

Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas
MPPT para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*

PAOLA ANDREA ESPAÑA MARTÍNEZ

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2020

Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*

PAOLA ANDREA ESPAÑA MARTÍNEZ

Informe final de trabajo de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Electrónico

Asesor

Mg. Edison Escobar

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2020

Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la universidad CESMAG para optar por el título de ingeniero electrónico.

Mg. Edison Escobar

Mg. Francisco Eraso Checa

Ing. Miller Ruales

San Juan de Pasto, septiembre 2020

Nota de exclusión

El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusiva responsabilidad del autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG

Dedicatoria

Dedico mi tesis a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.

A mis padres, por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.

“Las mujeres deben perder el miedo a materias específicas como las matemáticas y confiar en que se pueden desempeñar de manera exitosa en las diversas áreas de la ingeniería.”

Adriana Ortiz Ortega

Agradecimientos

Agradezco a Dios por mi familia, especialmente a mis padres, les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante.

Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino.

A mis abuelos, por su presencia, cariño e incontables oraciones, gracias por ser mi pilar en los momentos difíciles.

Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

A mi tutor de tesis y demás profesores que estuvieron presentes en todo este proceso, cuya experiencia, paciencia y apoyo constante fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Su guía no solo me proporcionó claridad académica, sino también motivación en momentos de duda.

Su confianza en mí me impulsó a seguir adelante y superar los desafíos.

Finalmente agradezco a mis amigos, gracias por su compañía y apoyo en los momentos de estrés y alegría.

Ustedes fueron mi red de contención y su amistad me ayudó a mantener el ánimo en los momentos más duros.

Cada uno de ustedes contribuyó a que este proceso fuera más llevadero y significativo.

Contenido

	Pág.
Introducción	19
1. El problema de investigación.....	21
1.1 Objeto o Tema de Investigación.....	21
1.2 Línea de Investigación	21
1.3 Sub Línea de Investigación	21
1.4 Planteamiento o Descripción del Problema	21
1.5 Formulación del Problema	22
1.6 Objetivos	23
1.6.1 Objetivo General	23
1.6.2 Objetivos Específicos.....	23
1.7 Justificación.....	23
1.8 Delimitación	24
2. Tópicos del marco teórico.....	25
2.1 Antecedentes	25
2.1.1 Convertidor de entradas múltiples con función <i>MPPT</i> para energía eólica-fotovoltaica	25
2.1.2 Comparación de lógica difusa y red neuronal en rastreador de punto de máxima potencia para sistemas fotovoltaicos.....	26
2.1.3 Comparación energética de siete técnicas <i>MPPT</i> para sistemas fotovoltaicos.	27
2.1.4 Análisis dinámico y control de convertidores de refuerzo DC-DC utilizados en PV independiente.....	27
2.1.5 Una investigación comparativa de los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia para el sistema fotovoltaico solar.	29

2.1.6	Modelado y simulación basada en eventos de un sistema fotovoltaico controlado con dos configuraciones de perturbación y observación del seguimiento del punto de máxima potencia.	30
2.2	Enunciados de los supuestos teóricos.....	31
2.2.1	Estación Davis	31
2.2.2	Duty cycle.....	32
2.2.3	Control por PWM.....	33
2.2.4	Convertidor BOOST DC-DC	33
2.2.5	Radiación Solar	34
2.2.6	Temperatura.....	35
2.2.7	Técnicas <i>MPPT</i>	36
2.2.8	Tiempo continuo o discreto	40
2.2.9	<i>ODE</i> Ecuaciones diferenciales ordinarias	41
2.2.10	Trapz.....	41
2.3	Definición de conceptos	41
2.3.1	Definición nominal de conceptos	41
2.3.2	Definición operativa de conceptos	42
2.4	Hipótesis.....	42
2.4.1	Hipótesis de investigación.....	42
2.4.2	Hipótesis nula	42
2.4.3	Hipótesis alternativa	42
3.	Metodología	43
3.1	Enfoque	43
3.2	Paradigma.....	43
3.3	Método	43
3.4	Tipo de investigación	43

3.5	Diseño de investigación	44
3.6	Universo	44
3.7	Muestra.....	45
3.8	Técnicas de recolección de información.....	45
3.8.1	Validez de la técnica.....	45
3.8.2	Confiabilidad técnica.....	45
3.9	Instrumentos de recolección de la información.....	45
4.	Resultados	46
4.1	Simulación de las técnicas <i>MPPT</i>	46
4.1.1	Implementación sistema fotovoltaico con convertidor <i>BOOST</i> y controlador con adaptación de múltiples técnicas <i>MPPT</i>	46
4.1.2	Tiempos de simulación.....	49
4.2	Simulaciones de técnicas <i>MPPT</i> con valores de referencia	51
4.2.1	Implementación técnica perturbar y observar (<i>P&O</i>) con valores de referencia 51	
4.2.2	Implementación técnica conductancia incremental (<i>INC</i>) con valores de referencia 58	
4.2.3	Implementación técnica lógica difusa (<i>FUZZY</i>) con valores de referencia ..	64
4.3	Potencia disipada por el convertidor <i>BOOST</i> con los valores de referencia.....	76
4.4	Controlador con adaptación de múltiples técnicas <i>MPPT</i>	78
4.4.1	Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico con controlador de múltiples técnicas <i>MPPT</i>	78
4.4.2	Diagrama de flujo del controlador con múltiples técnicas <i>MPPT</i>	79
4.4.3	Código script controlador de múltiples técnicas <i>MPPT</i>	81
4.4.4	Explicación del código del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT	82

4.5 Simulación del sistema fotovoltaico con el controlador de múltiples técnicas <i>MPPT</i> con valores de reales de la estación <i>DAVIS</i> por meses.....	84
5. Análisis de resultados	87
5.1 Potencia disipada por el convertidor <i>BOOST</i> en cada <i>step</i>	87
5.2 Evaluación de tiempos	87
5.2.1 Tiempo de asentamiento.....	87
5.2.2 Tiempo real de simulación	88
5.3 Datos de energía entregados por el controlador con adaptación de múltiples técnicas <i>MPPT</i> expresados en kWh.....	88
5.4 Ganancia de eficiencia del control respecto a cada técnica	91
Conclusiones	92
Recomendaciones.....	94
Referencias.....	95

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de bloques para representar la configuración del MIC propuesto	25
Figura 2. Configuración del sistema	26
Figura 3. Voltaje de salida de conversor BOOST para el primer escenario	28
Figura 4. Salida de voltaje del convertidor BOOST y corriente del arreglo fotovoltaico para el segundo escenario	28
Figura 5. Diagrama esquemático de varios métodos MPPT asistidos sistema PV	30
Figura 6. Sistema de control PV	31
Figura 7. Convertidor BOOST DC-DC	33
Figura 8. Curva efecto de la irradiancia.	35
Figura 9. Comportamiento temperatura panel solar.....	35
Figura 10. Diagrama de flujo P&O MPPT convencional.	37
Figura 11. Diagrama de flujo INC	38
Figura 12. Diagrama de bloques básico del controlador lógico Fuzzy	39
Figura 13. Diagrama sistema fotovoltaico con MPPT	46
Figura 14. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 300W/m ²	47
Figura 15. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 600W/m ²	47
Figura 16. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 1000W/m ²	47
Figura 17. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas P&O	52
Figura 18. Código bloques P&O	53
Figura 19. FNC, código script P&O	53
Figura 20. Comportamiento del duty para P&O	54
Figura 21. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m ² 600w/m ² 1000w/m ² en P&O	55
Figura 22. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia para P&O.....	56
Figura 23. Comportamiento de potencia para 300w/m ² y 600w/m ² con P&O	57
Figura 24. Comportamiento de potencia para 1000w/m ² con P&O.....	58
Figura 25. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas INC.....	59

Figura 26. Código de bloques INC	59
Figura 27. FNC, código script INC	60
Figura 28. Comportamiento del duty para INC	60
Figura 29. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m ² 600w/m ² 1000w/m ² en INC	61
Figura 30. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia con INC	62
Figura 31. Comportamiento de potencia para 300w/m ² y 600w/m ² con INC	63
Figura 32. Comportamiento de potencia para 1000w/m ² con INC	63
Figura 33. Codificación en bloques de INC	64
Figura 34. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas FUZZY	65
Figura 35. Fuzzy Logic Toolbox-Simulink Matlab	65
Figura 36. Entrada de cambio de Fuzzy en voltaje	67
Figura 37. Entrada de cambio de Fuzzy en potencia	68
Figura 38. Salida del FLC como cambio en el ciclo de trabajo	68
Figura 39. Vista de la superficie de las funciones de membresía - entrada vs la salida ...	70
Figura 40. Modelo de controlador lógico difuso	70
Figura 41. Comportamiento del duty para FUZZY	71
Figura 42. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m ² 600w/m ² 1000w/m ² en FUZZY	72
Figura 43. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia con FUZZY	73
Figura 44. Comportamiento de potencia para 300w/m ² y 600w/m ² con FUZZY	74
Figura 45. Comportamiento de potencia para 1000w/m ² con FUZZY	74
Figura 46. Bloque de medición para la potencia disipada por el convertidor BOOST.....	76
Figura 47. Comportamiento de curva de potencia disipada	77
Figura 48. Diagrama de bloques controlador con múltiples técnicas MPPT	78
Figura 49. Diagrama de flujo controlador con múltiples técnicas MPPT	80
Figura 50. Tabla de potencia y sistema entregada por el código	83
Figura 51. Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT, mes de enero	85
Figura 52. Energía (kWh) anual por técnica y mes	90
Figura 53. Energía (kWh) anual total	91

Lista de tablas

Tabla 1. Especificaciones panel Jinko Solar JKM310M-72	46
Tabla 2. Valores del convertidor BOOST.....	48
<i>Tabla 3. Valores para simulaciones</i>	<i>50</i>
Tabla 4. Tiempo de asentamiento para cada step de la técnica P&O	55
Tabla 5. Tiempo de asentamiento para cada Step de la técnica INC	62
Tabla 6.Especificación de entradas y salida del controlador Fuzzy con sus variables lingüísticas	66
Tabla 7. Límites de las funciones de membresía	67
Tabla 8. Tabla de reglas, relación entre variables de entrada y salida	69
Tabla 9. Tiempo de asentamiento para cada Step de la técnica FUZZY	72
Tabla 10. Valores de potencia disipada por step.....	77
Tabla 11. Información de los datos de enero a diciembre.....	84
Tabla 12. Energía (W.s) por mes entregada por cada técnica y por el controlador de enero a diciembre.....	86
Tabla 13. Compilación de tiempos de asentamiento por técnica y por step	87
Tabla 14. Compilado tiempo real de simulación por técnica.....	88
Tabla 15. Tabla anual de kWh por meses, técnica y control.....	89
Tabla 16. Energía (kWh) anual de cada técnica y del control	90
Tabla 17. Ganancia en eficiencia anual del controlador respecto a cada técnica	91

Glosario

AC: Corriente alterna

Convertidor tipo BOOST: Circuito elevador de tensión

Convertidor tipo BUCK-BOOST: Circuito reductor-Elevador

DAE: Ecuaciones algebraicas diferenciales

DC-AC: Corriente directa a corriente alterna

DC-DC: Corriente directa a corriente directa

dP: Variación de potencia

DUTY: Ciclo de trabajo

FLC o FUZZY: Técnica de lógica difusa

FNCE: Fuentes no Convencionales de Energía

GEI: Gases de Efecto Invernadero

I: Corriente unidades amperios

IA: Inteligencia artificial

IF- THEN: Estructura de control condicional

INC: Conductancia incremental

Índice THSW: Temperatura, humedad, sol y viento

Irradiancia: La irradiancia es la magnitud que permite medir qué cantidad de radiación solar incide sobre una determinada superficie y durante un determinado tiempo, sus unidades son w/m^2 :

ISS: Conjunto de sensores integrado

kWh: Kilowatt-hora

LC: Elementos de bobina y condensador

MatLab: Abreviatura de MATrix LABoratory (Laboratorio de matrices). Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

MIC: Module Integrated Converter

Mosfet: Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor

MPP: Máximo punto de potencia

MPPT: Maximum Power Point Tracking (Técnicas para el seguimiento del máximo punto de potencia)

ODE: Ecuaciones diferenciales ordinarias

OFF GRID: Fuera de la red

OMM: Organización Meteorológica Mundial

P&O: Técnica perturbar y observar

P: Potencia, unidades watts

PM: Phase Modulation, (Modulación de fase)

PV o FV: Photovoltaic system (Sistema fotovoltaico)

PWM: Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulsos)

RAM: Random Access Memory (memoria de acceso aleatorio)

RG X O: (Diseño de investigación), experimento puro

Sample time: (Tiempo de muestreo), se refiere a la velocidad a la que un sistema muestrea sus entradas.

SIMULINK: Entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab.

SIN: Sistema Interconectado Nacional

Step: Escalón

Técnica CVC: Controlador de voltaje constante

Temperatura: Magnitud física, unidades, grados centígrados °C

TRAPZ: Método trapezoidal de Matlab

V: Voltaje unidades voltios

Vmpp: Valor del voltaje cuando el control alcanza el máximo punto de potencia

Workspace: Espacio de trabajo en MatLab

ZNI: Zonas no Interconectadas

Resumen Analítico del estudio

Código:

Programa académico: Ingeniería electrónica

Fecha de elaboración: septiembre 2020

Autor: Paola Andrea España Martínez

Asesor: Mg. Edison Escobar

Título completo de la investigación: Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para un sistema fotovoltaico OFF GRID.

Palabras claves: Técnicas MPPT, sistemas fotovoltaicos, Matlab-Simulink.

Descripción: En el presente informe final...con los datos obtenidos por el grupo de investigación rampa de la universidad CESMAG.

Contenido: La investigación consta de cinco capítulos, divididos de la siguiente manera:

Capítulo uno, en éste se encuentra el problema de investigación en el cual se puede evidenciar el para qué y por qué se realizó esta investigación, los objetivos y la delimitación de la misma.

En el segundo capítulo se encuentra el marco teórico el cual en primera instancia presenta los antecedentes, los cuales evidencian varios trabajos y estudios ya efectuados, que tienen relación con el tema de investigación; seguido a esto, aparecen los supuestos teóricos que contiene las definiciones y conceptos que soportan la realización del proyecto, por último, se enseña la definición nominal y operativa de las variables y respectivas hipótesis planteadas.

En el tercer capítulo se encuentra la metodología de la investigación en donde se indica lo realizado para confirmar la hipótesis de investigación, aquí se detalla el enfoque, paradigma, método, tipo y diseño de investigación, universo y muestra. Por otra parte, las técnicas e instrumentos de recolección de información, con validez y confiabilidad.

En el cuarto capítulo se encuentran los resultados de la investigación, aquí se muestra el cumplimiento de los objetivos propuestos mediante descripciones detalladas de lo realizado. En el primer apartado se evidencia la implementación genérica del sistema fotovoltaico con el convertidor *BOOST* y el controlador de múltiples técnicas *MPPT*, en el segundo apartado se especifica cada técnica con sus respectivas gráficas y tablas. En el tercer apartado se encuentra la potencia disipada por el convertidor, en el cuarto está el controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*, y por último se encuentra el funcionamiento del controlador, por cada mes, durante un año.

En el quinto capítulo se encuentra el análisis de los resultados, donde se explica con claridad todos los resultados obtenidos en el proceso de investigación y se dan a conocer los datos para el cumplimiento de la hipótesis de investigación.

Metodología: Para demostrar la hipótesis de investigación, se realizó el presente estudio desde el paradigma positivista, puesto que su finalidad es explicar, predecir o controlar fenómenos, con un enfoque cuantitativo, ya que las variables asociadas al objeto de investigación fueron valoradas numéricamente, por ende, los resultados obtenidos permitieron determinar la eficiencia del sistema presentado porcentualmente, utilizando además, un diseño (*RG X O*) que se define como experimento puro, ya que se comparó la eficiencia de un convertidor *BOOST* con controlador de adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID* y un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*.

Área de investigación: Potencia y energía.

Línea de investigación: Energías alternativas.

Introducción

Actualmente, se está fomentando el uso de energías renovables y en especial, la energía solar fotovoltaica que se caracteriza por ser una fuente de energía limpia, renovable y con bajo impacto ambiental (De Juana, y otros, 2008). En Colombia, uno de los objetivos del gobierno en términos energéticos, es promover el desarrollo y la utilización de las Fuentes no Convencionales de Energía (FNCE), tales como la solar y la eólica, para su integración en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y su participación en las Zonas no Interconectadas (ZNI). En estas, la mejor solución sin lugar a duda es el uso de sistemas fotovoltaicos autónomos que tienen el objetivo de proveer de energía a las familias que actualmente carecen de la misma. En todo el territorio nacional se habla de aproximadamente 500.000 familias sin acceso a la energía eléctrica y la solución es el uso de combustibles fósiles, es decir plantas de generación diésel o gasolina que producen malos olores, ruidos, riesgos de explosión, entre otros (Duarte, 2020).

Dicho lo anterior, es importante resaltar que, en Colombia, se encuentra vigente la ley 1715 del 2014, la cual, tiene como finalidad, establecer el marco legal y los instrumentos para el aprovechamiento de las FNCE principalmente las de carácter renovable como la solar y la eólica.

Los sistemas fotovoltaicos cuentan con un convertidor ya sea DC-DC o DC-AC (Industriales, s.f.). Los convertidores son elementos capaces de alterar la tensión y características de la corriente eléctrica que reciben, transformándola de manera que resulte más apta para los usos específicos a que vaya destinada en cada caso.

En otras investigaciones se han desarrollado controladores para obtener la máxima potencia proveniente de los paneles solares por medio de un convertidor electrónico que efectúa una estrategia de control a fin de lograr el seguimiento del punto de máxima potencia *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) (Gupta, Chauhan, & Pachauri, 2016). En los convertidores comerciales, se observa que algunos presentan un sólo algoritmo de *MPPT*.

En este sentido, en la presente investigación se realizó un controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas para un sistema fotovoltaico *OFF-GRID*, con lo que se mejoró la eficiencia de la potencia entregada por este. Resaltando, que es un sistema que le apuesta a la energía verde.

El proceso que se llevó a cabo fue simular las técnicas por separado, para entender su funcionamiento y el comportamiento de la potencia entregada por cada una de estas. Se puso a prueba con valores ideales de irradiancia divididos en 3 *steps* así, 300W/m², 600W/m², 1000W/m² y una temperatura constante de 25 °C, se verificó que cada una de estas técnicas esté siguiendo el *MPP*, para comprobar esto, se tuvo en cuenta la potencia entregada en cada uno de los *steps* de cada técnica y se los comparó con los valores entregados por el módulo Jinko Solar JKM310M-72 en condiciones óptimas dadas por el fabricante. Cuando se comprobó cada una de estas, se ingresaron los valores reales tomados por la estación *DAVIS* de la universidad CESMAG y al final se compararon con la potencia obtenida por el controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*.

El controlador selector se simuló en un código script, en el que se le ingresan los vectores de potencia entregada de cada una de las técnicas simuladas y este tiene el criterio de selección necesario para saber que técnica utilizar en cada instante de tiempo, según los valores de potencia entregada y el tiempo de simulación de cada una.

Finalmente, se hace necesario mencionar, que con el presente estudio se muestra al usuario que con dicho control la potencia entregada es mayor al 14,9% por lo tanto, la relación costo beneficio es proporcional.

1. El problema de investigación

1.1 Objeto o Tema de Investigación

Controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*.

1.2 Línea de Investigación

Potencia y energía: El área de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Institución Universitaria CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015).

1.3 Sub Línea de Investigación

Energías alternativas: Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015).

1.4 Planteamiento o Descripción del Problema

Los sistemas fotovoltaicos son los generadores de energía eléctrica, obtenida a partir de la radiación solar por medio de paneles solares, pero estos sistemas presentan algunas desventajas, una de ellas es la inestabilidad en cuanto a condiciones de localización, tiempo, estación o clima, por lo cual, frente al cambio de estas variables, conduce a que un porcentaje

de su eficiencia energética se pierda (Bounechba, Bouzid, Snani, & Lashab, 2016). Por lo tanto, para incrementar este nivel de eficiencia, se han propuesto diversas técnicas para seguir su punto máximo de potencia, como se lo puede ver en la investigación de (Gupta, Chauhan, & Pachauri, 2016) en la que siguen el *MPP* (máximo punto de potencia) de la técnica perturbar y observar (*P&O*).

Generalmente, el esquema de un sistema fotovoltaico aislado, (*PV system – photovoltaic system*), se encuentra compuesto por un arreglo de paneles solares, un convertidor, un arreglo de baterías y un inversor (Gomes de Brito, Galotto, Sampaio, Azevedo, & Canesin, 2011). En este tipo de sistema, el convertidor cumple la función de aprovechar la máxima potencia suministrada por los paneles solares a través de técnicas *MPPT*, dependiendo de la variación de variables externas, como lo son la irradiancia y la temperatura (Ahmad, Rashid, Ferdowsy, Islam, & Hassan, 2015) para alimentar unas cargas en particular.

Por lo anterior, en este proyecto se desarrolló un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* el cual envía un pulso de control al convertidor, y se obtuvo el punto máximo de potencia en un sistema fotovoltaico *OFF GRID*, pero se desconocía la eficiencia de dicho controlador, para esto fue necesario saber cómo reaccionaron las técnicas *MPPT* en cuanto a la fluctuación de irradiancia y temperatura teniendo en cuenta la potencia entregada por cada uno de estos y así se evaluó la eficiencia del controlador al alcanzar el punto máximo de potencia.

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál es la eficiencia de un controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas para un sistema fotovoltaico *OFF GRID* con respecto a un sistema fotovoltaico con un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Analizar la eficiencia de un controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*, con respecto a un sistema fotovoltaico con un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*.

1.6.2 Objetivos Específicos.

- Simular las técnicas *MPPT* tales como *P&O*, *INC*, *FUZZY*, con un convertidor *BOOST* en un sistema fotovoltaico.

- Analizar el rendimiento de las técnicas *MPPT* existentes para controladores de sistemas fotovoltaicos mediante simulación.

- Simular un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para alcanzar el máximo punto de potencia y así la señal más óptima entre las tres técnicas sea enviada al convertidor *BOOST*.

- Evaluar la eficiencia del controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas con adaptación de múltiples técnicas en un convertidor *BOOST*, frente a los convertidores *BOOST* con una sola *MPPT*.

1.7 Justificación

Los sistemas fotovoltaicos permiten obtener energía eléctrica a partir de la radiación que emite el sol (Pierce, 2002), a través de paneles solares, produciendo energía eléctrica amigable con el medio ambiente y de bajos costos de operación y mantenimiento (Galeano, 2014).

La generación de energía eléctrica a partir de estos sistemas aportan múltiples beneficios, tales como, mitigar el uso de combustibles fósiles, reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), aprovechar los recursos renovables autóctonos, generar empleo y desarrollo científico – tecnológico, hace que se visualice un desarrollo económico importante en el País (Castillo, Castrillón, Vanegas, Valencia, & Villicaña, 2015), lo que se potenciará con este proyecto de investigación.

En este trabajo se propuso una mejora en el convertidor *BOOST*, con ayuda del controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para alcanzar el máximo punto de potencia y estabilizarlo el mayor tiempo posible, haciendo sustentable una carga sin necesidad de la red eléctrica comercial.

