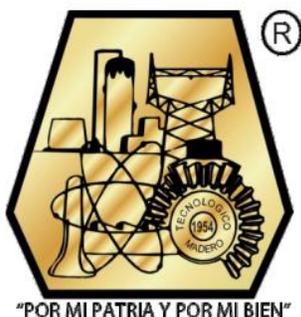


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA OBTENER EL
MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA EN PANELES SOLARES”

Que para obtener el Grado de
Maestra en Ingeniería Eléctrica

Presenta
Ing. María del Rosario Rivera Espinosa

Director de tesis
Dr. Pedro Martín García Vite



Cd. Madero, Tams., a **23 de Octubre de 2018**

OFICIO No.: U2.102/18

ÁREA: DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN
DE TESIS.

C. ING. MARÍA DEL ROSARIO RIVERA ESPINOSA
NO. DE CONTROL G11071487
PRESENTE

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su examen de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica, el cual está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE :	DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
SECRETARIO :	M.C. HERMENEGILDO CISNEROS VILLEGAS
VOCAL :	M.C. RAFAEL CASTILLO GUTIÉRREZ
SUPLENTE :	M.C. AARÓN GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DIRECTOR DE TESIS :	DR. PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE

Se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO PARA OBTENER EL MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA EN PANELES SOLARES”

Es muy satisfactorio para esta División compartir con Usted el logro de esta meta, esperando que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

ATENTAMENTE
EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®
“POR MI PATRIA Y POR MI BIEN”®

DR. JOSÉ AARÓN MELO BANDA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL
DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

c.c.p.- Archivo
Minuta

JAMB 'RCG' jar



Dedicatoria

A mis padres.

A mi hermana.

Agradecimientos

Doy gracias a Dios por todas las bendiciones recibidas y por la oportunidad de culminar una etapa más en mi vida.

Agradezco a las siguientes personas e instituciones por su apoyo y colaboración para la realización de este trabajo:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado a través de la beca 607088.

Al Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

Al personal docente, administrativo y de servicios de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del ITCM.

A mi director de tesis, el Dr. Pedro Martín García Vite, por compartir amablemente sus conocimientos y experiencias, además de su constante retroalimentación durante el desarrollo de este proyecto. A los profesores M.C. Hermenegildo Cisneros Villegas, M.C. Rafael Castillo Gutiérrez y M.C. Aarón González Rodríguez por sus valiosos comentarios para la realización de este trabajo.

A los estudiantes residentes: Jaime Eduardo Gómez Vicencio, Juan José Sánchez Palomo, Yadira Salazar González e Iracema Guadalupe Bautista Amador, por su colaboración en este proyecto .

A mis padres y a mi hermana por motivarme a seguir adelante y cumplir mis metas. A mis compañeros y amigos de la MIE por los momentos compartidos, por sus consejos y su ayuda.

Diseño e Implementación de un Algoritmo para Obtener el Máximo Punto de Potencia en Paneles Solares

María del Rosario Rivera Espinosa

Resumen

Los paneles solares poseen un único punto de operación en el cual se extrae la máxima potencia disponible. Dicho punto cambia rápidamente dependiendo de las condiciones de temperatura e irradiancia, por ello es necesario la implementación de algoritmos de seguimiento del Máximo Punto de Potencia. En el presente trabajo se describe la implementación del algoritmo Perturbar y Observar (P&O) utilizando un convertidor de potencia como acoplador de impedancias. Además, se provee el análisis teórico y son desarrolladas las ecuaciones de un convertidor de potencia con alta ganancia adecuado para utilizar en aplicaciones PV. Las simulaciones del sistema PV en lazo abierto y en lazo cerrado son realizadas con el convertidor boost y el convertidor propuesto. La obtención experimental de la curva característica del panel PV empleando una carga electrónica es presentada. La implementación de la configuración MPPT en lazo cerrado es llevada a cabo con la finalidad de validar experimentalmente la efectividad del algoritmo P&O ante perturbaciones.

Design and Implementation of an Algorithm for Obtaining the Maximum Power Point in Solar Panels

María del Rosario Rivera Espinosa

Abstract

Solar panels have a unique operating point at which the maximum power available is extracted. Such an operating point changes rapidly, depending on the temperature and irradiance conditions, therefore it is necessary to use Maximum Power Point Tracking algorithms. This work presents the Perturb and Observe (P&O) algorithm implementation with a power converter used as a means of impedance coupling. Furthermore, the theoretical analysis and the equations of a high gain power converter suitable for PV applications are developed. The open loop and closed loop PV system simulations are carried out with both boost and proposed converter. It is presented the experimental characteristic curve of the PV panel obtained by means an electronic load. The experimental implementation of the closed loop MPPT configuration is carried out in order to validate the P&O algorithm effectiveness under disturbances.

Índice general

Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Abstract	VI
Índice de Tablas	X
Índice de Figuras	XI
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
1.5 Hipótesis	4
1.6 Alcances y limitaciones	5
1.6.1 Alcances	5
1.6.2 Limitaciones	5
2 Marco Teórico	6
2.1 Sistemas de generación PV	7
2.1.1 Modelo matemático de un panel PV	7
2.1.2 Curva característica de un panel PV	9

2.1.3	Efectos de la irradiancia y la temperatura	10
2.2	Extracción de máxima potencia	11
2.2.1	Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia	11
2.2.2	Algoritmos MPPT	13
2.2.3	Algoritmo P&O	16
2.2.4	Convertidores de Potencia	20
2.3	Conclusiones	23
3	Operación del Sistema PV con el controlador MPPT	24
3.1	Generalidades del sistema PV con MPPT	25
3.2	Panel PV	25
3.2.1	Obtención de la curva característica del panel PV	26
3.3	Convertidor de potencia interconectado a un panel PV	30
3.3.1	Diseño del convertidor boost	32
3.4	Controlador MPPT	33
3.4.1	Sistema de adquisición de datos	34
3.4.2	Implementación del Algoritmo MPPT: P&O	37
3.5	Configuración propuesta para la validación del sistema PV con MPPT	41
3.5.1	Funcionamiento en lazo abierto de la configuración propuesta	41
3.6	Conclusiones	44
4	Resultados de simulación del sistema PV con MPPT	45
4.1	Modelo en simulación del sistema PV con MPPT	46
4.2	Resultados de simulación en lazo abierto	46
4.2.1	Configuración propuesta en lazo abierto	47
4.2.2	Sistema PV en lazo abierto	49
4.3	Resultados de simulación en lazo cerrado	50
4.3.1	Simulación de la configuración propuesta en lazo cerrado	50
4.3.2	Simulación del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost	54

4.3.3 Simulación del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost con alta ganancia	56
4.4 Conclusiones	60
5 Resultados experimentales	62
5.1 Obtención experimental de la curva característica del panel PV	63
5.2 Prototipo experimental de la configuración propuesta	66
5.2.1 Implementación del convertidor boost	66
5.2.2 Implementación del controlador MPPT	67
5.3 Resultados de la configuración propuesta en lazo abierto	71
5.4 Resultados de la configuración propuesta en lazo cerrado	73
5.4.1 Resultados en lazo cerrado con perturbación en R_L	73
5.4.2 Resultados en lazo cerrado con perturbación en R_s	77
5.5 Conclusiones	79
6 Conclusiones Generales y Trabajos Futuros	80
6.1 Conclusiones Generales	81
6.2 Contribuciones	82
6.3 Recomendaciones para trabajos futuros	82
6.4 Actividades realizadas en la Maestría en Ingeniería Eléctrica	83
6.5 Publicaciones	84
Bibliografía	85

Índice de Tablas

Tabla 2.1	Parámetros del modelo del panel PV.	9
Tabla 2.2	Clasificación de Algoritmos MPPT.	15
Tabla 2.3	Posibles combinaciones para el algoritmo P&O.	17
Tabla 2.4	Parámetros de algunos convertidores de potencia.	22
Tabla 3.1	Parámetros del panel PV utilizado en simulación.	26
Tabla 3.2	Parámetros del circuito carga electrónica.	28
Tabla 3.3	Parámetros del circuito de control.	29
Tabla 3.4	Parámetros del convertidor boost.	33
Tabla 3.5	Parámetros del circuito acondicionador de señal.	35
Tabla 3.6	Parámetros del filtro pasa bajas.	37
Tabla 3.7	Parámetros del algoritmo P&O.	40
Tabla 4.1	Parámetros de operación en lazo abierto.	48
Tabla 4.2	Parámetros de operación en lazo cerrado con perturbación en R_L	51
Tabla 4.3	Parámetros de operación en lazo cerrado con perturbación en R_S	53
Tabla 4.4	Parámetros de entrada del panel PV.	55
Tabla 4.5	Parámetros del convertidor boost de alta ganancia.	57
Tabla 5.1	Especificaciones técnicas del panel PV PROSE-5012.	64
Tabla 5.2	Potencia medida para diferentes valores de irradiancia.	66

Índice de Figuras

Figura 2.1	Modelo eléctrico de una celda PV.	7
Figura 2.2	Curva característica de un panel PV.	10
Figura 2.3	Efecto de la irradiancia en un panel PV.	10
Figura 2.4	Efecto de la temperatura en un panel PV.	11
Figura 2.5	Circuito equivalente Thévenin.	12
Figura 2.6	Potencia extraída en función de R_L	13
Figura 2.7	Diagrama de bloques del algoritmo P&O.	17
Figura 2.8	Funcionamiento de Algoritmo P&O.	18
Figura 2.9	Parámetros del Algoritmo P&O.	19
Figura 2.10	Elementos de un sistema PV con MPPT.	20
Figura 2.11	Convertidores de potencia: (a) boost, (b) buck, (c) buck boost y (d) boost con multiplicador.	21
Figura 2.12	Impedancia de entrada de convertidores básicos.	23
Figura 3.1	Diagrama de bloques del sistema PV con MPPT.	25
Figura 3.2	Diagrama de bloques del sistema para la obtención de la curva característica del panel PV.	27
Figura 3.3	Diagrama esquemático de la carga electrónica.	28
Figura 3.4	Diagrama esquemático del circuito de control.	29
Figura 3.5	Convertidor de potencia interconectado a un panel PV.	30
Figura 3.6	Variación de la resistencia óptima ante cambios en la irradiancia.	32
Figura 3.7	Diagrama de bloques del controlador MPPT.	34
Figura 3.8	Diagrama esquemático del circuito acondicionador de señal.	36

Figura 3.9 Diagrama esquemático del filtro pasa bajas.	36
Figura 3.10 Diagrama de bloques del algoritmo MPPT implementado.	38
Figura 3.11 Gráfica de la señal PWM.	40
Figura 3.12 Configuración propuesta.	41
Figura 3.13 Configuración propuesta con el convertidor boost.	41
Figura 3.14 Potencia extraída de la fuente de voltaje.	42
Figura 3.15 Impedancia Z_{in} del convertidor boost.	43
Figura 4.1 Configuración propuesta en Simulink (lazo cerrado).	47
Figura 4.2 Sistema PV con MPPT en Simulink.	47
Figura 4.3 Esquema con perturbación en R_L	48
Figura 4.4 Potencia medida en lazo abierto con perturbación en R_L	49
Figura 4.5 Máxima potencia para distintos valores de irradiancia	50
Figura 4.6 Potencia medida en lazo cerrado con perturbación en R_L	51
Figura 4.7 Ciclo de trabajo resultante al aplicar una perturbación en R_L	52
Figura 4.8 Esquema con perturbación en R_s	52
Figura 4.9 Potencia obtenida al aplicar una perturbación en R_s	54
Figura 4.10 Ciclo de trabajo D obtenido por el algoritmo P&O ante una perturbación en R_s	54
Figura 4.11 Potencia extraída del sistema PV al utilizar el convertidor boost conven- cional.	55
Figura 4.12 Ciclo de trabajo correspondiente a la máxima potencia del panel PV. . .	56
Figura 4.13 Diagrama esquemático del convertidor boost con alta ganancia.	57
Figura 4.14 Potencia extraída del sistema PV al utilizar el convertidor boost con alta ganancia.	57
Figura 4.15 Ciclo de trabajo correspondiente a la máxima potencia del panel PV. . .	58
Figura 4.16 Comparación entre el ciclo de trabajo obtenido por el algoritmo P&O con diferentes convertidores.	58
Figura 4.17 Comparación entre la potencia extraída con diferentes convertidores. . .	59

Figura 4.18 Comparación entre la curva de potencia-voltaje con diferentes convertidores.	60
Figura 5.1 Panel PV PROSE-5012 expuesto a condiciones exteriores.	63
Figura 5.2 Configuración experimental para la caracterización del panel PV.	64
Figura 5.3 Instrumentación empleada para la caracterización del panel PV.	64
Figura 5.4 Curvas de voltaje-potencia del panel PV.	65
Figura 5.5 Curvas de voltaje-corriente del panel PV.	65
Figura 5.6 Convertidor boost implementado en PCB.	67
Figura 5.7 Módulo de medición de corriente.	68
Figura 5.8 Módulo de medición de voltaje.	69
Figura 5.9 Implementación del filtro pasa bajas.	70
Figura 5.10 Configuración del ADC del microcontrolador ATmega328P.	70
Figura 5.11 Señal $q(t)$ con $D = 42\%$	72
Figura 5.12 Potencia extraída de la configuración propuesta en lazo abierto.	72
Figura 5.13 Configuración experimental del sistema MPPT.	73
Figura 5.14 Mediciones realizadas con el osciloscopio digital Tektronix TPS2024.	73
Figura 5.15 Potencia medida al aplicar una perturbación en R_L	74
Figura 5.16 Ciclo de trabajo medido al aplicar una perturbación en R_L	75
Figura 5.17 Ciclo de trabajo obtenido por el algoritmo P&O con diferentes tamaños de ΔD : $\Delta D_1 = 2\%$, $\Delta D_2 = 1.5\%$ y $\Delta D_3 = 0.8\%$ (de abajo hacia arriba).	76
Figura 5.18 Potencia obtenida con diferentes tamaños de ΔD : $\Delta D_1 = 2\%$, $\Delta D_2 = 1.5\%$ y $\Delta D_3 = 0.8\%$ (de abajo hacia arriba).	76
Figura 5.19 Potencia medida al aplicar una perturbación en R_s	77
Figura 5.20 Ciclo de trabajo medido al aplicar una perturbación en R_s	78

Capítulo

1

Introducción

Es indudable la necesidad de aprovechar al máximo los recursos energéticos que se encuentran disponibles en el planeta. Por lo anterior, es imperativo el desarrollo de nuevas tecnologías que contribuyan a la creación de soluciones sustentables. Una de las energías renovables que más abunda es la solar, la cual es captada por paneles encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica. Del total de energía solar que incide sobre un panel solo un cierto porcentaje es convertido en energía eléctrica, por lo que en este trabajo se aborda una propuesta que permite aumentar la eficiencia en los paneles solares.

El presente capítulo contiene una introducción sintética que provee un panorama de la problemática que se aborda en este trabajo, la cual está relacionada con la utilización de la energía recolectada en sistemas de generación fotovoltaica. Se exponen los fundamentos que sustentan el motivo de la investigación. Se plantean los objetivos específicos que serán buscados basados en las hipótesis propuestas. Además se especifican los alcances y limitaciones del estudio.

1.1. ANTECEDENTES

Los paneles fotovoltaicos (PV, del inglés photovoltaic) tienen un único punto de operación en el cual se le entrega la máxima potencia de salida a una carga conectada. Dicho punto conocido como punto de máxima potencia MPP (Maximum Power Point) depende tanto de las condiciones eléctricas de carga como de factores climáticos entre los cuales se encuentran la irradiancia solar y la temperatura. Los cambios en las condiciones climáticas son impredecibles, por ello es necesario un algoritmo de seguimiento continuo del MPP [1].

Existen numerosos métodos MPPT (Maximum Power Point Tracking) cuyo objetivo principal es mejorar la eficiencia energética de los sistemas PV. Entre las características que distinguen a estos algoritmos se encuentran: el tipo de implementación (analógica y/o digital), la simplicidad de su diseño, el número de sensores requeridos para su ejecución, la velocidad de convergencia, el rango de efectividad, así como el costo de su implementación. Por lo tanto, es muy importante la elección adecuada de un algoritmo que tiene por consecuencia un efecto notorio en la eficiencia energética del sistema PV. Una de las ventajas de la utilización de sistemas MPPT es la disminución de los costos debido a la reducción del número de paneles solares necesarios para obtener la potencia deseada.

Por otro lado, el MPP puede alcanzarse realizando variaciones en la carga para que se modifique el punto de operación, esto se lleva a cabo mediante un convertidor estático de potencia que desempeñe dicha función [2].

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los factores ambientales que determinan el punto óptimo de operación de un arreglo PV son condiciones que pueden variar de forma arbitraria por lo que representan un problema que afecta directamente el rendimiento del sistema. Además, las variaciones en la carga conectada al panel

PV causan una desviación del MPP lo cual se convierte en un inconveniente al desaprovechar parte del total de la potencia disponible. Por lo anterior, es necesario implementar un método que establezca automáticamente el seguimiento del MPP, éste implica que el arreglo PV opere siempre en la máxima relación de voltaje/corriente de salida.

Por tal motivo, se pretende implementar un algoritmo MPPT de bajo costo computacional que sea flexible y robusto ante perturbaciones en el sistema.

Por otro lado, los sistemas PV usualmente se componen por un arreglo en serie y/o paralelo de paneles solares de acuerdo a la aplicación. Con el objetivo de alcanzar mayores niveles de voltaje el número de módulos se incrementa y a su vez el costo del sistema tiende a elevarse. De lo anterior, para este tipo de configuraciones los convertidores de potencia ideales para aplicarse en estos algoritmos son aquellos que presentan una corriente de entrada continua y una alta ganancia.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Se requiere implementar un algoritmo que sea eficiente como el P&O (del inglés, Perturb and Observe) el cual es muy sencillo y provee alta flexibilidad mediante su implementación digital. Otros algoritmos que poseen mejor desempeño en cuanto a velocidad de convergencia emplean lógica difusa y redes neuronales pero tienen un mayor costo computacional lo cual se convierte en un inconveniente. El algoritmo implementado en forma digital presenta mayores ventajas con respecto a la versión analógica en aspectos como la flexibilidad de programación y el almacenamiento de información en la memoria.

Por lo general, se requiere obtener un valor de voltaje fijo que no puede proveer un único panel, por lo que se conectan varios dispositivos en cascada, debido a las condiciones ambientales y otros factores propios de la construcción del panel, el voltaje generado individualmente no es

uniforme, por consiguiente se pretende que el convertidor de potencia sea versátil de modo que permita aumentar los niveles de voltaje según se necesite.

Los convertidores de potencia convencionales presentan un rizo de corriente en la entrada relativamente alto. Sin embargo, es posible reducirlo de forma considerable teniendo como resultado un mejor desempeño del algoritmo MPPT [3].

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Diseñar, optimizar e implementar un algoritmo que localice el MPP de un sistema PV, auxiliado por un convertidor de potencia con característica de alta ganancia.

1.4.2. Objetivos específicos

- Implementar un algoritmo eficiente que localice el MPP de un sistema PV fijo.
- Implementar en un sistema digital el algoritmo diseñado.
- Crear un sistema de adquisición de datos para medir el voltaje y corriente de salida.
- Obtener la curva característica del sistema PV de forma experimental.
- Construir un convertidor basado en electrónica de potencia que permita seguir el MPP.
- Simulación del sistema integrado para verificación del algoritmo propuesto.
- Integrar el convertidor de potencia con el algoritmo MPPT.

1.5. HIPÓTESIS

El algoritmo diseñado permitirá obtener el MPP de un sistema PV genérico, sin necesidad de conocer el modelo exacto, obteniendo resultados experimentales con un sistema de adquisición de datos que medirá continuamente los valores de voltaje y corriente.

Se graficará la curva característica del sistema PV después de implementar el algoritmo y será posible garantizar la operación de dicho sistema en el MPP.

El uso del convertidor con alta ganancia permitirá que el algoritmo funcione adecuadamente debido a que posee una corriente de entrada continua.

1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.6.1. Alcances

- Diseño de un algoritmo capaz de obtener el MPP de un sistema PV fijo.
- Implementación del algoritmo con seguidor del MPP en plataforma digital.
- Diseño y construcción de un convertidor de potencia con características especiales.
- Simulación del algoritmo operando el convertidor de potencia.
- Validación experimental del comportamiento del algoritmo.
- Sistema de adquisición de datos instrumentado.

1.6.2. Limitaciones

- Utilización de un modelo genérico de un panel solar para simulación.
- El análisis será únicamente bajo condiciones de irradiancia uniforme (no se considera el efecto de sombreado parcial).
 - El convertidor será de baja potencia de 50 W.
 - El voltaje nominal del sistema fotovoltaico es de 17.5 V y 2.86 A bajo irradiancia nominal de 1,000 W/m².

