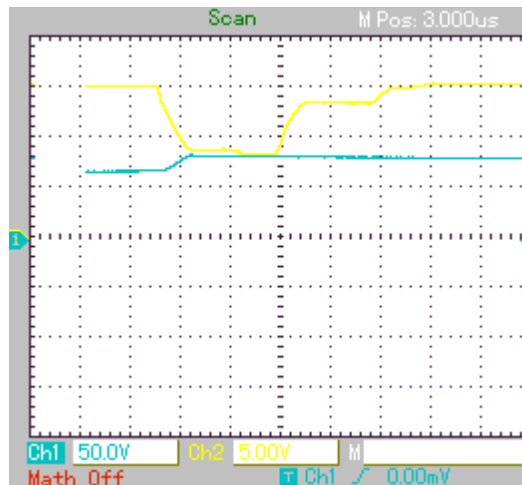


Figura 61. Voltaje entrada y salida MPPT – P&O con perturbación.

Nótese que, pese a las variaciones de la señal de color amarillo, correspondiente a la entrada de voltaje, la señal de salida (azul) permanece casi intacta, la variación del voltaje fue desde 13 V hasta 7 V, y la salida se comportó de acuerdo a lo esperado, sin perturbaciones grandes y aumentando un poco su valor con el fin de compensar el bajón de la entrada.

5.3.3. MPPT de conductancia incremental.

El algoritmo de conductancia incremental fue explicado en los apartados anteriores. En la fotografía siguiente, se puede evidenciar el comportamiento del mismo y las pruebas de laboratorio.

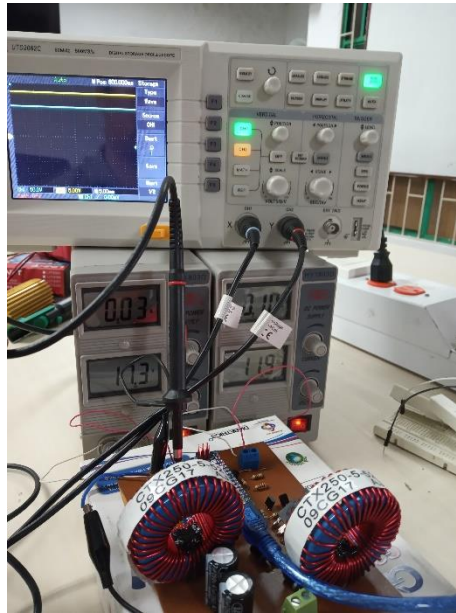


Figura 62. Ejercicio experimental MPPT – P&O.

Se implementó mediante programación el algoritmo de conductancia incremental y se simula bajo las mismas condiciones que el algoritmo de perturbar y observar, obteniendo una comparación de la salida y la entrada para estado estable, mostrada en la Figura 63. Nótese que se utilizó un voltaje de amplitud 17.5 V a la entrada, dando una salida de 100 V.

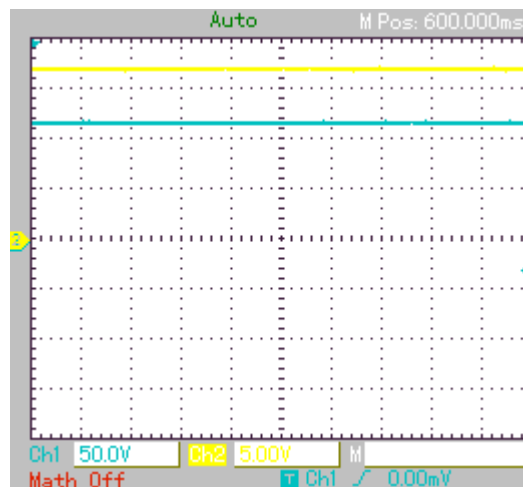


Figura 63. Voltaje entrada y salida Conductancia Incremental en estado estable.

La señal PWM, para este algoritmo tiene la forma de onda mostrada en la siguiente figura.

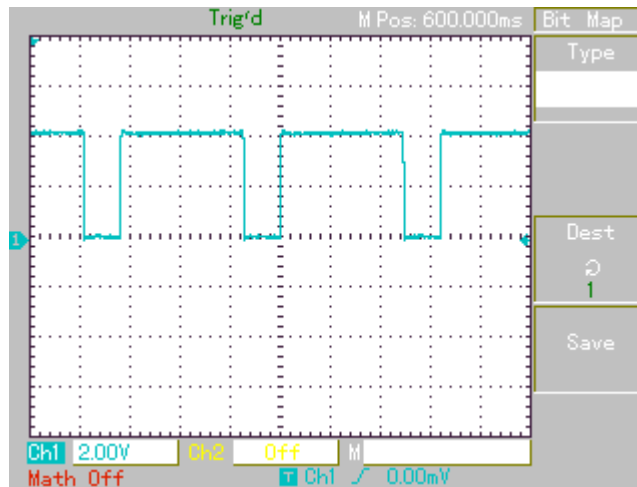


Figura 64. Señal PWM, Conductancia Incremental.