Los resultados de este proyecto permitieron conocer cuáles de estas técnicas *MPPT* tiene un mayor rendimiento para alcanzar el punto máximo de potencia de los paneles solares y establecer los parámetros de funcionamiento de cada una de estas técnicas, para que el controlador sepa cuál de estas conmutar según vea adecuado y en este sentido, se evaluó la eficiencia de este controlador respecto a las variables de entrada como lo son la temperatura y la irradiancia.

De esta forma, se fortalece la participación en el sector de energías renovables y la implementación de proyectos de este tipo en la ciudad de Pasto, teniendo en cuenta que, con el buen funcionamiento de la simulación de este controlador, permitirá desarrollar el algoritmo pertinente y aplicarlo con las mejores prestaciones.

1.8 Delimitación

En la investigación, dentro de las topologías de convertidores DC-DC existentes, se eligió la del convertidor *BOOST* por su fácil funcionamiento y eficiencia. En cuanto a las técnicas *MPPT*, en un inicio se implementaron métodos convencionales como el método de Perturbar y Observar y el método de Conductancia Incremental. En una segunda fase, se implementó el método basado en inteligencia artificial como lo es el método basado en lógica difusa, el cual permitió realizar su comparación con algunos métodos implementados en los controladores comúnmente usados por la comunidad científica y el medio comercial. Para evaluar el comportamiento de las técnicas de *MPPT* se tuvo en cuenta las variables de entrada como son irradiancia y la temperatura además de la de salida que es la potencia.

2. Tópicos del marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Convertidor de entradas múltiples con función *MPPT* para energía eólica-fotovoltaica

En este artículo realizado por (Shen & Yang, 2013), se propone un convertidor galvánico aislado de múltiples entradas para tratar la energía de la turbina eólica y la energía solar, para extraer la máxima potencia de la turbina eólica y el panel fotovoltaico, el método que se adopta para lograr la función de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) es perturbar y observar. El convertidor DC-DC (*Buck-boost*) integra dos convertidores directos y solo usa un inductor de salida. Por lo tanto, la estructura de los convertidores en módulos integrados (*MIC*, del inglés *Module Integrated Converter*) propuesto puede reducir el volumen del convertidor. Además, el *MIC* puede operar en modo intercalado que la ondulación de la corriente de salida se suprime significativamente, la energía almacenada en el inductor de fuga puede reciclarse, lo que mejora la eficiencia. En este documento, el *MIC* propuesto es analizado, simulado y probado en simulaciones y hardware las mediciones han validado el *MIC* propuesto.

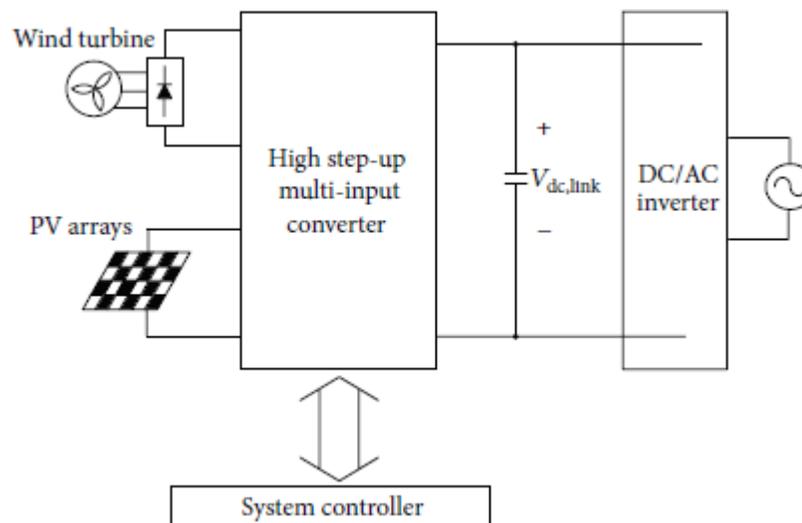


Figura 1. Diagrama de bloques para representar la configuración del MIC propuesto
Fuente: Shen, C.-L., & Yang, S.-H. (2013)

En este artículo se puede evidenciar, las conexiones que tiene el convertidor *BUCK-BOOST* ya que su forma de trabajar es muy similar a la de un *BOOST*, además que se implementa una de las técnicas *MPPT* a trabajar.

2.1.2 Comparación de lógica difusa y red neuronal en rastreador de punto de máxima potencia para sistemas fotovoltaicos.

En esta investigación realizada por (Ben Salah & Ouali, 2011), se llevó a cabo una comparación del seguimiento del máximo punto de potencia de dos algoritmos, Lógica Difusa y Redes Neuronales, en diferente controlador y cada uno con un convertidor *BOOST*, como se puede ver en la figura 2.

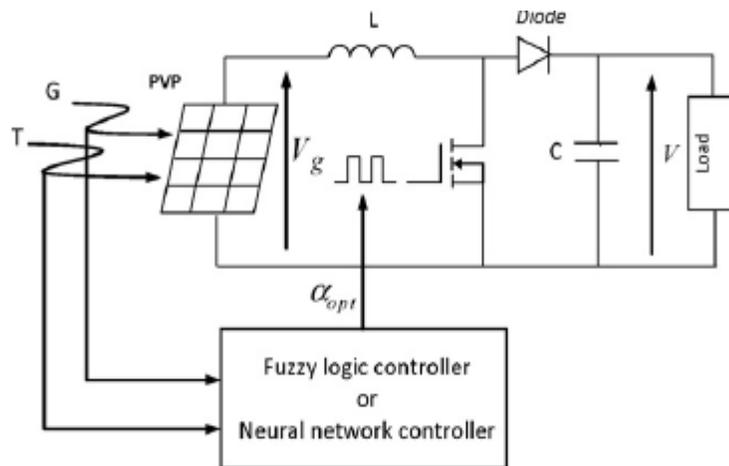


Figura 2. Configuración del sistema
Fuente: Ben Salah, C., & Ouali, M. (2011). 43-50.

Se ejecutó, midiendo el ciclo de trabajo (*duty*) óptimo frente a las variaciones de la radiación, obteniendo así, por parte de las técnicas, un buen ajuste del ciclo de trabajo, lo cual se ajusta al método medido, obteniendo una alta eficiencia para cada uno de los algoritmos. El controlador con la implementación del algoritmo de lógica difusa puede generar hasta el 99% de la potencia máxima real y el controlador con la implementación del algoritmo de redes neuronales, puede generar hasta el 92% de la potencia máxima.

De esta información se aclara las diferencias entre las dos *MPPT* del método basado en inteligencia artificial, y se logra seleccionar el método *FUZZY* que se implementó.

2.1.3 Comparación energética de siete técnicas *MPPT* para sistemas fotovoltaicos.

En este artículo realizado por (Dolara, Faranda, & Leva, 2009), se realizó un análisis preciso del rendimiento de las diferentes técnicas *MPPT*, con su respectiva implementación y el uso del convertidor *BOOST*, observando su comportamiento con dos diagramas diferentes de radiación. Las técnicas que se implementaron fueron: La técnica *P&O* (perturbar y observar) y sus modificaciones presentaron la más alta eficiencia, en comparación a las demás. La técnica *CVC* (controlador de voltaje constante), presentó una buena eficiencia para valores de radiación cercanos a 700 W/m^2 . Generalmente es seleccionada si es necesario minimizar el costo del sistema de control. La técnica *INC* (conductancia incremental), tiene una eficiencia más baja que las técnicas *P&O*, pero su tiempo de respuesta es bastante independiente de los valores de irradiación y su eficiencia aumenta con el nivel de irradiancia. Y la técnica de pulso de corriente corto (*SC*), resultó ser una de las peores técnicas, además, se requieren partes adicionales en el convertidor, lo cual decrece su eficiencia y potencia de salida.

En este artículo comparan los métodos más convencionales de las técnicas *MPPT*, y permite descartar la *CVC* y confirmar las técnicas *P&O – INC* simuladas.

2.1.4 Análisis dinámico y control de convertidores de refuerzo DC-DC utilizados en PV independiente.

En este artículo realizado por (Alexandridis & Krommydas, 2013), se llevó a cabo el análisis de la estabilidad y convergencia al punto de operación deseado para un sistema fotovoltaico aislado, con el fin de controlar la tensión de salida en valor de referencia independientemente de las variaciones de irradiancia y carga.

Se simularon dos escenarios, en donde en el primero se incrementó la irradiancia de 1000 W/m^2 a 1200 W/m^2 , y un cambio de carga de 350Ω a 250Ω y un voltaje de referencia de

600V. En la figura 3, se puede observar que la tensión de salida se estabiliza en el valor de estado estable deseado, después de un rápido transitorio.

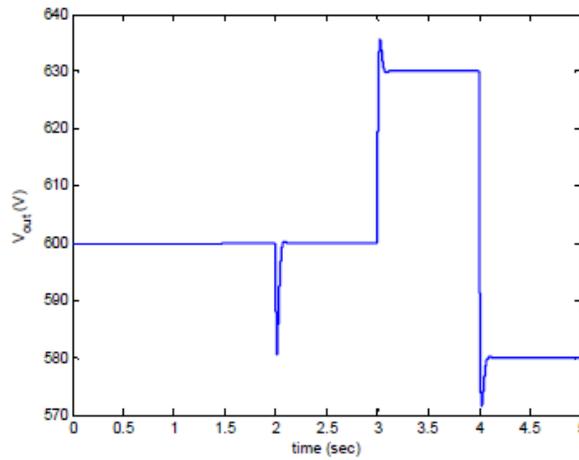


Figura 3. Voltaje de salida de convertor BOOST para el primer escenario

Fuente: Alexandridis, A., & Krommydas, K. (2013). 1535-1540.

En el segundo escenario, se examinó la respuesta del sistema fotovoltaico cuando opera muy cerca del *MPP*. Se estableció un voltaje de referencia de 600V, con una irradiancia de $1000\text{W}/\text{m}^2$, y una carga de 250Ω que se varió a 212Ω y luego a 211.4165Ω . Como se puede observar en la figura 4, el sistema es estabilizado al punto de equilibrio deseado para una potencia de salida muy cercana a la potencia máxima extraída del panel.

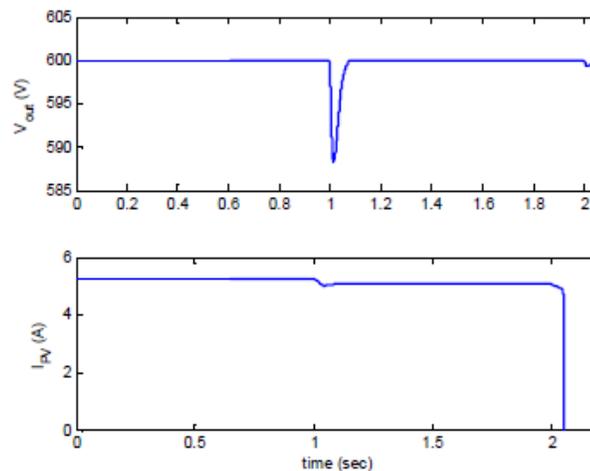


Figura 4. Salida de voltaje del convertidor BOOST y corriente del arreglo fotovoltaico para el segundo escenario

Fuente: Alexandridis, A., & Krommydas, K. (2013). 1535-1540.

El convertidor *BOOST* cumple un rol importante, ya que como ventaja principal da como resultado las propiedades de estabilidad que permite la regulación del voltaje de salida y convergencia al punto de funcionamiento deseado, independientemente de los cambios de carga o de la radiación solar.

De esta investigación se rescata, la rápida conmutación y respuesta que tiene el convertidor *BOOST*, asegurando la decisión de trabajar con esté.

2.1.5 Una investigación comparativa de los métodos de seguimiento del punto de máxima potencia para el sistema fotovoltaico solar.

En este documento realizado por (Gupta, Chauhan, & Pachauri, 2016), varios métodos de *MPPT* han sido estudiados e implementados en el entorno MATLAB/Simulink. Con base a la generación de señal de control, los métodos *MPPT* se han propuesto de forma innovadora para categorizarlos en tres clases, es decir, métodos convencionales e híbridos basados en la inteligencia artificial (*IA*). Además, los métodos *MPPT* considerados se modelan y se comparan sobre la base de diversos parámetros. Para lograr este objetivo, se desarrolla y valida el modelado MATLAB/Simulink de un panel fotovoltaico basado en un circuito de doble diodo equivalente con un panel solar disponible comercialmente. Luego, los métodos *MPPT* diseñados se implementan en este sistema *FV* bajo condiciones variables de irradiación solar para estudiar su respuesta dinámica para rastrear el punto de máxima potencia. Con base en este estudio, se lleva a cabo una nueva comparación de varias clases de métodos de *MPPT* en términos de voltaje de salida, corriente, potencia, tiempo de subida, tiempo de caída, eficiencia de seguimiento, etc.

Aporta en un análisis de estado estable en un módulo *PV* que se implementó con varios diseños y métodos *MPPT*, para estudiar su respuesta y el seguimiento de *MPP* de cada uno de los métodos, con su eficiencia y las características I-V y P-V, Esto se realizó en diferentes paneles solares, pero con las mismas condiciones de irradiación y temperatura. Además de la comparación de la potencia de salida, el voltaje y la corriente entre sistema fotovoltaico diseñado y sin ningún método *MPPT* bajo condiciones de prueba estándar.

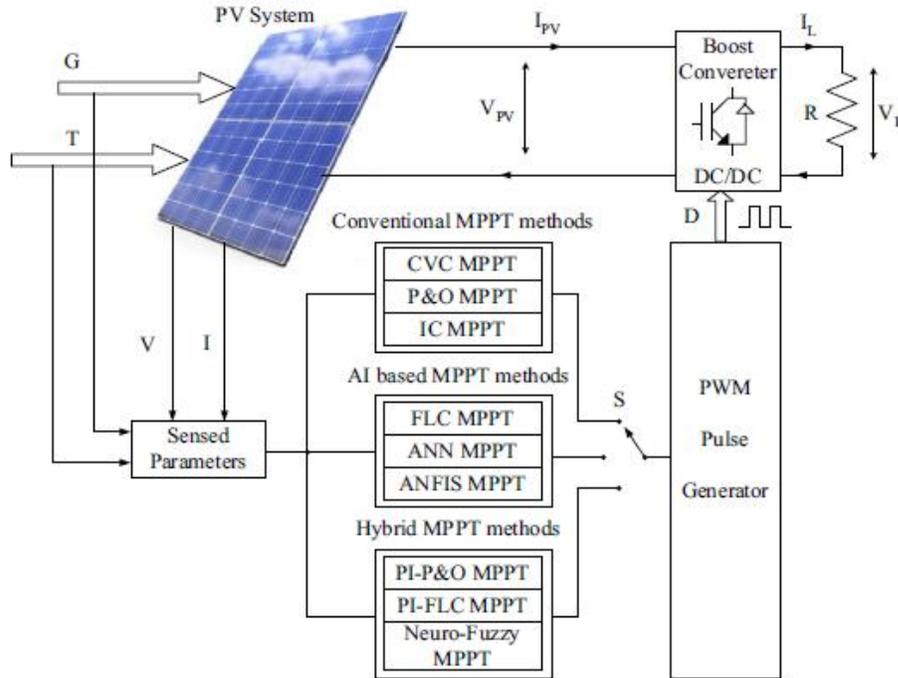


Figura 5. Diagrama esquemático de varios métodos MPPT asistidos sistema PV
 Fuente: Gupta, A., Chauhan K., Y., & Pachauri Kumar, R. (2016).

Con esta investigación es oportuno resaltar, la conmutación que hacen entre las técnicas y el estudio previo de las variables que van a definir la elección del sistema.

2.1.6 Modelado y simulación basada en eventos de un sistema fotovoltaico controlado con dos configuraciones de perturbación y observación del seguimiento del punto de máxima potencia.

En este artículo realizado por (Gallo, Ruiz, Bolaños, Osorio, & Angulo, 2017), se llevó a cabo la simulación y los resultados experimentales de un sistema fotovoltaico conformado por una fuente solar, una potencia de impulso convertidor, un algoritmo de perturbar y observar y una carga puramente resistiva. El sistema fue controlado con dos estructuras *MPPT*. La primera estructura actúa directamente en el ciclo de trabajo del convertidor, en la segunda estructura, el *MPPT* el control se acopla con una estructura de control de modo actual promedio.

La última estructura mejora el tiempo de establecimiento y las oscilaciones de estado estacionario del convertidor; sin embargo, puede aparecer una dinámica deslizante. Este tipo de dinámica puede rápidamente deteriorar los semiconductores debido a las altas frecuencias de conmutación. Por esta razón, es necesario sintonizar el modo actual del controlador correctamente, otra alternativa es implementar un controlador de modo de corriente máxima, lo que garantiza un cambio por rampa ciclo.

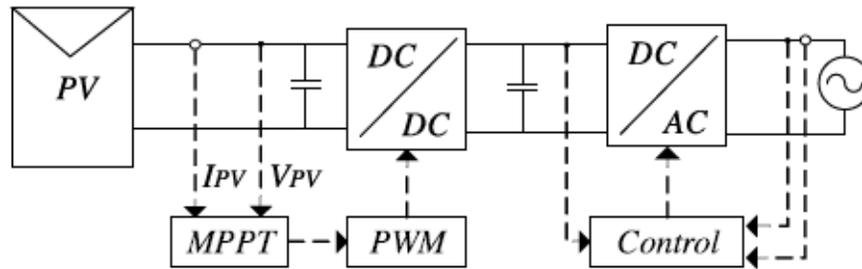


Figura 6. Sistema de control PV

Fuente: Gallo, G., Ruiz, J., Bolaños, M., Osorio, G., & Angulo, F. (2017).

En este artículo se puede apreciar los cambios que se deben realizar para que el sistema fotovoltaico alimente a una carga AC, pero también aclaran la forma en que trabaja la técnica de perturbar y observar.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 Estación Davis

La estación meteorológica *DAVIS Vantage Pro2.0* es un equipo que cumple con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (*OMM*) y se encuentra ubicada en la terraza del edificio Holanda de la Universidad CESMAG, los datos son entregados a un *software Weatherlink 6.0.3* que permite exportar a una base de datos y tiene la posibilidad de monitorear de manera continua y permanente, a través de un conjunto de sensores integrado llamado ISS, las variables que se señalan a continuación:

1. Velocidad del viento
2. Dirección del viento
3. Factor de enfriamiento por el viento o sensación térmica
4. Punto de rocío

5. Temperatura exterior
6. Temperatura interior
7. Índice de calor
8. Humedad
9. Evapotranspiración
10. Índice THSW, Temperatura, humedad, sol y viento, que calcula la temperatura aparente de lo que se sentiría al estar expuesto al sol.
11. Presión atmosférica
12. Tendencia barométrica
13. Intensidad de la lluvia
14. Lluvia diaria, mensual y anual
15. Lluvia de tormenta
16. Radiación solar
17. Radiación Ultravioleta.

Así mismo, cabe señalar, que, en esta, se encuentran acoplados los sensores de dirección, velocidad del viento y la cubeta para la medición de precipitación, del mismo modo, es relevante, tener en cuenta el tiempo de muestreo de las variables relacionadas con la dirección del viento y la radiación solar. (Checa, Erazo de la Cruz, & Escobar Rosero, 2016).

2.2.2 **Duty cycle**

En términos eléctricos, el ciclo de trabajo o *duty cycle* es la relación existente entre el tiempo en que una señal se encuentra en estado activo con el periodo de dicha señal, normalmente este término es aplicado para señales cuadradas, donde se intenta emular una señal analógica mediante la variabilidad del estado alto y bajo de una señal digital (Veoso, 2016).

De este modo, conviene enfatizar en diversos porcentajes tras la obtención del *duty*, que podrían significar según el mismo autor lo siguiente:

- 0% *duty*: Cuando el *duty cycle* es igual cero significa que en ningún momento la señal se encuentra en estado alto, es decir, que la señal no entrega potencia.

- 50% *duty*: Al colocar el *duty cycle* en 50%, significa que la mitad del periodo la señal se encuentra en estado alto, lo que permite suponer, que si se utiliza esta señal para alimentar un motor o prender un led, se estaría haciendo con la mitad de la potencia que se tiene disponible, para el caso del led se notaría que la luz se enciende con menor intensidad y en el caso del motor se movería más rápido.

- 75% *duty*: Este caso significa que se está entregando una potencia de salida del 75% de la máxima posible.

- 100% *duty*: Se está entregando la totalidad de la potencia posible, lo que significa que la señal nunca se encuentra en estado bajo.

Como se puede ver, lo interesante es que controlando el tiempo en que la señal está en alto, se puede controlar la potencia que se aplicó a la señal, de esta manera es como se logra controlar la velocidad de un motor, la intensidad de un led y demás (Veoso, 2016).

2.2.3 Control por PWM

La modulación por ancho de pulso o PWM (*Pulse Width Modulation*), es una técnica que logra producir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital. El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo que la señal está en un estado lógico alto, como un porcentaje del tiempo total que toma éste para completar un ciclo completo.

El control del convertidor DC-DC se realiza por medio de la modulación por ancho de pulso, cuyo objetivo es enviar pulsos de conmutación de este (Kazimierczuk, 2008).

2.2.4 Convertidor BOOST DC-DC

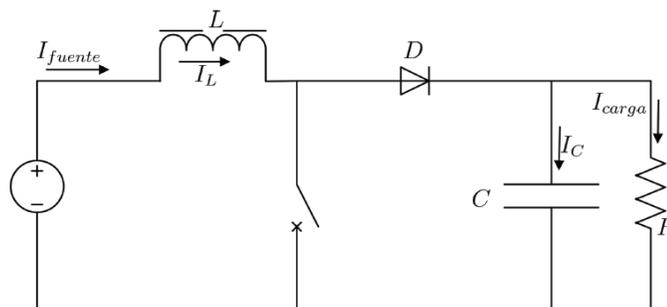


Figura 7. Convertidor BOOST DC-DC

Fuente: (Vergara, 2008)

La figura 7, corresponde al convertidor *BOOST* DC-DC, el cual es una fuente de alimentación conmutada, que contiene al menos dos interruptores semiconductores y al menos un elemento para almacenar energía, el cual permite reducir o amplificar el voltaje de entrada. De igual forma, según (Vergara, 2008), el conversor *BOOST* (elevador o step-up) se caracteriza porque la tensión en la carga es mayor o igual que la tensión en la fuente, de modo que, al igual que en el conversor Buck, se distinguen el modo continuo y el discontinuo según la continuidad de la corriente en el inductor. La inductancia crítica con carga resistiva es:

$$L_c = \frac{R \cdot D \cdot (1 - D)^2}{2 \cdot f} \quad (1)$$

La relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida es:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (2)$$

En efecto, cabe destacar, que este conversor, presenta dos etapas de funcionamiento:

En la primera etapa cuando el interruptor está cerrado, conduce corriente por éste y a la vez fluye entre los terminales positivo y negativo a través del inductor, que almacena energía en forma de campo magnético. Por el resto del circuito, no fluiría corriente por el diodo, el capacitor y la carga, ya que representan una impedancia mucho más alta que la ruta que atraviesa la corriente a través del interruptor.

Y en la segunda etapa, cuando el interruptor está abierto, la corriente del inductor continúa fluyendo hacia el diodo de rectificación, para cargar la salida. A medida que la tensión de la salida aumenta, la intensidad que circula por el inductor disminuye.

2.2.5 Radiación Solar

La radiación afecta directamente en el rendimiento de la célula solar. Una variación en este parámetro modifica la curva característica que describe la célula solar fotovoltaica (Cordero, 2014).