Capítulo

2

Marco Teórico

Este capítulo comprende la fundamentación teórica utilizada para el desarrollo del presente trabajo. Por consiguiente, se describen a detalle los sistemas PV enfatizando su modelo y curva característica para posteriormente proporcionar un análisis de cómo se logra operar en el MPP, seguido de una revisión de los algoritmos MPPT comúnmente empleados en aplicaciones PV. Posteriormente, se describe a detalle el funcionamiento del algoritmo P&O, el cual es utilizado en este trabajo y finalmente se muestran las principales características de algunos de los convertidores de potencia típicos.

2.1. SISTEMAS DE GENERACIÓN PV

La necesidad de utilizar fuentes de energía alternas ha ido en aumento a lo largo de los últimos años, una de las energías renovables más predominantes es la solar, la cual es captada por paneles PV cuya función es transformar el tipo de energía incidente en energía eléctrica útil para el consumidor final [4].

A continuación se describe de manera general el funcionamiento de un panel PV así como el modelo matemático utilizado para el desarrollo de este trabajo.

2.1.1. Modelo matemático de un panel PV

Los paneles PV están constituidos por un arreglo de celdas solares fabricadas con un material semiconductor, comúnmente silicio. También, existen celdas construidas de otros materiales como el arseniuro de galio, fósforo de galio-indio, telururo de cadmio y grafeno por mencionar algunos. Sin embargo, el silicio es el elemento más preferido por sus características de absorción y por ser de costo accesible [5]. Cuando la energía solar incide sobre una celda, se genera una corriente proporcional a la irradiancia debido al efecto fotovoltaico. La irradiancia solar (G) es la potencia de radiación solar por unidad de área incidente en una superficie [6]. Sus unidades en el S.I. son W/m^2 .

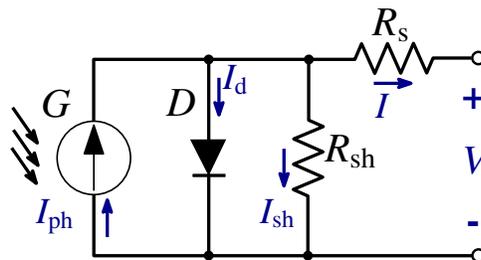


Figura 2.1: Modelo eléctrico de una celda PV.

Para analizar el comportamiento de una celda PV en un circuito es conveniente emplear un modelo equivalente. La corriente fotogenerada I_{ph} puede ser modelada con un generador de corriente mientras que la corriente de oscuridad (o corriente del diodo) I_d puede ser representada con un diodo como se muestra en la Figura 2.1. La resistencia en serie R_s incluida en el modelo representa la resistencia equivalente debido a los contactos metálicos con el semiconductor, a las capas semiconductoras y a la malla de metalización resultantes de la fabricación de la estructura de una celda PV. La resistencia en derivación o paralelo R_{sh} representa las fugas de corriente en los bordes de la celda, los posibles cortos circuitos metálicos y la recombinación favorecida en las fronteras de grano del cristal. En general, la resistencia en paralelo toma valores suficientemente altos como para que su influencia en el funcionamiento global sea baja, y de ahí que frecuentemente se desprece su contribución [6].

El modelo de una celda PV posee características no lineales. La corriente generada depende de distintos parámetros [7] como se puede observar en (2.1)-(2.5). En la Tabla 2.1 se especifican los parámetros empleados en el modelo de la celda solar así como sus unidades.

$$I = I_{ph}N_p - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

$$I_{ph} = G_k[I_{sc} + k_1(T_{op} - T_{ref})] \quad (2.2)$$

$$I_d = \left[e^{\frac{(V + IR_s)}{(nV_tCN_s)}} - 1 \right] I_s N_p \quad (2.3)$$

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (2.4)$$

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 e^{\left[\frac{qEg}{nk} \left(\frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]} \quad (2.5)$$

Tabla 2.1: Parámetros del modelo del panel PV.

	Parámetro	Unidad
I	Corriente de salida del panel PV	A
I_{ph}	Corriente fotogenerada	A
N_s	Número de paneles en serie	-
N_p	Número de paneles en paralelo	-
G_k	Coefficiente de irradiancia solar $\frac{G}{G_{ref}}$	-
I_{sc}	Corriente de corto circuito	A
k_1	Coefficiente de temperatura de la corriente de corto circuito	-
T_{op}	Temperatura de operación de la celda	°C
T_{ref}	Temperatura de la celda a 25°C	°C
V	Voltaje de salida del panel PV	V
R_s	Resistencia en serie	Ω
R_{sh}	Resistencia en derivación o paralelo	Ω
G	Irradiancia incidente sobre el panel	$\frac{W}{m^2}$
n	Factor de idealidad del diodo	-

2.1.2. Curva característica de un panel PV

En la Figura 2.2 se observa la curva característica de un panel PV que tiene un comportamiento no lineal bajo condiciones de temperatura e irradiancia constantes. La curva característica de un panel PV se obtiene al conectar una resistencia de carga variable en las terminales del panel, obteniendo un par de valores de voltaje y corriente asociados al valor de la carga. Existe un único punto de operación llamado MPP en el cual la potencia generada es máxima. El MPP a su vez corresponde al producto de un voltaje V_{MPP} y una corriente I_{MPP} . La potencia entregada por la celda en este punto será la considerada como potencia nominal P_{max} . Las unidades de esta potencia son watts pico (Wp) [6].

La potencia generada por el panel PV está dada por (2.6)

$$P_{pv} = V_{pv}I_{pv} \quad (2.6)$$

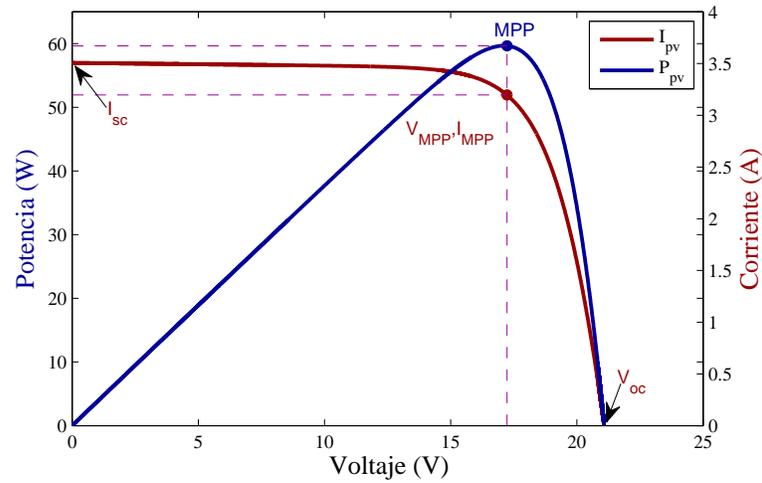


Figura 2.2: Curva característica de un panel PV.

2.1.3. Efectos de la irradiancia y la temperatura

El voltaje y la corriente generados en una celda dependen directamente de la iluminación recibida. El cambio de la corriente de corto circuito I_{sc} de la célula es directamente proporcional al incremento de la irradiancia como se muestra en la Figura 2.3. Además, se puede ver que el voltaje de circuito abierto V_{oc} tiene una variación poco significativa con respecto al cambio de la irradiancia.

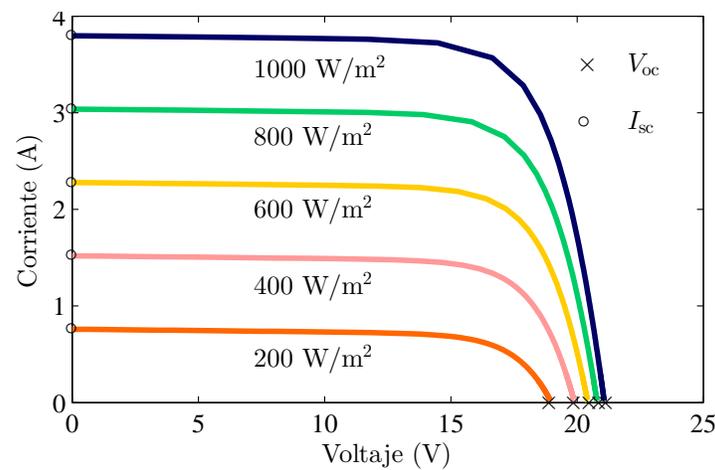


Figura 2.3: Efecto de la irradiancia en un panel PV.

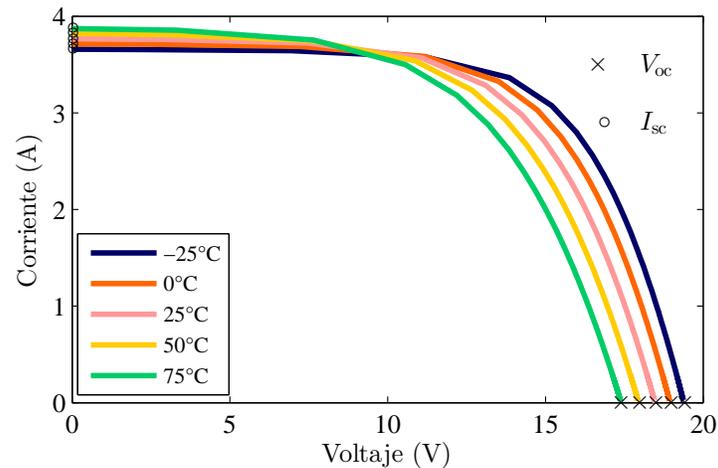


Figura 2.4: Efecto de la temperatura en un panel PV.

Por otro lado, la temperatura afecta de manera considerable el voltaje V_{oc} , tal y como muestra la Figura 2.4.

2.2. EXTRACCIÓN DE MÁXIMA POTENCIA

Uno de los principales inconvenientes de la utilización de paneles solares como fuentes de generación de energía es su baja eficiencia, aproximadamente del 20% [8], por lo que es necesario implementar dispositivos y métodos que mitiguen dicha desventaja. Una de las alternativas que permite aumentar el aprovechamiento de la potencia generada por el sistema PV es la utilización de convertidores de potencia que modifiquen el punto de operación del panel PV de tal manera que se mantenga en la máxima relación de voltaje/corriente de salida.

2.2.1. Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia

El Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia establece que la potencia máxima entregada por una fuente representada por su circuito equivalente de Thévenin se alcanza cuando

la carga es igual a dicha resistencia de Thévenin como se indica en (2.7) [9], ver Figura 2.5.

$$R_L = R_{Th} \quad (2.7)$$

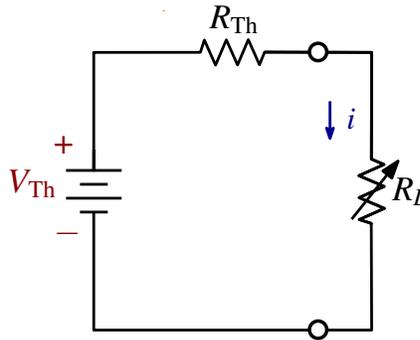


Figura 2.5: Circuito equivalente Thévenin.

La potencia suministrada a la carga del circuito representado en la Figura 2.5 se obtiene mediante (2.8).

$$p = i^2 R_L = \left(\frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L} \right)^2 R_L \quad (2.8)$$

La máxima potencia transferida se obtiene sustituyendo (2.7) en (2.8), de lo que resulta (2.9). Al variar la resistencia de carga R_L , la potencia suministrada a la carga varía como se indica gráficamente en la Figura 2.6 [10].

$$p_{\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{Th}} \quad (2.9)$$

Utilizando este principio es posible controlar el punto de operación de la curva de potencia-voltaje de la Figura 2.2 de un panel PV. Mediante el control del ciclo de trabajo D de un convertidor de potencia se puede modificar el valor de su impedancia equivalente Z_{in} , el cual para garantizar la máxima transferencia de potencia deberá ser igual al valor correspondiente de impedancia en el MPP obtenido con (2.10).

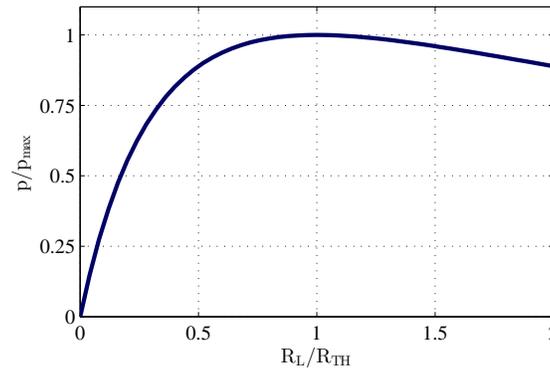


Figura 2.6: Potencia extraída en función de R_L .

$$Z_{MPP} = \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (2.10)$$

2.2.2. Algoritmos MPPT

Un objetivo esencial para lograr una mayor eficiencia de cualquier aplicación PV es lograr el seguimiento del MPP. Debido a que la posición del MPP como función de la irradiancia y la temperatura cambia con el tiempo es necesario seguirlo continuamente, para este propósito son utilizados algoritmos de control MPPT [11].

En la literatura una gran cantidad de algoritmos MPPT han sido presentados [2], [12], [13]. Los diferentes algoritmos MPPT que han sido estudiados difieren por las siguientes características: complejidad de implementación, número y tipo de sensores requeridos para diversas variables (voltaje, corriente, irradiancia y temperatura), velocidad de convergencia, tipo de implementación (analógica y/o digital), costo, dependencia del modelo del panel PV y eficiencia bajo condiciones atmosféricas uniformes o variables. Es importante señalar que las condiciones de operación uniformes raramente se presentan en aplicaciones prácticas [11].

Además, uno de los problemas presentados en instalaciones de sistemas de generación PV formadas por arreglos de paneles solares es el efecto de sombreado parcial. Cuando una celda

o un conjunto de ellas es afectada por algún cuerpo que bloquea de manera parcial o total la irradiancia incidente se reduce de una manera considerable la eficiencia del arreglo PV. Este efecto altera el comportamiento de los sistemas MPPT, para ello se han propuesto algunas consideraciones en la estructura de los arreglos PV y la selección de los convertidores de potencia como se expone en [14]. Sin embargo, los objetivos de este estudio se centran en el diseño del algoritmo MPPT y del convertidor de potencia por lo que el efecto de sombreado parcial no está contemplado dentro de esta investigación.

De acuerdo a la manera en la que son obtenidos los parámetros utilizados para la ejecución de los algoritmos MPPT, éstos pueden ser clasificados en dos categorías generales a saber [5]:

1. Control Indirecto: este control se basa en un conjunto de datos que contienen los principales parámetros del panel PV. La cantidad de datos utilizados es variable y puede incluir valores nominales proporcionados por el fabricante o mediciones obtenidas experimentalmente. La ventaja principal de este tipo de técnicas es su simplicidad, sin embargo el MPP resultante es un estimado que no toma en cuenta los cambios en el funcionamiento del panel debido al envejecimiento o a la suciedad.
2. Control Directo: el tipo técnicas dentro de esta clasificación emplea las mediciones de parámetros del sistema PV como voltaje, corriente, irradiancia y temperatura. Con base en las variables medidas el algoritmo proporciona una salida que controla la posición del punto de operación permitiendo ubicarlo en el MPP de la curva PV.

La cantidad de algoritmos MPPT que existe actualmente es muy extensa, de acuerdo a su diseño estos algoritmos pueden ser divididos en cuatro principales grupos [11]:

1. Ascenso de colina (hill climbing).
2. Ajuste de curva (curve fitting).
3. Algoritmos dinámicos (dynamical algorithms).
4. Otras técnicas.

El primer grupo pertenece a la familia de algoritmos iterativos de búsqueda local, uno de los algoritmos mayormente utilizados dentro de esta clasificación es el llamado P&O (Perturb and Observe), es robusto y fácil de implementar de forma analógica o digital, una desventaja de estos algoritmos es la disminución de su eficiencia bajo condiciones atmosféricas variables.

Tabla 2.2: Clasificación de Algoritmos MPPT.

Algoritmo	Complejidad de Implementación	Implementación Analógica o Digital	Velocidad de Convergencia	Sensores
FOCV	Baja	Ambas	Media	V
FSCC	Baja	Ambas	Media	I
P&O	Baja	Ambas	Baja	V,I
IC	Media	Digital	Baja	V,I
RCC	Media	Analógica	Alta	Varía (V,I,G,T)
FL	Alta	Digital	Alta	Varía (V,I,G,T)
NN	Alta	Digital	Alta	V,I

Los algoritmos de ajuste de curva están basados en relaciones aproximadas que proveen la posición del MPP como función de otras características del sistema más fáciles de medir o identificar. Ejemplos de ellos son el Voltaje Fraccional de Circuito Abierto o FOCV (Fractional Open Circuit Voltage) y Corriente Fraccional de Corto Circuito FSCC (Fractional Short Circuit Current). Estos algoritmos son muy sencillos de implementar, pertenecen a las técnicas de control indirecto y su diseño depende estrictamente del modelo del panel PV por lo que se consideran de baja eficiencia. Otros algoritmos más precisos son los basados en Lógica Difusa FL (Fuzzy Logic) y redes neuronales NN (Neural Networks), sin embargo poseen alto grado de complejidad en su implementación y un alto costo computacional.

Los algoritmos dinámicos utilizan el rizo generado por el convertidor CD-CD como una señal de perturbación interna con la finalidad de identificar la posición del punto de operación con respecto al MPP. Un ejemplo es el algoritmo de control de correlación de rizo o RCC (Ripple Correlation Control).

El último grupo se compone por todos los demás algoritmos que no corresponden a las clasificaciones anteriores. En la Tabla 2.2 se muestran algunos de los algoritmos MPPT más reportados en la literatura.

2.2.3. Algoritmo P&O

El algoritmo P&O es uno de los más conocidos debido a la sencillez de su diseño e implementación. Además, es comúnmente empleado en la comparación con otros algoritmos con la finalidad de evaluar su comportamiento.

El algoritmo P&O es utilizado en este trabajo haciendo hincapié en el diseño y la selección de sus parámetros así como la importancia del convertidor de potencia adecuado para su aplicación, por tal motivo en esta sección dicho algoritmo se abordará con mayor detalle.

El principio de funcionamiento del algoritmo P&O se basa en el siguiente criterio: si el voltaje de operación del arreglo PV se perturba en cierta dirección, y la potencia extraída del mismo se incrementa, significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por consiguiente el voltaje de operación deberá perturbarse en la misma dirección. De otra forma, si la potencia extraída del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP; como resultado el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se propuso originalmente. Una vez alcanzado el punto de máxima potencia el algoritmo P&O hará que el punto de operación del panel oscile en torno a él [1].

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de bloques del algoritmo P&O. El voltaje, la corriente y la potencia generados por el panel en el instante k están denotados por las variables V_k , I_k y P_k respectivamente, mientras que los valores de dichos parámetros en el instante anterior se representan con el subíndice $k-1$. El bloque Z^{-1} se encarga de guardar los valores en un instante dado para posteriormente utilizarlos en el cálculo de dP y dV . La variable D es el ciclo de trabajo del convertidor de potencia y ΔD es el tamaño de la perturbación en el ciclo de trabajo.

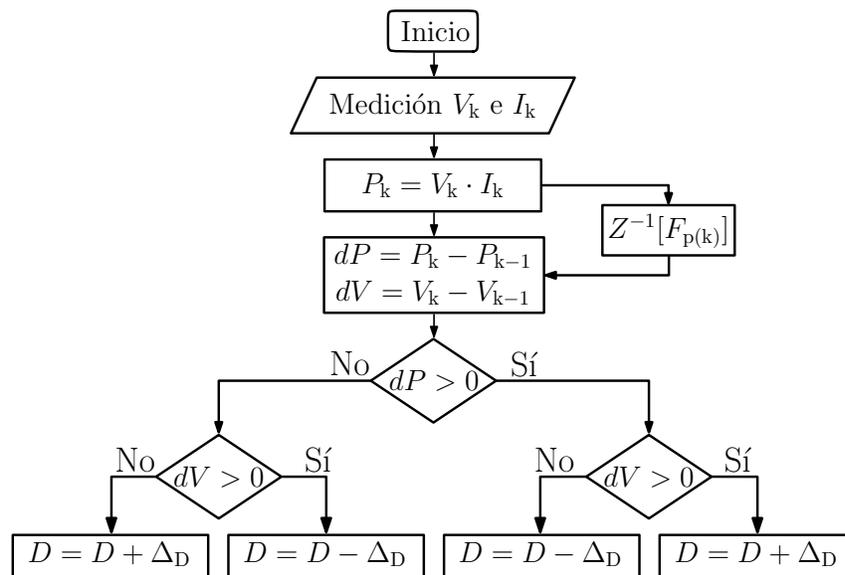


Figura 2.7: Diagrama de bloques del algoritmo P&O.