Tomando como referencia el experimento realizado para el algoritmo de P&O, se simuló en la fuente regulada que actúa como paneles solares, una perturbación en la potencia de la entrada, lo que ocasiona una disminución en el nivel de tensión. El comportamiento del convertidor, se observa ahora, en la Figura 65.

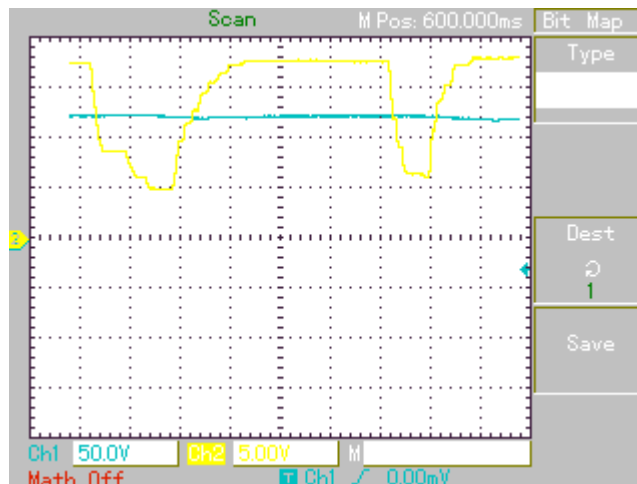


Figura 65. Voltaje entrada y salida Conductancia Incremental con perturbaciones.

En términos generales, el comportamiento de los dos algoritmos implementados es bastante similar, según lo muestran los valores de las señales de voltaje y la respuesta ante las perturbaciones, esto se debe a que en ambos casos, se trata de algoritmos de iteraciones repetidas que simplemente rastrean un punto a lo largo de una curva en una gráfica determinada. Pese a ello observando las perturbaciones en ambos casos, se concluye que la salida de tensión para el caso de conductancia incremental tiene una estabilidad mayor.

5.3.4. Control en modos deslizantes.

Se utilizó para la prueba de laboratorio, las mismas condiciones mostradas anteriormente, se tienen programado en el microcontrolador un algoritmo que emplea a superficie de deslizamiento definida por la ecuación 14. En donde se debe calcular la conductancia de la red, y luego, empleando el voltaje de salida y la corriente de entrada, determinar una señal PWM. En la ilustración siguiente, se muestra una evidencia fotográfica del funcionamiento del convertidor.

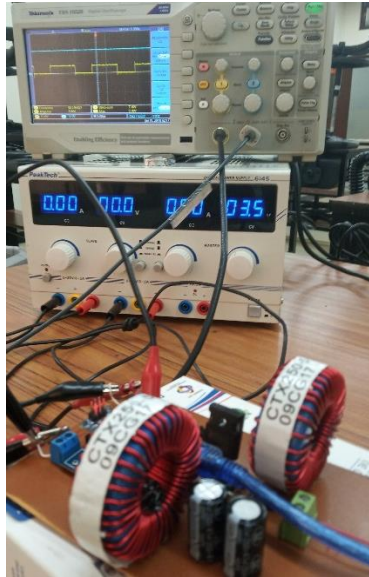


Figura 66. Convertidor en modo deslizamiento.

Seguidamente, se procedió a tomar las muestras de las señales con el convertidor funcionando, arrojando una señal de salida con un voltaje cercano a los 100 V, a pesar que la señal de entrada es de apenas 8V. En la figura que se muestra a continuación aparece lo antes mencionado.

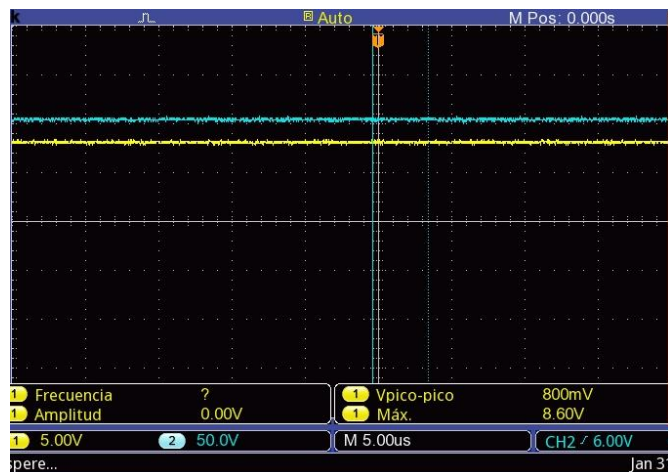


Figura 67. Voltaje de entrada y salida en Control en modos deslizantes.