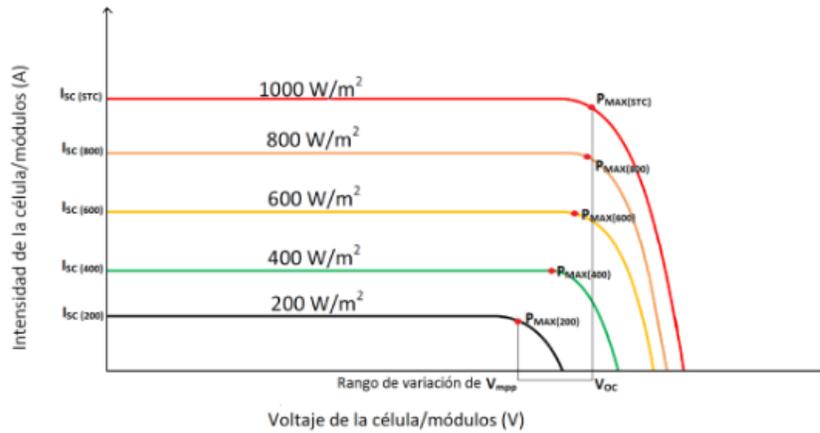


Figura 8. Curva efecto de la irradiancia.
Fuente: (Ingelibre, 2014)

En concordancia con lo anterior, (Cordero, 2014), manifiesta, además, que la tensión de un circuito abierto casi no varía una vez que se modifica la radiación solar incidente, sin embargo, la corriente de cortocircuito se ve afectada de la siguiente manera:

- Al aumentar la radiación solar incidente (irradiancia) la corriente de cortocircuito aumenta.
- En el caso de que disminuya la radiación solar incidente, la corriente de cortocircuito disminuye.

2.2.6 Temperatura

Por otra parte, la temperatura es un factor muy importante a la hora de establecer un sistema de generación fotovoltaica, debido a que esta tiene un gran efecto en el comportamiento de cada célula (Cordero, 2014).

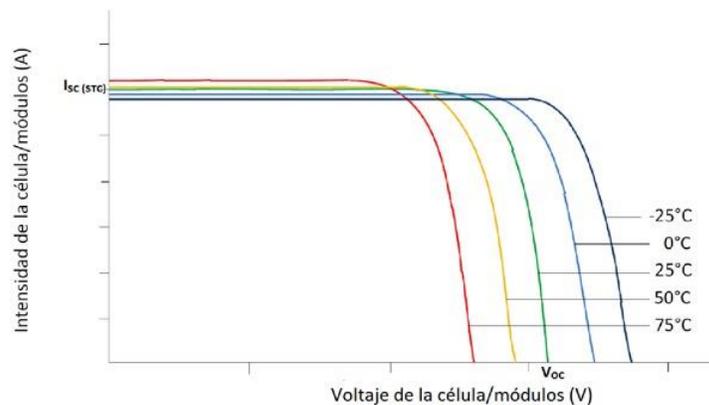


Figura 9. Comportamiento temperatura panel solar
Fuente: (Collado, 2015).

Según el mismo autor, la temperatura afecta directamente a la tensión en circuito abierto de la célula fotovoltaica, de manera que el punto óptimo de funcionamiento varía según la temperatura que tenga la célula solar.

- A medida que la temperatura disminuye la potencia aumenta.
- En el caso contrario, cuando la temperatura aumenta la tensión y la potencia que ofrece la célula fotovoltaica disminuye.

2.2.7 Técnicas *MPPT*

A continuación, se muestran las técnicas *MPPT* que se trabajaron.

2.2.7.1 *Perturbar y observar*

Este es uno de los métodos *MPPT* comúnmente utilizados, en este método, las perturbaciones se aplican a la señal de voltaje o corriente de referencia del sistema fotovoltaico (Mamarelis, Petrone, & Spagnuolo, 2014).

En este método, el voltaje del sistema fotovoltaico se considera como señal de referencia, el objetivo de este método es forzar la referencia voltaje del sistema fotovoltaico a V_{mpp} , lo que causa la instantánea voltaje PV para rastrear V_{mpp} , esto se hace aplicando pequeñas y constantes perturbaciones a la tensión FV. Después de cada perturbación la variación en la potencia de salida (dP) se mide. Un dP positivo indica que la potencia de salida se aproximará a MPP. Por lo tanto, una perturbación de signo positivo se aplica a la tensión FV en la próxima etapa. Por otro lado, si dP es negativo, un signo negativo la perturbación se aplica estos pasos se realizan repetidamente hasta que el *MPP* del sistema se alcanza donde dP es igual a cero (Selmi, Davis, Devis, & Abdul-Niby, 2014).

El *P&O* tiene dos inconvenientes principales, en primer lugar, la determinación del tamaño de paso de perturbación ideal es difícil, si las perturbaciones son grandes, la posibilidad de que el algoritmo oscile alrededor del *MPP* se vuelve alto y si las perturbaciones son pequeñas, la convergencia la velocidad del algoritmo se vuelve muy baja (Jiang, Wang, & Ji).

Este inconveniente se supera mediante el uso de un tamaño de perturbación variable, que disminuye a medida que el algoritmo converge al *MPP*, en segundo lugar, este algoritmo

está inclinado al error de seguimiento *MPP* cuando se somete a las condiciones ambientales que varían rápidamente.

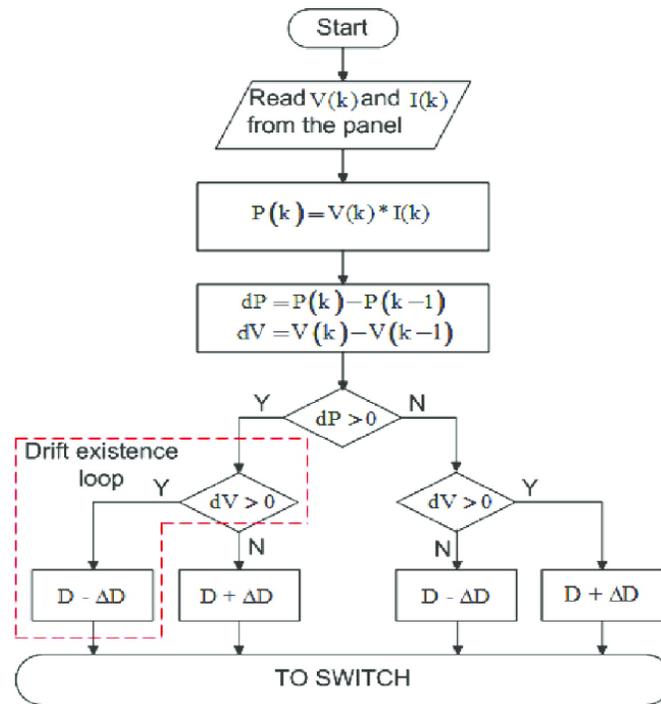


Figura 10. Diagrama de flujo P&O MPPT convencional.
Fuente: (Muralidhar & Susovon, 2015)

2.2.7.2 Conductancia incremental

Este método *MPPT* se enfoca en la pendiente de la característica I-V del sistema PV para rastrear el *MPP* del sistema (Abdulkadir, Samosir, & Yatim, 2012). Este método se basa en el principio de que la pendiente de la curva de potencia del sistema fotovoltaico en el *MPP* es cero, positivo cuando la salida la potencia es menor que *MPP* y negativa cuando la potencia de salida es mayor que el *MPP* (Garraoui, Mouna, Lassaad, & Barambones, 2013). La potencia de salida máxima se puede expresar con la siguiente ecuación.

$$P_{MPP} = V_{MPP} * I_{MPP} \quad (3)$$

Se puede evaluar diferenciando la potencia de salida del PV con respecto a la tensión fotovoltaica y equipararlo a cero, como se expresa en las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dV} \cong \frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{-I_{MPP}}{V_{MPP}} \quad (5)$$

En este método, la velocidad de seguimiento de *MPP* se puede aumentar ajustando el tamaño de incremento o decremento de *Vstep*, pero causará que el sistema empiece a oscilar alrededor del *MPP*. La principal ventaja de este es que puede servir como una solución efectiva para condiciones ambientales cambiantes.

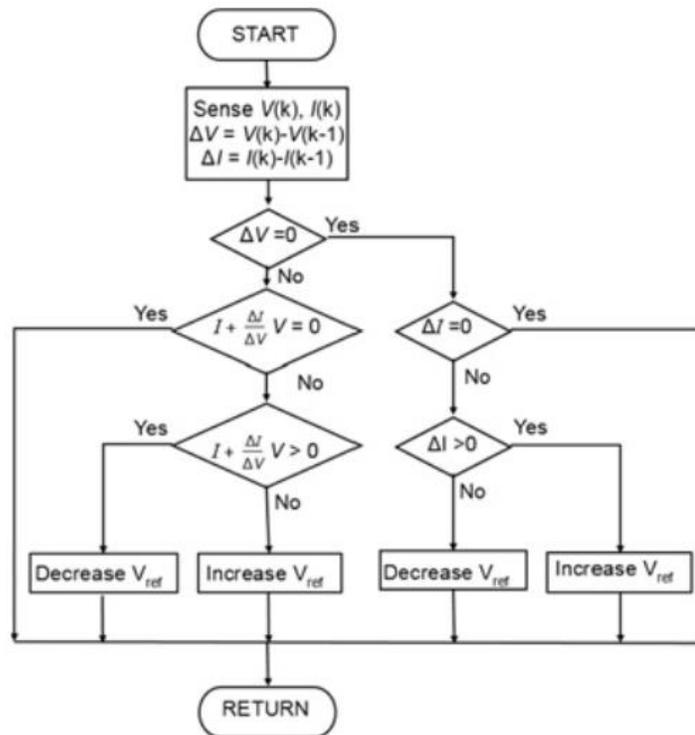


Figura 11. Diagrama de flujo INC
Fuente: (Vergara, 2008)

2.2.7.3 Lógica difusa

Los controladores de lógica difusa se han utilizado ampliamente en procesos industriales en los últimos años debido a su naturaleza heurística asociada con la simplicidad, efectividad y la consideración de su variable basada en múltiples reglas para la variación de parámetros tanto lineales como no lineales del sistema. El sistema difuso se compone de conocimiento basado en sistema de reglas; La parte principal de *FLC* es el conocimiento de

la base que consiste en las reglas *If-Then*. *Fuzzy* es implementado para obtener el punto de voltaje de operación *MPP* más rápido con menos sobreimpulso y también puede minimizar la fluctuación de voltaje después de que se haya reconocido *MPP*. El objetivo de control es rastrear la potencia máxima que conducirá en consecuencia a la operación efectiva del panel fotovoltaico. Para diseñar el *Fuzzy*, las variables que representan la dinámica y el rendimiento del sistema deben elegirse como la entrada al controlador. El diagrama de bloques básico se muestra en la figura 12 (Garg, R.Saida Nayak, & Sushma Gupta, 2015).

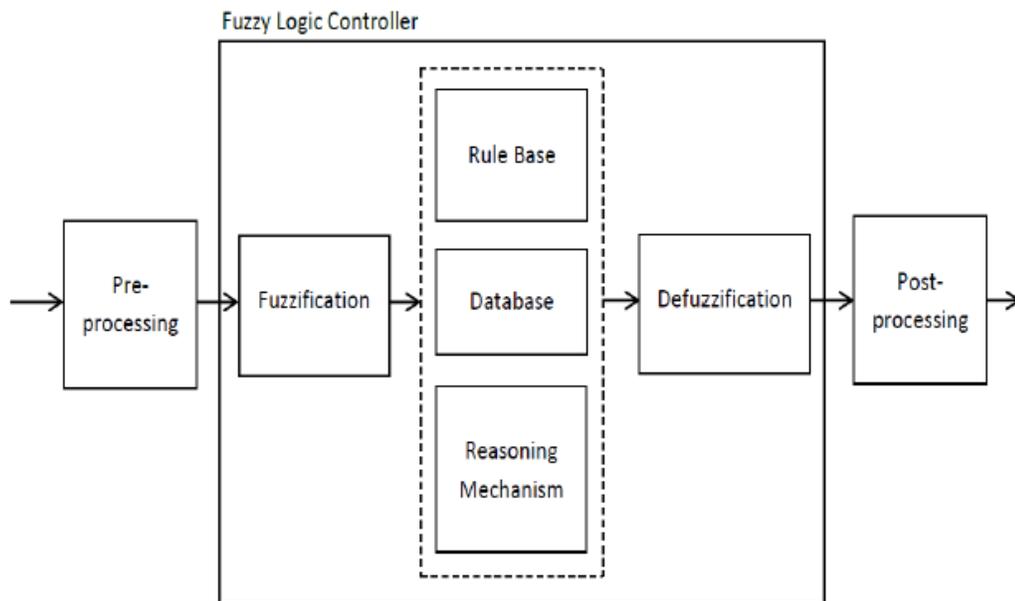


Figura 12. Diagrama de bloques básico del controlador lógico Fuzzy
Fuente: (Garg, R.Saida Nayak, & Sushma Gupta, 2015).

Estos controladores son robustos y ventajosos en lo que respecta a su procedimiento de diseño (Khateb, Rahim, Selvaraj, & Uddin, 2014). Las partes principales de un *Fuzzy* son *fuzzificación*, inferencia, base de reglas y *defuzzificación*. En el paso de *fuzzificación*, las variables crujientes de entrada se convierten en variables lingüísticas de acuerdo con las funciones de membresía de entrada. En paso de inferencia, también conocido como paso de toma de decisiones, entonces las reglas especificadas identifican el comportamiento del controlador. Las reglas en este paso se expresan como variables lingüísticas denotadas por conjuntos difusos (Simões, 1998).

Se definen las dos entradas, es decir, error (E) y cambio de error (CE), así,

$$E(n) = \frac{P_{PV}(n) - P_{PV}(n - 1)}{V(n) - V(n - 1)} \quad (6)$$

$$CE(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (7)$$

Donde PPV es la potencia instantánea de la matriz FV. La inferencia difusa se procesa usando el método de Mamdani. Aquí, la *defuzzificación* utiliza el método del centro de gravedad para obtener el resultado que es el deber ciclo de convertidor de refuerzo DC-DC (Chiu, 2010).

2.2.8 Tiempo continuo o discreto

Para la realización de las simulaciones aquí presentadas, se consideró esencial, elegir el campo de variación de la variable tiempo. Para lo que, es necesario conocer; si la elección recae en los números reales o en un subconjunto de los reales no negativos, el problema se plantea en tiempo continuo, mientras que, si la elección corresponde a los enteros o a los enteros no negativos, el problema será presentado en tiempo discreto (Torres, s.f). Así pues, en el caso continuo, si una variable depende del tiempo, el valor de esta corresponderá al valor instantáneo que alcanza la magnitud que ella representa. Por el contrario, en el tiempo discreto, según la misma autora, tal variable en un momento recoge esa misma magnitud durante un intervalo, cuya amplitud será previamente especificada. Por lo tanto, si esa amplitud es considerada lo suficientemente pequeña, una diferencia primera tenderá a una variación instantánea, encontrándose de tal modo, alguna relación entre los problemas en tiempo continuo y discreto. De manera análoga, se retoma el modelo bidimensional de *Turnovsky*, citado en (Torres, s.f), el cual, al ser planteado en tiempo continuo origina, una dinámica sencilla, sin embargo, si en este modelo se discretiza la dinámica que emerge resulta muy compleja. Esto es debido a que la dimensión del sistema juega un papel importante sobre la dinámica que puede surgir. Así pues, un sistema discreto unidimensional, puede presentar una dinámica tan compleja como es la existencia de caos.

2.2.9 *ODE* Ecuaciones diferenciales ordinarias

Los mecanismos de solución de ecuaciones diferenciales ordinarias (*ODE*) en MATLAB resuelven problemas de valores iniciales con una gran variedad de propiedades. Los mecanismos de solución pueden funcionar en problemas rígidos y no rígidos, problemas con una matriz de masa, ecuaciones algebraicas diferenciales (*DAE*) o problemas completamente implícitos (MathWorks, 2019).

ODE 45: Según (MathWorks, 2020), el *ode45* funciona bien con la mayoría de los problemas de *ODE* y generalmente debería ser su primera opción de solucionador. Sin embargo, *ode23* y *ode113* pueden ser más eficientes que *ode45* para problemas con requisitos de precisión más flexibles o estrictos.

2.2.10 **Trapz**

Con la intención de calcular el área bajo la curva a través de la integral de orden 1, se hizo uso de $Q = \text{trapz}(X, Y)$, a partir de la cual se integra Y , con respecto a las coordenadas o el espacio escalar especificado por X . Así mismo, es necesario recalcar, que, si X es un vector de coordenadas, $\text{length}(X)$ debe ser igual al tamaño de la primera dimensión Y , cuyo tamaño no es igual a 1 (MathWorks, 2020).

2.3 Definición de conceptos

2.3.1 Definición nominal de conceptos

La variable por medir es la eficiencia (η) de todo el sistema de control con respecto al potencial de generación a partir de la eficiencia de la conversión de energía. Su valor se puede obtener de la relación entre la potencia de salida del controlador *MPPT* con adaptación múltiples técnicas (P_o) sobre la potencia entregada por cada panel con una sola técnica (P_t).

2.3.2 Definición operativa de conceptos

$$n = P_o/P_t \times 100\% \quad (8)$$

Donde:

n= eficiencia a calcular

P_o= La potencia de salida del controlador *MPPT* con adaptación de múltiples técnicas y se calcula a partir del producto de la tensión y la corriente.

P_t= La potencia entregada por cada técnica por separado

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis de investigación

La eficiencia del convertidor *BOOST* con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* tales como, *P&O*, *INC* y *FUZZY* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*, es mayor al 5% a la eficiencia dada por un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*, para los valores de irradiancia y temperatura tomados por la estación *DAVIS*.

2.4.2 Hipótesis nula

La eficiencia del convertidor *BOOST* con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* tales como, *P&O*, *INC* y *FUZZY* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*, no es mayor al 5% a la eficiencia dada por un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*, para los valores de irradiancia y temperatura tomados por la estación *DAVIS*.

2.4.3 Hipótesis alternativa

El convertidor *BOOST* con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* tales como, *P&O*, *INC* y *FUZZY*, no es eficiente para implementarlo en un sistema fotovoltaico *OFF GRID*.

3. Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, ya que las variables asociadas al objeto de investigación se valoran numéricamente, por ende, los resultados obtenidos permitirán determinar la eficiencia del sistema, que se presenta porcentualmente.

3.2 Paradigma

Desde el punto de vista epistemológico y metodológico el paradigma que orienta la investigación cuantitativa es el positivismo, termino instituido por el filósofo francés Auguste Comte (1.798 a 1.857) (Quijano Vodniza, 2009).

Esta investigación es positivista, puesto que su finalidad es explicar, predecir o controlar fenómenos. Dentro de este contexto, se buscó controlar la potencia de un panel solar, alcanzando la máxima potencia de éste, mediante un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*, el cual se implementó consultando en antecedentes y se realizó con ayuda de simulaciones.

3.3 Método

Al ser esta investigación cuantitativa, el método que se utilizó es científico, o también conocido como método empírico-analítico (Quijano Vodniza, 2009), ya que busca encontrar la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*, con el fin de validar o rechazar las hipótesis y resolver así este problema de investigación definido.

3.4 Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva, pues la finalidad fue determinar cuál técnica *MPPT* es la más adecuada para aplicarla en el sistema fotovoltaico, con un convertidor *BOOST* DC-DC y obtener la mayor eficiencia del mismo. Mencionado lo anterior se hizo necesario establecer los parámetros de cada una de las técnicas *MPPT* teniendo en cuenta la fluctuación de la irradiancia y el nivel de la temperatura, ya que éstas afectan directamente a la tensión e intensidad de corriente que entrega el panel solar, todo esto para alcanzar el punto

máximo de potencia según las condiciones que se encuentre el sistema, para así realizar una relación entre la potencia estimada del panel y la potencia de salida del convertidor *MPPT*, con el fin de determinar la variable del objetivo de investigación, que es la eficiencia.

3.5 Diseño de investigación

El diseño de esta investigación (**RG X O**), se define como experimento puro, ya que comparó la eficiencia de un convertidor *BOOST* con controlador de adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID* y un convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*.

RG1 X1 O1

RG2 X2 O2

Donde:

RG1 = Sistema fotovoltaico estándar *OFF GRID*

RG2 = Sistema fotovoltaico estándar *OFF GRID*

X1 = Convertidor *BOOST* con controlador de adaptación de múltiples técnicas *MPPT* para un sistema fotovoltaico *OFF GRID*

X2 = Convertidor *BOOST* con una sola técnica *MPPT*

O1 = Eficiencia del sistema con controlador de adaptación de múltiples técnicas *MPPT*

O2 = Eficiencia del sistema sin controlador de adaptación de múltiples técnicas *MPPT*

3.6 Universo

Convertidor *BOOST* con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*, las cuales hacen referencia a Perturbar y Observar (*P&O*), Conductancia Incremental (*INC*) y Lógica Difusa (*FUZZY*). El universo es finito ya que es cuantificable y accesible.

3.7 Muestra

La muestra es la misma que el universo, ya que se realizará el estudio de eficiencia de estas técnicas.

3.8 Técnicas de recolección de información

Observación directa: la información que se necesitó se obtuvo a partir del software de Simulink, que funciona sobre el entorno de Matlab, en el cual se simuló el sistema fotovoltaico y se implementó cada una de las técnicas *MPPT* además de la simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*, una vez estuvo listo, las variables a analizar fueron la irradiancia y la temperatura como variables de entrada y la potencia como variable de salida ya que esto determinó la eficiencia del sistema fotovoltaico.

3.8.1 Validez de la técnica

La técnica de recolección de información es válida, porque el software en donde se llevó a cabo la simulación es una herramienta integrada que permite trabajar con algoritmos con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos involucrados en los mismos.

3.8.2 Confiabilidad técnica

La técnica fue confiable, debido a que la curva de irradiancia y los valores de temperatura fueron reales y se utilizaron los mismos en la comparación del controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* y el convertidor con una sola técnica *MPPT*.

3.9 Instrumentos de recolección de la información

Se simuló el sistema fotovoltaico en el software de Simulink, con los datos de irradiancia y temperatura obtenidos del estudio ya realizado con los paneles solares del laboratorio San Buenaventura por el grupo de investigación RAMPA, y los datos dados por la simulación realizada fueron evaluados en EXCEL, lo que permitió determinar cual tiene mayor eficiencia.

4. Resultados

4.1 Simulación de las técnicas *MPPT*

4.1.1 Implementación sistema fotovoltaico con convertidor *BOOST* y controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*

Para lograr la construcción de un controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* (figura 13) se aplicó un modelo de simulación general, explicado a continuación:

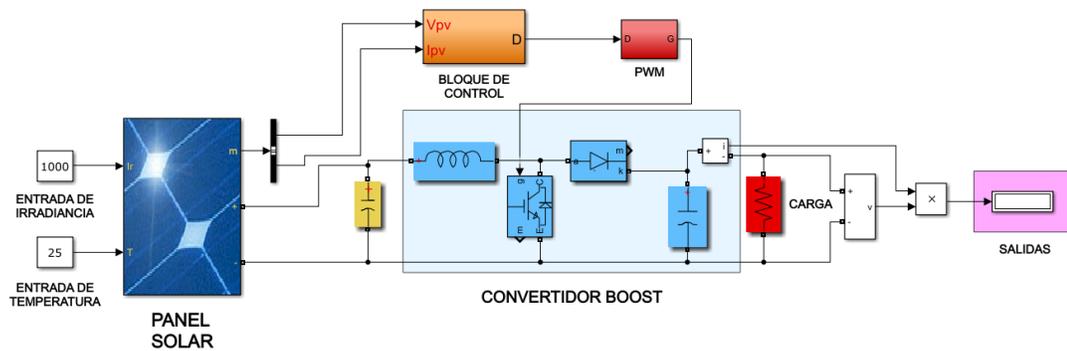


Figura 13. Diagrama sistema fotovoltaico con *MPPT*

Fuente. Esta investigación

Entrada de irradiancia: En este bloque se encuentra el valor de irradiancia dado en W/m^2 .