En la Tabla 2.3 se muestran las cuatro posibles combinaciones de los parámetros de entrada y salida del algoritmo P&O.

Tabla 2.3: Posibles combinaciones para el algoritmo P&O.

Variables de entrada		Variable de salida
dP	dV	Ciclo de Trabajo
> 0	> 0	$D + \Delta_D$
> 0	< 0	$D - \Delta_D$
< 0	> 0	$D - \Delta_D$
< 0	< 0	$D + \Delta_D$

Para ilustrar el funcionamiento del algoritmo P&O, en la Figura 2.8 se muestra la curva de voltaje–potencia de un panel PV. Se propone un punto inicial de operación denotado como A al cual le corresponde un valor de voltaje y corriente, después de un determinado tiempo el algoritmo realiza una perturbación al sistema de tal manera que los parámetros medidos generan un nuevo punto de potencia señalado con la letra B. Se puede distinguir que la magnitud de la potencia es menor que la inicial ($dP < 0$) y que a su vez el voltaje ha disminuido ($dV < 0$). El algoritmo detecta que debe hacer una perturbación en una dirección opuesta de tal manera que la potencia aumente. Después de un número determinado de perturbaciones en el mismo sentido, eventualmente y de manera ideal, el punto de operación llegará al MPP señalado con la letra C. La localización de este punto viene dada por (2.11) [11]. No obstante, debido a las características inherentes del algoritmo, el punto de operación continuará moviéndose alrededor del MPP generando oscilaciones en el sistema.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.11)$$

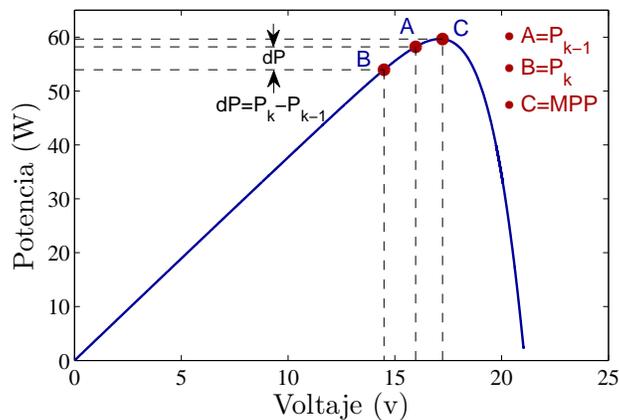


Figura 2.8: Funcionamiento de Algoritmo P&O.

La oscilación en estado estable depende en gran medida del tamaño de la perturbación ΔD y la frecuencia de la perturbación F_p . La disminución de esta oscilación puede llevarse a cabo mediante la reducción de ΔD , sin embargo el seguimiento del MPP se efectuaría en un tiempo mayor. Si se desea aumentar la velocidad de convergencia al MPP es necesario aumentar F_p . Es importante señalar que el periodo de perturbación $T_p = 1/F_p$ debe ser mayor que el tiempo de respuesta del convertidor de potencia necesario para que alcance el estado estable [12].

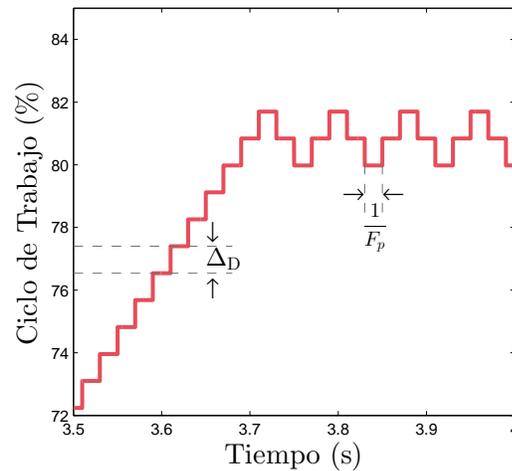


Figura 2.9: Parámetros del Algoritmo P&O.

En la Figura 2.9 se muestran los parámetros de diseño del algoritmo P&O referentes al ciclo de trabajo del convertidor de potencia. Es notorio que a mayor tamaño de la perturbación, tomará menos tiempo llegar al valor adecuado de ciclo de trabajo produciendo una oscilación más grande en la potencia extraída.

El algoritmo P&O posee múltiples ventajas. Principalmente la sencillez de implementación y el bajo costo computacional, es decir, el número de operaciones necesarias para ejecutarlo. Sin embargo, uno de los inconvenientes que presenta es la desviación del MPP ante alteraciones rápidas en la irradiancia [8]. Es posible que el algoritmo proponga una perturbación en un sentido equivocado debido a que detecte un nuevo punto de operación causado por un aumento en la irradiancia en lugar de ser debido a la perturbación realizada. Una selección no adecuada de los parámetros del algoritmo tiene como consecuencia una baja velocidad de seguimiento o un rizo excesivo lo cual se traduce en una desventaja considerable para el MPPT [15].

Se han presentado varias propuestas para disminuir las dificultades de seguimiento y reducir las oscilaciones. En [16] se efectúa una modificación al algoritmo P&O proponiendo utilizar tres puntos de perturbación para eliminar las imprecisiones existentes en el algoritmo tradicio-

nal. En [17] se realiza una mejora en el algoritmo P&O insertando una sintonización automática en los parámetros de control del algoritmo. Además, se implementa un sistema de control que permite detectar si los cambios en el punto de operación son debidos a la perturbación o a cambios en la irradiancia.

2.2.4. Convertidores de Potencia

Un convertidor de potencia CD-CD con ganancia G_v es un elemento esencial de un sistema MPPT debido a que permite que el punto de operación del panel PV se sitúe en la zona de extracción de máxima potencia. La Figura 2.10 muestra la configuración donde el convertidor trabaja como un circuito acoplador de impedancias entre el arreglo PV y la carga.

El convertidor de potencia presenta una impedancia de entrada equivalente que puede escribirse en función del ciclo de trabajo D y la resistencia de carga R_L . De acuerdo al Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia revisado en la Sección 2.2.1, se sabe que cuando las impedancias de la fuente y del convertidor sean iguales, se extraerá la máxima potencia. El ajuste del ciclo de trabajo del convertidor permite modificar la impedancia equivalente Z_{in} vista por el panel PV. El controlador MPPT es el encargado de modificar el ciclo de trabajo hasta alcanzar el valor óptimo.

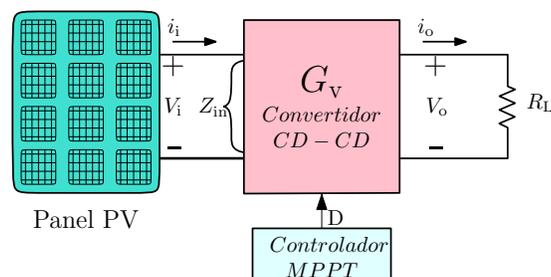


Figura 2.10: Elementos de un sistema PV con MPPT.

La resistencia en serie R_s representada en el modelo del panel PV tiene un efecto en la pendiente de la curva I-V. Para valores altos de R_s se reduce el valor de la potencia en el MPP. De manera similar, para valores bajos de la resistencia en paralelo R_{sh} la potencia disminuye, sin embargo en la práctica dicha resistencia posee un valor alto por lo que se omite su efecto como se revisó en la Sección 2.1.1.

La selección de un adecuado convertidor de potencia es de gran importancia y debe elegirse acorde a los requerimientos de la aplicación. Los convertidores básicos más utilizados en sistemas PV son el buck, boost y buck-boost los cuales se muestran en la Figura 2.11 y se abordarán a continuación.

Es bien sabido que el convertidor boost o convertidor elevador, Figura 2.11(a), proporciona un voltaje de salida mayor o igual al voltaje aplicado en la entrada. El convertidor buck o convertidor reductor, Figura 2.11(b), provee un voltaje de salida menor o igual al voltaje aplicado en la entrada. El convertidor buck-boost o elevador-reductor, Figura 2.11(c), reúne las características de los dos convertidores permitiendo obtener un voltaje de salida mayor o menor que el de entrada [18]. En [19] se presenta una variante del convertidor boost convencional, la adición de una etapa multiplicadora [Figura 2.11(d)] permite aumentar la ganancia del convertidor, entre otras ventajas.

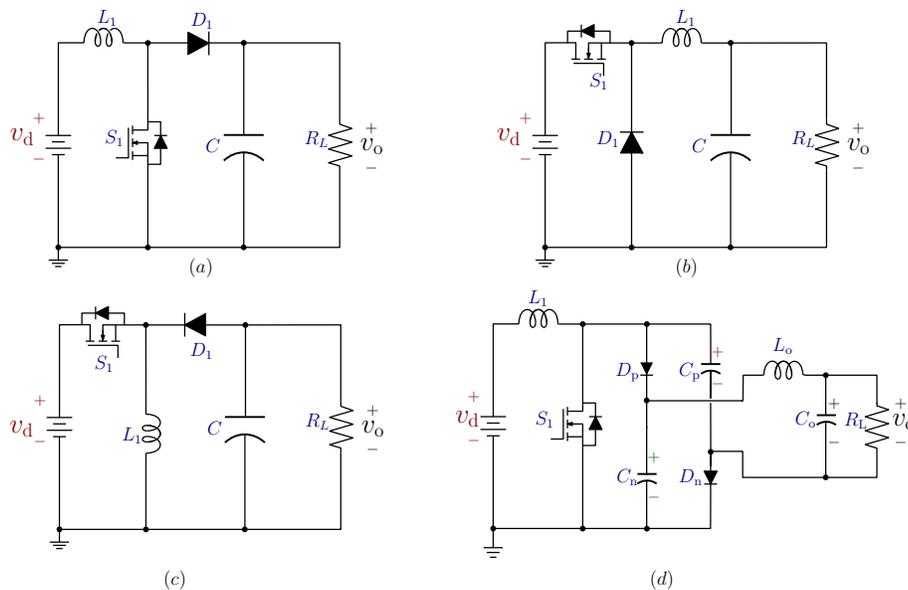


Figura 2.11: Convertidores de potencia: (a) boost, (b) buck, (c) buck boost y (d) boost con multiplicador.

Los principales parámetros de los convertidores presentados se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: *Parámetros de algunos convertidores de potencia.*

Parámetro			
Convertidor	$\frac{V_o}{V_i}$	$\frac{I_o}{I_i}$	Z_{in}
buck	D	$\frac{1}{D}$	$\frac{R_L}{D^2}$
boost	$\frac{1}{1-D}$	$1-D$	$(1-D)^2 R_L$
buck-boost	$\frac{-D}{1-D}$	$\frac{D-1}{D}$	$\frac{(1-D)^2}{D^2} R_L$
boost+multiplicador	$\frac{1+D}{1-D}$	$\frac{1-D}{1+D}$	$\frac{(1-D)^2}{(1+D)^2} R_L$

La impedancia de entrada del convertidor de potencia Z_{in} es un parámetro de diseño del sistema MPPT que permite situar el punto de operación en el MPP de la curva PV de la Figura 2.2. El criterio de selección del convertidor de potencia más adecuado depende directamente del modelo del sistema PV del que se desea maximizar la extracción de potencia. En la Figura 2.12 se presenta una gráfica comparativa de la impedancia de entrada equivalente de los convertidores de potencia básicos y del presentado en [19].

El convertidor de potencia seleccionado debe ser capaz de representar una impedancia equivalente que se aproxime a la impedancia presentada por el panel PV de tal manera que la potencia extraída se maximice. Como puede observarse en la Figura 2.12, la impedancia de entrada del convertidor boost puede tomar exclusivamente valores iguales o menores a la resistencia de carga. Por otra parte, el convertidor buck es incapaz de emular valores de impedancia menores a la resistencia de carga, mientras que el convertidor buck-boost presenta una mayor flexibilidad al permitir obtener un mayor rango de valores de impedancia equivalente incluyendo cantidades por encima o por debajo de la resistencia de carga [20].

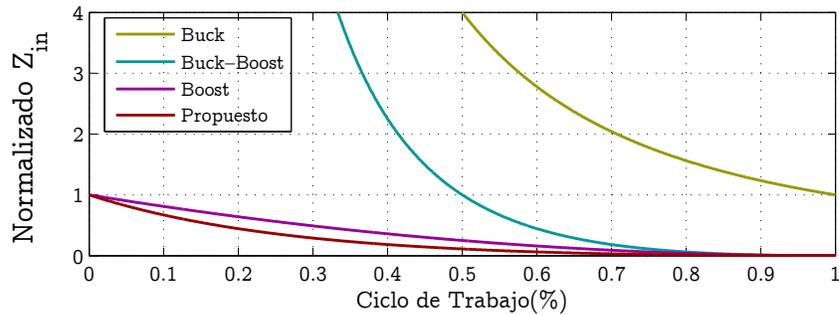


Figura 2.12: Impedancia de entrada de convertidores básicos.

2.3. CONCLUSIONES

La potencia generada por un panel PV es afectada por las condiciones ambientales y las condiciones de carga, por lo que es necesario implementar algoritmos MPPT que permitan extraer la máxima potencia disponible. Es posible operar en el MPP ajustando la impedancia vista por el panel PV mediante el uso de convertidores de potencia. De acuerdo al Teorema de la Máxima Transferencia de Potencia, el control del ciclo de trabajo del convertidor debe determinarse de tal forma que su impedancia equivalente sea igual al valor de la impedancia correspondiente al MPP de la curva de potencia-voltaje del panel PV.

El algoritmo P&O es ampliamente conocido y es implementado en este trabajo debido a las ventajas que presenta. La selección del convertidor de potencia adecuado se realiza tomando en cuenta las características del panel PV y los requerimientos de la aplicación.

Capítulo

3

Operación del Sistema PV con el controlador MPPT

El presente capítulo tiene como finalidad describir detalladamente el diseño y funcionamiento del sistema PV con el controlador MPPT. Se expone la metodología empleada para la obtención de la curva característica del panel PV. La estructura del controlador MPPT y cada una de las partes que lo conforman se indican de manera sistemática. Además, se presenta el dimensionamiento de los dispositivos utilizados para la simulación e implementación del convertidor de potencia. Para ilustrar la utilidad de la propuesta de este trabajo de investigación, en esta sección se presenta el comportamiento del sistema en lazo abierto.

3.1. GENERALIDADES DEL SISTEMA PV CON MPPT

El sistema PV con MPPT de la Figura 3.1 está compuesto por los siguientes elementos: una fuente de generación de energía (panel PV), un convertidor de potencia adicionado con una etapa de control y una carga R_L . El control MPPT se encarga de medir los parámetros del panel PV y procesarlos. Posteriormente, el bloque de control MPPT proporciona una variable de salida controlada $d(t)$ utilizada para la generación de la señal $q(t)$ por medio de una técnica PWM (Modulación por Ancho de Pulso).

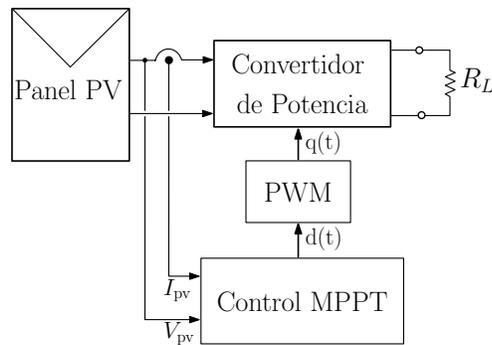


Figura 3.1: Diagrama de bloques del sistema PV con MPPT.

En las siguientes secciones se describen detalladamente las funciones que desempeñan los componentes del sistema PV con MPPT implementado en este trabajo. Se proporcionan las especificaciones técnicas de los dispositivos empleados y los criterios utilizados para el diseño del convertidor de potencia y del algoritmo MPPT.

3.2. PANEL PV

El primer elemento que compone el sistema PV con MPPT de la Figura 3.1 es el generador de energía eléctrica, en este trabajo y para fines de estudio se emplea un único panel PV. Sin embargo, en aplicaciones prácticas es común utilizar una combinación de paneles interconectados en serie y/o paralelo donde el número de dispositivos determina la potencia eléctrica generada.

Es importante señalar que es factible el uso de otros tipos de fuentes de energía tales que permitan maximizar la extracción de potencia. En [21] se presenta un método de control MPPT de bajo costo para maximizar la extracción de potencia de un aerogenerador, mientras que en [22] se propone un algoritmo MPPT con aplicación en celdas de combustible.

Tomando en consideración que el algoritmo implementado en este trabajo no requiere un modelo preciso del panel PV, el propuesto en [7] es conveniente para incorporar al sistema MPPT a nivel de simulación. En la Tabla 3.1 se muestran los parámetros del panel PV utilizado.

Tabla 3.1: *Parámetros del panel PV utilizado en simulación.*

Párametro	Valor
P_{\max}	60 W
V_{MPP}	17.1 V
I_{MPP}	3.5 A
I_{sc}	3.8 A
V_{oc}	21.1 V

3.2.1. Obtención de la curva característica del panel PV

Uno de los objetivos planteados en este trabajo es la obtención de la curva característica del panel PV. La finalidad de caracterizar el panel PV es conocer los principales parámetros eléctricos del dispositivo sin la necesidad de utilizar un modelo matemático exacto. Es importante mencionar que la información proporcionada por el fabricante contiene las especificaciones obtenidas al someter el dispositivo a condiciones estándar de medida STC (Standard Test Conditions) que corresponden a una irradiancia de $1,000 \text{ W/m}^2$, una temperatura del módulo de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y un factor de masa del aire de 1.5. Dichas especificaciones poco se asemejan a las condiciones de operación en exterior. Los parámetros obtenidos a través de la medición de voltaje y corriente en el entorno típico de operación son de utilidad para el diseño de algunos sistemas MPPT. La obtención de la curva característica del panel PV permite determinar el MPP y con base en ello verificar la funcionalidad del algoritmo MPPT.

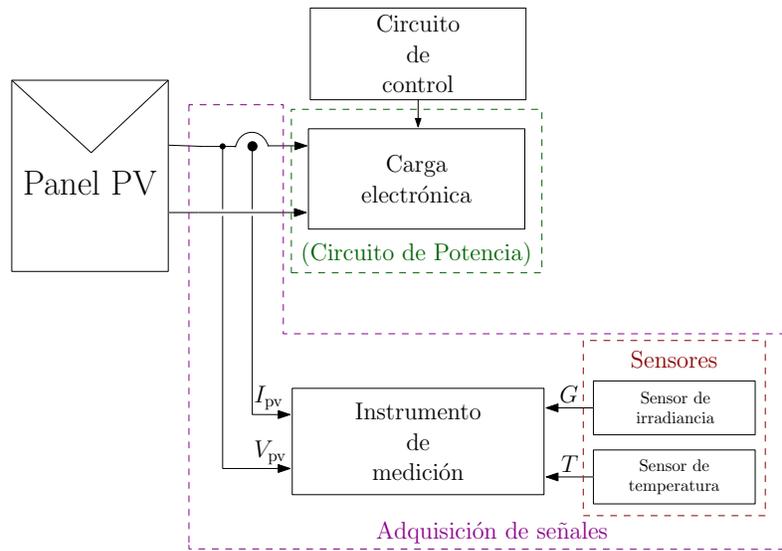


Figura 3.2: Diagrama de bloques del sistema para la obtención de la curva característica del panel PV.

El circuito propuesto para la obtención de la curva característica del panel PV está formado por los elementos presentados en la Figura 3.2. A continuación se describen cada de una de las etapas.

- El **circuito de control** proporciona los niveles de voltaje apropiados para suministrar la corriente de base del transistor de tal manera que se polarice adecuadamente permitiendo operar en la región activa comportándose como una carga lineal.
- El **circuito de potencia**, etapa principal del sistema propuesto, es capaz de emular una carga electrónica. Este bloque está compuesto por una conexión en serie de dos transistores bipolares operados en la zona activa.
- La **adquisición de señales** se realiza mediante el instrumento de medición el cual cuantifica las señales proporcionales de voltaje y corriente del panel PV.
- Los **sensores** proveen valores proporcionales de irradiancia y temperatura, el conocimiento de estas variables permite determinar la sensibilidad de respuesta del panel ante cambios de esta naturaleza.