Por último, se presenta una muestra del PWM generado por el microcontrolador, de forma tal que se puede hacer una idea el lector de lo que está pasando en el circuito convertidor respecto de los voltajes de entrada y salida. En la figura se puede observar dicho PWM.

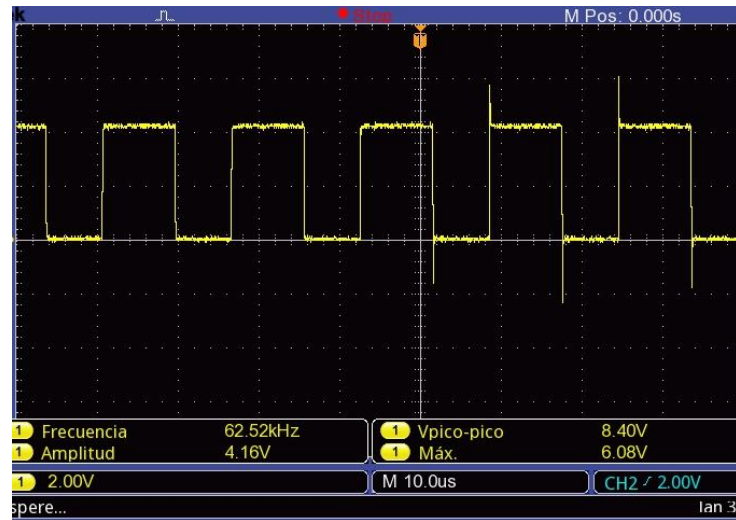


Figura 68. Señal PWM control en modos deslizantes.

Es importante evidenciar el comportamiento del circuito en condiciones de perturbaciones, por lo que se han simulado variando el voltaje de la fuente de potencia, los resultados se encuentran en la siguiente ilustración. La señal en color azul obedece al voltaje de salida y la amarilla al de entrada con perturbaciones.

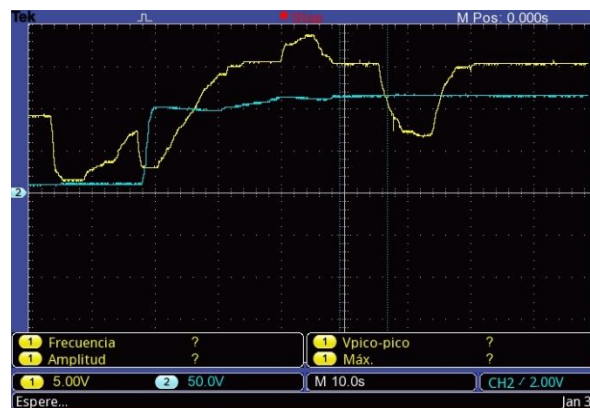


Figura 69. Voltaje de entrada y salida control en modos deslizantes.

5.4. EXPERIMENTACIÓN CON PANEL SOLAR

El trabajo experimental incluido en este apartado, se realizó en el laboratorio de electrónica de la Universidad Santo Tomás, sede principal en Bogotá. A continuación se describe lo realizado, que básicamente obedece a probar los algoritmos implementados, conectando como fuente de potencia un panel solar de 20W y observando la naturaleza de las gráficas de la señal PWM, de los voltajes de salida. En la siguiente figura se puede observar el experimento realizado. El dispositivo implementado, solo requiere la modificación del algoritmo para continuar con los ensayos, por lo que siempre el montaje fue el mismo. Se utilizó una lámpara de 1000W de potencia para simular la radiación solar, tal y como se observa en la imagen.



Figura 70. Pruebas con paneles solares y el Convertidor Boost Cuadrático.

5.4.1. Perturbar y Observar

Se procedió a programar el microcontrolador con el algoritmo P&O implementado y se obtuvieron los resultados mostrados en este apartado. Frente a la señal de PWM, al voltaje de entrada y de salida los valores resultantes se puede observar en las siguientes imágenes:

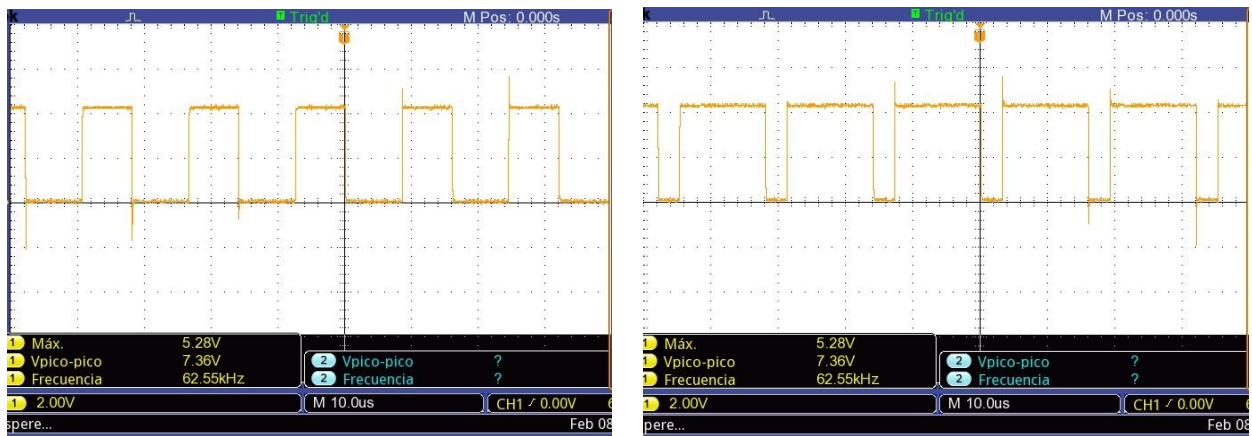


Figura 71. Variación del PWM frente a perturbaciones (P&O).

La figura 71, representa la variación del PWM del algoritmo P&O, frente a variaciones en la radiación solar, dichas variaciones, repercuten en las señales de salida que a continuación se observan.

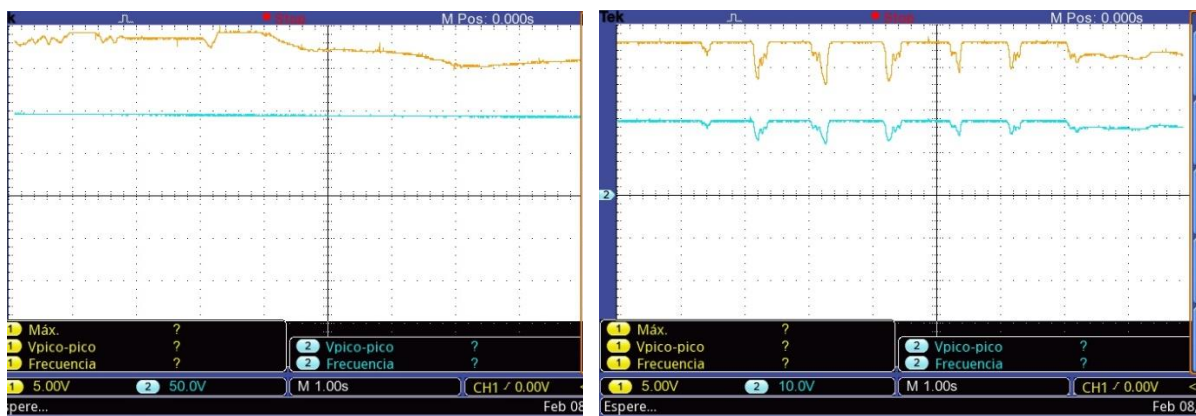


Figura 72. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (P&O).

Lo mostrado por la Figura 72, se entiende como el voltaje de entrada y salida, frente a perturbaciones de la fuente y de la carga. En el primer caso, no se ha colocado una carga al convertidor conmutado, por lo tanto, el circuito responde ante cualquier voltaje de entrada con el máximo voltaje de salida posible, en este caso casi 100V. En la segunda imagen de la figura anterior, al sistema se le colocó una carga de 1000 ohmios, lo que ocasiona que en el voltaje de salida y de entrada el mismo nivel de tensión.

5.4.2. Conductancia Incremental

Con este método, se programó el microcontrolador con el algoritmo implementado de conductancia incremental y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 73, frente a la señal del PWM, variando frente a los niveles de iluminación del panel solar.

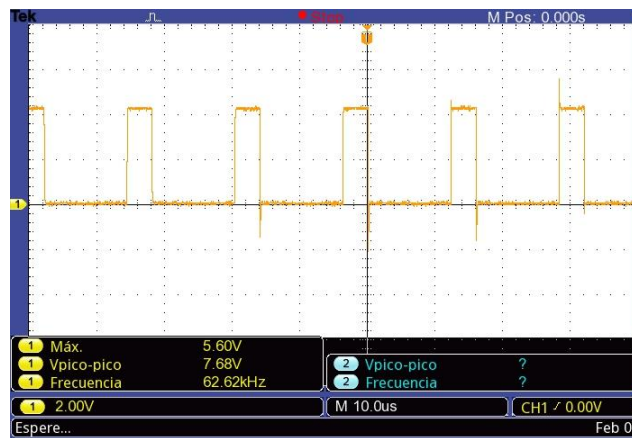


Figura 73. PWM frente a perturbaciones (Conductancia Incremental).

Tomando en cuenta que los algoritmos se han programado en el mismo microcontrolador, y frente a las mismas condiciones, se ha procedido a tomar el PWM, frente a una cantidad mínima de radiación solar, lo que arroja como resultado la señal mostrada por la Figura 73. Las señales que se obtuvieron comparando el voltaje de entrada frente al de salida, muestran un comportamiento similar al del algoritmo de P&O, y dicho comportamiento se evidencia en la Figura 74.