Entrada de Temperatura: Aquí ingresa la temperatura ambiente dada en grados centígrados ($^{\circ}C$).

Panel solar: Se utiliza un módulo Jinko Solar JKM310M-72.

Tabla 1. Especificaciones panel Jinko Solar JKM310M-72

Voc	Vmp	Isc	Imp	Área
47.1 V	38.5 V	8.78 A	8.05 A	1.940356 m^2

Es necesario saber el comportamiento del panel dado por el fabricante para comprobar si cada una de las técnicas implementadas (*P&O*, *INC*, *FUZZY*) están siguiendo el máximo punto de potencia (*MPP*), para esto se simuló las curvas entregadas por el panel Jinko Solar JK310M-72 (Watts vs Voltaje) con los mismos valores de referencia que se utilizaron en el

desarrollo del proyecto, la irradiancia de 300W/m^2 se evidencia en la figura 14; la de 600W/m^2 en la figura 15 finalmente la de 1000W/m^2 en la figura 16.

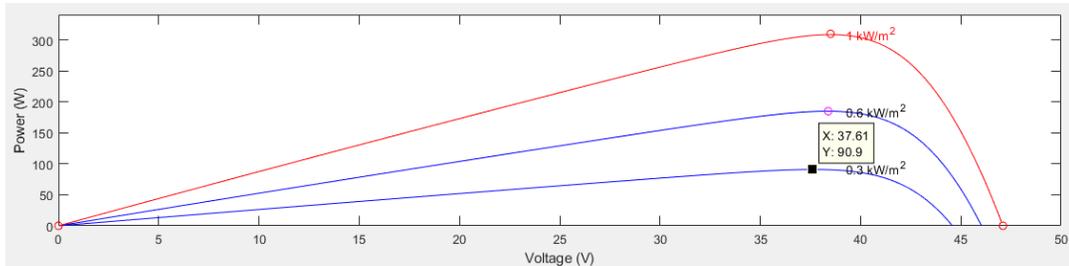


Figura 14. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 300W/m^2
Fuente: MATLAB

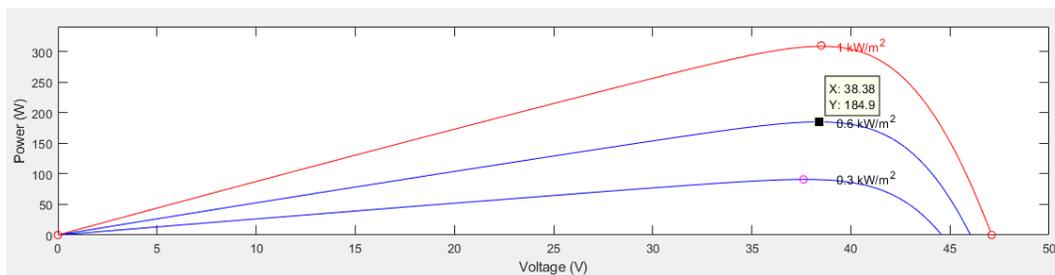


Figura 15. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 600W/m^2
Fuente: MATLAB

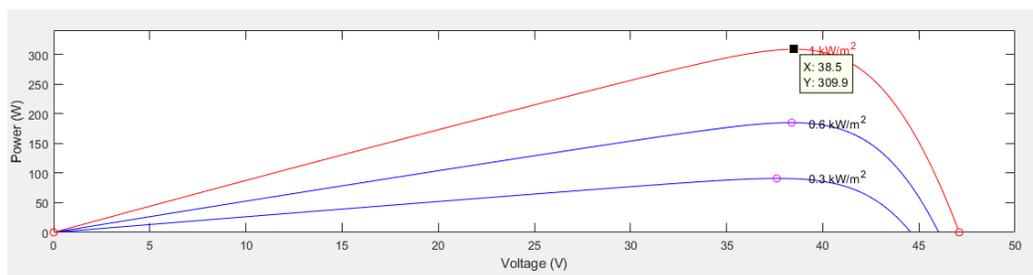


Figura 16. Comportamiento de la curva irradiancia panel Jinko Solar JKM310M-72 1000W/m^2
Fuente: MATLAB

Convertidor BOOST: Para simular este convertidor, fue necesario revisar la bibliografía y determinar en qué condiciones se iba a trabajar y así establecer los valores de capacitancia e inductancia, ya que el convertidor tipo *BOOST* es un circuito elevador de tensión, que usa las características del inductor y el capacitor como elementos almacenadores

de energía para elevar la corriente proveniente de la fuente de alimentación y usarla para inyectarla al condensador, produciendo así niveles de voltaje mayores en la carga que los de la fuente (Valderrama, Moreno, & Vega, 2011).

Las ecuaciones para determinar estos valores están definidas así (Hard, 2001),

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2f} \quad (9)$$

$$C > \frac{D}{fR(\text{rizo})} \quad (10)$$

Donde,

L: Inductancia

C: capacitancia

D: Ciclo de trabajo

R: resistencia - carga

f: frecuencia de operación

A partir de los valores de inductancia y capacitancia calculados, se observó que la salida de potencia alcanzaba el *MPP*, pero oscilaba alrededor de 40W, por lo tanto, se hizo un proceso de ensayo error, modificando estos valores, hasta que la señal de salida fuera estable y se establecieron los valores expresados en la tabla 2.

Tabla 2. Valores del convertidor *BOOST*

Capacitancia	Inductancia
251.496 uF	2.40741 mH

Bloque de control: Este varía dependiendo de la técnica que se utilice, ya sea:

- Perturbar y observar (*P&O*)
- Conductancia incremental (*INC*)
- Lógica difusa (*FUZZY*)

PWM: Se estableció con una frecuencia de 30KHz, para sistemas fotovoltaicos es ideal un PWM alto, pero según la investigación de (Mahamudul, Saad, & Henk, 2013) cuando se trabaja con un Mosfet es necesario tener en cuenta las limitaciones del fabricante para no tener problemas de calentamiento y pérdidas de energía en este, y para una frecuencia de 10KHz utilizan resistencias entre 13 Ω , 22 Ω , 35 Ω dependiendo del panel.

Carga: La resistencia se fijó en 50 Ω para todas las simulaciones, este valor se estableció así por el estudio realizado en (Valderrama, Moreno, & Vega, 2011).

Salidas: En el bloque de salidas se encuentran las mediciones de:

- Voltaje
- Corriente
- Potencia

Cada uno de estos cuenta con un *display* para observar el valor en tiempo real, un bloque de *WorkSpace* que se encarga de guardar los datos simulados, el tiempo de toma de datos por este es de 1e-2 segundos, este se eligió así para reducir el tiempo real de simulación, pero el resultado no se altera, y un *Scope* para observar el comportamiento de la curva.

4.1.2 Tiempos de simulación

Para lograr el funcionamiento óptimo del controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT* fue necesario, simular cada una por separado y entender su comportamiento con valores de referencia, los mismos para las tres técnicas. Posterior a ello se simuló con valores reales. La explicación de estos se encuentra en la tabla 3.

Tabla 3. Valores para simulaciones

Valores de referencia	Valores reales
<p>Irradiancia: Se tomó 300 w/m², 600 w/m² y 1000 w/m² los cuales se establecieron así para observar el comportamiento del control con valores bajos, medios y altos, y poder tener un panorama amplio de los límites de la irradiancia (0-1000w/m²) y con estos verificar si cada técnica sigue el <i>MPP</i> dado por el fabricante del panel figura 14-15-16.</p>	<p>Se tomaron los valores obtenidos por la estación <i>DAVIS</i> durante el 2018. En total fueron 91.708 datos tomados cada 5 minutos.</p> <p>La simulación de estos se realizó por mes. (Los valores específicos de cada mes se encuentran en el apartado 4.5).</p>
<p>Temperatura: Se la estableció en 25°C ya que es la temperatura ambiente aproximadamente</p>	

Para los valores de referencia el tiempo de simulación total es de 4.5 segundos con 3 *steps* esto quiere decir que cada step cuenta con 1.5 segundos, este valor se lo definió haciendo una aproximación de la estabilización de las 3 técnicas, lo que se puede observar en el tiempo de asentamiento de cada técnica, ya que el *P&O* y el *INC* se estabilizan en un tiempo menor al *FUZZY*, tal hallazgo se debe a que la técnica “*FUZZY*” se simuló en tiempo discreto con un *sample time* de 5e-06 segundos y con *ODE 45* y las otras dos técnicas fueron simuladas en tiempo continuo y un *ODE* auto. Fue necesario establecer el mismo tiempo de simulación para las tres técnicas, ya que, para el buen funcionamiento del código final, que hace referencia al controlador de múltiples técnicas *MPPT* se requiere la misma cantidad de datos y que estén tomados en el mismo tiempo para ingresar estos en forma de vector a dicho código. Por esta razón se escogió el tiempo de asentamiento del mayor dado que no afecta un tiempo más largo, en cambio uno más corto sí.

Para los valores reales el tiempo de simulación depende de la cantidad de muestras por mes, por ejemplo, en el mes de enero se tomaron 7058 datos y el tiempo de simulación es 0.7058 segundos, como se muestra en la ecuación 11.

$$Datos \times \frac{1seg}{10000 \text{ datos}} = \text{Tiempo en segundos} \quad (11)$$

Donde,

Datos: Es el número de datos de irradiancia y temperatura que tiene cada mes.

10.000: Divisor para reducir el tiempo de simulación.

Tiempo en segundos: El tiempo que se establece en Simulink.

Para simular el controlador conjunto a las tres técnicas, fue necesario definir un tiempo de simulación por cada mes, este valor lo dio la ecuación 11. El divisor de la ecuación fue el mismo para todos los meses y así no se tuvo inconvenientes en el momento de aplicar las fórmulas finales. Su fin fue reducir el tiempo real de simulación, dado que, si se deja el mismo tiempo de los datos, el tiempo real de simulación incrementa alrededor del 1000%. Es decir, retomando el ejemplo anterior, cuando el tiempo se estableció en 7058 segundos, el tiempo que se demoró la simulación en finalizar fue de 30 minutos, y con el tiempo en 0,7058 segundos, se demoró 3 minutos, así que, los datos finales, de la energía entregada por los dos tiempos fueron los mismos.

4.2 Simulaciones de técnicas *MPPT* con valores de referencia

4.2.1 Implementación técnica perturbar y observar (*P&O*) con valores de referencia

Para esta simulación se contaba con la bibliografía necesaria para entender su funcionamiento desde un diagrama de flujo, el cual se encuentra explicado en la figura 10.

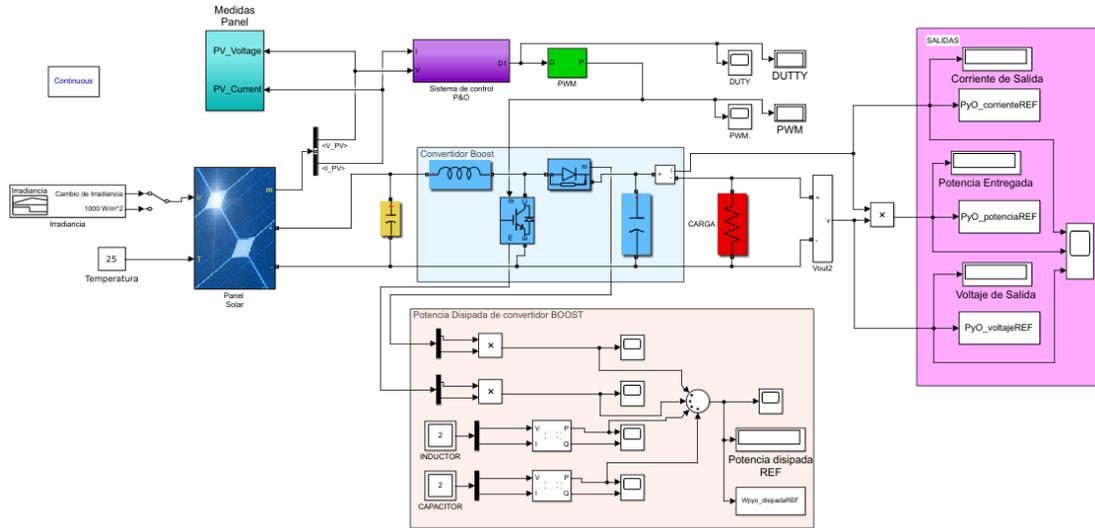


Figura 17. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas P&O
Fuente: Esta investigación

En la figura 17 se observa la compilación del sistema fotovoltaico, con el convertidor *BOOST*, el control *P&O*, el *PWM* establecido anteriormente además de un bloque donde se está calculando la energía disipada por dicho convertidor.

La irradiancia y la temperatura son los valores de referencia explicados en la tabla 3.

4.2.1.1 Código

El sistema de control *P&O* se lo configuro en dos partes, la principal donde se hace el reconocimiento de las variables de entrada (voltaje y corriente) con un código de bloques del software de Simulink, aquí se encuentran los bloques de almacenamiento para poder comparar el resultado anterior y el presente como lo pide el diagrama de flujo. Y la segunda parte que es la lógica matemática (figura 19) la cual se encuentra en un script el cual se lo llama a Simulink a través del bloque *MATLAB Function*.

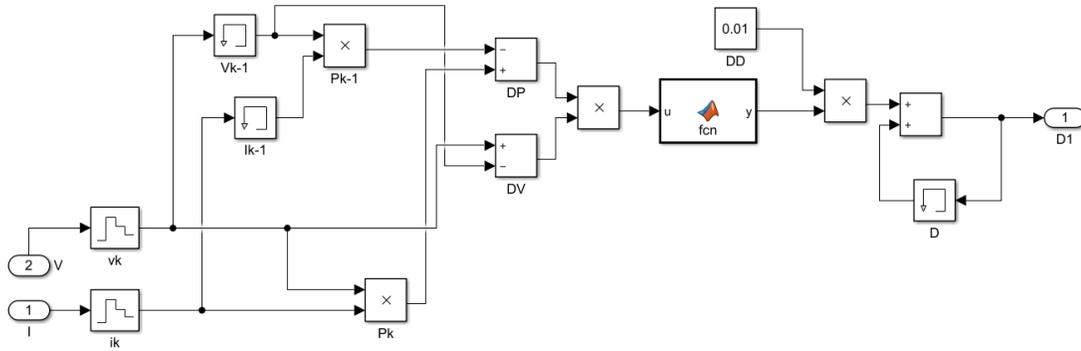


Figura 18. Código bloques P&O

Fuente: Esta investigación

```
function y = fcn(u)
y = 0;
if(u==0)
    y=0;
end
if(u>0)
    y=-1;
end
if(u<0)
    y=1;
end
```

Figura 19. FNC, código script P&O

Fuente: Esta investigación

Después que las variables de entrada pasan por el código, la salida de este es el *duty* o ciclo de trabajo el cual entra al *PWM* con una señal digital y este con pulsos de 0 o 1, apaga o enciende el Mosfet respectivamente.

4.2.1.2 *Duty*

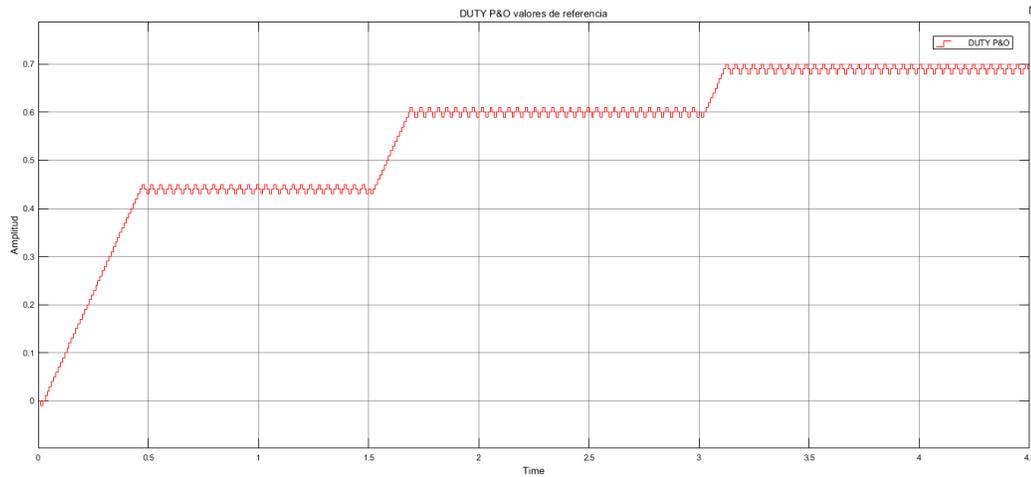


Figura 20. Comportamiento del duty para P&O

Fuente: Esta investigación

En la figura 20 se perciben los cambios del *duty* que están dados cada 0.01 segundos, durante los 4.5 segundos que dura la simulación, y los 3 *steps* que se dan por el cambio de irradiancia. El valor del *duty* se muestra en la figura 18, se lo quiso establecer para una implementación futura en una tarjeta de desarrollo, siendo más grande o pequeño no altera la curva del *duty*, por ende, tampoco el resultado, pero es importante definirlo por los límites establecidos de dicha tarjeta. Es el mismo para las tres técnicas *MPPT* que se simularon.

4.2.1.3 *Tiempo de asentamiento de la curva de potencia por cada step para perturbar y observar*

El tiempo de asentamiento, es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta al alcanzar el punto deseado. Este se lo evaluó con el fin de saber el tiempo que se demora cada técnica y cada step en estabilizarse. Fue necesario tenerlo en cuenta, para generalizar el tiempo por step y por técnica, es decir, el tiempo que se definiera debía permitir que cada step de las 3 técnicas alcanzara el punto de potencia deseado.

Se buscó generalizar el tiempo, para que el análisis de las tres técnicas fuera confiable, al tener la misma cantidad de valores en el mismo tiempo de simulación.

Para lograr esto, se tomó el tiempo de asentamiento por cada step como se muestra en la figura 21, en esta se observa un punto negro sobre la curva de potencia, que se refiere a la ubicación del cursor justo cuando la curva se estabiliza, al lado derecho de esta en un círculo rojo se muestra el tiempo cuando ocurre, cada grafica corresponde a un valor de irradiancia diferente, como se muestra en el recuadro bajo la curva de potencia.

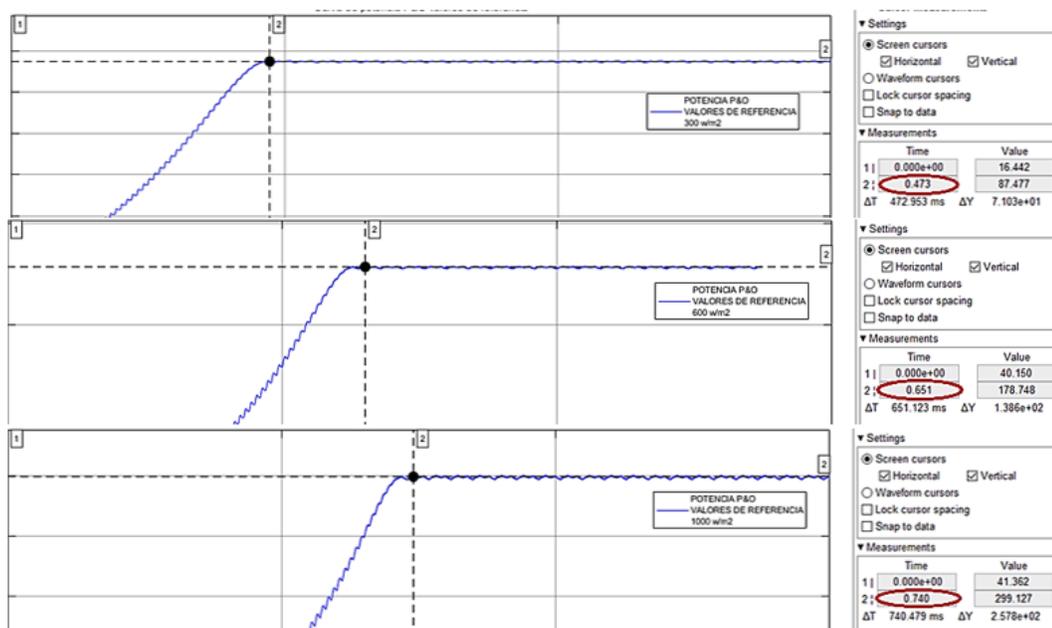


Figura 21. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m^2 600w/m^2 1000w/m^2 en P&O
Fuente: Esta investigación

En la tabla 4, se encuentra el tiempo de asentamiento en segundos por cada step, estos valores, se los evalúa en el apartado 5.2.1 con los tiempos de asentamiento de la técnica conductancia incremental y lógica difusa, en el que se establece el tiempo general para las simulaciones con valores de referencia.

Tabla 4. Tiempo de asentamiento para cada step de la técnica P&O

Step 300w/m^2	Step 600w/m^2	Step 1000w/m^2
0.473 seg	0.651 seg	0.740 seg

4.2.1.4 Comportamiento corriente, voltaje y potencia con valores de referencia para la técnica perturbar y observar

En la figura 22 se puede observar que las curvas son muy estables, la corriente más que el voltaje y la potencia siendo el producto de estas dos, sobre todo en el tercer *step* tiene una oscilación más marcada, el cual corresponde a la entrada de irradiancia de $1000\text{w}/\text{m}^2$.

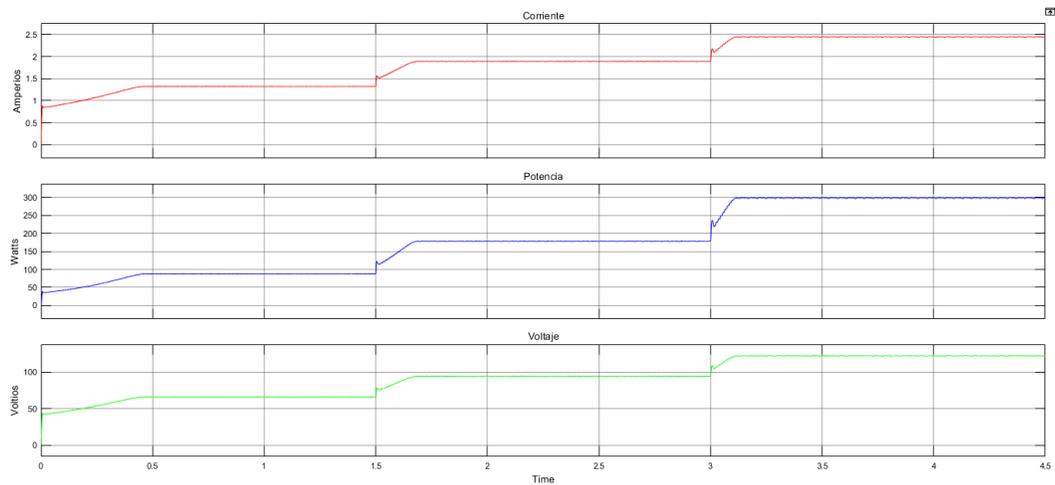


Figura 22. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia para P&O
Fuente: Esta investigación

Con la ayuda de Matlab se puede calcular la energía total entregada por cada técnica, utilizando el comando “*Trapz*”, en el ingresan dos vectores, el tiempo de simulación (*s*) y la potencia (*w*) obtenida en cada punto, lo que hace es calcular el área bajo la curva y por esto el resultado entregado es la energía medida en julios o watts por segundo. Estos vectores los entrega el bloque de “*Matlab function*”.