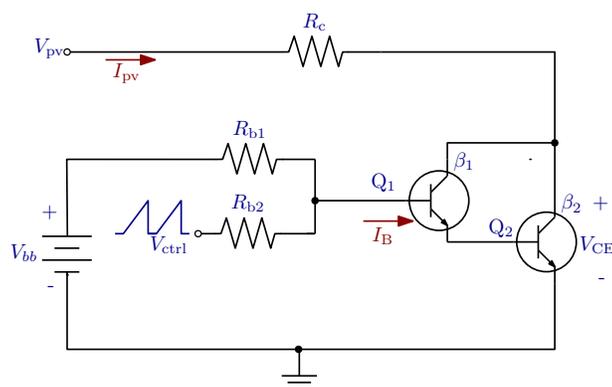


Figura 3.3: Diagrama esquemático de la carga electrónica.

El circuito electrónico propuesto emula una carga conectada al panel PV capaz de cubrir el rango de valores necesario para obtener la curva de potencia. Dicho circuito consiste en una serie de transistores operados en la zona lineal.

En la Figura 3.3 se observa el diagrama esquemático del circuito de potencia, compuesto por la conexión Darlington de dos transistores de tal forma que la ganancia total del arreglo es el producto de las ganancias de los elementos individualmente como se expresa en (3.1).

$$\beta_T = \beta_1 \beta_2 \quad (3.1)$$

Los valores de los componentes utilizados para la implementación del circuito se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Parámetros del circuito carga electrónica.

Parámetro	Valor
V_{bb}	12 V
R_{b1}	100 Ω
R_{b2}	10 k Ω
R_c	1.5 Ω
Q_1	TIP41
Q_2	2N3055

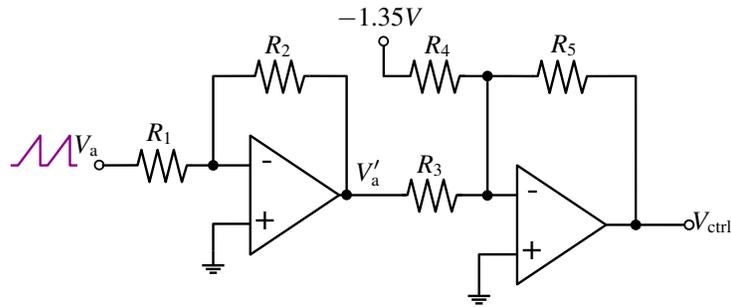


Figura 3.4: Diagrama esquemático del circuito de control.

El circuito de control cuyo diagrama esquemático se muestra en la Figura 3.4 permite ajustar el nivel de voltaje aplicado al circuito de potencia. La configuración propuesta consiste en un amplificador inversor con una ganancia de 0.2, donde el voltaje V_a' está dado por (3.2). Enseguida se implementa un sumador inversor con ganancia unitaria, el voltaje V_{ctrl} es calculado mediante (3.3). La señal diente de sierra V_a se establece a una frecuencia de 10 Hz y una amplitud de 5 V. El voltaje de salida V_{ctrl} delimita las regiones de operación del transistor.

$$V_a' = -\frac{R_2}{R_1} V_a \quad (3.2)$$

$$V_{ctrl} = -\frac{R_5}{R_3} (V_a' - 1.35) \quad (3.3)$$

En la Tabla 3.3 se proporcionan los valores de las resistencias utilizadas en el circuito de control.

Tabla 3.3: Parámetros del circuito de control.

Parámetro	Valor
R_1	1.5 k Ω
R_2	330 Ω
R_3	1 k Ω
R_4	1 k Ω
R_5	1 k Ω

3.3. CONVERTIDOR DE POTENCIA INTERCONECTADO A UN PANEL PV

El convertidor de potencia es el elemento que permite situar el punto de operación del panel PV en el MPP de la curva de potencia-voltaje. La Figura 3.5 muestra un convertidor de potencia que interconecta a un panel PV con una carga fija R_L . Además, se puede ver un circuito equivalente en el cual el convertidor de potencia es reemplazado por una resistencia variable, donde Z_{in} es la impedancia total vista por el panel PV, es decir, la suma de la resistencia de carga R_L más la resistencia equivalente del convertidor de potencia.

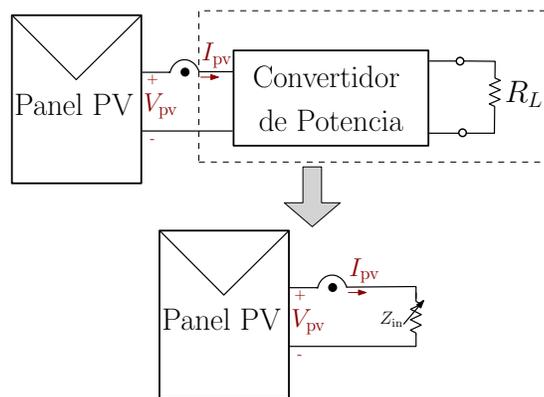


Figura 3.5: Convertidor de potencia interconectado a un panel PV.

La topología del convertidor CD-CD debe ser seleccionada de acuerdo a las siguientes consideraciones: los requerimientos del sistema PV y los niveles de voltaje del panel PV y/o del sistema de almacenamiento de energía. En el caso de que el voltaje generado por el sistema PV sea mayor al requerido, un convertidor buck sería la mejor opción. Mientras que de ser necesario un voltaje mayor, un convertidor boost sería el más conveniente. Para aplicaciones donde se requiere una ganancia variable que permita ajustar a un nivel menor o mayor que el voltaje de entrada, el convertidor buck-boost es el apropiado [23].

Para el desarrollo de este trabajo se seleccionó un convertidor boost debido a que se emplea un único panel PV con características de voltaje limitado para ciertas aplicaciones. Además, el convertidor boost exhibe una característica de corriente de entrada continua lo cual representa una ventaja para la medición de dicho parámetro en la etapa de implementación del algoritmo MPPT.

Como se estudió en la Sección 2.2.4 el valor de la impedancia Z_{in} puede ser modificado a conveniencia por medio del control del ciclo de trabajo D aplicado al convertidor de potencia. De acuerdo a la Tabla 2.4, para obtener el valor óptimo de dicho parámetro correspondiente al convertidor boost se utiliza (3.4).

$$Z_{in} = (1 - D)^2 R_L \quad (3.4)$$

Para un valor fijo de R_L los límites de Z_{in} se establecen de acuerdo al rango de operación del ciclo de trabajo D . La Figura 2.12 muestra que para los convertidores de tipo elevador la impedancia asociada al valor mínimo de D es igual a R_L . A medida que D se aproxima a la unidad, la impedancia equivalente tiende a cero. Por lo que es necesario establecer un rango de variación del ciclo de trabajo que sea conveniente para el funcionamiento del convertidor de potencia, típicamente se seleccionan valores intermedios. Asimismo, se debe elegir un valor de R_L adecuado que ofrezca flexibilidad de operación ante las variaciones paramétricas del panel PV.

La gráfica de la Figura 3.6 muestra la resistencia óptima del panel PV en el MPP para un rango amplio de valores de irradiancia incidente. Se observa que para valores de irradiancia muy bajos, la impedancia necesaria es considerablemente alta. De lo anterior se puede concluir que el convertidor de potencia presenta ciertas limitaciones para operar en el MPP, es decir la funcionalidad del sistema queda acotado por el modelo del panel PV y los cambios en las condiciones climáticas. No obstante, la mayoría de los sistemas se diseñan para no operar en condiciones de bajos niveles de irradiancia con el fin de no degradar la eficiencia total del sistema.

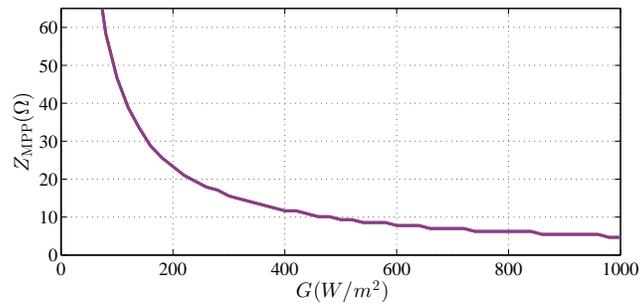


Figura 3.6: Variación de la resistencia óptima ante cambios en la irradiancia.

3.3.1. Diseño del convertidor boost

El diseño del convertidor de potencia es fundamental para la correcta operación del sistema MPPT. La determinación de los parámetros del convertidor es compleja debido a las características no lineales del panel PV, adicionalmente los factores ambientales interfieren en el diseño y operación del convertidor [24].

En la Figura 2.11(a) se muestra el diagrama esquemático del convertidor boost para el cual a continuación se describen los criterios de diseño.

Primeramente, el valor de la inductancia L es seleccionado de tal manera que el convertidor opere en el modo de conducción continua [25], es decir, que exista un flujo de corriente mayor a cero a través del inductor. Además, el tamaño de dicho componente está relacionado con la velocidad de respuesta transitoria del convertidor, la cual debe ser lo suficientemente rápida para que el algoritmo MPPT opere de manera adecuada.

El valor del capacitor de salida C es elegido lo suficientemente grande para mantener un voltaje de salida constante con un rizo reducido.

Para escoger la resistencia de carga R_L apropiada se contempla el comportamiento de la

resistencia óptima del panel Z_{MPP} ante variaciones en la irradiancia y se delimita un rango intermedio de operación del ciclo de trabajo D . Partiendo de (3.4), es posible calcular el valor del elemento mediante (3.5).

$$R_L = \frac{Z_{in}}{(1-D)^2} \quad (3.5)$$

Para fines de análisis, se propone un voltaje de entrada V_d similar al proporcionado por el panel PV. El resto de los componentes son seleccionados tomando en cuenta las características eléctricas máximas a las que serán sometidos y la velocidad de operación requerida.

En la Tabla 3.4 se muestra el valor de los componentes utilizados para la simulación e implementación del convertidor boost.

Tabla 3.4: *Parámetros del convertidor boost.*

Parámetro	Valor
V_d	17.5 V
L_1	680 μ H
C	100 μ F
R_L	15 Ω
D_1	1N4936G
S_1	FDD5353

3.4. CONTROLADOR MPPT

El controlador MPPT ilustrado en la Figura 3.7 está formado por los siguientes elementos:

- **Sistema de adquisición de datos:** Mide periódicamente el voltaje y la corriente de entrada utilizando sensores adecuados. Realiza el acondicionamiento de las señales proporcionadas por los elementos de medición para que sean útiles para su procesamiento llevado a

cabo por el sistema digital. Elimina la componente no deseada de las señales por medio de un filtro pasa bajas. Convierte las señales medidas de tipo analógico a señales digitales.

- **Algoritmo MPPT:** Utiliza los resultados proporcionados por el sistema de adquisición de datos para realizar los cálculos necesarios que determinen la señal de control óptima para el sistema. El algoritmo empleado en este trabajo es el P&O.
- **Generador PWM:** Este bloque genera la señal de control $q(t)$ del convertidor de potencia utilizando el valor dado por el algoritmo MPPT. La señal correspondiente $q(t)$ tiene niveles lógicos cuyo ciclo de trabajo D depende de la señal de control $d(t)$. Conceptualmente esta etapa no forma parte del controlador MPPT, sin embargo es incluido en este esquema debido a la estrecha relación entre ambas señales.

A continuación se describe a mayor detalle cada elemento del controlador MPPT.

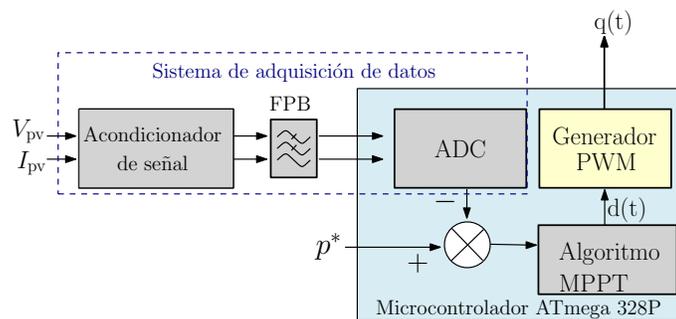


Figura 3.7: Diagrama de bloques del controlador MPPT.

3.4.1. Sistema de adquisición de datos

Las mediciones requeridas para la implementación del algoritmo P&O son el voltaje y la corriente suministrados por el panel PV que a su vez corresponden a los parámetros de entrada del convertidor de potencia de la Figura 3.5. Para ello es necesario utilizar la instrumentación adecuada que permita obtener una medición precisa y útil.

El sensor de corriente utilizado proporciona a su salida una señal de voltaje con un factor de ganancia dado por (3.6) donde el voltaje offset V_{off} tiene un valor de 40 mV y la variable I_{med} representa la señal de corriente medida:

$$V_{\text{oi}} = \frac{4}{3}I_{\text{med}} \pm V_{\text{off}} \quad (3.6)$$

Por otro lado, el sensor de voltaje empleado sigue la relación dada por (3.7) donde V_{med} representa la señal de voltaje medido.

$$V_{\text{ov}} = \frac{1}{4}V_{\text{med}} \quad (3.7)$$

Es necesario implementar un circuito acondicionador de señal a la salida del sensor de corriente que convierta la magnitud medida en un nivel de voltaje óptimo para su posterior procesamiento. Dicho circuito consiste en la utilización de un divisor de voltaje para acotar la amplitud de la señal y posteriormente mediante un amplificador operacional configurado como sumador no inversor con ganancia unitaria se efectúa el ajuste de cero. El circuito implementado se muestra en el diagrama de la Figura 3.8 y los componentes utilizados se presentan en la Tabla 3.5. El valor de la corriente medida I_{med} se obtiene con (3.8) donde V_{med}^* es el voltaje medido a la salida del circuito acondicionador de señal con un valor entre 0 y 5 V.

$$I_{\text{med}} = (V_{\text{med}}^* - 2.5)1.2 \quad (3.8)$$

Tabla 3.5: *Parámetros del circuito acondicionador de señal.*

Componente	Valor
R_1'	2.7 k Ω
R_2'	4.7 k Ω
R_3'	1.2 k Ω
R_4'	220 Ω
R_5'	22 k Ω

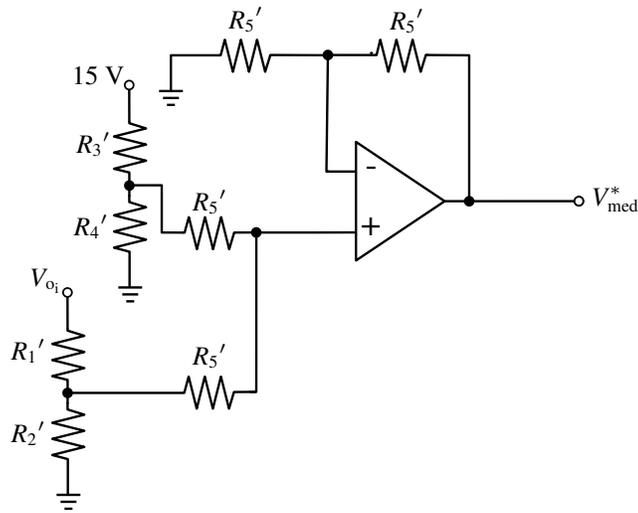


Figura 3.8: Diagrama esquemático del circuito acondicionador de señal.

Posteriormente, se realiza un filtrado de las señales con el objetivo de obtener una medición libre de fluctuaciones. Por consiguiente, se utilizará un filtro pasa bajas analógico para atenuar las componentes de alta frecuencia.

En la Figura 3.9 se presenta el circuito utilizado para la implementación del filtrado de la señal y en la Tabla 3.6 se especifican los valores de los componentes utilizados.

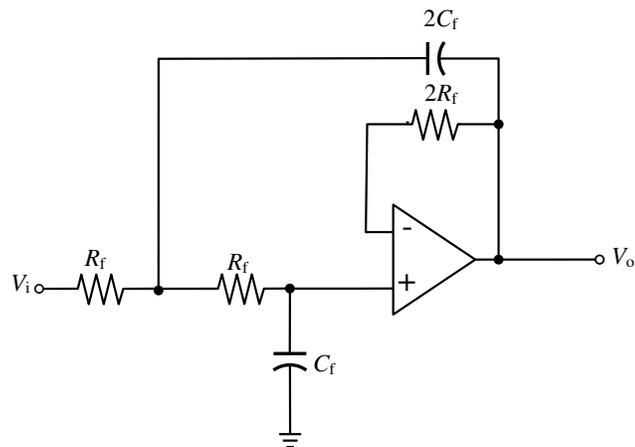


Figura 3.9: Diagrama esquemático del filtro pasa bajas.

Tabla 3.6: Parámetros del filtro pasa bajas.

Componente	Valor
R_f	10 k Ω
C_f	0.1 μ F

Finalmente, se lleva a cabo la conversión de las magnitudes medidas de tipo analógico a su equivalente en nivel digital. Para ello se emplea el ADC (Analog to Digital Converter) del microcontrolador ATmega328P. Debido a los requerimientos del procesamiento de datos para la ejecución del algoritmo MPPT, se utiliza la máxima resolución del ADC la cual es de 10 bits.

El resultado de la conversión se puede calcular con (3.9) donde V_{in} es el voltaje de entrada que se desea convertir y el voltaje de referencia V_{ref} tiene un valor de 5 V.

$$ADC = \frac{V_{in} \cdot 2^{10}}{V_{ref}} \quad (3.9)$$

3.4.2. Implementación del Algoritmo MPPT: P&O

El algoritmo MPPT presentado en uno de los bloques de la Figura 3.7, es el encargado de procesar las señales medidas y acondicionadas por el sistema de adquisición de datos para posteriormente generar una salida óptima empleada para la generación PWM. De tal manera que iguale la impedancia equivalente Z_{in} con la del panel PV Z_{MPP} resultando en la máxima extracción de potencia. El algoritmo P&O revisado en la Sección 2.2.3 es implementado utilizando un microcontrolador ATmega328P.

La Figura 3.10 muestra el proceso sistemático llevado a cabo por el algoritmo P&O. A continuación se describe la secuencia de ejecución del algoritmo.

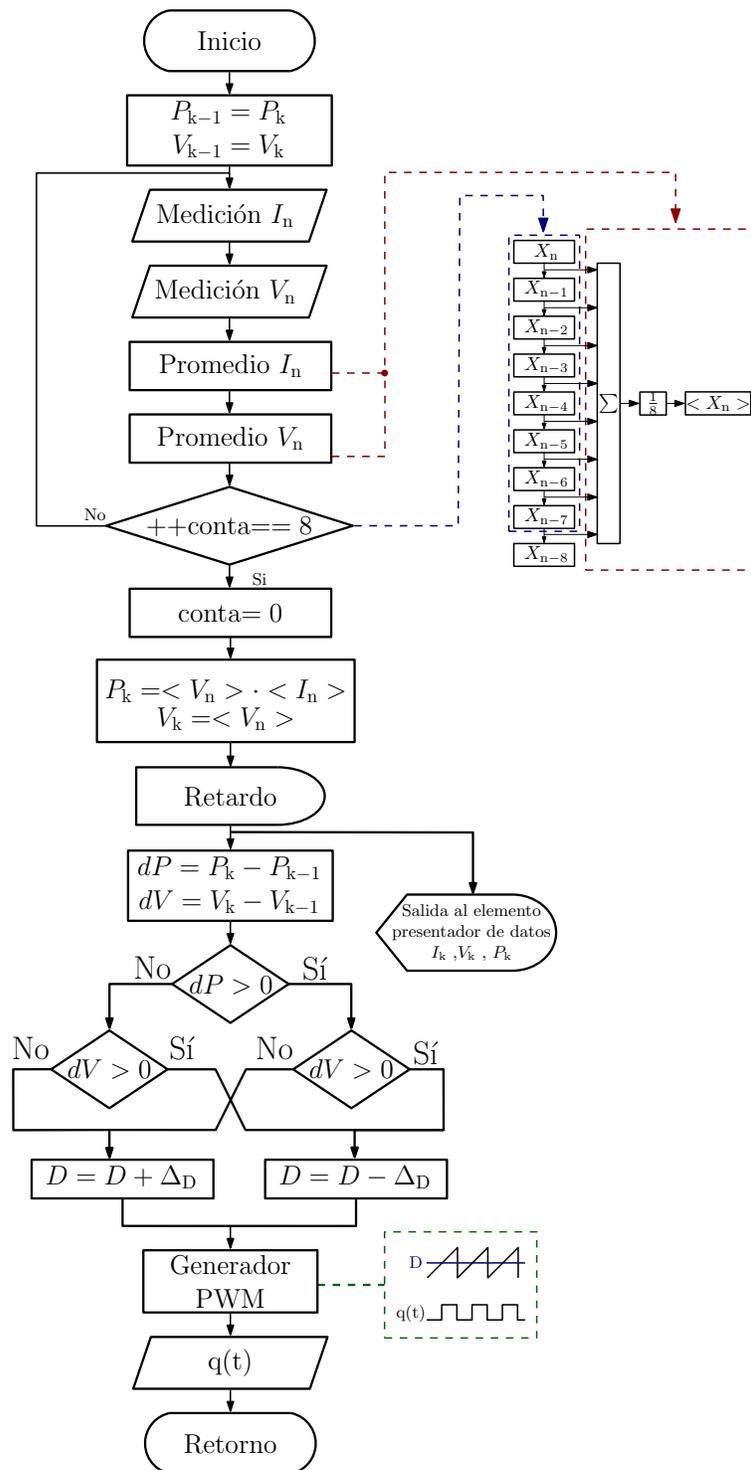


Figura 3.10: Diagrama de bloques del algoritmo MPPT implementado.