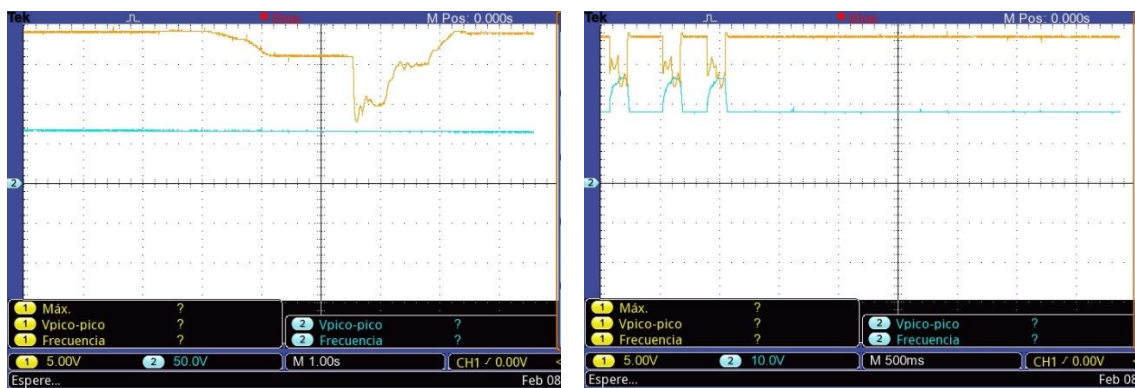


Figura 74. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (Conductancia Incremental).

El comportamiento frente a las variaciones fuertes de carga, es similar también al algoritmo de P&O, sin embargo, se puede observar, que frente a la ausencia de carga Figura 74 (foto izquierda), la señal de salida (en color azul), intenta mantener un nivel de tensión considerablemente alto y sin embargo su valor decrece en el tiempo. Por otra parte, con carga de 1000 ohmios, las tensiones tanto de salida como de entrada, son susceptibles a las variaciones de potencia en la fuente por radiación solar irregular.

5.4.3. Control en modos deslizantes

Se procedió a programar el microcontrolador con el algoritmo implementado en modos deslizantes, y se obtuvieron los resultados mostrados a continuación. Frente al voltaje de salida y a la señal PWM,

para una iluminación bastante pequeña en el panel solar, se puede observar el PWM y el voltaje de salida en la imagen 75.

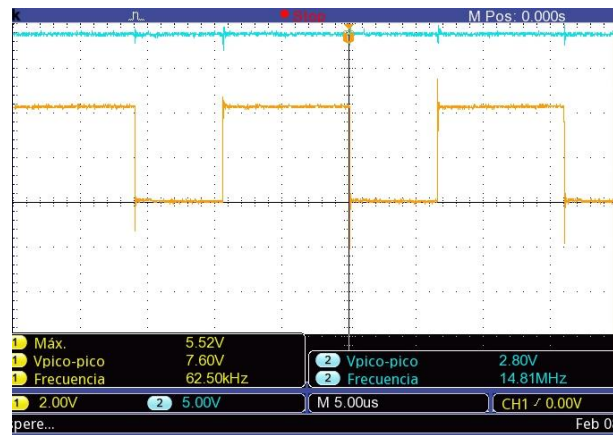


Figura 75. PWM y voltaje de salida frente a perturbaciones (Modo deslizante).

A continuación, se procede a probar la señal de salida del convertidor en modos de deslizamiento, y frente a perturbaciones de radiación, los resultados son los que se muestran en la Figura 76.

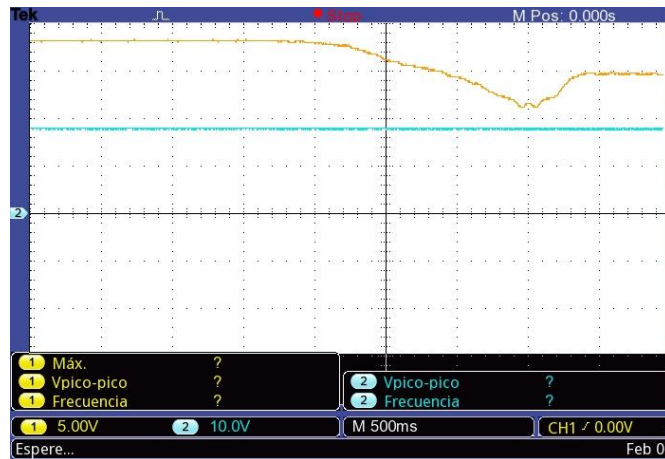


Figura 76. Voltajes de entrada y salida frente a perturbaciones (Modo deslizante).