La codificación del *trapz* es la siguiente:

```
vector_1=vector_de_datos_de_potencia.Data;  
vector_2=vector_de_tiempo.Time;  
energia=trapz(vector_2,vector_1)
```

La energía entregada por *P&O* con *trapz* para los valores de referencia es 822.8896w.s , esta es acumulada durante los 4.5 segundos de simulación con los 3 *steps* de

irradiancia y el tiempo real para que la técnica perturbar y observar entregara los resultados fue de 13:03 min.

4.2.1.4.1 Comportamiento potencia de salida

Para verificar si el control está siguiendo el *MPP*, se revisó la curva de potencia en cada step después de alcanzar la estabilización, con ayuda de “*cursor measurements*” de Simulink se puede visualizar los valores demarcados en un círculo rojo, estos corresponden a los puntos negros sobre la curva.

A cada valor de potencia entregado por *step*, se le sacó un porcentaje el cual corresponde a la cercanía que tiene con el comportamiento del panel solar según su fabricante, el cual se muestra en las gráficas 14, 15 y 16 correspondientes a 300 w/m^2 , 600 w/m^2 y 10000 w/m^2 respectivamente. Y así establecer si era apta o no para implementarla con los valores reales entregados por la estación Davis. El porcentaje se lo sacó utilizando la regla de 3 tomando como el 100% el valor dado por el fabricante.

El punto 1 de la figura 23 corresponde al cursor ubicado sobre el primer *step* que muestra la potencia entregada por 300 w/m^2 , está se estabilizó en 85.163 watts, al remitirse a la figura 14 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia entregada para esta irradiancia es de 90.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 93.689%.

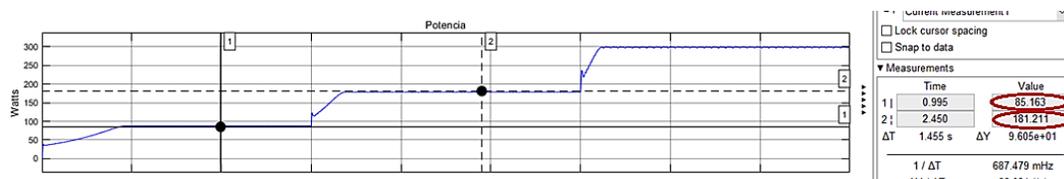


Figura 23. Comportamiento de potencia para 300 w/m^2 y 600 w/m^2 con P&O

Fuente: Esta investigación

El punto 2 de la figura 23 corresponde al cursor ubicado sobre el segundo *step* que muestra la potencia entregada por 600 w/m^2 , está se estabilizó en 181.211 watts, al remitirse a la figura 15 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia obtenida para esta irradiancia es de 184.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 98.004%.

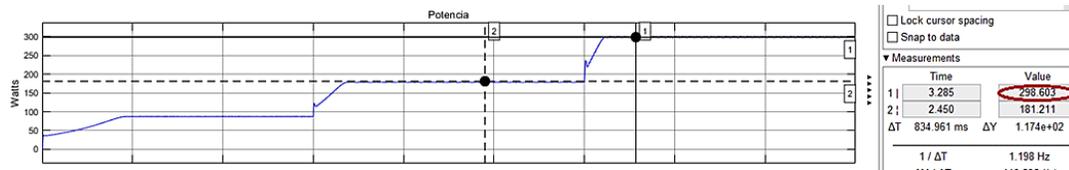


Figura 24. Comportamiento de potencia para 1000w/m^2 con P&O

Fuente: Esta investigación

El punto 1 de la figura 24 corresponde al cursor ubicado sobre el tercer *step* que muestra la potencia entregada por 1000 w/m^2 , ésta se estabilizó en 298.603 watts, al remitirse a la figura 16 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia entregada para esta irradiancia es de 309.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 96.355%.

Con lo anterior se puede concluir que esta técnica en los *steps* tiene un porcentaje cercano al comportamiento del sistema sin carga siguiendo el *MPP*, por lo cual esta técnica, se encuentra en condiciones óptimas para simular los datos reales, y compararlas con las otras dos técnicas.

La principal dificultad que se obtuvo en *P&O* no estuvo en la implementación del código si no en establecer los valores de inductancia y capacitancia del convertidor *BOOST*. Con esos valores el programa seguía el punto de máxima potencia pero en la onda se generaba mucho ruido, la potencia entregada variaba alrededor de 40w por *step*, para estabilizar la onda se tuvo en cuenta la teoría de Mohan de “ondulación o rizo del voltaje de salida”, en la que se tiene en cuenta la frecuencia de conmutación, por esto se procedió a modificar el *PWM*, los valores variaban entre 20 KHz y 50 KHz y se estableció un *PWM* de 30 KHz ya que este permite que el Mosfet este estable y la capacitancia e inductancia permanezcan normales. Después de esto se logró obtener una salida más limpia.

4.2.2 Implementación técnica conductancia incremental (*INC*) con valores de referencia

Es una alternativa a la estrategia Perturbar y Observar, se basa en el hecho de que la derivada de la potencia respecto a la tensión del generador fotovoltaico se anula en el punto de potencia máxima.

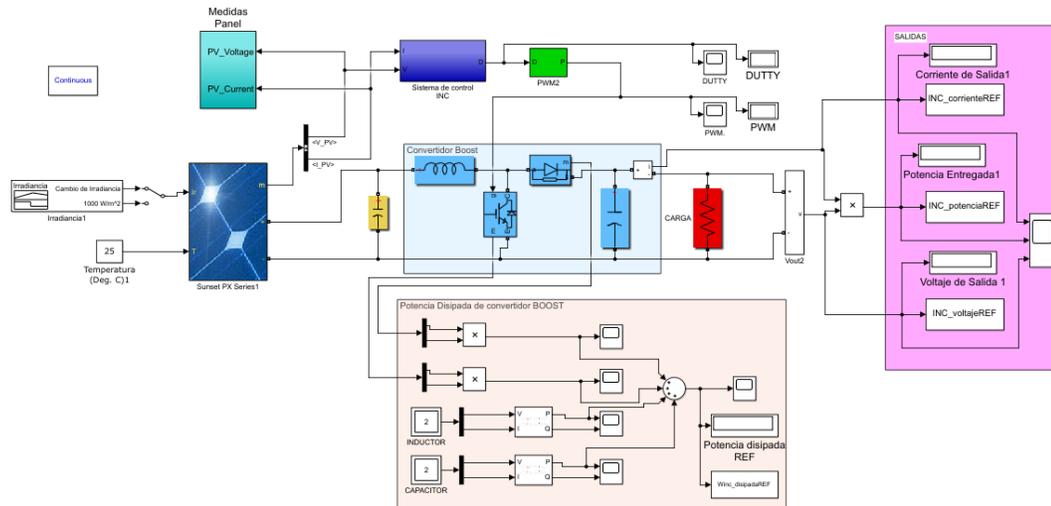


Figura 25. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas INC
Fuente: Esta investigación

En la figura 25 se observa la compilación del sistema fotovoltaico, con el convertidor *BOOST*, el control *INC*, el *PWM* establecido anteriormente además de un bloque donde se está calculando la energía disipada por dicho convertidor.

La irradiancia y la temperatura son los valores de referencia explicados en la tabla 3.

4.2.2.1 Código

El sistema de control *INC* se lo configuro en dos partes, la principal donde se hace el reconocimiento de las variables de entrada (voltaje y corriente) con un código de bloques del *software* de Simulink, aquí están los bloques de almacenamiento para comparar el resultado anterior y el presente como lo pide el diagrama de flujo. Y la segunda parte que es la lógica matemática (figura 27), se encuentra en un script, el cual se lo llama a Simulink a través del bloque *MATLAB Function*.

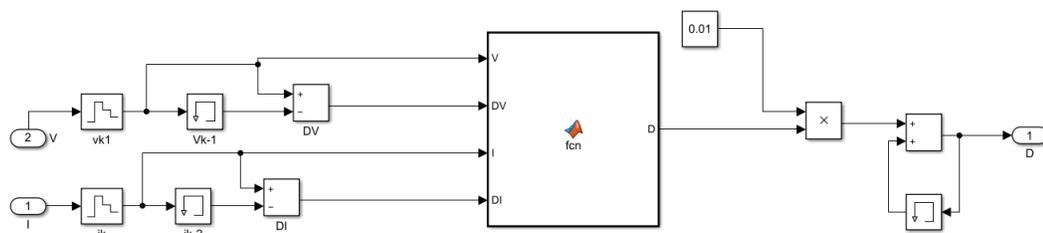


Figura 26. Código de bloques INC
Fuente: Esta investigación

```

function D = fcn(V,DV,I,DI)
D = 0;
if(DV==0)
    if(DI==0)
        D=0;
    end
    if(DI>0)
        D=-1;
    end
    if(DI<0)
        D=1;
    end
end
else
    if(DI/DV==-I/V)
        D=0;
    end
    if(DI/DV>-I/V)
        D=-1;
    end
    if(DI/DV<-I/V)
        D=1;
    end
end
end

```

Figura 27. FNC, código script INC
Fuente: Esta investigación

Después que las variables de entrada pasan por el código, la salida de este es el *duty* o ciclo de trabajo el cual entra al *PWM* con una señal digital y este con pulsos de 0 o 1, apaga o enciende el Mosfet respectivamente.

4.2.2.2 Duty

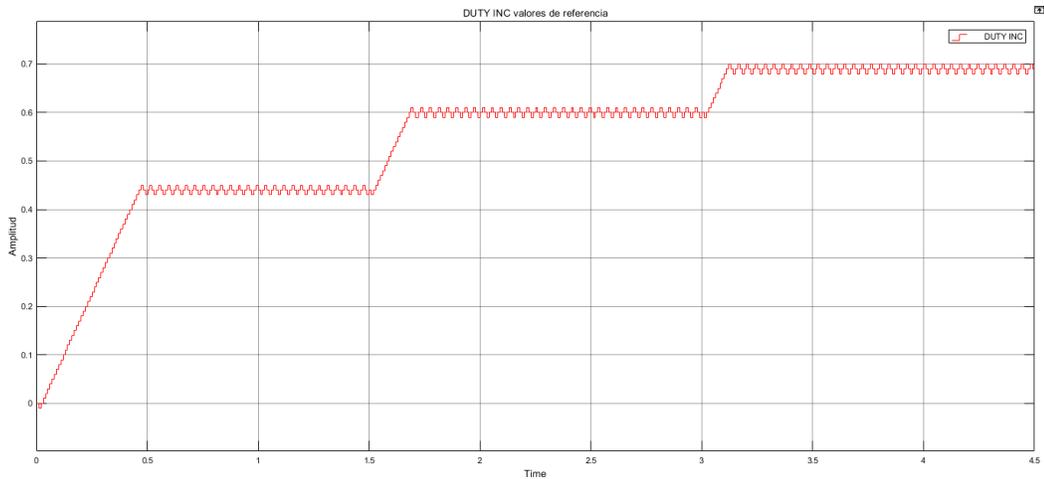


Figura 28. Comportamiento del duty para INC
Fuente: Esta investigación

En la figura 28 se perciben los cambios del *duty* que están dados cada 0.01 segundos durante los 4.5 segundos que dura la simulación, y los 3 *steps* que se dan por el cambio de irradiancia.

4.2.2.3 *Tiempo de asentamiento de la curva de potencia por cada step para conductancia incremental*

Se tomó el tiempo de asentamiento por cada step como se muestra en la figura 29, en esta se observa un punto negro sobre la curva de potencia, que se refiere a la ubicación del cursor justo cuando la curva se estabiliza, al lado derecho de esta en un círculo rojo se muestra el tiempo cuando ocurre, cada grafica corresponde a un valor de irradiancia diferente, como se evidencia en el recuadro bajo la curva de potencia y el compilado de estos valores se encuentran en la tabla 5.

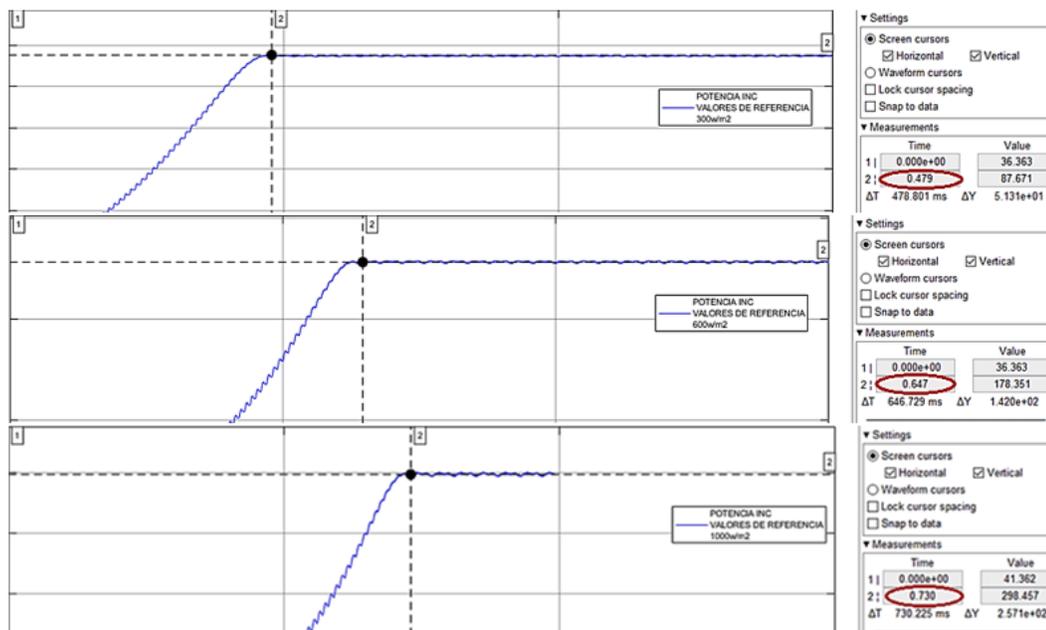


Figura 29. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m^2 600w/m^2 1000w/m^2 en INC
Fuente: Esta investigación

Tabla 5. Tiempo de asentamiento para cada Step de la técnica INC

Step 300w/m ²	Step 600w/m ²	Step 1000w/m ²
0.479 seg	0.647 seg	0.730 seg

4.2.2.4 Comportamiento corriente, voltaje y potencia con valores de referencia para la técnica conductancia incremental

En la figura 30 se puede observar que las curvas son estables, tienen una oscilación por step de 6 watts aproximadamente, en el tercer step es más marcada, de 10 watts el cual corresponde a la entrada de irradiancia de 1000w/m².

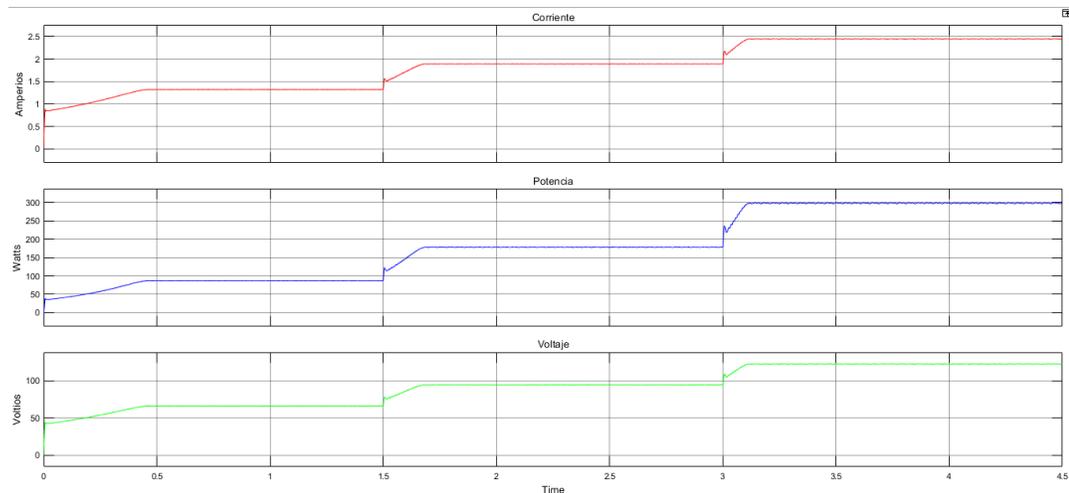


Figura 30. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia con INC

Fuente: Esta investigación

Con la ayuda de Matlab es posible calcular la energía total entregada por cada técnica, utilizando el comando “Trapz”, en el ingresan dos vectores, el tiempo de simulación (s) y la potencia (w) entregada en cada punto; lo que hace es calcular el área bajo la curva y por esto, el resultado entregado es la energía medida en julios o watts por segundo. Estos vectores los entrega el bloque de “Matlab function”.

La codificación del trapz es la siguiente:

```
vector_1=vector_de_datos_de_potencia.Data;
vector_2=vector_de_tiempo.Time;
energia=trapz(vector_2,vector_1)
```

La energía entregada por INC con trapz para los valores de referencia es 822.8896w.s esta es la acumulada durante los 4.5 segundos de simulación con los 3 *steps* de irradiancia y el tiempo real de simulación para que la técnica conductancia incremental entregara los resultados fue de 12:01 min.

4.2.2.4.1 Comportamiento potencia de salida

Para verificar si el control está siguiendo el *MPP*, se revisó la curva de potencia en cada step después de alcanzar la estabilización, con ayuda de “*cursor measurements*” de Simulink se puede visualizar los valores demarcados en un círculo rojo, estos corresponden a los puntos negros sobre la curva.

El punto 1 de la figura 31 corresponde al cursor ubicado sobre el primer *step* que muestra la potencia entregada por 300 w/m², ésta se estabilizó en 85.163 watts, al remitirse a la figura 14 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia dada para esta irradiancia es de 90.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 93.689%.

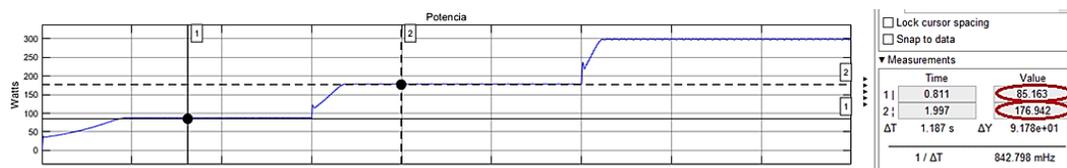


Figura 31. Comportamiento de potencia para 300w/m² y 600w/m² con INC

Fuente: Esta investigación

El punto 2 de la figura 31 corresponde al cursor ubicado sobre el segundo *step* que muestra la potencia entregada por 600 w/m², ésta se estabilizó en 176.942 watts, al remitirse a la figura 15 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia dada para esta irradiancia es de 184.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 95.696%.

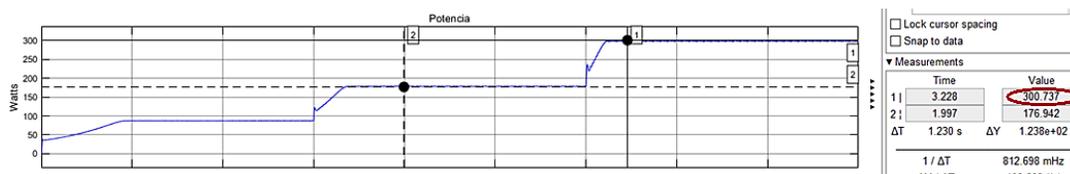


Figura 32. Comportamiento de potencia para 1000w/m² con INC

Fuente: Esta investigación

El punto 1 de la figura 32 corresponde al cursor ubicado sobre el tercer *step* que muestra la potencia entregada por 1000 w/m^2 , ésta se estabilizó en 300.737 watts, al remitirse a la figura 16 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia dada para esta irradiancia es de 309.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 97.043%.

Con lo anterior se puede concluir que esta técnica en los *steps* tiene un porcentaje cercano al comportamiento del sistema sin carga siguiendo el *MPP*, por lo cual está, se encuentra en condiciones óptimas para simular los datos reales, y compararlas con las otras dos técnicas.

En esta simulación no se obtuvo problemas ya que al ser una modificación del *P&O* su funcionamiento es muy parecido y se pueden utilizar los mismos valores en el convertidor *BOOST* y el *PWM*, en lo que se diferencian es en el tiempo de simulación y el costo computacional en cuanto a *RAM*. Siendo, más rápido este.

Con el fin de hacer una validación en el código de *INC*, se realizó una modificación y se obtuvo una codificación total en bloques con lógica matemática con ayuda de Simulink-Matlab, como se muestra en la figura 33, con esto se puede comprobar que las modificaciones en el código basadas en el diagrama de flujo no alteran el resultado ni el tiempo real de simulación.

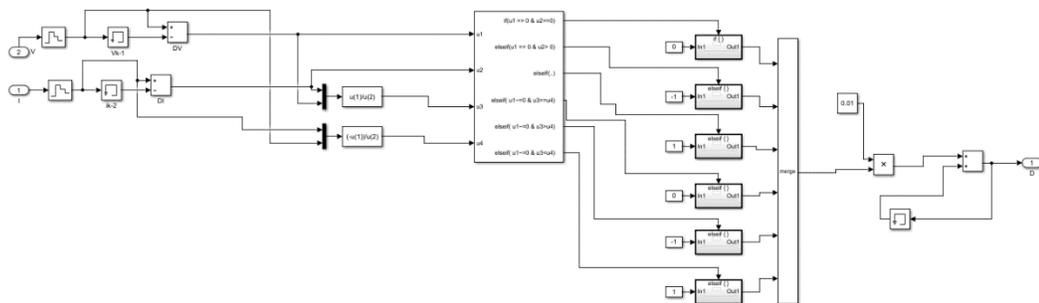


Figura 33. Codificación en bloques de *INC*
Fuente: Esta investigación

4.2.3 Implementación técnica lógica difusa (*FUZZY*) con valores de referencia

Esta técnica no cuenta con un diagrama de flujo genérico, si no con un diagrama de bloques (ver figura 12), por lo tanto, en este es necesario definir, las variables lingüísticas, la

tabla de reglas, y las funciones de membresía tanto de entrada (voltaje y potencia) como de salida (*duty*).

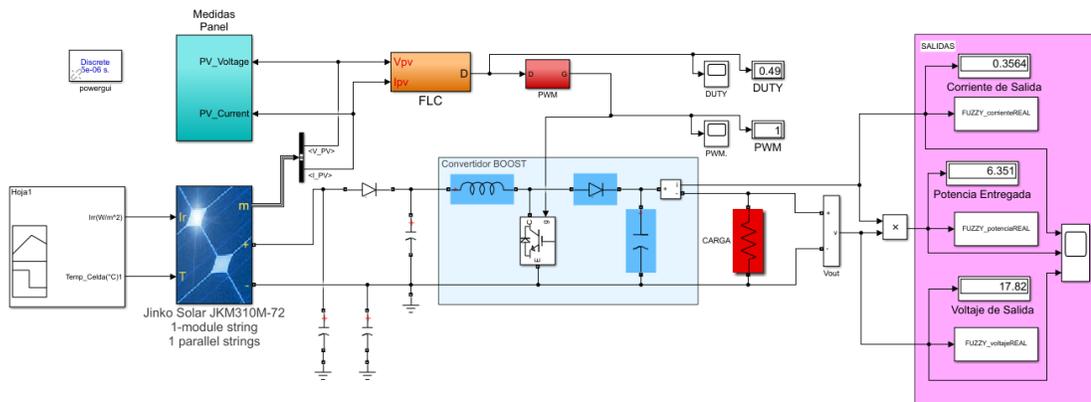


Figura 34. Sistema fotovoltaico con adaptación de múltiples técnicas FUZZY
Fuente: Esta investigación

4.2.3.1 Código

Para implementar este control en Simulink, se utilizó la app de Matlab, “*Fuzzy Logic Toolbox*”, como se muestra en la figura 35, en esta se ingresa el voltaje (V_n) y la potencia (P_n) como funciones de membresía de entrada, estas dos ingresan a un bloque llamado “mppt1” en el que se encuentra la tabla de reglas, definida por las variables lingüísticas, y el cruce de estas da como resultado la función de membresía de salida *duty* (D), y este pulso es el que entra al *PWM* activando y desactivando el Mosfet.