Primeramente, se guardan los valores actuales de las mediciones de potencia P_k y voltaje V_k en las variables que representan los datos del instante anterior P_{k-1} y V_{k-1} . Para la primera vez que se ejecute el algoritmo dichas mediciones siempre tendrán un valor inicial de cero. Posteriormente, se lleva a cabo la medición de corriente I_n seguida de la medición de voltaje V_n . Enseguida se calcula el promedio de dichas señales, para ello se utiliza una técnica de promediado móvil la cual consiste en calcular el promedio de la señal en un intervalo determinado de ocho valores medidos. Conforme se van generando nuevas mediciones, la ventana se recorre de tal manera que los datos más recientes se incluyan en la operación y los más antiguos sean descartados.

El siguiente paso es calcular el producto de los valores promedio de voltaje $\langle V_n \rangle$ y corriente $\langle I_n \rangle$ para obtener la potencia actual P_k . Además, se guarda el voltaje promedio actual en la variable V_k . Después se introduce un retardo durante el cual se despliegan los datos actualizados en una pantalla de cristal líquido.

A continuación se calcula la diferencia entre los valores actuales y los anteriores dP y dV como se indica en la Figura 3.10. Con base en los resultados obtenidos se evalúa si el valor de dP es positivo ($dP > 0$) y posteriormente se verifica la misma condición con dV ($dV > 0$). De lo anterior, existen cuatro posibilidades diferentes para las cuales resultan únicamente dos alternativas: que la perturbación (Δ_D) al ciclo de trabajo D sea positiva o negativa, es decir, que su valor sea incrementado o disminuido. Para el caso específico del convertidor boost empleado, en este trabajo, el sentido de la perturbación para cada posibilidad es mostrado en la Figura 3.10.

Finalmente, el valor D resultante del procedimiento anterior se almacena en un registro de comparación del microcontrolador que se utiliza para generar la señal PWM. El ciclo de trabajo D de la señal de salida $q(t)$ está dado por (3.10) donde T_{on} es el tiempo que la señal se encuentra en un nivel lógico alto y T_{off} es el tiempo que permanece en nivel bajo. En la Figura 3.11 se puede observar la señal PWM de frecuencia F_s y periodo $T_s = 1/F_s$. También es posible expresar el periodo T_s como la suma de T_{on} y T_{off} .

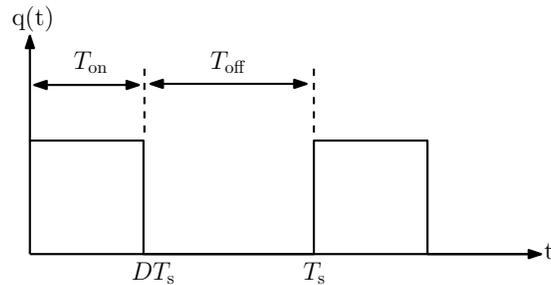


Figura 3.11: Gráfica de la señal PWM.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (3.10)$$

Después de completar la primera iteración del algoritmo, la secuencia se repite indefinidamente actualizando las mediciones de voltaje, potencia y el ciclo de trabajo hasta que este último converja en un valor óptimo para las condiciones de operación del sistema. La frecuencia F_p con la que se realiza la perturbación, es establecida con el fin de conseguir una velocidad de convergencia conveniente para el sistema PV.

Los parámetros del algoritmo P&O mostrados en la Figura 2.9 se eligen con base en las posibilidades de procesamiento del microcontrolador y a los criterios revisados en la Sección 2.2.3. La Tabla 3.7 contiene los parámetros seleccionados para la implementación del algoritmo P&O.

Tabla 3.7: Parámetros del algoritmo P&O.

Parámetro	Valor
F_p	50 Hz
Δ_D	0.8 %

3.5. CONFIGURACIÓN PROPUESTA PARA LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA PV CON MPPT

Con la finalidad de evaluar el funcionamiento del sistema MPPT implementado en el presente trabajo se expone la configuración con la que se pretende emular de una manera aproximada el comportamiento del panel PV. Dicha configuración permite estudiar la respuesta del sistema en lazo abierto y anticipar el valor óptimo al que deberá ajustarse el algoritmo en lazo cerrado.

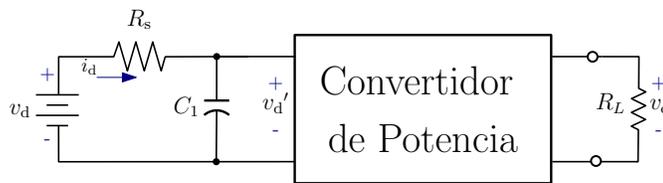


Figura 3.12: Configuración propuesta.

En la Figura 3.12 se muestra la configuración propuesta la cual está formada por una fuente de voltaje constante V_d y una resistencia R_s conectada en serie. La resistencia mencionada representa el valor óhmico de Z_{MPP} al que deberá ajustarse la impedancia Z_{in} del convertidor para obtener la máxima transferencia de potencia. El capacitor de entrada C_1 se conecta en paralelo a la fuente de voltaje para minimizar las pérdidas ocasionadas por el rizo de voltaje [24].

3.5.1. Funcionamiento en lazo abierto de la configuración propuesta

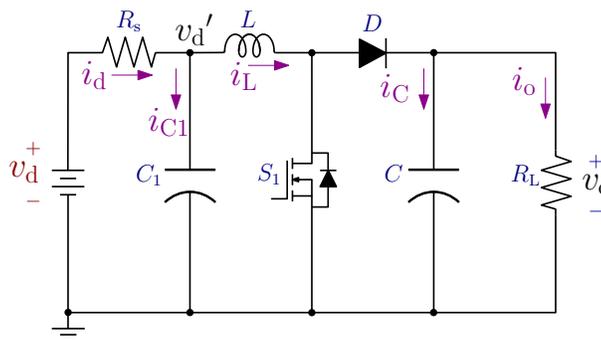


Figura 3.13: Configuración propuesta con el convertidor boost.

El bloque del convertidor de potencia presentado en la Figura 3.12 es implementado con el convertidor boost utilizando los parámetros seleccionados en la Sección 3.3.1. En la Figura 3.13 se puede observar el diagrama esquemático del circuito propuesto.

El funcionamiento del circuito propuesto en lazo abierto es equivalente al de la Figura 2.5 revisado en la Sección 2.2.1. El convertidor boost se comporta como una resistencia variable controlada por el ciclo de trabajo D , a medida que dicha resistencia se aproxime al valor de R_s se cumplirá la máxima transferencia de potencia en el sistema.

En la Figura 3.14 se muestra la gráfica de la potencia extraída de la fuente de voltaje respecto al ciclo de trabajo D del convertidor. La potencia mostrada es obtenida con las mediciones de voltaje y corriente en la entrada del convertidor boost. Es evidente que existe un valor para el ciclo de trabajo óptimo D^* que corresponde al MPP y puede obtenerse al reescribir (3.4) resultando (3.11).

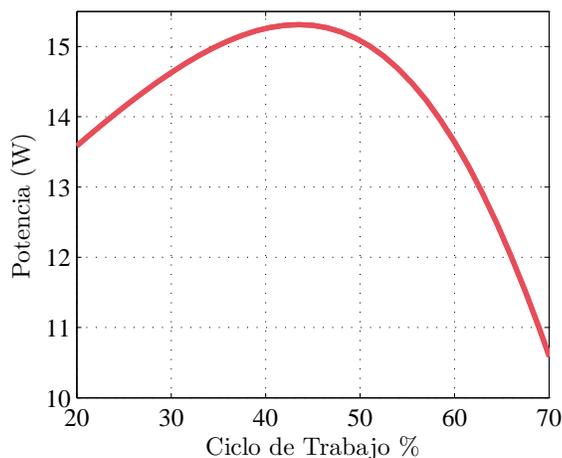


Figura 3.14: Potencia extraída de la fuente de voltaje.

$$D^* = 1 - \sqrt{\frac{Z_{in}}{R_L}} \quad (3.11)$$

De lo anterior se puede concluir que a partir del funcionamiento en lazo abierto del esquema propuesto es posible conocer el valor óptimo para el cual la potencia extraída es máxima.

De manera similar, es posible obtener el conjunto de valores que puede tomar la impedancia Z_{in} en función del ciclo de trabajo D . En la Figura 3.15 se presenta la impedancia Z_{in} del convertidor boost para los distintos valores propuestos de D . Es posible observar que el valor de D en el que la potencia es máxima es equivalente al valor en el que la impedancia Z_{in} es igual a la resistencia R_s .

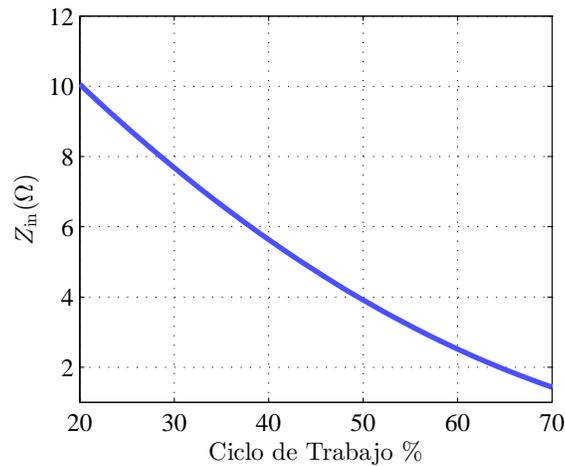


Figura 3.15: Impedancia Z_{in} del convertidor boost.

3.6. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó la descripción del sistema PV con MPPT cuyo objetivo es localizar y seguir de manera continua el MPP de un panel PV. Asimismo, se analizó el funcionamiento de cada una de las partes que componen dicho sistema y se proporcionaron las especificaciones técnicas de los dispositivos utilizados en el desarrollo del mismo.

Además, se describió la operación del circuito diseñado para la caracterización del panel PV. Los criterios considerados para la selección del convertidor de potencia apropiado para el sistema fueron expuestos de manera precisa y se realizó el diseño del convertidor boost con base en los parámetros del panel PV. De igual forma, se analizaron los elementos que constituyen el controlador MPPT y se detalló el proceso de ejecución del algoritmo P&O. Finalmente, se presentó la configuración propuesta para la validación del funcionamiento del sistema PV con MPPT.

Capítulo

4

Resultados de simulación del sistema PV con MPPT

El presente capítulo tiene por objetivo mostrar detalladamente el funcionamiento del sistema PV con MPPT implementado a nivel de simulación, así como el buen desempeño de los principales bloques que constituyen dicho sistema. La plataforma de desarrollo del sistema PV con MPPT se llevó a cabo con el paquete computacional Simulink de Matlab® versión 2014a. Se empleó la librería SimPowerSystem™ para realizar el modelo del convertidor de potencia. El algoritmo P&O se desarrolló en la misma plataforma y se utilizó el modelo del panel PV expuesto en [7].

4.1. MODELO EN SIMULACIÓN DEL SISTEMA PV CON MPPT

A continuación se describen las cuatro distintas configuraciones empleadas para la validación del análisis teórico mediante simulación expuesto en las siguientes secciones.

- Configuración propuesta en lazo abierto: consiste en el esquema presentado en la Sección 3.5. El convertidor boost es implementado con los parámetros mostrados en la Tabla 3.4, el valor del capacitor de entrada C_1 es de $100 \mu\text{F}$ y R_s es de 5Ω . Este modelo opera en lazo abierto, es decir, no se incluye el controlador MPPT.
- Sistema PV en lazo abierto: se realiza la simulación del panel PV en lazo abierto, con la finalidad de corroborar el valor de la potencia máxima disponible para diferentes valores de irradiancia incidente.
- Configuración propuesta en lazo cerrado: El algoritmo P&O es adicionado a la configuración propuesta. Los parámetros de diseño del algoritmo son los mostrados en la Tabla 3.7. La Figura 4.1 muestra la implementación de la configuración propuesta mediante bloques.
- Sistema PV con MPPT: comprende el esquema mostrado en la Figura 3.1. La implementación en Simulink del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost se presenta en la Figura 4.2. De la misma forma, se lleva a cabo la simulación empleando el convertidor boost de alta ganancia.

4.2. RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LAZO ABIERTO

En esta sección se presenta el funcionamiento en lazo abierto de la configuración propuesta y del panel PV. Se expone la respuesta de ambos esquemas ante perturbaciones y se proporcionan los resultados de simulación obtenidos.

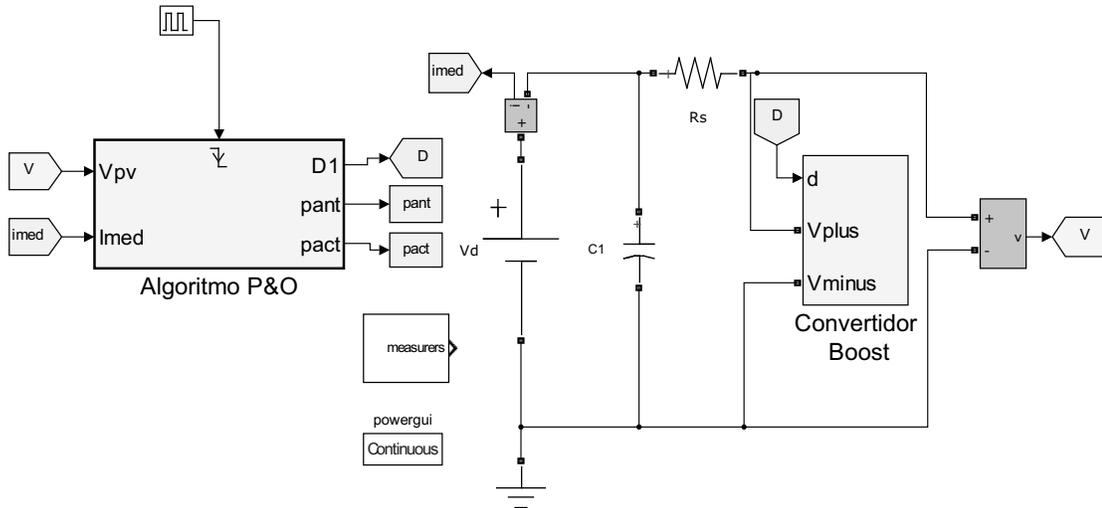


Figura 4.1: Configuración propuesta en Simulink (lazo cerrado).

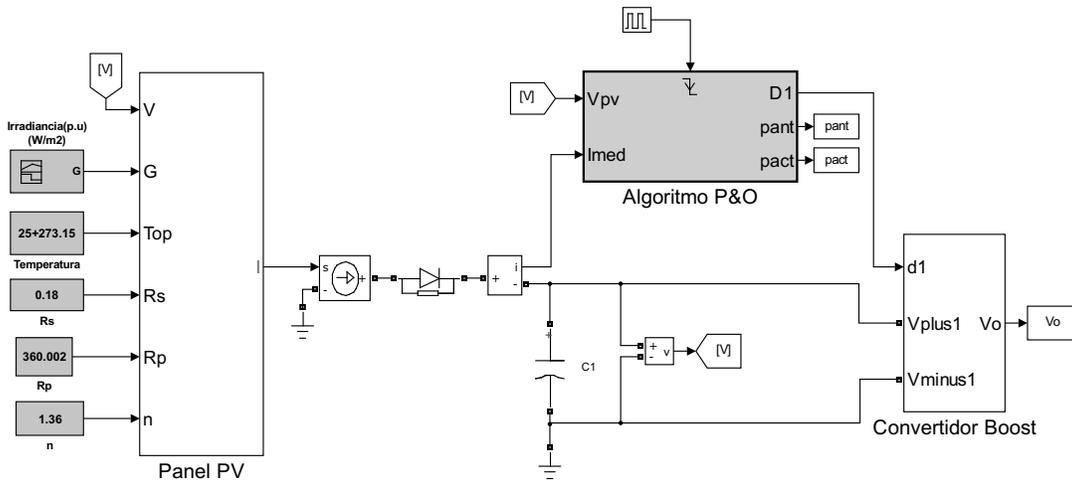


Figura 4.2: Sistema PV con MPPT en Simulink.

4.2.1. Configuración propuesta en lazo abierto

El funcionamiento bajo condiciones estáticas en lazo abierto del circuito propuesto en la Figura 3.13 se analizó en la Sección 3.5.1. Sin embargo, con la finalidad de obtener resultados

con una mayor aproximación a los obtenidos bajo condiciones dinámicas en las que típicamente opera el sistema, se propone la introducción de una perturbación como se muestra en la Figura 4.3.

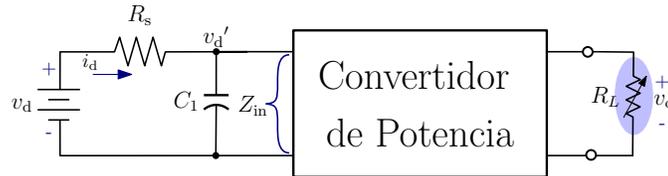


Figura 4.3: Esquema con perturbación en R_L .

La resistencia de carga R_L es manipulada de tal manera que su valor óhmico varíe de forma instantánea. Por consecuencia, la impedancia equivalente Z_{in} del convertidor de potencia se modifica de acuerdo a (3.4).

Para el caso ideal, en el que la extracción de potencia es máxima, el valor de Z_{in} debe ser igual al de R_s . En la Tabla 4.1 se muestran los parámetros establecidos para la condición de operación óptima y los correspondientes a la perturbación realizada.

Tabla 4.1: Parámetros de operación en lazo abierto.

Parámetro	Valor
D^*	42 %
R_s	5 Ω
Condición óptima	
R_L	15 Ω
Z_{in}	5 Ω
Perturbación	
R_L	139 Ω
Z_{in}	46 Ω

La Figura 4.4 muestra la potencia instantánea medida en la entrada del convertidor boost obtenida mediante el producto del voltaje v_d' y la corriente i_d . El ciclo de trabajo D es establecido a un valor fijo durante toda la simulación. Es posible observar que al introducir la perturbación

en el sistema, es decir, al variar R_L , la potencia disminuye notoriamente debido a que las impedancias del circuito no están acopladas, es decir, tienen diferente valor. Además, al operar en lazo abierto, no existe una retroalimentación que ajuste el ciclo de trabajo D , por lo que la impedancia Z_{in} cambia de valor conforme lo hace la resistencia de carga R_L .

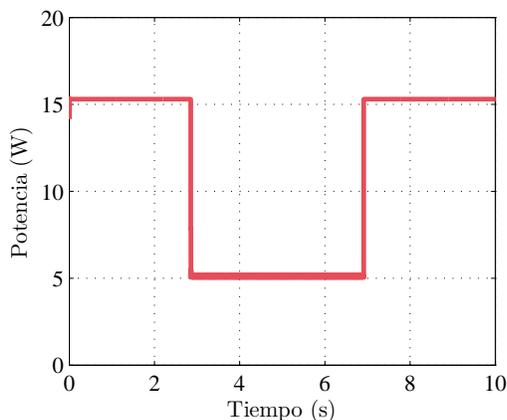


Figura 4.4: Potencia medida en lazo abierto con perturbación en R_L .

4.2.2. Sistema PV en lazo abierto

Como se revisó en la Sección 2.1, la potencia generada por un panel PV depende tanto de las condiciones eléctricas de carga como de las condiciones ambientales. La simulación llevada a cabo consiste en la obtención de la curva característica del panel PV bajo condiciones de irradiancia constante. Lo anterior es conseguido al conectar al panel PV una carga con un amplio rango de variación. El procedimiento es repetido para diferentes valores de irradiancia obteniendo el MPP de cada una de las curvas características obtenidas.

La Figura 4.5 muestra la gráfica de la máxima potencia extraída del panel PV para un amplio rango de valores de irradiancia G . Es posible observar que ambos parámetros se modifican de manera proporcional de tal forma que se obtiene una mayor potencia a un nivel superior de irradiancia. Los resultados obtenidos mediante la simulación en lazo abierto del panel PV proporcionan una referencia para posteriormente validar el funcionamiento del sistema MPPT.