El comportamiento del algoritmo implementado, provoca que frente a variaciones grandes en la radiación solar de entrada, el voltaje de salida mantenga cercano al punto de MPPT, que para el caso de estos paneles solares, es cerca de 18V. Obsérvese que la señal azul, está cercana a los 18V, precisamente y sin presentar variaciones fuertes como si pasa en la señal de entrada. Con todos los resultados anteriormente mostrados, se pueden realizar comparaciones frente a las simulaciones presentadas en los capítulos 4 y 5. Por otra parte, se evidenció que el convertidor conmutado ofrece las mismas características en entornos simulados y en entorno real del laboratorio.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este apartado del proyecto, se procede a enumerar los temas más relevantes y concluyentes de la investigación efectuada. Inicialmente se enuncia el abanico de posibilidades que se tienen como trabajos futuros de investigación y finalmente se listan las conclusiones más relevantes que se obtuvieron capítulo tras capítulo de este trabajo de maestría.

Se debe señalar también que, como en todo trabajo de investigación, los hallazgos de este proyecto, sientan las bases fundamentales para futuros proyectos de investigación posgraduales o no y que evidentemente, dichos resultados se pueden organizar de forma tal que se genere una o varias publicaciones de alto impacto en el entorno científico de la disciplina en cuestión.

6.1. CONTRIBUCIONES DEL PROYECTO

Colombia es un país que actualmente se considera en vía de desarrollo, por lo que investigaciones, proyectos y estudios tecnológicos con un alto componente innovador, siempre son bienvenidos para mejorar las condiciones de vida y/o ambientales del país. El tema principal del proyecto ejecutado, que son los algoritmos MPPT, permite evidenciar una comparación a fondo entre tres (3) distintas estrategias de control implementadas sobre el mismo circuito convertidor CC/CC tipo Boost Cuadrático, aportando sobre todo, en la utilización de dichas estrategias sobre un tipo de convertidor que muy pocas veces ha sido utilizado para aplicaciones fotovoltaicas. Además, el principal producto e insumo para futuros trabajos, es el estudio comparativo entre las estrategias implementadas, todas ellas susceptibles de mejoras.

El control por modos deslizantes, es una estrategia cuya aplicación a los temas de energías renovables, ha sido básica y muy superficial. El proyecto ejecutado, permitió evaluar el comportamiento del convertidor Boost Cuadrático, controlado en modos deslizantes y se comprobó que la posibilidad en cuanto a las aplicaciones es muy amplia, puesto que son tantas como conmutadores haya, es decir, la estrategia puede ser aplicable a cualquiera de ellos, por no mencionar que la superficie de deslizamiento utilizada es solo una de dos que se definieron en el capítulo 4. Respecto a las estrategias de control por perturbaciones, en el algoritmo de conductancia incremental,

se evidenció un mejor comportamiento en cuanto a las oscilaciones alrededor del punto de equilibrio. El algoritmo se modificó de forma tal que se calcula la conductancia en cada iteración más cercana al MPP, permitiendo el control en modos deslizantes y la búsqueda del máximo en la curva de carga del convertidor.

6.2. TRABAJOS FUTUROS

El convertidor conmutado tipo Boost Cuadrático y los modelos matemáticos obtenidos, pueden ser utilizados para estudiar diferentes estrategias de control y particularmente estrategias que apunten a la búsqueda de los puntos de máxima potencia. Dichos trabajos pueden ser posgraduales, o proyectos de investigación ejecutados en las Universidades y para beneficio directo de la comunidad científica y la sociedad colombiana. Las estrategias de control implementadas (Perturbar y Observar, Conductancia Incremental y G - Girador) pueden ser utilizadas con convertidores conmutados de potencia de distintas topologías. Este hecho, permitirá que muchos otros trabajos de investigación se realicen a partir de la hipótesis planteada en este proyecto de investigación y los resultados expuestos en la discusión. Las posibles combinaciones son muchas pues se podría combinar un solo algoritmo MPPT con todas las topologías de convertidores o viceversa.

El algoritmo MPPT implementado, sea el método indiferente, puede ser programado fácilmente en un microcontrolador o en un DSP, o incluso de forma analógica, lo cual incluye un aspecto de facilidad a la hora de implementar y construir este tipo de circuitos. El modelo matemático del convertidor de potencia, se encuentra listo para adaptarle cualquier estrategia de control moderno o clásico, y evaluar el comportamiento del mismo tanto experimental como en simulaciones.

Por otra parte, las conclusiones y resultados de este trabajo de investigación, son relevantes y permitirían construir uno o varios documentos preliminares que pudieran sintetizar todo el trabajo y llevarlo a una revista de divulgación científica, previa aprobación del director del proyecto, lo que permitiría aportar a la comunidad científica colombiana y cerraría el ciclo del conocimiento que se pretendería buscar con el proyecto de investigación. El trabajo presentado anteriormente, se ha sintetizado en un formato de artículo científico que se someterá a la revista IEEE – Latin America, revista indexada en el Scimago Journal Rank en el cuartil tres (Q3).