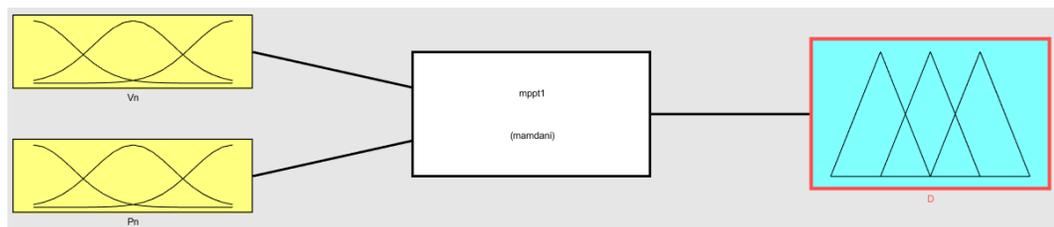


Figura 35. Fuzzy Logic Toolbox-Simulink Matlab
Fuente: Matlab-Simulink

Para detallar más el proceso del control de lógica difusa, se dividió en 3 partes principales, *fuzzificación*, *inferencia* y *defuzzificación*.

4.2.3.1.1 Fuzzificación

En esta etapa, las variables de entrada numéricas se calculan o convierten en variables lingüísticas basadas en un subconjunto llamado función de pertenencia. Para traducir el valor del cambio en el voltaje y el cambio en la potencia, la entrada difusa “cambio en la potencia” y “cambio en el voltaje” está diseñada con siete variables cada una al igual que la salida; la salida del controlador de lógica difusa es el cambio en el ciclo de trabajo, las cuales se encuentran en la tabla 6 y los límites de la función de membresía de entrada y salida (certeza en y, y discurso en x) aplicados en el sistema se deciden por el conocimiento previo del sistema en cuestión, estos se encuentran en la tabla 7.

Tabla 6. Especificación de entradas y salida del controlador Fuzzy con sus variables lingüísticas

Entradas		Salida
Vn	Pn	D
NB	NB	NB
NM	NM	NM
NS	NS	NS
ZE	ZE	ZE
PS	PS	PS
PM	PM	PM
PB	PB	PB

Donde,

PB es, Positivo grande

PM es, Positivo medio

PS es, Positivo pequeño

ZE es, Cero

NS es, Negativo pequeño

NM es, Negativo medio

NB es, Negativo grande

Tabla 7. Límites de las funciones de membresía

Límites de las funciones de membresía (discurso)		
Vn	Pn	D
[-6 6]	[-6 6]	[-0.2 0.2]

En la figura 36 se tiene una de las dos entradas del sistema, en esta se tiene la entrada con el cambio de voltaje y en la figura 37 el cambio con respecto a la potencia. Estas dos son exactamente iguales, en estas se observan gráficamente las variables lingüísticas de la tabla 6 con los límites de la tabla 7. En el eje y “certeza” la amplitud es de 1, que hace referencia al 100%.

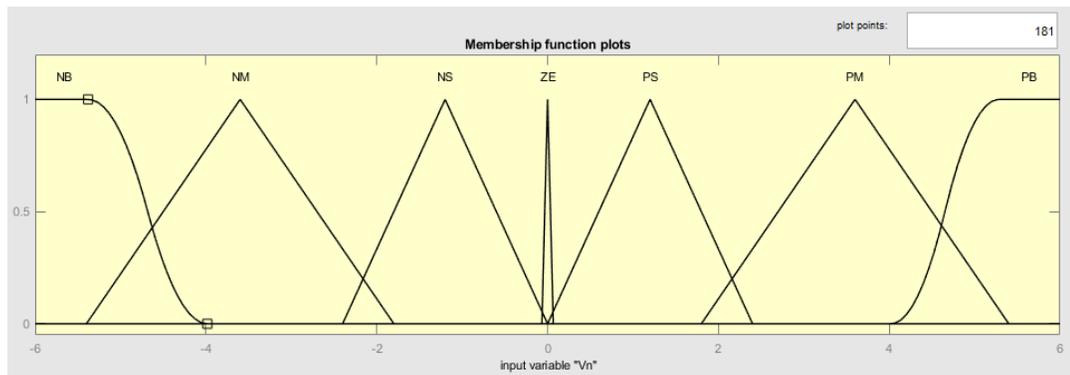


Figura 36. Entrada de cambio de Fuzzy en voltaje
Fuente: Matlab

El producto de la certeza de estas dos entradas es el valor que se ubica en la salida, por esta razón la salida tiene la misma amplitud.

Es decir, si Vn es 0.6 y Pn es 0.3, la salida se ubica en 0.18 del eje y, que corresponde al 18% de certeza. Y la ubicación del eje x en la salida se hace con la tabla 8.

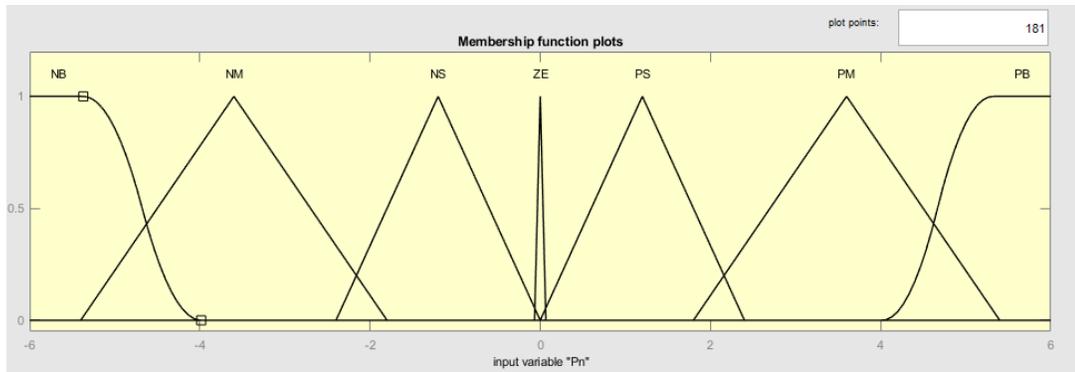


Figura 37. Entrada de cambio de Fuzzy en potencia

Fuente: Matlab

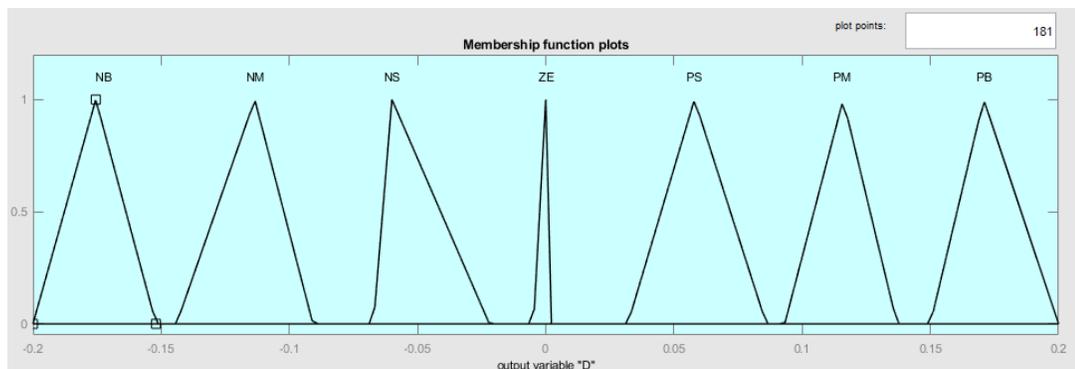


Figura 38. Salida del FLC como cambio en el ciclo de trabajo

Fuente: Matlab

El diseño de cada una de estas variables lingüísticas está definida por un experto del tema, este diseño se encuentra en los estudios de (Garg, R.Saida Nayak, & Sushma Gupta, 2015) y (Mahamudul, Saad, & Henk, 2013).

4.2.3.1.2 Interferencia

El algoritmo de reglas difusas recopila un conjunto de reglas de control difusas en un orden específico, estas reglas se utilizan para controlar un sistema que cumpla con los requisitos de rendimiento deseados y están diseñadas a partir del conocimiento de un experto del sistema. El sistema de inferencia en un controlador de lógica difusa se puede subdividir en tres partes:

Base de reglas: Consiste en una serie de reglas *If-Then* para el correcto funcionamiento del controlador.

Base de datos: Consiste en todas las funciones de membresía definidas por el usuario que se utilizarán en las reglas.

Mecanismo de razonamiento: Básicamente procesa las reglas dadas y de acuerdo con unas reglas particulares y una condición dada nos proporciona el resultado requerido.

Tabla 8. Tabla de reglas, relación entre variables de entrada y salida

		Pn						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Vn	NB	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NB
	NM	PM	PS	PS	NS	NS	NS	NM
	NS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	NS
	ZE	NS	NS	PS	ZE	ZE	NS	NS
	PS	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS
	PM	NM	NM	NS	PS	PS	PS	PS
	PB	NB	NB	NM	PS	PS	PM	PB

En la tabla 8 se puede visualizar como se realizó el cruce de voltaje y potencia, y así se define la salida “*duty*”. Esta tabla está dada por un experto en (Garg, R.Saida Nayak, & Sushma Gupta, 2015).

Con el siguiente ejemplo se explica el funcionamiento de esta tabla.

En la entrada Vn, el programa está leyendo la variable lingüística PM, y en Pn nos indica PS, haciendo el cruce la salida “*duty*” es PS.

La figura 39 muestra la vista de la superficie de las funciones de entrada y salida difusas. A partir de esta, se observa claramente la variación del ciclo de trabajo con respecto

al cambio de potencia y voltaje, esto también verifico el correcto funcionamiento del controlador difuso.

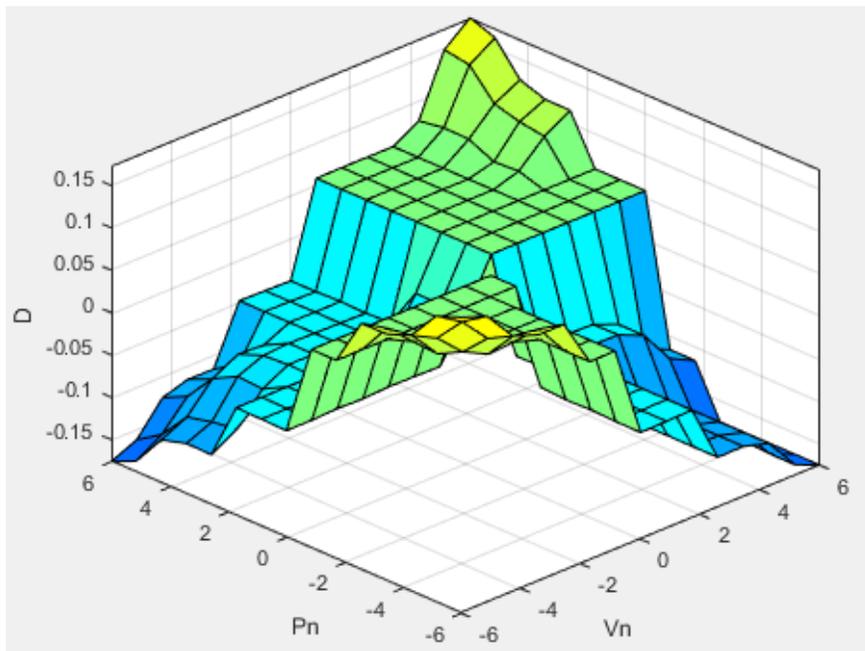


Figura 39. Vista de la superficie de las funciones de membresía - entrada vs la salida

Fuente: Esta investigación

4.2.3.1.3 Defuzzificación

La entrada para el proceso de *defuzzificación* es un conjunto difuso y la salida es un número único que debe aplicarse al sistema, para la salida final deseada según el sistema se requiere un valor no difuso de la salida de control, por lo tanto, una etapa de *defuzzificación*.

Este proceso ocurre dentro de *Fuzzy Logic Toolbox*.

4.2.3.1.4 Modelo Matlab / Simulink de MPPT basado en lógica difusa

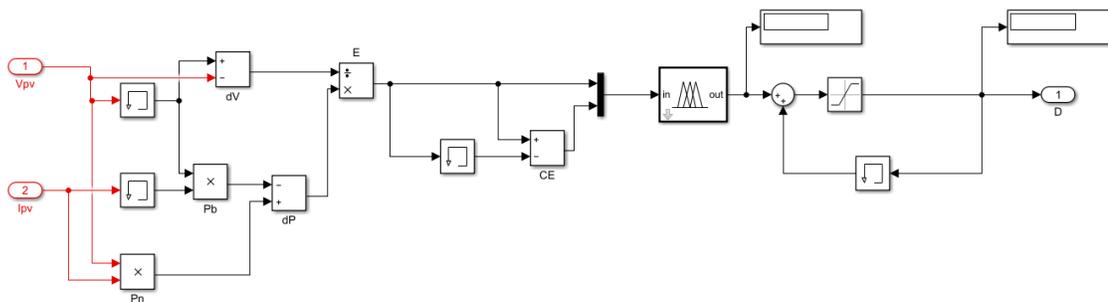


Figura 40. Modelo de controlador lógico difuso

Fuente: Esta investigación

En la figura 40 se observa el control externo del control difuso, donde se llamó la corriente y el voltaje, para obtener la potencia. También se encuentran las memorias para guardar el valor anterior de voltaje y potencia, ya que “*Fuzzy Logic Toolbox*” trabaja con el error y la derivada del error, y para definirlos es necesario los valores anteriores y actuales. La salida de *Fuzzy Logic Toolbox* se definió una saturación que limita la amplitud del *duty*, esta saturación se define para la implementación en una tarjeta de desarrollo según especificaciones del fabricante.

4.2.3.2 *Duty*

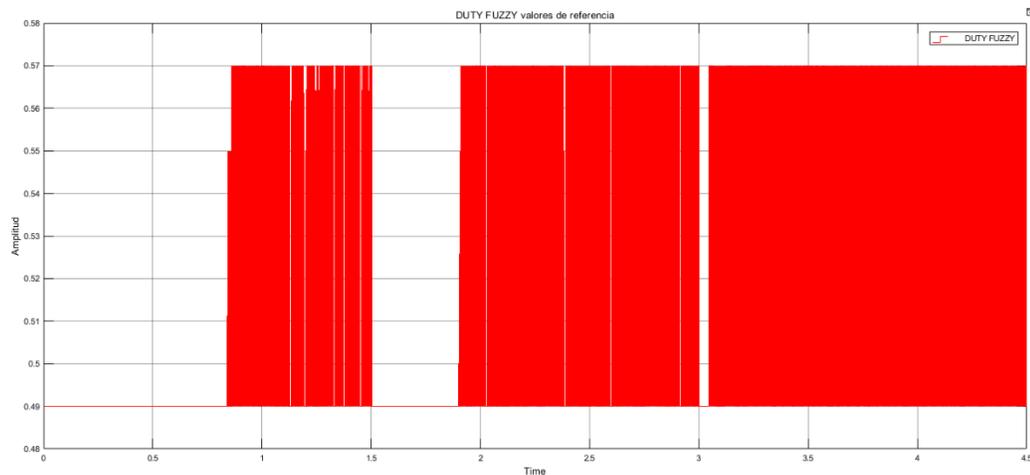


Figura 41. Comportamiento del *duty* para FUZZY

Fuente: Esta investigación

En la figura 43 se perciben los cambios del *duty* que están dados cada 0.01 segundos durante los 4.5 segundos que dura la simulación, es este control los 3 *steps* no están marcados como los dos anteriores, pero se alcanza a percibir el cambio de irradiancia en, 1.5 segundos de 300w/m^2 a 600w/m^2 y en 3 segundos de 600w/m^2 a 1000w/m^2 .

4.2.3.3 *Tiempo de asentamiento de la curva de potencia por cada step para lógica difusa*

Se tomó el tiempo de asentamiento por cada *step* como se muestra en la figura 42, en esta se observa un punto negro sobre la curva de potencia, que se refiere a la ubicación del cursor justo cuando la curva se estabiliza, al lado derecho de esta en un círculo rojo se muestra el tiempo cuando ocurre, cada grafica corresponde a un valor de irradiancia diferente, como

se muestra en el recuadro bajo la curva de potencia y el compilado de estos valores se encuentran en la tabla 9.

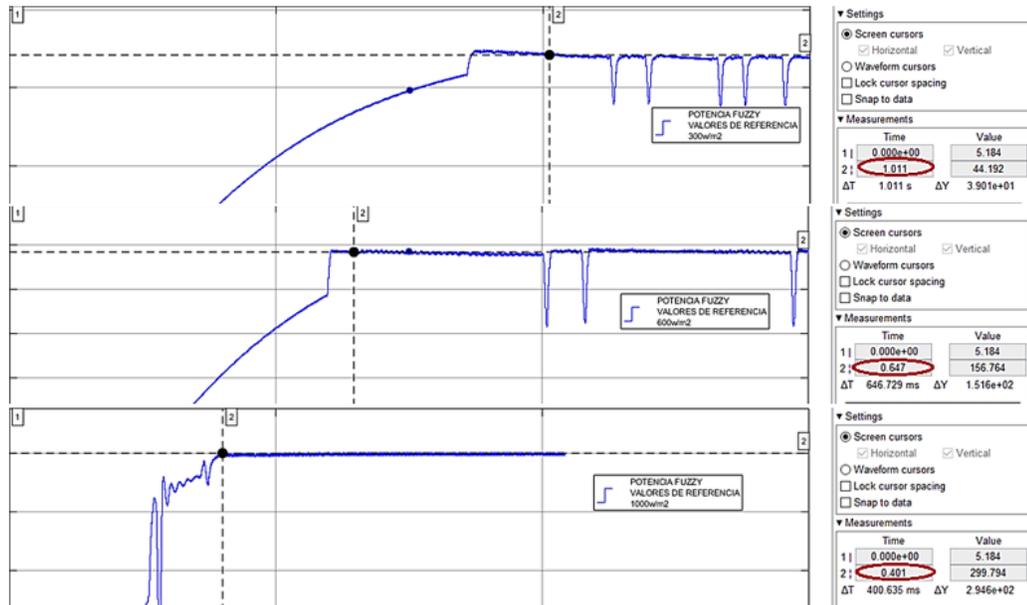


Figura 42. Curvas del tiempo de asentamiento para 300w/m^2 600w/m^2 1000w/m^2 en FUZZY
Fuente: Esta investigación

Tabla 9. Tiempo de asentamiento para cada Step de la técnica FUZZY

Step 300w/m^2	Step 600w/m^2	Step 1000w/m^2
1.011	0.647	0.401

4.2.3.4 Comportamiento corriente, voltaje y potencia con valores de referencia para la técnica de lógica difusa

En la figura 43 se puede observar que el primer *step* es muy débil en comparación con los dos siguientes y demora mucho en estabilizarse, el segundo *step* tiene unos picos negativos, estos se los logro minimizar, implementando dos capacitores, para que actúen como filtro, junto al convertidor *BOOST*. En el tercer *step*, se evidencia que la señal es muy estable y la oscilación de este es mínima.

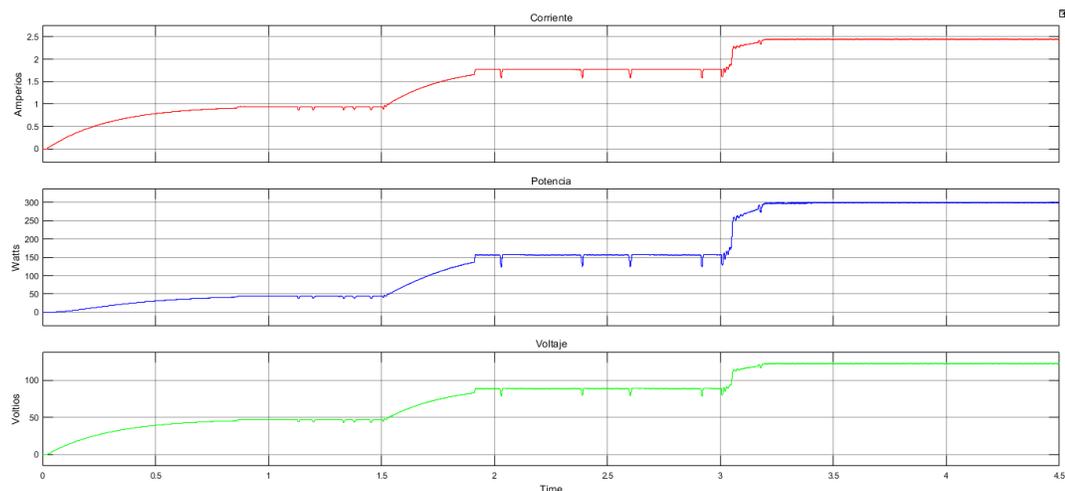


Figura 43. Comportamiento de corriente, voltaje y potencia con FUZZY
Fuente: Esta investigación

Con la ayuda de Matlab se puede calcular la energía total entregada por cada técnica, utilizando el comando “*Trapz*”, en el ingresan dos vectores, el tiempo de simulación (s) y la potencia (w) entregada en cada punto, lo que hace es calcular el área bajo la curva y por esto el resultado entregado es la energía medida en julios o watts por segundo. Estos vectores los entrega el bloque de “*Matlab function*”.

La codificación del trapz es la siguiente:

```
vector_1=vector_de_datos_de_potencia.Data;
vector_2=vector_de_tiempo.Time;
energia=trapz(vector_2,vector_1)
```

La energía entregada por FUZZY con trapz para los valores de referencia es 696.4693w.s esta es la acumulada durante los 4.5 segundos de simulación con los 3 *steps* de irradiancia y el tiempo real de simulación para que la técnica lógica difusa entregara los resultados fue de 43:10 min.

4.2.3.4.1 Comportamiento potencia de salida

Para verificar si el control está siguiendo el *MPP*, se revisó la curva de potencia en cada step después de alcanzar la estabilización, con ayuda de “*cursor measurements*” de Simulink se puede visualizar los valores demarcados en un círculo rojo, estos corresponden a los puntos negros sobre la curva.

El punto 1 de la figura 44 corresponde al cursor ubicado sobre el primer *step* que muestra la potencia entregada por 300 w/m^2 , está se estabilizó en 42.477 watts, al remitirse a la figura 14 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia entregada para esta irradiancia es de 90.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 46.729%.