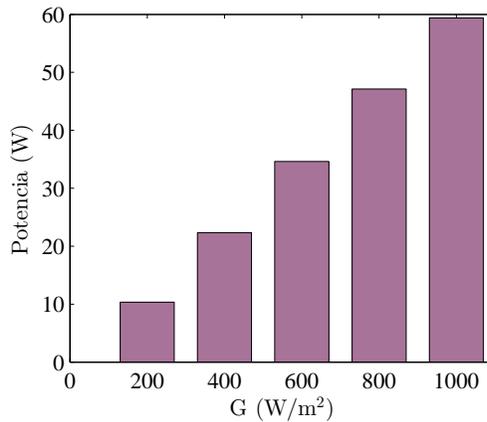


Figura 4.5: Máxima potencia para distintos valores de irradiancia .

4.3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LAZO CERRADO

A continuación se muestran los resultados obtenidos al implementar vía simulación el algoritmo P&O. Se presenta el funcionamiento de la configuración propuesta en lazo cerrado utilizando el convertidor boost. Posteriormente, se exponen los resultados del sistema PV con MPPT incluyendo el modelo del panel PV con el mismo convertidor. Finalmente, se realiza una simulación con el convertidor boost de alta ganancia y se analizan las diferencias entre los resultados de ambas topologías.

4.3.1. Simulación de la configuración propuesta en lazo cerrado

La simulación expuesta a continuación integra la configuración presentada en la Sección 4.2.1 y la implementación del algoritmo P&O tal como se muestra en la Figura 4.1.

Se llevó a cabo un procedimiento similar al desarrollado en la configuración en lazo abierto

introduciendo una perturbación en la resistencia R_L . El algoritmo P&O implementado en simulación proporciona a su salida la señal de control cuyo ciclo de trabajo D se ajusta a un valor óptimo para lograr la máxima transferencia de potencia.

Tabla 4.2: *Parámetros de operación en lazo cerrado con perturbación en R_L .*

Parámetro	Valor
R_s	5 Ω
Condición óptima	
R_L	15 Ω
D^*	42 %
Z_{in}	5 Ω
Perturbación	
R_L	139 Ω
D^*	81 %
Z_{in}	5 Ω

La Tabla 4.2 muestra los parámetros de la configuración, además se incluye el ciclo de trabajo óptimo D^* calculado teóricamente con (3.11).

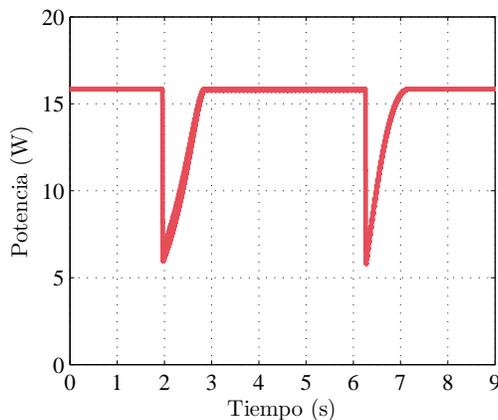


Figura 4.6: *Potencia medida en lazo cerrado con perturbación en R_L .*

La Figura 4.6 muestra la potencia medida en la entrada del convertidor boost. Es evidente que el algoritmo P&O es capaz de seguir el MPP a pesar de la perturbación introducida en el

sistema. Mientras el algoritmo P&O se encuentra en funcionamiento, la potencia en estado estable se mantiene en el valor óptimo a diferencia de la gráfica presentada en la Figura 4.4.

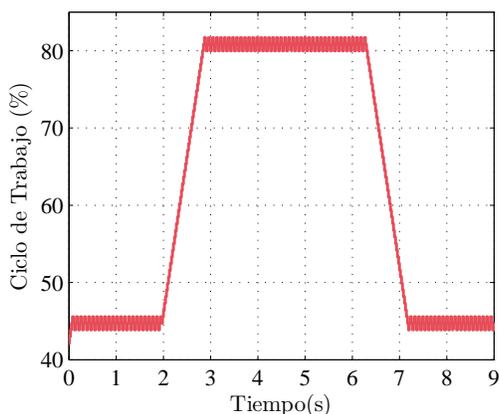


Figura 4.7: Ciclo de trabajo resultante al aplicar una perturbación en R_L .

Por otro lado, el algoritmo P&O emplea las mediciones periódicas de voltaje v_d' y corriente i_d para ajustar de forma automática el ciclo de trabajo D . En la Figura 4.7 se puede observar la gráfica correspondiente a dicho valor calculado por el algoritmo de control MPPT. Es posible apreciar el cambio efectuado en D en el instante en que es realizada la perturbación. Además, en estado estable se observa que el ciclo de trabajo D se mantiene oscilando alrededor del valor óptimo debido a las características propias del algoritmo P&O.

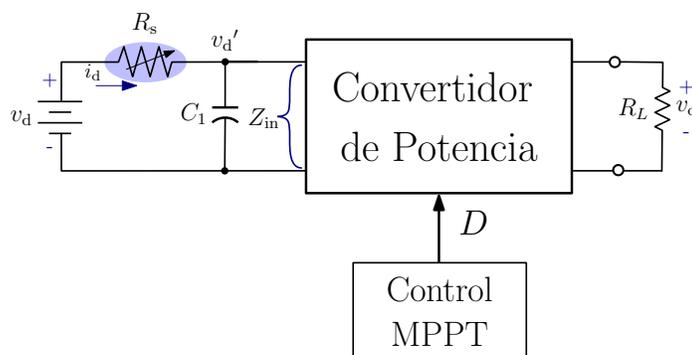


Figura 4.8: Esquema con perturbación en R_s .

Utilizando la misma configuración, se realizó la simulación de una perturbación en la resistencia R_s como se muestra en el esquema de la Figura 4.8. Dicha perturbación tiene un efecto en la cantidad de corriente i_d que circula a través de R_s , de manera análoga al cambio en la corriente del panel PV ante variaciones en la irradiancia incidente.

El objetivo de esta simulación es comprobar que el algoritmo P&O es capaz de seguir el MPP ante perturbaciones que modifican la cantidad de potencia disponible. Los parámetros del sistema en lazo cerrado con perturbación en R_s se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Parámetros de operación en lazo cerrado con perturbación en R_s .

Parámetro	Valor
R_L	15 Ω
Condición inicial	
R_s	5 Ω
D^*	42 %
Z_{in}	5 Ω
Perturbación	
R_s	3.3 Ω
D^*	53 %
Z_{in}	3.3 Ω

La Figura 4.9 muestra la potencia medida en la entrada del convertidor boost para las dos condiciones de operación propuestas. Se puede apreciar que para la condición inicial la máxima potencia disponible es menor que la obtenida durante la perturbación en el sistema, esto debido al cambio en el valor de R_s .

En la Figura 4.10 se presenta la gráfica del ciclo de trabajo D para las diferentes condiciones establecidas. Es posible determinar que el algoritmo implementado opera de manera adecuada debido a que los valores correspondientes al ciclo de trabajo D coinciden con los calculados teóricamente para la obtención de la máxima potencia mostrados en la Tabla 4.3. Además, los valores presentados en la Figura 4.9 corresponden a la máxima potencia disponible.

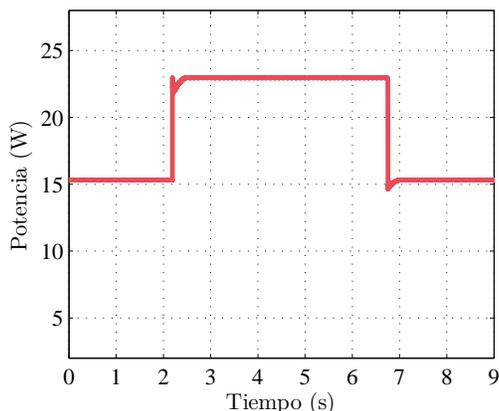


Figura 4.9: Potencia obtenida al aplicar una perturbación en R_s .

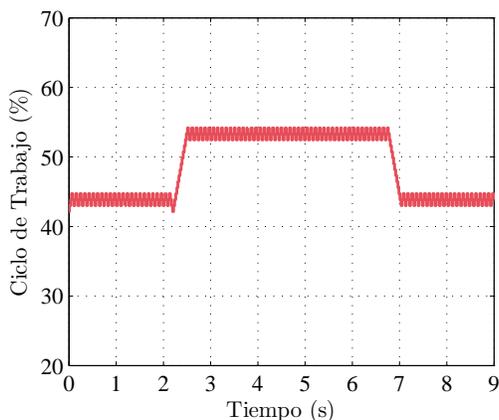


Figura 4.10: Ciclo de trabajo D obtenido por el algoritmo P&O ante una perturbación en R_s .

4.3.2. Simulación del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost

El funcionamiento del sistema PV con MPPT es evaluado mediante el modelo en simulación presentado en la Figura 4.2. Dicho modelo está integrado por el panel PV con las características eléctricas expuestas en la Tabla 3.1 y los parámetros de entrada mostrados en la Tabla 4.4. El convertidor boost y el algoritmo P&O son implementados de manera similar a la configuración presentada en la Sección 4.3.1.

Tabla 4.4: *Parámetros de entrada del panel PV.*

	Parámetro	Valor
T_{op}	Temperatura de operación de la celda	25 °C
R_s	Resistencia en serie	0.18 Ω
R_p	Resistencia en derivación o paralelo	360 Ω
G	Irradiancia incidente sobre el panel	1,000 $\frac{W}{m^2}$
n	Factor de idealidad del diodo	1.36

Con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema PV con MPPT ante variaciones en la cantidad de irradiancia incidente, se introduce una perturbación en forma de escalón.

La Figura 4.11 muestra la gráfica de la potencia extraída del panel PV para una irradiancia de $G=1,000 \text{ W/m}^2$ y con un valor de $G=800 \text{ W/m}^2$ durante la perturbación. Los valores de potencia corresponden a los mostrados en la gráfica de la Figura 4.5. Los resultados de simulación obtenidos evidencian que el algoritmo P&O es capaz de extraer la máxima potencia disponible independientemente de los cambios en la irradiancia.

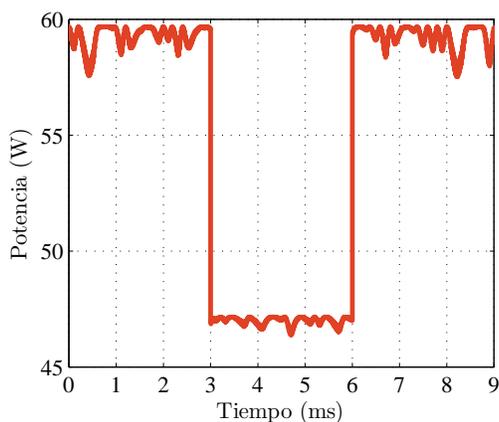


Figura 4.11: *Potencia extraída del sistema PV al utilizar el convertidor boost convencional.*

La Figura 4.12 muestra el ciclo de trabajo D establecido por el algoritmo P&O. Dicho valor, determina la impedancia equivalente Z_{in} del convertidor boost, de tal forma que en el MPP se ajuste al valor de la impedancia del panel PV Z_{MPP} .

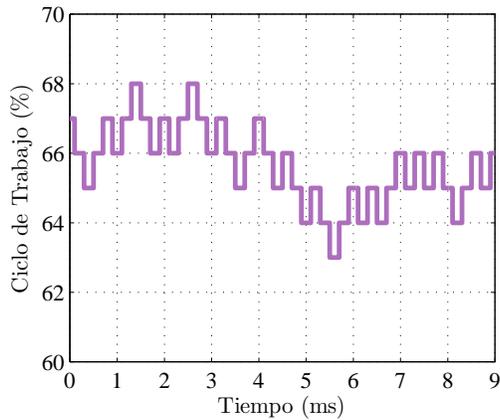


Figura 4.12: Ciclo de trabajo correspondiente a la máxima potencia del panel PV.

4.3.3. Simulación del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost con alta ganancia

A continuación se presenta la evaluación del sistema PV con MPPT empleando una variante del convertidor boost con característica de alta ganancia. El análisis de la topología propuesta es presentado a detalle en [19]. El diagrama esquemático del convertidor se muestra en la Figura 2.11(d), el cual es repetido aquí por conveniencia, ver Figura 4.13. La Tabla 4.5 contiene los parámetros de diseño utilizados para dicho convertidor.

El esquema de simulación así como los parámetros del algoritmo P&O son implementados de la misma manera que en la Sección 4.3.2. De igual forma es introducida una perturbación en la irradiancia incidente en el panel PV con el objetivo de verificar el funcionamiento del sistema ante dichas condiciones.

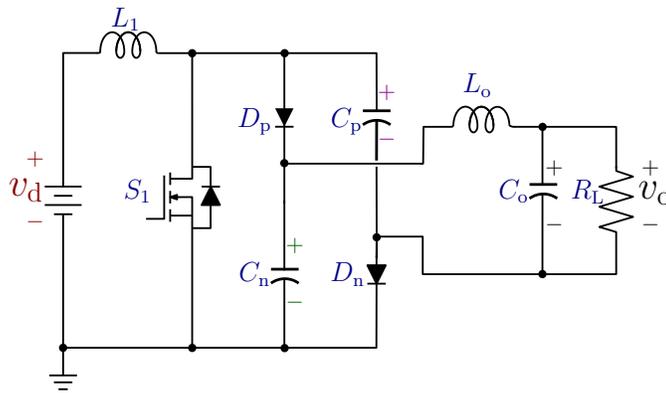


Figura 4.13: Diagrama esquemático del convertidor boost con alta ganancia.

Tabla 4.5: Parámetros del convertidor boost de alta ganancia.

Parámetro	Valor
L_1	$44 \mu\text{H}$
L_o	$44 \mu\text{H}$
C_p	$100 \mu\text{F}$
C_n	$100 \mu\text{F}$
C_o	$100 \mu\text{F}$
R_L	45Ω

La Figura 4.14 muestra la potencia medida en la entrada del convertidor boost con alta ganancia. Es posible confirmar que el sistema implementado es capaz de seguir el MPP para cada una de las condiciones de operación propuestas.

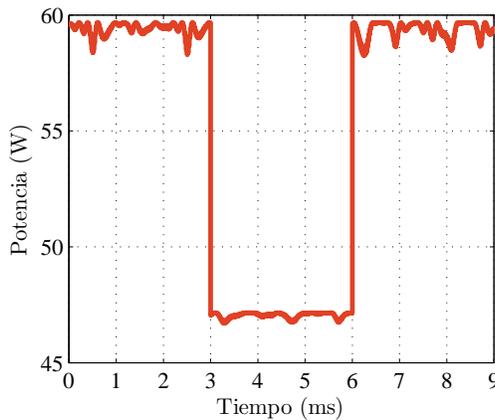


Figura 4.14: Potencia extraída del sistema PV al utilizar el convertidor boost con alta ganancia.

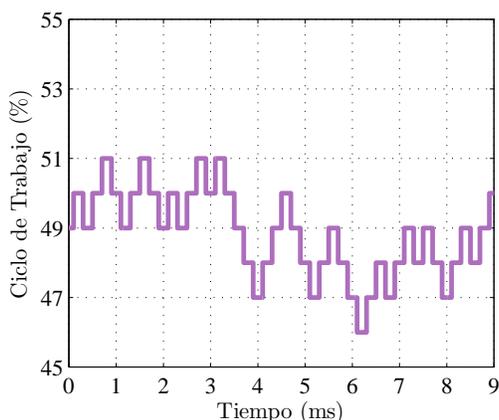


Figura 4.15: Ciclo de trabajo correspondiente a la máxima potencia del panel PV.

La gráfica presentada en la Figura 4.15 muestra el ciclo de trabajo D calculado por el algoritmo P&O. Es posible observar que al utilizar el convertidor boost de alta ganancia los valores que toma D en el MPP son notablemente menores a los establecidos al operar con el convertidor boost convencional expuestos en la Figura 4.12.

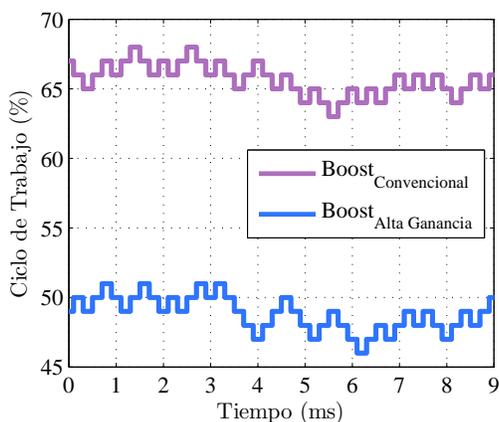


Figura 4.16: Comparación entre el ciclo de trabajo obtenido por el algoritmo P&O con diferentes convertidores.

Es importante mencionar que la utilización de valores de ciclo de trabajo menores es una condición deseable, ya que las pérdidas por conducción son disminuidas. Lo anterior representa un aumento en la eficiencia del convertidor de potencia y en general del sistema completo. La Figura 4.16 muestra la comparación entre los valores de ciclo de trabajo calculados por el algoritmo P&O para ambos convertidores.

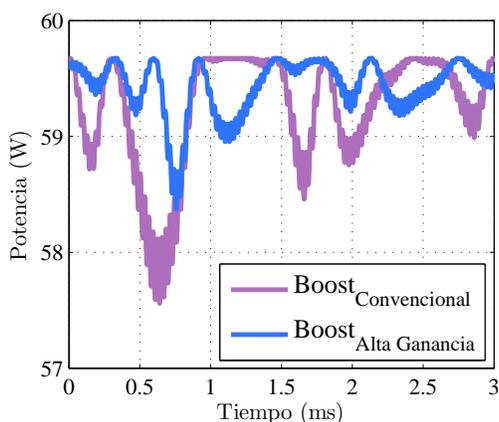


Figura 4.17: Comparación entre la potencia extraída con diferentes convertidores.

La Figura 4.17 presenta un acercamiento de las gráficas de potencia medida mostradas previamente para ambos convertidores. Los resultados son obtenidos bajo las mismas condiciones de operación del panel PV y del algoritmo P&O. Es posible distinguir una diferencia relevante entre la magnitud de oscilación presente en ambas señales, siendo menor la asociada al convertidor boost con alta ganancia.

En la Figura 4.18 se muestra la trayectoria de la curva de voltaje-potencia obtenida utilizando ambos convertidores ante perturbaciones en la irradiancia.

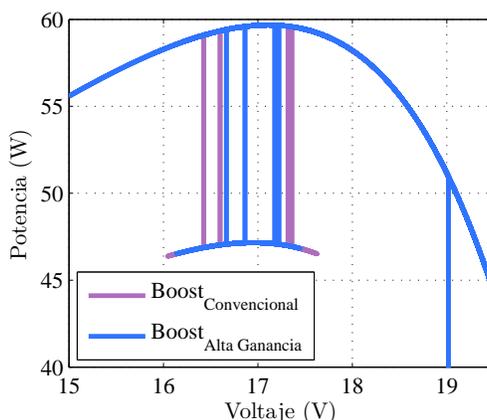


Figura 4.18: Comparación entre la curva de potencia-voltaje con diferentes convertidores.

4.4. CONCLUSIONES

Los resultados de simulación presentados en este capítulo mostraron el funcionamiento de las distintas configuraciones propuestas para la validación del sistema PV con MPPT. El análisis de la operación del sistema tanto en lazo abierto como en lazo cerrado permitió enfatizar la justificación del uso de algoritmos MPPT para el mayor aprovechamiento de la energía eléctrica generada por paneles PV.

El modelo en simulación del convertidor boost con los parámetros de diseño propuestos mostró ser apropiado para su utilización en sistemas MPPT. Se presentaron los valores óptimos del ciclo de trabajo D estimados mediante el algoritmo P&O siendo correspondientes con los cálculos obtenidos de manera teórica.

La simulación del sistema PV con MPPT permitió validar la funcionalidad del algoritmo de control P&O ante los diferentes niveles de irradiancia incidente en un panel PV. Es importante mencionar que el algoritmo P&O no requiere de un modelo matemático de alta exactitud para su correcta operación, por lo que el esquema de simulación implementado puede ser adecuado a paneles PV con diferentes características.

La comparación entre los resultados obtenidos al implementar el sistema con dos convertidores de potencia distintos permitió determinar la funcionalidad de cada uno de ellos y las ventajas ofrecidas por el convertidor boost de alta ganancia proporcionando una operación en condiciones óptimas con valores de ciclo de trabajo menores a los establecidos mediante el uso del convertidor boost convencional.