6.3. CONCLUSIONES

En condiciones climáticas normales, la cantidad de energía que proviene del sol en las zonas ecuatoriales, siempre es suficiente para mantener en producción distintos generadores fotovoltaicos, esto se pudo evidenciar dada la información recolectada sobre el recurso solar presente en las ciudades de Villavicencio y Bogotá, y exactamente en capítulo 2 de este documento.

Los modelos matemáticos obtenidos de los circuitos equivalentes de las celdas solares, son modelos que pueden ser simulados en PSIM o cualquier otro software, de forma tal que las simulaciones elaboradas obedezcan a un comportamiento real y bastante aproximado al de los dispositivos emulados. Todo esto permitió realizar un estudio, a partir de los modelos y luego implementar la parte experimental. Las herramientas de simulación como PSIM, puede proveer una aproximación muy precisa de los paneles solares con las características reales de funcionamiento. Se tiene un módulo en PSIM que es un modelo confiable y muy preciso de los paneles solares y que respondió de manera apropiada a las simulaciones realizadas.

Los convertidores conmutados de potencia, continúan haciéndose un lugar importante en la electrónica de potencia, dado que su aplicación es múltiple y a distintos niveles de tensión. En este proyecto, se utilizó para adaptar las condiciones de carga de un panel solar y realizar el control del máximo nivel de potencia a la salida del convertidor, sin embargo, sus aplicaciones van desde los vehículos eléctricos, hasta las grandes turbinas eólicas. Los resultados obtenidos con las simulaciones implementadas para los convertidores de potencia Boost Cuadrático, permitió evidenciar que los modelos estudiados, se comportan equivalentemente a los convertidores reales, lo que convierte el producto de este proyecto en el insumo para simular y posteriormente implementar cualquier estrategia MPPT que mejor se adapte y que mayor robustez le brinde al sistema de control de carga. De hecho, el circuito implementado en el simulador se utilizó para evaluar el comportamiento en ambientes simulados y experimentales y respondió notablemente permitiendo recolectar importantes datos y arrojar conclusiones de investigación.

El diseño en estado estable del circuito del convertidor, arrojó como resultado un circuito electrónico que fue la planta utilizada para implementar el algoritmo MPPT y estrategias de control. Dicho circuito permitió sacar adelante este trabajo de investigación y plantear nuevas soluciones y retos en el ámbito de los convertidores conmutados y los módulos de generación fotovoltaicos. Los algoritmos de seguimiento al punto de máxima potencia (MPP), son muy relevantes a la hora de controlar y establecer niveles de potencia constantes en los controladores de carga para paneles

solares. Cada uno de los algoritmos estudiados e implementados en este proyecto, se comprobó tanto en ambientes simulados como en un entorno experimental de laboratorio.

La diferencia de las señales simuladas en cuanto a una perturbación de radiación solar o una perturbación de temperatura no es significativa, es decir que ninguno de los algoritmos estudiados en este apartado presenta mejor o peor comportamiento frente al origen de la perturbación. La frecuencia de este tipo de perturbaciones es muy lenta en la naturaleza, para efectos del sistema simulado se utilizó una señal cuadrada de 200 Hz de frecuencia. Las señales de voltaje que se encuentran presentes en los capacitores del convertidor conmutado, presentaron un comportamiento similar en todos los casos implementados de simulación, esto se puede observar en las gráficas presentadas en el capítulo 4 y por lo tanto no serían un factor concluyente a la hora de seleccionar una estrategia de control pertinente. Del comportamiento de las corrientes en los inductores, se puede concluir que el algoritmo de Conductancia Incremental presenta un fuerte factor diferenciador respecto a los demás algoritmos, teniendo en cuenta que las señales de corriente son más estables en el convertidor controlado por Conductancia Incremental, se puede concluir que este método de control favorece las necesidades del usuario respecto a la estabilidad de la corriente.

En todos los casos estudiados, se puede observar que la potencia de salida, se comporta según lo esperado, es decir, realiza un seguimiento de la potencia que presenta el panel solar ante las perturbaciones simuladas. Para el caso del algoritmo de conductancia incremental, se puede observar que la potencia de salida del convertidor se mantiene en el rango de la variación de la potencia del panel solar, por lo que dicho algoritmo tiene un comportamiento muy aceptable en cuanto a los niveles de potencia presentes a la salida del convertidor.