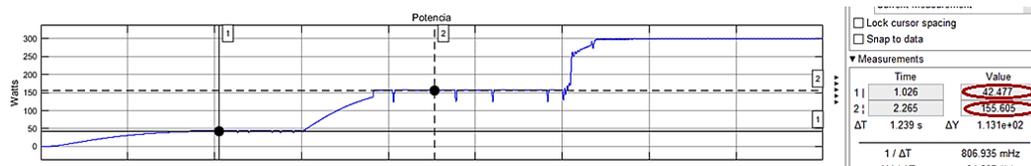


Figura 44. Comportamiento de potencia para 300 w/m^2 y 600 w/m^2 con FUZZY
Fuente: Esta investigación

El punto 2 de la figura 44 corresponde al cursor ubicado sobre el segundo *step* que muestra la potencia entregada por 600 w/m^2 , está se estabilizó en 155.605 watts, al remitirse a la figura 15 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar JKM310M-72, se observa que la potencia entregada para esta irradiancia es de 184.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 84.156%.

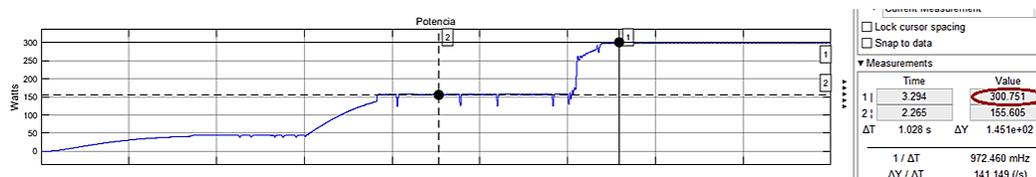


Figura 45. Comportamiento de potencia para 1000 w/m^2 con FUZZY
Fuente: Esta investigación

El punto 1 de la figura 45 corresponde al cursor ubicado sobre el tercer *step* que muestra la potencia entregada por 1000 w/m^2 , está se estabilizó en 300.751 watts, al remitirse a la figura 16 correspondiente al comportamiento de la curva irradiancia del panel Jinko Solar

JKM310M-72, se observa que la potencia entregada para esta irradiancia es de 309.9 watts, con un porcentaje de eficiencia de 97.048%.

Con lo anterior se puede concluir que en esta técnica a medida que aumenta la irradiancia disminuye la diferencia entre el valor teórico y práctico de la potencia entregada por el control difuso y la diferencia en este último *step* es mínima, inclusive es la menor de las tres técnicas. Al sacar el porcentaje de los 3 *steps* dio 75.98% de eficiencia en la técnica, por lo cual esta técnica está en condiciones óptimas para simular los datos reales, y compararlas con las otras dos técnicas.

Para el buen funcionamiento del *FUZZY* se realizó una modificación en el bloque *powergui* de Simulink, teniendo en cuenta que es necesario para simular cualquier modelo que contenga bloques de sistemas de energía especializados “*Simscape™ Electrical™*”. Este almacena el circuito Simulink equivalente que representa las ecuaciones de espacio de estado del modelo (MathWorks, 2020).

La configuración de la pestaña *Solver* selecciona el tipo de simulación, ya sea continuo, discreto o faso. El discreto se utiliza para realizar una discretización del modelo, es decir se especifica el “*sample time (s)*” que por defecto es 50e-6 segundos, en el controlador de lógica difusa se trabajó con 5e-6 segundos, con el fin de tener un tiempo de muestreo más largo y también se modificó “*solver selection*” con *ode (45)*, este solo funciona con funciones que utilizan dos argumentos de entrada [t,y,te,ye] donde, “t” son los puntos de evaluación devueltos como vector columna. “y” las soluciones devueltas como *array*; donde cada fila de “y” corresponde a la solución en el valor devuelto de la fila correspondiente en “t”. “te” es la hora del evento o momento de los eventos, devuelto como vector de columna; los momentos de los eventos de “te” corresponden a las soluciones devueltas en “ye” e “ie” especifica qué evento se produjo. “ye” es la solución en el momento del evento, devuelta como un *array*. Por último “ie” es el índice del evento desencadenado, devuelto como vector de columna.

Esto se definió así, porque al dejar la simulación en continuo la *RAM* de los equipos colapsaba, por todos los ciclos que tiene el código de lógica difusa.

4.3 Potencia disipada por el convertidor *BOOST* con los valores de referencia

Según las especificaciones del fabricante del panel, este, debería llegar a 310w o aproximarse a este valor al ingresarle 1000w/m², sin embargo, al simular las tres técnicas, se evidencio que ninguna llegaba a este valor, por esta razón se adjuntó un bloque que midió la energía perdida por el convertidor *BOOST*, siendo esta la sumatoria del capacitor, la bobina, el Mosfet y el diodo como se muestra en la figura 46.

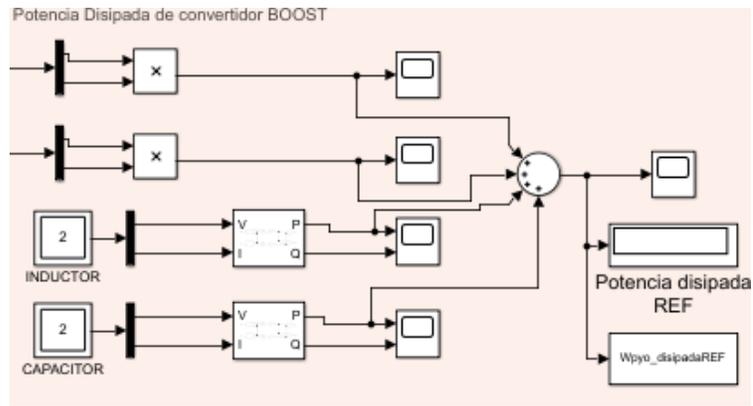


Figura 46. Bloque de medición para la potencia disipada por el convertidor *BOOST*

Fuente: Esta investigación

Este bloque cuenta con un *scope* para observar la gráfica de la potencia vs el tiempo como se evidencia en la figura 47, en ella se visualizan 3 *steps*. El *WorkSpace* que se encarga de guardar los datos simulados en dos vectores, los cuales fueron ingresados a *trapz* lo que dio una energía perdida por calor de 16.8957w.s acumulada durante los 4.5 segundos, con los mismos 3 *steps* de irradiancia (300w/m², 600w/m², 1000w/m²).

En la figura 47 con ayuda de “*cursor measurements*” se observa la potencia que da cada *step*, la potencia está señalada en dos círculos rojos, cada uno de estos hace referencia a la potencia disipada alcanzada en cada *step*, explicados en la tabla 10.

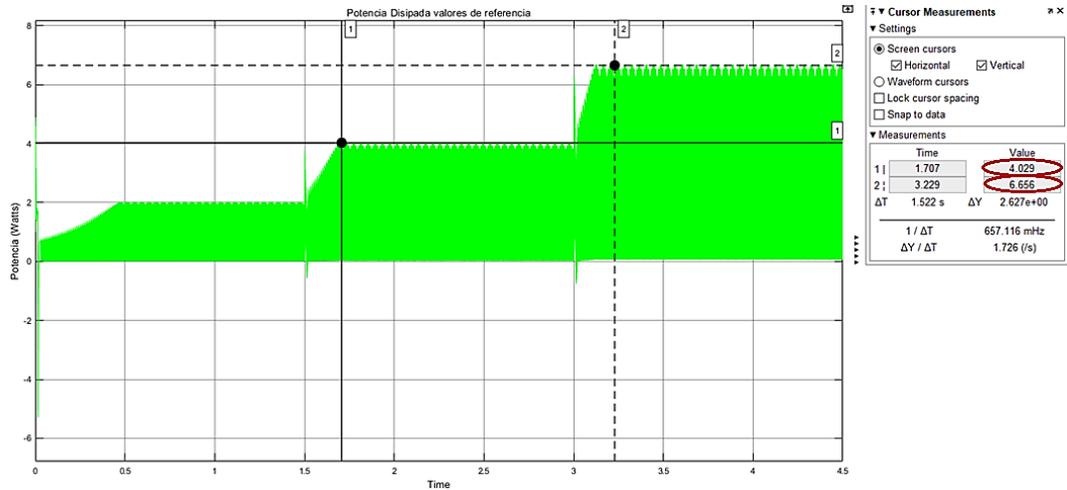


Figura 47. Comportamiento de curva de potencia disipada
Fuente: Esta investigación

Tabla 10. Valores de potencia disipada por step

Irradiancia por step	300 w/m2	600 w/m2	1000 w/m2
Potencia dada Por el fabricante	90.9W	184.9W	309.9W
Potencia disipada	2 watts	4.029 watts	6.656 watts
Porcentaje de disipación	2.2%	2.17%	2.14%

Este procedimiento se realizó para todas las técnicas y con las tres dieron los mismos resultados, la variación fue mínima, oscilaba después de las 3 cifras significativas.

Para sacar el porcentaje de disipación se utilizó la ecuación 12.

$$\frac{P_d}{P_f} \times 100\% = \text{Porcentaje de disipación} \quad (12)$$

Donde,

Pd: Es la potencia disipada por cada step

Pf: Es la potencia que se espera que de por cada step, según el fabricante, esta se la encuentra en las figuras 14, 15 y 16.

4.4 Controlador con adaptación de múltiples técnicas *MPPT*

Después de asegurar que cada técnica está siguiendo con el *MPP*, se prosiguió a implementar el controlador con múltiples técnicas *MPPT*, para evaluar si la eficiencia es mayor con esta conmutación en comparación a cada técnica.

4.4.1 Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico con controlador de múltiples técnicas *MPPT*

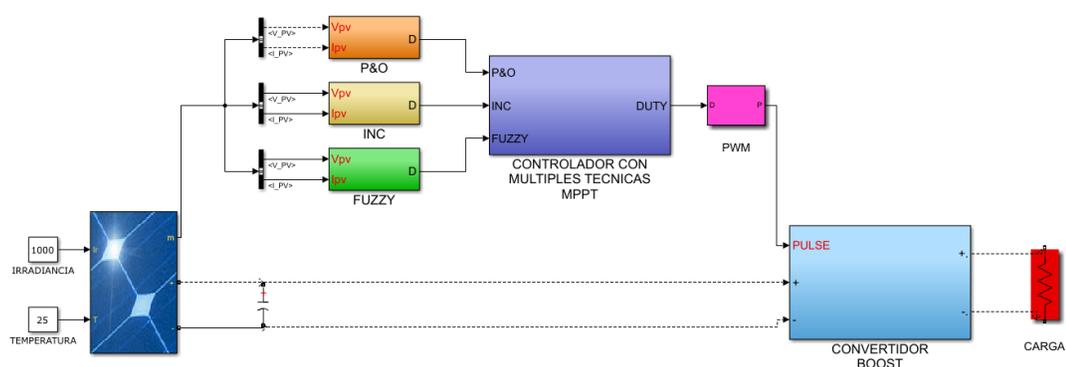


Figura 48. Diagrama de bloques controlador con múltiples técnicas *MPPT*

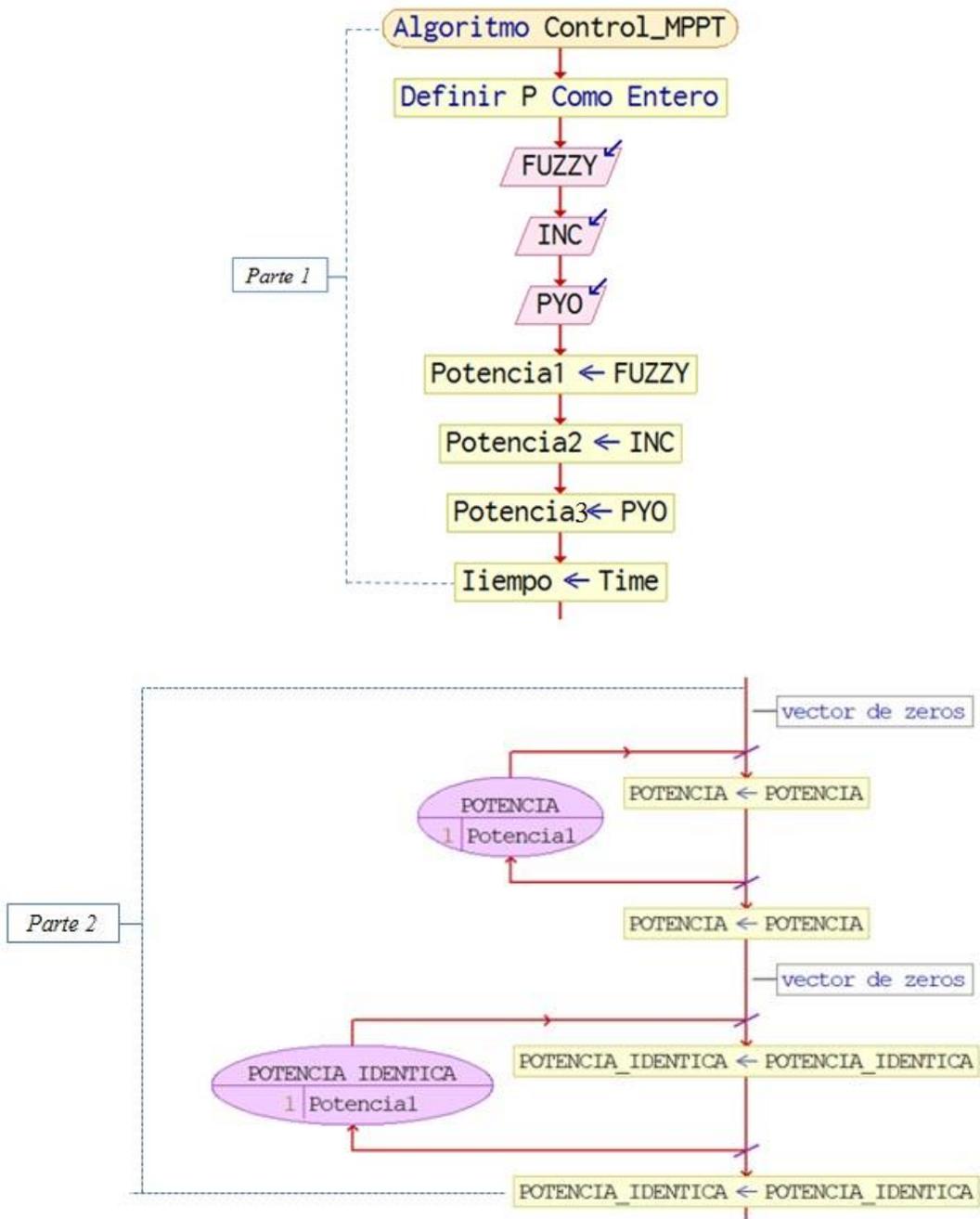
Fuente: Esta investigación

El sistema fotovoltaico con controlador de múltiples técnicas *MPPT* cuenta con la entrada de irradiancia y temperatura, así que, los valores de voltaje y corriente que entregó el panel ingresaron a la codificación de cada técnica, el valor que arrojó cada una de estas, ingresó al controlador con múltiples técnicas *MPPT* y finalmente el código seleccionó la técnica que se utilizó en cada momento.

Esta simulación no fue desarrollada en Simulink, debido al cambio en tiempos de simulación (dos en continuo y una en discreto). Por esto, fue importante la ayuda del bloque *Workspace* para guardar el valor entregado de potencia y el tiempo en forma de vectores, que después fueron llamados desde el código realizado en *Matlab-script*, seguido al desarrollo del proceso, con el comportamiento de estos.

Siendo así en el código se llaman 4 vectores, 3 con datos de potencia, uno por cada técnica y un vector de tiempo, ya que el tiempo se definió igual para cada una de estas.

4.4.2 Diagrama de flujo del controlador con múltiples técnicas MPPT



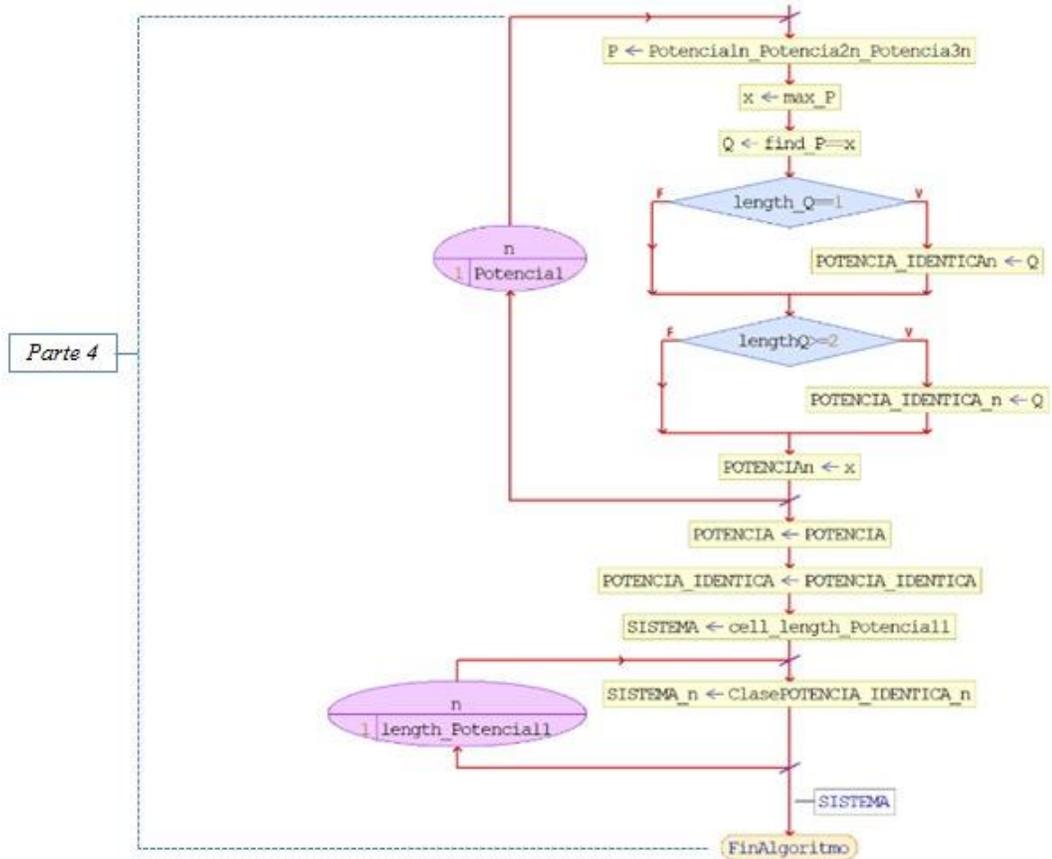
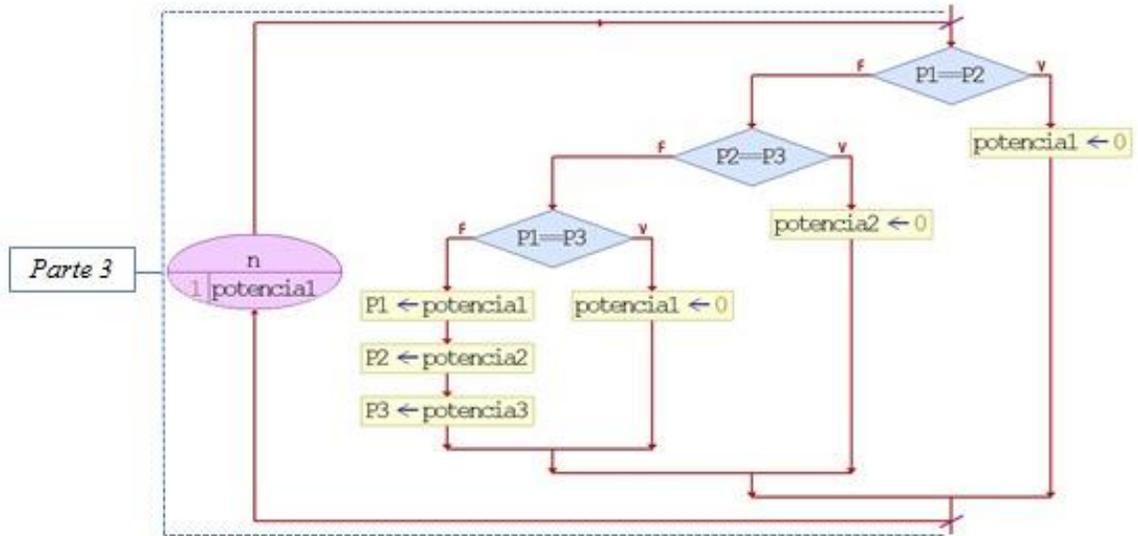


Figura 49. Diagrama de flujo controlador con múltiples técnicas MPPT
Fuente: Esta investigación

4.4.3 Código script controlador de múltiples técnicas *MPPT*

```
clear;
clc;
format long
load('FUZZY_potenciaREF.mat');
load('INC_potenciaREF.mat');
load('PyO_potenciaREF.mat');
Potencial = FUZZY_potenciaREF.Data';
Potencia2 = PyO_potenciaREF.Data';
Potencia3 = INC_potenciaREF.Data';
Tiempo = [TIEMPO_potenciaREF.Time]';
Clase={'Sistema de Conductancia incremental','Sistema de Perturbar y
observar','Sistema de Lógica difusa'};

POTENCIA=zeros(length(Potencial));
POTENCIA=POTENCIA(1:end,1:1);
POTENCIA_IDENTICA=zeros(length(Potencial));
POTENCIA_IDENTICA=POTENCIA_IDENTICA(1:end,1:1);

for n = 1:length(Potencial)
    if Potencial(n)==Potencia2(n)
        Potencial(n)=0;
    else
        if Potencia2(n)==Potencia3(n)
            Potencia2(n)=0;
        else
            if Potencia3(n)==Potencial(n)
                Potencial(n)=0;
            else
                Potencial(n) = Potencial(n);
                potencia2(n) = Potencia2(n);
                Potencia3(n) = Potencia3(n);
            end
        end
    end
    end
    n = n+1;
end

for n=1:length(Potencial)
    P=( [Potencial(n) Potencia2(n) Potencia3(n)] );
    x=max(P);
    Q=find(P==x);
    if length(Q)==1
        POTENCIA_IDENTICA(n)=Q;
    end
    if length(Q)>=2
        Q=Q(1);
        POTENCIA_IDENTICA(n)=Q;
    end
    POTENCIA(n)=x;
end
POTENCIA=POTENCIA(1:end,1:1);
POTENCIA_IDENTICA=POTENCIA_IDENTICA(1:end,1:1);
SISTEMA=cell(length(Potencial),1);
for n=1:length(Potencial)
```

```

        SISTEMA(n)=Clase(POTENCIA_IDENTICA(n));
    end

SISTEMA;
table(POTENCIA,SISTEMA)
plot(Tiempo,Potencia1)
hold on
plot(Tiempo,Potencia2)
hold on
plot(Tiempo,Potencia3)
grid on
plot(Tiempo,POTENCIA,'*')
grid on
axis([0 5 0 350])
title({'CONTROLADOR CON ADAPTACIÓN DE MÚLTIPLES TÉCNICAS MPPT';'MES'})
legend('FUZZY','INC','P&O','CONTROL')
ylabel('Potencia (Watts)')
xlabel('Tiempo (Segundos)')

```

4.4.4 Explicación del código del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT

El anterior código, cuenta con 5 partes, fue importante tener en cuenta que la longitud de estos cuatro vectores debía ser igual, para el correcto funcionamiento del mismo.

Este código fue realizado con dos parámetros, el primero es la magnitud de la potencia, la cual es posible evaluarse en la cuarta parte del código, y el segundo es el tiempo, el que corresponde a una ponderación previa entre el tiempo de asentamiento por step y el tiempo real de simulación lo que permitió realizar una etiqueta predeterminada al código, por el comportamiento de las tres técnicas en su simulación. Esta evaluación, se encuentra detallada en el apartado 5.2, y la explicación en código en la parte 3 de este. Es necesario resaltar, que al momento de simular el código no es necesario repetir las simulaciones, ni modificar estos parámetros, debido a que ya están establecidos.