Capítulo

5

Resultados experimentales

En el presente capítulo se describe el procedimiento empleado para la construcción de los elementos que conforman el sistema MPPT. Se expone el desarrollo del prototipo propuesto para la caracterización del panel PV y se presentan los resultados obtenidos. Los circuitos correspondientes al convertidor de potencia y el sistema de adquisición de datos son llevados a cabo con base en los parámetros revisados en el Capítulo 3. El algoritmo P&O es codificado a nivel digital y su implementación es realizada mediante un microcontrolador.

Se presentan los experimentos realizados empleando la configuración propuesta en lazo abierto y posteriormente se integra el algoritmo MPPT permitiendo tener un lazo de control retroalimentado con el fin de validar la funcionalidad del sistema. Se analizan ambos resultados ante perturbaciones, destacando las ventajas del sistema propuesto en lazo cerrado.

5.1. OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL PANEL PV

En la Sección 3.2.1 se presentó el diseño de una carga electrónica con la finalidad de obtener la curva característica de un panel PV. Dicha caracterización es de gran importancia para el diseño de algunos algoritmos MPPT debido a que se logra obtener el MPP en condiciones reales de operación tomando en cuenta factores como la degradación del equipo por envejecimiento, suciedad, entre otros. En este trabajo se plantea una alternativa accesible y de bajo costo, capaz de proporcionar los principales parámetros eléctricos de un panel PV bajo diversas condiciones ambientales.

El panel PV caracterizado corresponde al modelo PROSE-5012 con una potencia nominal de 50 W bajo STC. La Tabla 5.1 provee las especificaciones técnicas del panel PV utilizado.

En la Figura 5.1 se observa el panel PV expuesto a condiciones exteriores al ser sometido a las pruebas experimentales. El sensor Si-01 TC-T de Ingenieurbüro es utilizado para realizar las mediciones de irradiancia y temperatura.



Figura 5.1: Panel PV PROSE-5012 expuesto a condiciones exteriores.

Tabla 5.1: Especificaciones técnicas del panel PV PROSE-5012.

Párametro	Valor
P_{\max}	50 W
V_{MPP}	17.5 V
I_{MPP}	2.86 A
I_{sc}	3.01 A
V_{oc}	21.5 V

El prototipo experimental desarrollado corresponde a la carga electrónica presentada en el diagrama esquemático de la Figura 3.3. La implementación de dicho circuito es llevada a cabo empleando los componentes de la Tabla 3.2.

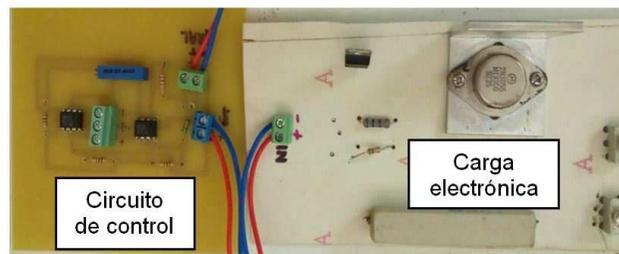


Figura 5.2: Configuración experimental para la caracterización del panel PV.

La configuración experimental utilizada para la obtención de la curva característica del panel PV es mostrada en la Figura 5.2.



Figura 5.3: Instrumentación empleada para la caracterización del panel PV.

En la Figura 5.3 se presenta la instrumentación empleada para adquirir las señales de voltaje v_{pv} y corriente i_{pv} en tiempo real. El proceso de la obtención de la curva de potencia del panel PV se llevó a cabo bajo diferentes condiciones de irradiancia G .

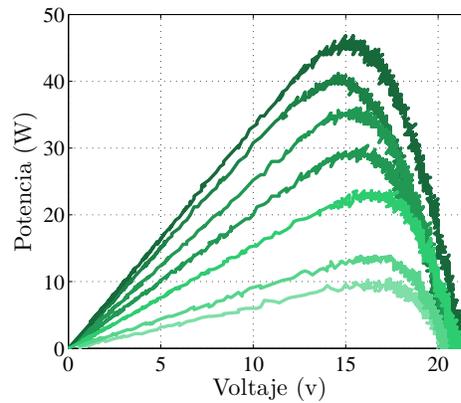


Figura 5.4: Curvas de voltaje-potencia del panel PV.

La Figura 5.4 presenta las gráficas de voltaje-potencia obtenidas por medio del prototipo experimental de la Figura 5.2 diseñado en este trabajo, a partir de dichas gráficas es posible obtener el MPP en condiciones de operación conocidas.

En la Figura 5.5 se exhiben las gráficas de voltaje-corriente correspondientes a las mismas condiciones para las que se obtuvieron las curvas de potencia.

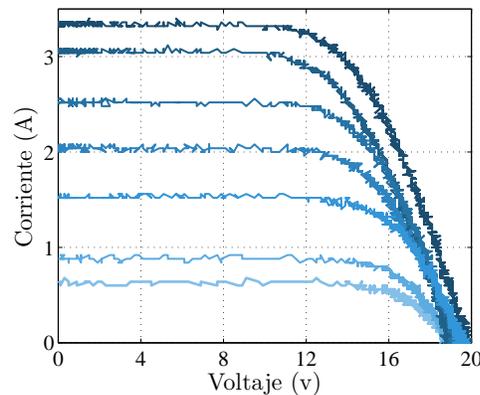


Figura 5.5: Curvas de voltaje-corriente del panel PV.

La Tabla 5.2 resume los resultados correspondientes al MPP para un valor de irradiancia medida y un rango de temperaturas entre 37 °C y 43 °C.

La experimentación se llevó a cabo el 26 de junio de 2018 en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Cd. Madero, ubicado en la latitud 22.257890 y longitud -97.850654.

Tabla 5.2: *Potencia medida para diferentes valores de irradiancia.*

G (W/m ²)	P (W)
250	10.4
304	13.8
750	23.6
1,077	30.4
1,100	36.0
1,154	41.2
1,220	46.8

5.2. PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE LA CONFIGURACIÓN PROPUESTA

En esta sección se describe el proceso mediante el cual se desarrolló el prototipo experimental utilizado para la validación del sistema MPPT. Dicho prototipo incluye el convertidor boost y el controlador MPPT.

5.2.1. Implementación del convertidor boost

El convertidor boost diseñado en el apartado 3.3.1, es implementado en una tarjeta de circuito impreso (PCB) utilizando los componentes definidos en la Tabla 3.4. Dichos componentes se seleccionaron con base en la disponibilidad de los mismos y tomando en cuenta sus características eléctricas de operación.

Es importante señalar que los dispositivos utilizados para la implementación del convertidor de potencia no son ideales, es decir presentan una resistencia equivalente que, como es bien sabido, genera pérdidas por conducción, provocando la disminución en la eficiencia del convertidor.

Además, los semiconductores utilizados como interruptores exhiben características que producen pérdidas por conmutación, esto debido a que el tiempo transcurrido entre los estados de saturación y corte no es instantáneo. Por lo anterior, los resultados obtenidos mediante la utilización del convertidor de potencia presentan ciertas diferencias con respecto al análisis teórico y a los modelos en simulación.

La Figura 5.6 muestra el circuito correspondiente al convertidor boost utilizado para realizar las pruebas experimentales llevadas a cabo en este trabajo.

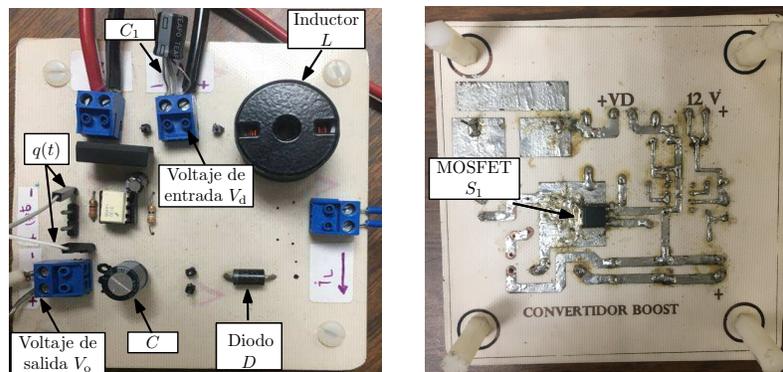


Figura 5.6: Convertidor boost implementado en PCB.

5.2.2. Implementación del controlador MPPT

La estructura del controlador MPPT desarrollado en este trabajo se muestra en la Figura 3.7. A continuación se describe la manera en que se implementó cada uno de los bloques que conforman dicho sistema.

Para llevar a cabo la medición de corriente, se utilizó el sensor efecto Hall L18P003D15 con un valor de corriente nominal de 3 A. Dicho sensor entrega a su salida un voltaje proporcional a la corriente medida. Como se estudió en la Sección 3.4.1 es necesario acondicionar la señal de salida del sensor de corriente para que sea posible su posterior procesamiento por medio del sistema digital a través del ADC.

La Figura 5.7 presenta el módulo construido para la medición de corriente, el cual está compuesto por el sensor L18P003D15 y el circuito acondicionador de señal cuyo diagrama esquemático es mostrado en la Figura 3.8. Es posible estimar la corriente medida, una vez que se conoce el voltaje de salida del modulo de medición de corriente. El cálculo de la corriente medida está dado por (3.8) y es mencionado nuevamente para mayor facilidad en (5.1).

$$I_{med} = (V_{med}^* - 2.5)1.2 \quad (5.1)$$

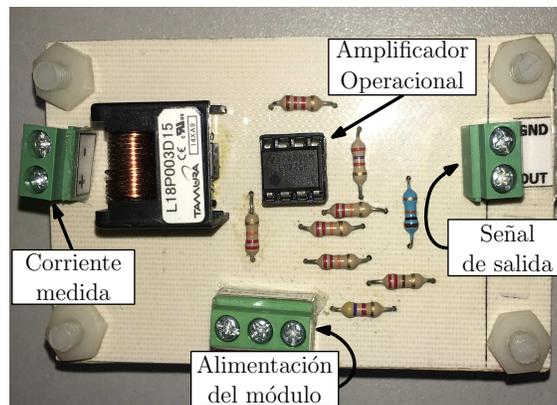


Figura 5.7: Módulo de medición de corriente.

Por otra parte, para llevar a cabo la medición de voltaje es necesario realizar un escalamiento adecuado que sea compatible con los niveles de voltaje apropiados para el sistema de control. Por tal motivo, se utilizó un divisor de voltaje formado por cuatro resistores de precisión con valor de 2 kΩ. El voltaje medido en la salida está dado por (3.7) y es repetido aquí (5.2) por conveniencia.

$$V_{ov} = \frac{1}{4}V_{med} \quad (5.2)$$

El valor máximo de voltaje medido es establecido a 20 V, por lo que existe un margen de operación suficiente para evitar daños tanto en el sensor como en el dispositivo de control. La Figura 5.8 muestra el circuito implementado para llevar a cabo la medición de voltaje.

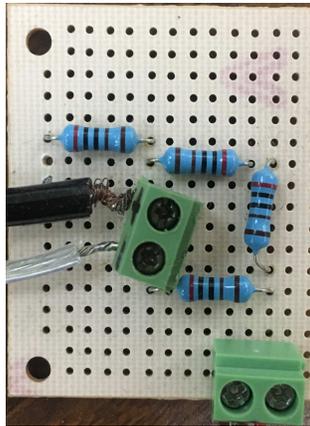


Figura 5.8: Módulo de medición de voltaje.

Posteriormente, como se expuso en la Sección 3.4.1, es necesario llevar a cabo el filtrado de las señales medidas, con el propósito de eliminar las oscilaciones presentes. El filtro pasa bajas mostrado en el diagrama de la Figura 3.9 es implementado y su funcionamiento es verificado de forma experimental. En la Figura 5.9 se muestra el circuito implementado correspondiente al filtro pasa bajas.

Las señales analógicas correspondientes a los valores de voltaje y corriente medidos y posteriormente acondicionados a niveles adecuados para su procesamiento, requieren ser convertidas a un nivel digital. Dicha tarea es efectuada utilizando el ADC del microcontrolador ATmega328P. Además, con la finalidad de monitorear los valores convertidos, se conecta una pantalla LCD que muestra las mediciones realizadas.

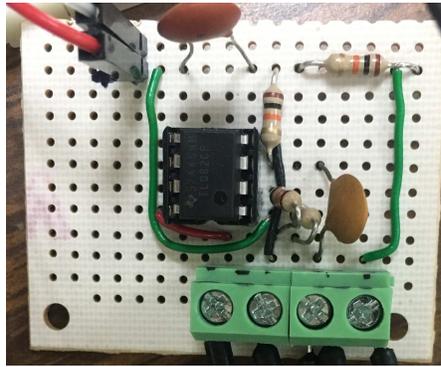


Figura 5.9: Implementación del filtro pasa bajas.

En la Figura 5.10 se muestra el sistema implementado mediante el cual se realiza la conversión analógica-digital. Dicho sistema está formado por el microcontrolador y la pantalla LCD.

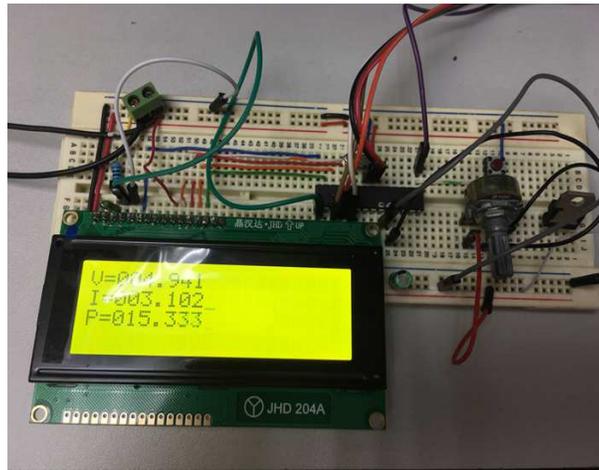


Figura 5.10: Configuración del ADC del microcontrolador ATmega328P.

En este trabajo, la implementación del algoritmo P&O es realizada de forma digital, es decir, se utiliza un dispositivo programable que se encarga de ejecutar de manera secuencial las instrucciones que componen la estructura del algoritmo. Dicha tarea es llevada a cabo con el microcontrolador ATmega328P.

La codificación del algoritmo P&O es llevada a cabo en lenguaje C utilizando el software Atmel Studio versión 7.0.

La frecuencia de operación del dispositivo es provista por un cristal externo de 20MHz, lo cual permite ejecutar las instrucciones con una velocidad adecuada para el funcionamiento del algoritmo.

Finalmente, la modulación de la señal $q(t)$, cuya función es controlar el tiempo en el que se encuentra activo el interruptor del convertidor de potencia, es realizada mediante una técnica PWM. Dicha técnica es implementada a nivel digital utilizando el resultado del algoritmo P&O.

La secuencia de ejecución del algoritmo MPPT integrando el procesamiento de las señales de voltaje y corriente adquiridas, el algoritmo P&O y la modulación PWM es presentada en el diagrama de flujo de la Figura 3.10. Los parámetros del algoritmo utilizados se muestran en la Tabla 3.7.

5.3. RESULTADOS DE LA CONFIGURACIÓN PROPUESTA EN LAZO ABIERTO

El esquema presentado en la Sección 3.5.1 es implementado con los parámetros del convertidor boost mostrados en la Tabla 3.4. La configuración es sometida a una perturbación en la resistencia de carga R_L como se indica en el esquema de la Figura 4.3.

En la Tabla 4.1 se presentan los valores del ciclo de trabajo D y la resistencia de entrada R_s establecidos para la realización de la prueba en lazo abierto. Además, se muestran los valores de la resistencia de carga R_L correspondientes a los dos estados planteados.

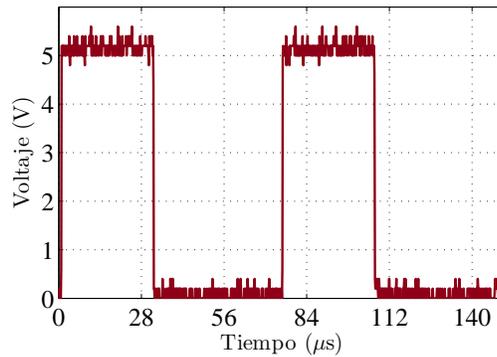


Figura 5.11: Señal $q(t)$ con $D = 42 \%$.

En la Figura 5.11 se muestra la señal $q(t)$ aplicada a la compuerta del transistor S_1 del convertidor boost. Dicha señal posee un ciclo de trabajo fijo con un valor $D=42 \%$ y una frecuencia de $F=18 \text{ kHz}$.

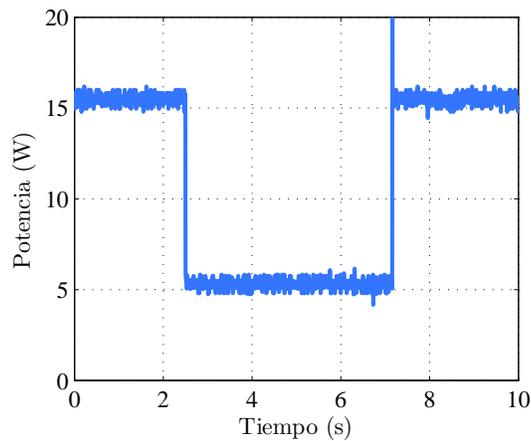


Figura 5.12: Potencia extraída de la configuración propuesta en lazo abierto.

La Figura 5.12 muestra la gráfica de la potencia medida en la entrada del convertidor boost para las dos condiciones de operación establecidas. Es posible observar que, debido a que el sistema opera en lazo abierto, la potencia disminuye durante el tiempo en que es introducida la perturbación. La gráfica obtenida experimentalmente corresponde a los resultados de simulación presentados en la Figura 4.4.

El esquema presentado en la Figura 4.3 es implementado de forma experimental adicionando el algoritmo P&O con la finalidad de validar la funcionalidad del sistema en lazo cerrado. El experimento realizado consistió en aplicar una perturbación en la resistencia de carga R_L , esto se lleva a cabo conectando una resistencia $R = 124 \Omega$ en serie con la carga $R_L = 15 \Omega$ establecida en los parámetros de diseño del convertidor produciendo un nuevo valor de resistencia de carga de $R_L = 139 \Omega$. Posteriormente, se realizaron las mediciones correspondientes al voltaje v_d' y la corriente i_d en la entrada del convertidor boost. Dichas mediciones fueron llevadas a cabo utilizando el osciloscopio digital Tektronix TPS2024. Para la medición de corriente se empleó la sonda A622 del mismo fabricante, la cual es suficiente para medir corrientes de CD a baja frecuencia. En la Figura 5.14 se muestran las mediciones realizadas con el osciloscopio digital.

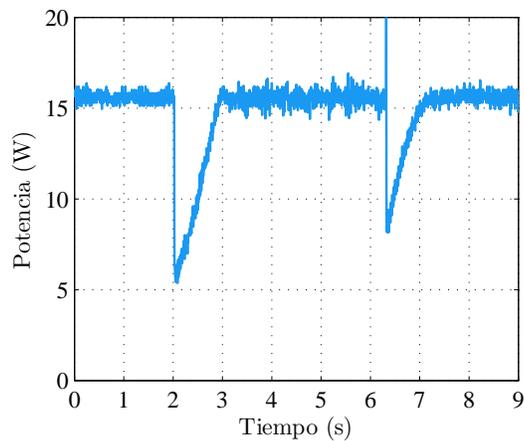


Figura 5.15: Potencia medida al aplicar una perturbación en R_L .

La Figura 5.15 muestra la potencia medida para las condiciones impuestas por los parámetros de la Tabla 4.2. Los parámetros de diseño del algoritmo son establecidos de acuerdo a la Tabla 3.7. La potencia medida corresponde a la máxima estimada teóricamente. El ciclo de trabajo es calculado automáticamente por el algoritmo MPPT. Los resultados obtenidos experimentalmente concuerdan con los de simulación presentados previamente en la Figura 4.6.

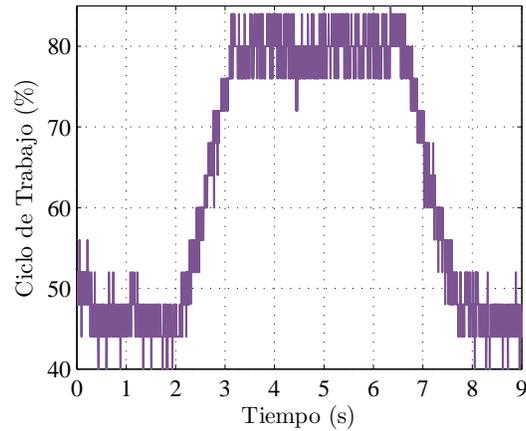


Figura 5.16: *Ciclo de trabajo medido al aplicar una perturbación en R_L .*

La Figura 5.16 presenta la gráfica correspondiente al ciclo de trabajo determinado por el algoritmo P&O para la extracción de la máxima potencia de la configuración implementada. Como es bien sabido, el ciclo de trabajo D representa una variable virtual, es decir, no es posible medir su magnitud de forma directa. Por tal motivo, se empleó un filtro pasa bajas frecuencias, el cual permite obtener el valor medio de la señal $q(t)$ siendo su magnitud equivalente al valor del ciclo de trabajo D . El ciclo de trabajo, obtenido mediante simulación para la misma configuración, es presentado en la Figura 4.7.