Es necesario precisar que cualquiera de los algoritmos implementados experimentalmente, es válido para la búsqueda del punto máximo de potencia. Esto, claro está, en condiciones de perturbaciones que alteran valores de la fuente pero que no la suprimen totalmente por ejemplo, una nube pasajera, la sombra de un árbol, etc., en esos casos no existen convertidores de potencia que puedan mantener una potencia de salida sin nada a la entrada del circuito, por robustos que sean sus elementos almacenadores. Se observó que en ambos casos implementados experimentalmente, el circuito conmutado se comporta según lo esperado. Los valores para el ciclo de trabajo y las señales de salida, obedecen en todo a lo indicado por las ecuaciones de estado estacionario. Se ha verificado cada uno de los algoritmos mediante condiciones normales, lo que da como resultado las señales mostradas en el capítulo 5. Por otra parte, para los dos algoritmos, se procedió a verificar el comportamiento mediante una variación en la fuente de tensión, arrojando como resultado, que el

algoritmo de conductancia incremental, logra estabilizar la tensión de salida. Ambos algoritmos encuentran el ciclo de trabajo en el que la potencia de salida es la máxima esperada.

BIBLIOGRAFÍA

- Abid, H., Toumi, A., & Chaabane, M. (2014). MPPT Algorithm for Photovoltaic Panel Based on Augmented Takagi-Sugeno Fuzzy Model. *ISRN Renewable Energy*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/253146>
- Bastidas Rodriguez, J. D., Franco, E., Petrone, G., Ramos Paja, C. A., & Spagnuolo, G. (2014). Maximum power point tracking architectures for photovoltaic systems in mismatching conditions: a review, 7(November 2013), 1396–1413. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0406>
- Castellanos, N. (2013). Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía. *Revista Inventum*, (15), 35–40. Retrieved from <http://biblioteca.uniminuto.edu/ojs/index.php/Inventum/article/view/549>
- Cid-Pastor, A., Martínez-Salamero, L., Alonso, C., Schweitz, G., & Leyva, R. (2007). DC power gyrator versus DC power transformer for impedance matching of a PV array. *EPE-PEMC 2006: 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings*, (3), 1853–1858. <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.283129>
- Cruz Boscá, M., & Buendía, E. (2009). Física en la Red.
- Green, M., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. (2016). Solar cell efficiency tables. *PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS: RESEARCH AND APPLICATIONS*, 9(11), 261–270. <https://doi.org/10.1002/pip>
- Haroun, R., & Aroudi, A. El. (2017). Synthesis of a Mode Control of two Cascaded Boost Converter Gyrator Based on Sliding Surface Using One Sliding Surface, (June). <https://doi.org/10.1515/9783110448412-001>
- Hart, D. W. (2001). *Electrónica de Potencia*. (P. E. S.A, Ed.). Madrid.
- IDEAM, & UPME. (2015). Atlas Interactivo IDEAM.
- Martinez Salamero, L., Cid Pastor, A., El Aroudi, A., Giral, R., & Calvente, J. (2009). Modelado y Control de Convertidores Conmutados Continua-Continua: Una perspectiva Tutorial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 6(4), 5–20. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70104-9](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70104-9)
- Mathworks. (2000). MPPT Algorithm - MATLAB & Simulink.
- Mejía, A. E., Torres, C. A., & Hincapié Isaza, R. A. (2010). Conexión de un sistema fotovoltaico a la red eléctrica. *Scientia et Technica*, (44), 31–36.
- Mejía, D. A., Torres, I., & Diaz, J. L. (2014). Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un convertidor SEPIC en sistemas fotovoltaicos, (45), 44–55.
- Morales, D. S. (2010). Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications.

- Science*, 411, 82. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2010.08.011>
- Murdoch, C. S., & Reynoso, S. N. (2013). Design and Implementation of a MPPT Circuit for a Solar UAV. *Ieee Latin America Transactions*, 11(1), 108–111.
<https://doi.org/10.1109/tla.2013.6502787>
- Poggi-Varaldo, H. M., Martínez Reyes, A., & Pineda Cruz, J. A. (2009). *Libro de Ciencia y Tecnología N° 2*. México.
- Rashid, M. H. (2001). *Electrónica de Potencia*.
- Riosolar. (2015). *Sistema Fotovoltaico*.
- Rodriguez Meza, M. A., & Cervantes Cota, J. L. (2005). El Efecto Fotoeléctrico, 1–22. Retrieved from <http://www.astro.inin.mx/mar>
- Ruiz C, L. J., Beristáin J, J. A., Sosa T., I. M., & Hernández, H. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. *Revista De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Computación*, 8(1), 17–23.
- Torres, M. D., Schallenberg Rodríguez, J. C., & Piernavieja Izquierdo, G. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. (I. T. de Canarias, Ed.). Islas Canarias.
- Torres P., C. A., Restrepo P., C., & Alzate G., A. (2009). Considerations of static and dynamic design for converters DC-DC, (42), 57–62.
- WebSolar. (2015). *Controladores MPPT*.