Como se revisó en la Sección 2.2.3 los parámetros de diseño del algoritmo P&O son de gran importancia para el óptimo funcionamiento del mismo. Por lo que a continuación se presentan los resultados obtenidos al variar el tamaño de la perturbación ΔD realizada al ciclo de trabajo. En la gráfica de la Figura 5.17 (izquierda) se muestra el ciclo de trabajo calculado por el algoritmo P&O correspondiente a la condición de operación que permite extraer a la máxima potencia. Se definen $\Delta D_1 = 2\%$, $\Delta D_2 = 1.5\%$ y $\Delta D_3 = 0.8\%$ (de abajo hacia arriba). Los resultados evidencian que al ajustar el parámetro ΔD a una magnitud mayor, el ciclo de trabajo D converge a un valor óptimo en un tiempo menor. Sin embargo, en la gráfica de la Figura 5.17 (derecha) se muestra un acercamiento donde es posible observar que se presenta una mayor estabilidad en D cuando es utilizado un valor menor de la perturbación ΔD .

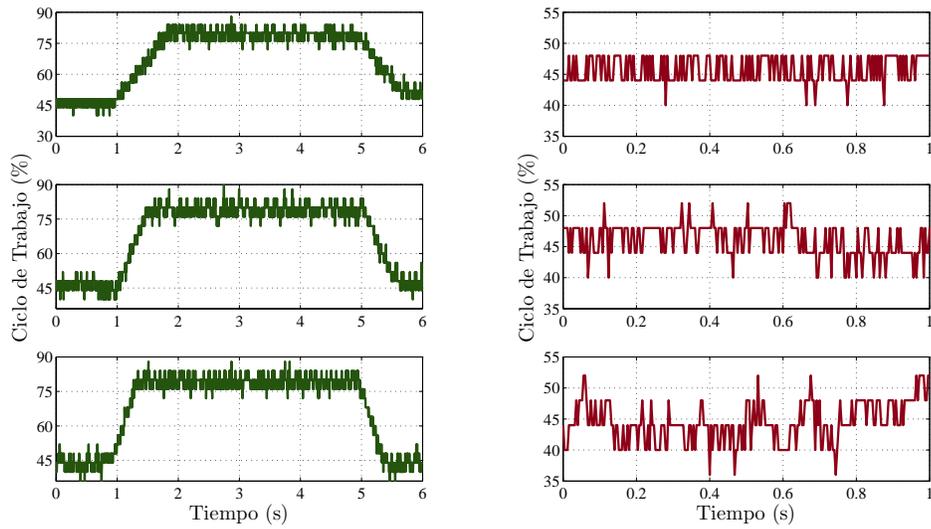


Figura 5.17: Ciclo de trabajo obtenido por el algoritmo P&O con diferentes tamaños de ΔD : $\Delta D_1 = 2\%$, $\Delta D_2 = 1.5\%$ y $\Delta D_3 = 0.8\%$ (de abajo hacia arriba).

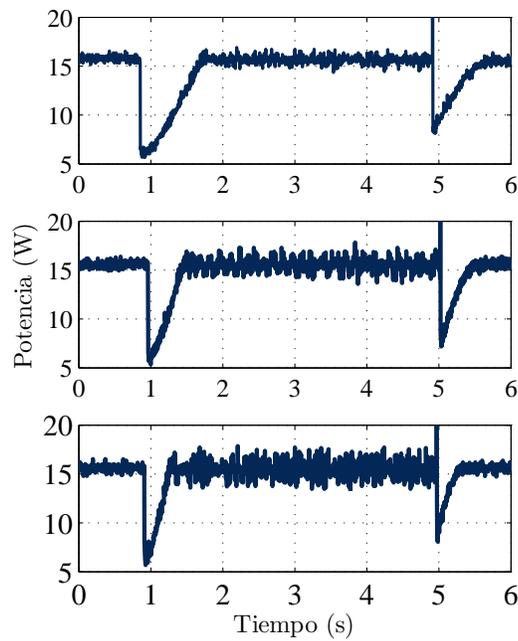


Figura 5.18: Potencia obtenida con diferentes tamaños de ΔD : $\Delta D_1 = 2\%$, $\Delta D_2 = 1.5\%$ y $\Delta D_3 = 0.8\%$ (de abajo hacia arriba).

En la Figura 5.18 se presentan las gráficas correspondientes a la potencia medida para los tres tamaños de la perturbación realizada a ΔD . Es evidente la presencia de una oscilación en la potencia debido a las características inherentes del algoritmo P&O. Sin embargo, se puede observar una diferencia notoria en la magnitud de dicha oscilación en relación al tamaño de la perturbación ΔD . La gráfica (superior) obtenida utilizando el valor $\Delta D_3 = 0.8$ exhibe una menor oscilación en comparación con las gráficas correspondientes a valores más grandes de ΔD . Por lo anterior, $\Delta D_3 = 0.8$ es considerado como el valor óptimo para la operación correcta del algoritmo con un tiempo de convergencia apropiado y una menor oscilación, suficientes para los experimentos llevados a cabo en este trabajo.

5.4.2. Resultados en lazo cerrado con perturbación en R_s

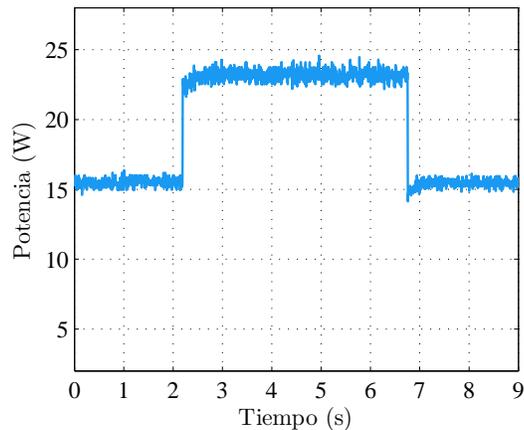


Figura 5.19: Potencia medida al aplicar una perturbación en R_s .

De manera similar a la metodología empleada en la Sección 5.4.1, se realizó el experimento correspondiente al esquema de la Figura 4.8 utilizando los parámetros de la Tabla 4.3. La perturbación en la resistencia R_s es realizada colocando una resistencia $R = 10 \Omega$ en paralelo con la resistencia de entrada $R_s = 5 \Omega$ resultando una nueva $R_s = 3.3 \Omega$.

Los resultados correspondientes a la potencia medida para las dos condiciones de operación, determinadas por el cambio en el valor de la resistencia de entrada R_s , se presentan en la Figura 5.19. Dichos resultados muestran el valor de la potencia máxima extraída. En la Figura 4.9 se observa la gráfica de potencia correspondiente a las mismas condiciones de operación obtenidas mediante simulación.

El ciclo de trabajo óptimo medido, calculado por el algoritmo P&O para cada estado de operación, es mostrado en la Figura 5.20. Los resultados de simulación de esta configuración se expusieron previamente en la Figura 4.10. Los valores calculados y los obtenidos de forma experimental, corresponden a los valores estimados tales que hacen que la impedancia Z_{in} del convertidor boost sea igual a la resistencia de entrada R_s obteniendo como consecuencia la máxima transferencia de potencia.

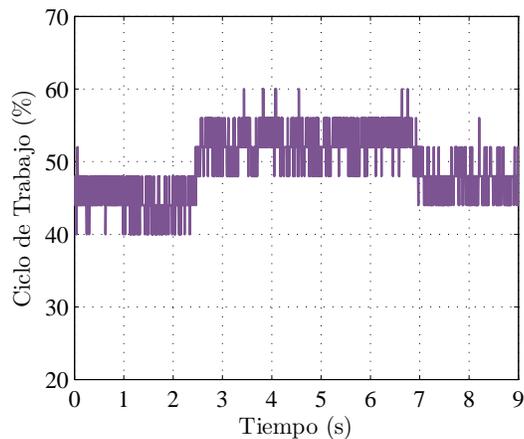


Figura 5.20: Ciclo de trabajo medido al aplicar una perturbación en R_s .

5.5. CONCLUSIONES

En este capítulo se describió el desarrollo de los prototipos experimentales implementados para la obtención de los resultados experimentales correspondientes al sistema MPPT. La realización de los prototipos se llevó a cabo con base en lo expuesto en el Capítulo 3 tomando en cuenta los criterios seleccionados para el diseño del convertidor de potencia y de los parámetros del algoritmo P&O.

Los experimentos llevados a cabo se efectuaron haciendo uso de la configuración planteada en la Sección 3.5. La comprobación del funcionamiento del sistema implementado en lazo abierto permitió confirmar la necesidad de la utilización de un sistema MPPT.

Los resultados experimentales expuestos en este capítulo presentaron correspondencia con el análisis teórico. Además, los resultados de simulación presentados en el Capítulo 4 mostraron una gran similitud con los obtenidos mediante la implementación experimental.

Es posible concluir que el algoritmo P&O implementado en este trabajo, es capaz de establecer de forma automática el ciclo de trabajo óptimo correspondiente a la extracción de máxima potencia. Además, es importante mencionar que el algoritmo en cuestión es capaz de localizar y seguir el MPP incluso ante perturbaciones en el sistema.

Capítulo

6

Conclusiones Generales y Trabajos Futuros

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas del desarrollo del presente trabajo investigación. Además, se expresan algunas recomendaciones para trabajos futuros.

6.1. CONCLUSIONES GENERALES

En el presente trabajo se abordó la problemática relacionada con el aprovechamiento de la energía extraída de los sistemas de generación PV. Se realizó el diseño e implementación de un sistema MPPT con la finalidad de conseguir la máxima transferencia de potencia.

La utilización de una carga electrónica como herramienta para la caracterización de un panel PV, permitió determinar sus principales parámetros eléctricos bajo condiciones típicas de operación en exterior. La curva de potencia-voltaje obtenida, contribuyó a la selección de los parámetros de diseño del algoritmo P&O.

Se presentó el diseño de una nueva topología de un convertidor de potencia con características de alta ganancia. El análisis de los resultados de simulación del sistema PV con MPPT utilizando dicho convertidor, mostró considerables ventajas en comparación con el convertidor boost convencional, entre ellas: el establecimiento de un valor menor del ciclo de trabajo durante la operación en el MPP y un menor contenido de oscilaciones en la potencia generada.

La validación vía simulación del sistema PV con MPPT tanto con el convertidor boost como con el convertidor boost de alta ganancia, corroboró el funcionamiento del algoritmo P&O ante perturbaciones en la irradiancia incidente.

Se implementó el controlador MPPT en el microcontrolador ATmega 328P. Dicho controlador comprende: la adquisición de las señales analógicas de voltaje y corriente, así como su conversión a valores digitales, el algoritmo P&O y la modulación PWM.

La implementación de la configuración propuesta en lazo cerrado proporcionó resultados experimentales que determinan la correcta operación del algoritmo P&O para la extracción de la máxima potencia.

Los resultados experimentales corroboraron que los parámetros del diseño del algoritmo P&O influyen directamente en el seguimiento adecuado del MPP. La frecuencia de la perturbación F_p es inversamente proporcional al tiempo de convergencia en el MPP. Además, la oscilación presente en la potencia extraída de la fuente de energía es directamente proporcional al tamaño de la perturbación Δ_D .

La presente propuesta puede ayudar a incrementar la eficiencia en un sistema PV contribuyendo con el desarrollo de tecnología que aumente el aprovechamiento de las energías renovables disponibles en el planeta.

6.2. CONTRIBUCIONES

- Diseño e implementación de una carga electrónica que permite obtener la curva característica de un panel PV genérico.
- Diseño de un convertidor de potencia con características especiales de alta ganancia apropiado para aplicaciones de sistemas PV con MPPT.
- Simulación del sistema PV con MPPT utilizando el convertidor boost convencional y el convertidor boost de alta ganancia.
- Implementación del algoritmo P&O en el microcontrolador ATmega 328P.
- Prototipo experimental del sistema MPPT: sistema de adquisición de datos, algoritmo MPPT, generador PWM y convertidor Boost.

6.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se proporcionan las siguientes recomendaciones en relación a los resultados expuestos en este trabajo de investigación:

- La implementación en una plataforma digital del sistema de adquisición de señales correspondiente a la obtención de la curva característica del panel PV. Asimismo, se sugiere el uso de algún protocolo de comunicación como el serial, para generar una interfaz gráfica en un equipo de cómputo suprimiendo la necesidad de utilizar un instrumento de medición especializado.
- La implementación del sistema PV con MPPT con un convertidor de potencia con características de rizo de corriente de entrada reducido.
- La utilización de un dispositivo programable con características sofisticadas que permita la ejecución del algoritmo a una mayor velocidad.
- La optimización del algoritmo P&O tomando en cuenta los inconvenientes causados por el efecto de sombreado parcial en sistemas PV.
- Análisis del sistema utilizando un arreglo de paneles PV y considerando el efecto de sombreado parcial.

6.4. ACTIVIDADES REALIZADAS EN LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

- Asistencia a la Reunión General de la Red de Sistemas Eléctricos de Potencia y Redes Inteligentes - CONACYT y Escuela de Verano de Potencia 2017. 4-6 Octubre de 2017, Zacatecas, Zac., México.
- Apoyo en el proyecto TecNM “Aplicaciones de las nuevas tecnologías de control y manejo de energías basadas en convertidores modulares multiniveles”, 2017 bajo el registro 6060.17-P.
- Participación como ponente en la XIX Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación, ROPEC 2017. 8-10 Noviembre de 2017, Ixtapa, Gro., México.

- Asistencia al evento Expo Enertam Internacional 11-13 Abril de 2018, Tampico, Tam., México.
- Apoyo en el proyecto TecNM “Implementación de convertidores de potencia para el control y manejo de una red inteligente a pequeña escala con fuentes renovables”, 2018 bajo el registro 6689.18-P.

6.5. PUBLICACIONES

- P. M. García-Vite, **M. del Rosario Rivera-Espinosa**, R. Castillo-Gutiérrez, A. González-Rodríguez y F. Hernández-Angel, “A High Step-Up Power Converter with Reduced Input Current Ripple for PV Applications”, *2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, artículo aceptado.
- **M. del Rosario Rivera-Espinosa**, P. M. García-Vite, Yadira Salazar González, I. Guadalupe Bautista Amador y J. José Sánchez Palomo, “Carga electrónica para la obtención experimental de curvas características de paneles solares”, *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2018*, artículo aceptado.
- P. M. García-Vite, **M. del Rosario Rivera-Espinosa**, A. Y. Alejandre-López, R. Castillo-Gutiérrez, A. González-Rodríguez y F. Hernández-Angel, “Analysis and implementation of a step-up power converter with input current ripple cancelation”, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, Mar 2018, pp. 1338-1357.
- A. Y. Alejandre-López, P. M. Garcia-Vite, **M. del Rosario Rivera-Espinosa**, R. Castillo-Gutiérrez, R. Salas-Cabrera y J. E. Pedraza-Barrón, “Esquema de Regulación de Voltaje en los Submódulos de un Inversor Modular Multinivel”, *XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2018*, Mar 2018.
- J. E. Pedraza-Barrón, P. M. García-Vite, C. G. Torres-Orozco, **M. del Rosario Rivera-Espinosa** y A. Y. Alejandre-López, “Estructura de comunicación de datos para el control

de un Convertidor Modular Multinivel”, *Transversalidad Científica Y Tecnológica Mex*, Ene-Jun 2018, pp. 168-174.

- **M. del Rosario Rivera-Espinosa**, A. Y. Alejandre-López, J. E. Pedraza-Barrón, P. M. García-Vite, y H. R. Robles-Campos, “A high step-up DC-DC converter with MPPT for PV application”, *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Nov 2017, pp. 1-6.
- P. M. Garcia-Vite, J. E. Valdez-Resendiz, J. C. Mayo-Maldonado, J. C. Rosas-Caro, **M. del Rosario Rivera-Espinosa** y A. Valderrabano-Gonzalez, “Quadratic gain converter with output voltage ripple mitigation”, *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Oct 2017, pp. 2253-2259.

Bibliografía

- [1] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, July 2005. 2, 16
- [2] B. Subudhi and R. Pradhan, “A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 89–98, Jan 2013. 2, 13
- [3] A. H. E. Khateb, N. A. Rahim, J. Selvaraj, and B. W. Williams, “DC-to-DC Converter With Low Input Current Ripple for Maximum Photovoltaic Power Extraction,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 4, pp. 2246–2256, April 2015. 4
- [4] M. Malinowski, J. I. Leon, and H. Abu-Rub, “Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2132–2146, Nov 2017. 7
- [5] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley, 2003. 7, 14
- [6] O. Perpiñán, *Energía Solar Fotovoltaica*, 2015. [Online]. Available: <http://oscarperpinan.github.io/esf/> 7, 8, 9
- [7] S. Pukhrem, “A photovoltaic panel model in matlab/simulink,” *11th students science conference : Bedlewo*, pp. 115 – 120, Oct 2013. 8, 26, 45

-
- [8] A. A. Elbaset, H. Ali, M. A.-E. Sattar, and M. Khaled, "Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 551–560, 2016. 11, 19
- [9] R. C. D. y James A. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits*, 9th ed. Wiley, 2010. 12
- [10] C. K. A. y Matthew N. O. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*, 3rd ed. Mc Graw Hill, 2006. 12
- [11] M. Balato, L. Costanzo, and M. Vitelli, *Maximum Power Point Tracking Techniques*. Webster (Ed.), 2016, pp. 1–26. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/047134608X.W8299> 13, 14, 18
- [12] M. F. N. Tajuddin, M. S. Arif, S. M. Ayob, and Z. Salam, "Perturbative methods for maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic (PV) systems: a review," *International Journal of Energy Research*, vol. 39, no. 9, pp. 1153–1178, 2015. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3289> 13, 18
- [13] M. A. G. de Brito, L. Galotto, L. P. Sampaio, G. d. A. e Melo, and C. A. Canesin, "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1156–1167, March 2013. 13
- [14] W. Xiao, N. Ozog, and W. G. Dunford, "Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 3, pp. 1696–1704, June 2007. 14
- [15] J. Kivimäki, S. Kolesnik, M. Sitbon, T. Suntio, and A. Kuperman, "Design Guidelines for Multiloop Perturbative Maximum Power Point Tracking Algorithms," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1284–1293, Feb 2018. 19
- [16] Y.-T. Hsiao and C.-H. Chen, "Maximum power tracking for photovoltaic power system," in *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, vol. 2, Oct 2002, pp. 1035–1040 vol.2. 19

- [17] W. X. y W. G. Dunford, "A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems," in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, vol. 3, June 2004, pp. 1957–1963 Vol.3. 20
- [18] T. M. U. y. W. P. R. Ned Mohan, *Electrónica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*, 3rd ed. Mc Graw Hill, 2009. 21
- [19] M. del Rosario Rivera-Espinosa, A. Y. Alexandre-López, J. E. Pedraza-Barrón, P. M. García-Vite, and H. R. Robles-Campos, "A high step-up DC-DC converter with MPPT for PV application," in *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Nov 2017, pp. 1–6. 21, 22, 56
- [20] E. D. Aranda, J. A. G. Galan, M. S. de Cardona, and J. M. A. Marquez, "Measuring the I-V curve of PV generators," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 4–14, Sept 2009. 22
- [21] R. I. Putri, M. Pujiantara, A. Priyadi, T. Ise, and M. H. Purnomo, "Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application," *IET Electric Power Applications*, vol. 12, no. 4, pp. 455–462, 2018. 26
- [22] A. Harrag and S. Messalti, "Variable Step Size IC MPPT Controller for PEMFC Power System Improving Static and Dynamic Performances," *Fuel Cells*, vol. 17, no. 6, pp. 816–824. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fuce.201700047> 26
- [23] A. Khaligh and S. Dusmez, *Solar Energy Harvesting: Power Electronics Interfaces and Control*. American Cancer Society, 2013, pp. 1–40. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/047134608X.W8128> 30
- [24] R. Ayop and C. W. Tan, "Design of boost converter based on maximum power point resistance for photovoltaic applications," *Solar Energy*, vol. 160, pp. 322

– 335, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17310885> 32, 41

[25] D. W. Hart, *Electrónica de Potencia*, 3rd ed. Prentice Hall, 2001. 32