La primera es en la que se llamaron los tres vectores de potencia, cada uno de una técnica MPPT y el cuarto vector de tiempo que se utilizó para las tres técnicas, ya que el tiempo se estandarizo para estas, así mismo, se les asigno el nombre de cada sistema; sistema de perturbar y observar, sistema de conductancia incremental y sistema de lógica difusa.

En la segunda parte, se crearon dos vectores de ceros, con la misma longitud de los vectores de potencia que se ingresaron al inicio del código, cabe señalar que estos fueron utilizados para realizar el procedimiento en la parte 4 y 5.

En la tercera parte, se encuentra el segundo parámetro que corresponde al tiempo, este se lo utiliza, siempre y cuando alguna de las tres potencias se repita, es decir, se prioriza INC sobre P&O y FUZZY, y P&O sobre FUZZY. Esto fue definido por el tiempo de respuesta de cada control, en su funcionamiento individual, ver tabla 13 y 14. Por esta razón en el código se anula la potencia con menos relevancia, para que en la parte 4 cuando se encuentra la potencia con amplitud mayor no queden dos.

En la cuarta parte, se encuentra el primer parámetro, aquí se realiza la comparación de la potencia de las tres técnicas y se selecciona la mayor; por cada momento de toma de datos. Aquí se utilizan los vectores de ceros, para conservar el momento al que corresponde cada dato de potencia, además del sistema con el que se recolecto “esa” potencia.

Finalmente, en la quinta parte se realiza la tabla que entrega el código, siendo esta de dos columnas, la primera de la potencia que se escogió y la segunda en la que se muestra la técnica que se utilizó, el número de filas va sujeto a la longitud de los vectores, lo que corresponde a la cantidad de números tomados, esta se puede visualizar, en la figura 50. Adicionalmente se crea la gráfica (potencia vs. tiempo) en la que se encuentra el comportamiento de las tres técnicas; estas se las puede diferenciar por el color. Junto a la selección del control; con un asterisco morado. Como se muestra en la figura 51.

POTENCIA	SISTEMA
0	'Sistema de Lógica difusa'
35.4891167321158	'Sistema de Conductacia incremental'
36.3696133585277	'Sistema de Conductacia incremental'

Figura 50. Tabla de potencia y sistema entregada por el código
Fuente: Esta investigación

Este código se comprobó con valores de referencia, para después simular cada mes con los valores reales entregados por la estación Davis, para estas simulaciones los parámetros no cambiaron, lo único que se modificó fueron los vectores de potencia y de tiempo dependiendo del mes, lo cual se evidencia en la tabla 11.

El código entrega la potencia por momento en un vector (POTENCIA), este es el que se ingresa a *trapz* para saber la cantidad de energía recolectada por este, estos valores se encuentran detallados en la tabla 12.

4.5 Simulación del sistema fotovoltaico con el controlador de múltiples técnicas

MPPT con valores de reales de la estación DAVIS por meses

La simulación del código de controlador de múltiples técnicas *MPPT* se desarrolló para cada mes con los valores reales tomados de la estación *Davis*.

Tabla 11. Información de los datos de enero a diciembre

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Inicio	3/01/2018	1/02/2018	1/03/2018	1/04/2018	1/05/2018	1/06/2018
Fin	31/01/2018	28/02/2018	31/03/2018	30/04/2018	31/05/2018	30/06/2018
Número de días	30	27	30	29	30	29
Promedio w/m2	148,030745 3	185,57787 7	131,687368 7	132,811621 4	114,164455 9	127,989099 1
# de datos	7058	8064	6670	8537	8897	7982

	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Inicio	1/07/2018	1/08/2018	1/09/2018	1/10/2018	1/11/2018	1/12/2018
Fin	31/07/2018	31/08/2018	30/09/2018	31/10/2018	30/11/2018	7/12/2018
Número de días	30	30	29	30	29	6
Promedio w/m2	129,55830 99	124,16502 13	134,56440 42	156,34343 08	134,10798 71	134,10963 05
# de datos	8876	8915	8502	8517	8038	1652

En la tabla 11 se encuentra la información detallada de los datos que se tuvieron en cuenta para la simulación, cada mes tiene fecha de inicio y fin de toma de datos, el número de días que estos se tomaron, el promedio de irradiancia en dicho mes, y el total de datos simulados, con el que se define el tiempo de simulación. Lo anterior expresado en la ecuación 11.

La figura 51 hace referencia al mes de enero, aquí se observa el funcionamiento del control más las 3 técnicas individuales, aquí se muestra el comportamiento de la potencia de la técnica perturbar y observar en amarillo, en rojo la de conductancia incremental, y la de lógica difusa en azul. El control esta dado con un “*” en color morado, mostrando la técnica que selecciona en cada momento según los dos parámetros mencionados anteriormente.

Las gráficas del todo del año se encuentran en el anexo 1.

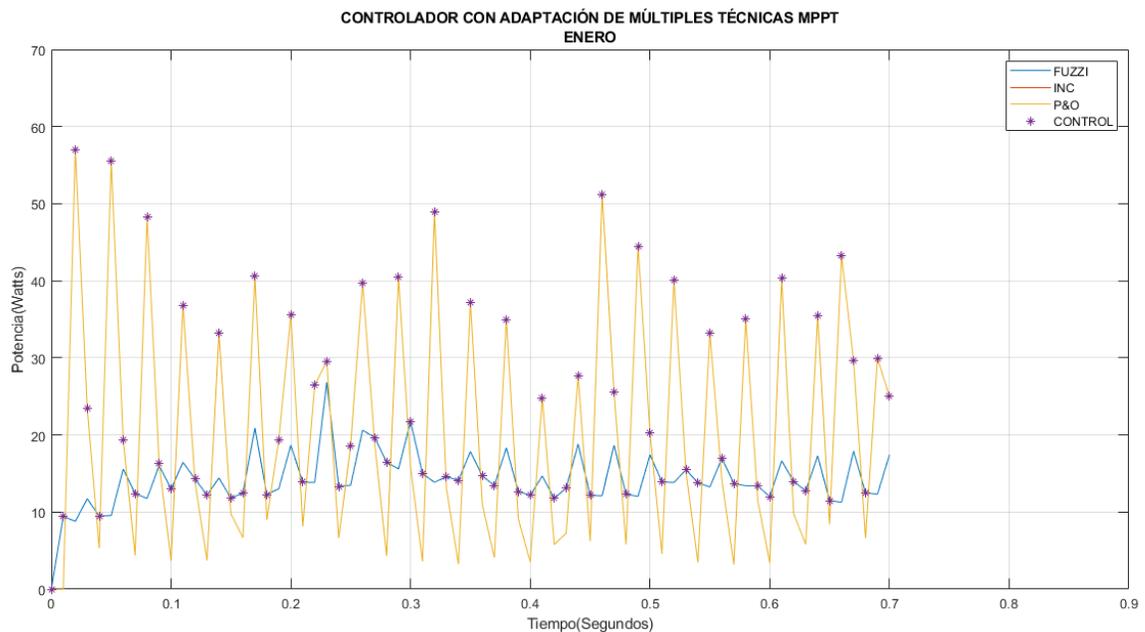


Figura 51. Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT, mes de enero

Fuente: Esta investigación

Tabla 12. Energía (W.s) por mes entregada por cada técnica y por el controlador de enero a diciembre

MES	FUZZY	P&O	INC	CONTROL
Enero	10,0395071282537	14,2343801793411	14,2343822850892	16,4265782502675
Febrero	19,36333439593020	17,2453715042017	17,2453228492496	23,717296883576
Marzo	7,26271069232802	12,6149167712903	12,6148943294245	13,740995137402
Abril	10,75171042467050	17,3749884833611	17,3749713724442	19,763487024846
Mayo	8,53360690066832	16,2856454122564	16,2856561257102	17,740612628947
Junio	9,03642108378496	15,2429070225080	15,2713978321883	17,085063445862
Julio	10,76064346883900	16,9570078442878	16,9543645029893	19,049799703987
Agosto	10,13187652165820	16,6926021050379	16,6927639985036	18,156715483449
Septiembre	10,87778612136690	16,5384369618019	16,5465153102998	18,346978065803
Octubre	15,28485607344120	16,8619176777439	16,8619128463314	20,434764793976
Noviembre	10,09022592688900	15,4123786699025	15,4123959508668	17,153273620918
Diciembre	2,03775936788484	2,9578044018111	2,9577378440985	3,455407368018
Total	124,170438105715	178,418357033544	178,452315247195	205,070972407051

En la tabla 12 se encuentra el consolidado de la energía recolectada por las tres técnicas individualmente y por el control con adaptación de múltiples técnicas MPPT en cada mes, además de la sumatoria total, la que indicó la relevancia que tiene el control sobre las técnicas operando individualmente. Para obtener estos resultados, se ingresaron los vectores de potencia y tiempo, a “trapez”, esta función evalúa el área bajo la curva dando como resultado la energía en watts por segundo.

5. Análisis de resultados

5.1 Potencia disipada por el convertidor *BOOST* en cada *step*

En el apartado 4.3 se evaluó la potencia disipada, o la potencia perdida por el convertidor *BOOST*. Después de hacer los cálculos en porcentajes, se encontró que la potencia disipada por dicho convertidor es de 2.17%, independientemente de la técnica que se utilice o de la irradiancia que se le esté ingresando. Para realizar este procedimiento se tomaron los valores de la tabla 10.

5.2 Evaluación de tiempos

5.2.1 Tiempo de asentamiento

El tiempo de asentamiento se calculó para definir el tiempo que necesitaba cada *step* y por ende el tiempo total de la simulación de cada técnica en los valores de referencia para estabilizarse y dar un valor final acertado. En el capítulo 4, se encuentra especificado como se calcularon estos valores por cada técnica y por cada *step*. El compilado de estos datos se encuentra en la tabla 13.

Tabla 13. Compilación de tiempos de asentamiento por técnica y por *step*

Técnica	Step 300w/m ²	Step 600w/m ²	Step 1000w/m ²	Tiempo de asentamiento total
P&O	0.473 seg	0.651 seg	0.740 seg	1.864 seg
INC	0.479 seg	0.647 seg	0.730 seg	1.856 seg
FUZZY	1.011 seg	0.647 seg	0.401 seg	2.059 seg

Se necesitó estandarizar un solo tiempo de simulación, para esto se tomó el mayor valor. Como se muestra en la tabla 13 el mayor tiempo es el del primer *step* del *fuzzy* que corresponde a la irradiancia de 300w/m², siendo de 1.011 segundos, por esto el tiempo estándar de simulación por *step* se ajustó en 1.5 segundos para dar tiempo de observar la curva estable. Por lo anterior el tiempo total de simulación es de 4.5 segundos.

En la última columna se encuentra la sumatoria de cada uno de estos, este valor se sacó para relacionar el tiempo de asentamiento de cada técnica con el tiempo real de simulación expresado en la tabla 14 y así definir el segundo parámetro del código del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT.

5.2.2 Tiempo real de simulación

En la tabla 13, se observó que el tiempo de asentamiento de la técnica conductancia incremental es el menor, seguido al de perturbar y observar, finalizando con el de lógica difusa. Cuando se simularon las técnicas también se tomó el tiempo real que tardó cada técnica para entregar el valor final, estos tiempos se expresan en la tabla 14, de la que se obtiene la misma prioridad de las técnicas.

Por la concordancia de estas dos tablas se decidió establecer el segundo parámetro del código con este orden de “prioridad”, la técnica de conductancia incremental sobre las otras dos; perturbar y observar y lógica difusa.

Tabla 14. Compilado tiempo real de simulación por técnica

Técnica	Tiempo
P&O	13:03 min
INC	12:01 min
FUZZY	43:10 min

5.3 Datos de energía entregados por el controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT expresados en kWh

En este apartado se hace la conversión de la energía entregada por el controlador que se encontraba en watts por segundo, pasándola a kWh, teniendo en cuenta el tiempo de toma de datos por la estación Davis, y los 10000 datos que se utilizó en la ecuación 11, para reducir el tiempo de simulación.

La ecuación 13, especifica todos los datos que se utilizaron para realizar esta conversión.

$$E_{t_c}(w.s) \times \frac{5min}{1dato} \times \frac{1k}{1000} \times \frac{10000datos}{1seg} \times \frac{60seg}{1min} \times \frac{1h}{3600seg} = kWh \text{ por técnica} \quad (13)$$

Donde:

$E_{t.c}$: Energía (W.s) entregada por cada técnica y por el controlador especificados en la tabla 12.

Los valores de la tabla 17, hacen referencia a los valores de la tabla 12, después de aplicarles la fórmula 13, estos valores se consolidaron gráficamente en la figura 52.

Tabla 15. Tabla anual de kWh por meses, técnica y control

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL
P&O	11,86198348	14,37114292	10,51243064	14,47915707
INC	11,86198524	14,37110237	10,51241194	14,47914281
FUZZY	8,366255940	16,13611200	6,052258910	8,959758687
CONTROL	13,68881521	19,76441407	11,45082928	16,46957252

	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO
P&O	13,57137118	12,70242252	14,13083987	13,91050175
INC	13,57138010	12,72616486	14,12863709	13,91063667
FUZZY	7,111339084	7,530350903	8,967202891	8,443230435
CONTROL	14,78384386	14,23755287	15,87483309	15,13059624

	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
P&O	13,78203080	14,05159806	12,84364889	2,464837002
INC	13,78876276	14,05159404	12,84366329	2,464781537
FUZZY	9,064821768	12,73738006	8,408521606	1,698132807
CONTROL	15,28914839	17,02897066	14,29439468	2,879506140

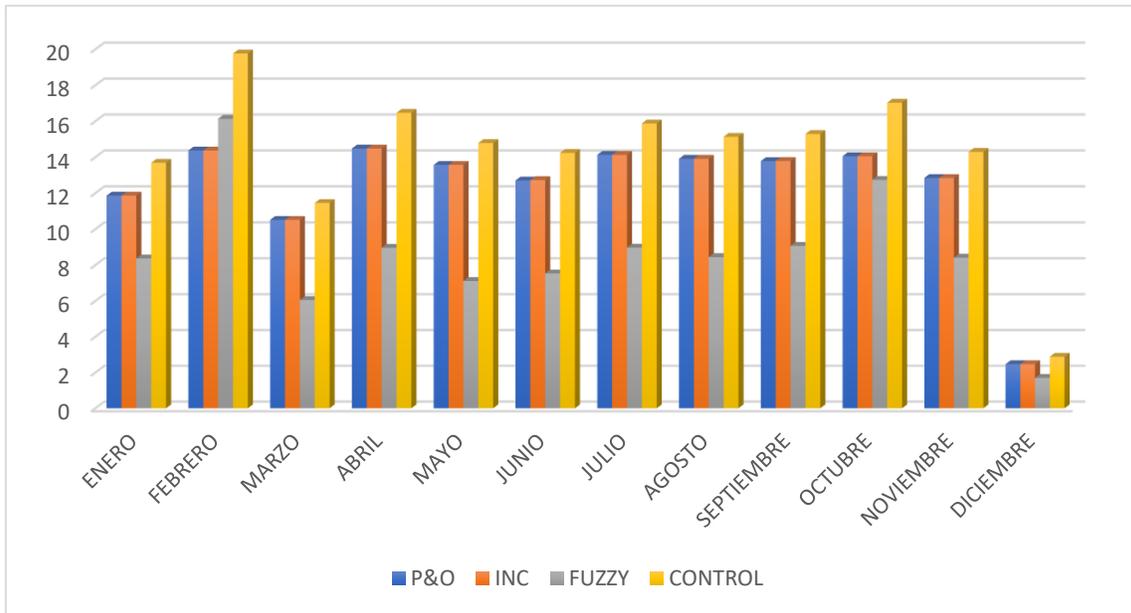


Figura 52. Energía (kWh) anual por técnica y mes
Fuente: Esta investigación

Para establecer la energía anual en kWh entregada por cada una de las técnicas MPPT y por el controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT, con los valores de la estación Davis, se realizó la sumatoria de la tabla 16 obteniendo como resultado los valores expresados en la tabla 17. En la figura 53 se muestra gráficamente la relevancia que tiene el control con adaptación de múltiples técnicas MPPT, con respecto a las técnicas individuales.

Tabla 16. Energía (kWh) anual de cada técnica y del control

Energía (kWh) anual			
P&O	INC	FUZZY	CONTROL
148,681964194620	148,710262705996	103,475365088096	170,892477005876

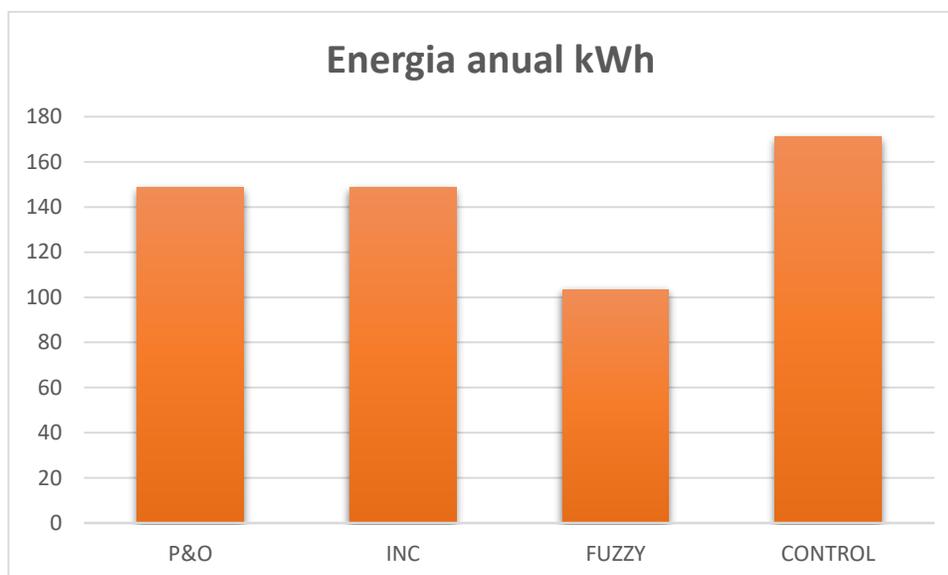


Figura 53. Energía (kWh) anual total

Fuente: Esta investigación

5.4 Ganancia de eficiencia del control respecto a cada técnica

Para calcular la eficiencia del control respecto a cada técnica se utilizó la ecuación 14, en esta se tomó el cien por ciento como la técnica individual, por esto al realizar el procedimiento se le resta 100, para que quede la ganancia del control sobre cada una de estas técnicas.

$$\left(\frac{\text{energía control}}{\text{energía tecnica}} * 100\% \right) - 100 = \text{eficiencia por técnica} \quad (14)$$

Tabla 17. Ganancia en eficiencia anual del controlador respecto a cada técnica

Ganancia en eficiencia del controlador		
Respecto a P&O	Respecto a INC	Respecto a FUZZY
14,9382697030981 %	14,9163977631688 %	65,1528137739676 %

La tabla 19 da respuesta acertada a la hipótesis propuesta en la investigación, dando un porcentaje superior al 9.9% esperado, así se concluye que en el sistema fotovoltaico con el controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT, si genera una eficiencia mayor a un sistema fotovoltaico con el control de una sola técnica MPPT.

Conclusiones

La potencia disipada por el convertidor BOOST se estableció como el 2.17% del valor de irradiancia que ingrese al panel solar, se definió así ya que al simular las tres técnicas con valores diferentes de irradiancia y sacar el porcentaje de los mismos, este oscila alrededor del 0.03%. Con lo que se concluye que no importa el valor de irradiancia, ni la técnica, el convertidor disipará el mismo porcentaje, siempre y cuando el PWM no cambie, lo que equivale a pérdidas en el proceso de conversión energética.

Si la frecuencia del PWM es menor, la potencia disipada es directamente proporcional a esta, sin embargo, al reducir la frecuencia del PWM en la simulación el tiempo se incrementa en aproximadamente dos minutos. Esta es otra de las razones por las cuales el PWM se estableció con una frecuencia de 30Khz, para el cual el Mosfet permite seleccionar elementos LC del convertidor BOOST de una menor magnitud y por tanto de menor costo, sin que se sobrepase los límites del fabricante que puedan provocar una disipación excesiva de potencia.

En las gráficas mensuales de las simulaciones del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT se evidencia que existen instantes de tiempo, justo cuando el controlador realiza el muestreo donde dos o tres técnicas permiten extraer la misma magnitud de potencia, presentándose mayor coincidencia con las técnicas P&O e INC, dado que el INC es una variación del P&O. Para que el programa decida cual elegir, se tuvo en cuenta el tiempo de asentamiento y el tiempo real de simulación de cada técnica. De las tablas 13 y 14, se obtiene que, el algoritmo de conductancia incremental tiene un tiempo de respuesta más rápido, seguido a este el de perturbar y observar, dejando de ultimo el de lógica difusa. En resumen, con los resultados obtenidos del rendimiento de las tres técnicas, se logra establecer un criterio importante para el controlador, el cual supone que, si la magnitud de la potencia coincide en más de una técnica dentro del controlador, en este primaría su rendimiento.

A partir de los resultados de las simulaciones con valores de referencia, el algoritmo basado en lógica difusa rastrea la potencia continuamente con menos fluctuación y también tiene menos sobre impulso en comparación con los otros dos algoritmos; perturbar y observar y conductancia incremental. En las respuestas del tiempo de asentamiento, también se

observa que cuando los valores de irradiancia son aproximadamente menores a 300 W/m^2 el algoritmo se demora más tiempo en estabilizarse, en cambio con valores aproximadamente mayores a 600 W/m^2 su respuesta es rápida, con lo que se concluye que el algoritmo de lógica difusa actúa mejor con valores altos de irradiancia y su respuesta es más estable, y la técnica de perturbar y observar al igual que la de conductancia incremental actúan mejor con valores bajos de irradiancia.

La hipótesis de investigación se cumple satisfactoriamente, ya que la eficiencia del convertidor BOOST con adaptación de múltiples técnicas MPPT en las que se hace uso de P&O, INC y FUZZY para un sistema fotovoltaico OFF GRID, es mayor en comparación a utilizar las técnicas de forma independiente, de modo que, la adaptación de múltiples técnicas presenta una ganancia en eficiencia de 14.916% respecto a INC, de 14.938% respecto a P&O, y de 65.152% respecto a FUZZY. Para los valores de irradiancia y temperatura tomados por la estación DAVIS, la investigación actual se encuentra entre 9.916% y 60.152% por encima del 5% planteado en la hipótesis.

Recomendaciones

Dado que la técnica de lógica difusa actúa mejor con valores altos de irradiancia, desde 600 W/m² hasta 1000 W/m², y el promedio de irradiancia día tomado por la estación *Davis* es de 137,759 w/m², es posible adicionar otra técnica del grupo de inteligencia artificial de las *MPPT*, que su rendimiento sea mayor con valores bajos de irradiancia y que su tiempo de estabilización sea similar al de la técnica de lógica difusa en el tercer step correspondiente a 1000W/m², o cambiar la técnica de *P&O* por *PI-FLC* que se encuentra en el grupo de las *MPPT* híbridas.

Si se desea implementar el código en un sistema fotovoltaico físico, los algoritmos de las técnicas *MPPT* elegidas y el código que selecciona de manera autónoma la mejor técnica dependiendo del comportamiento de las variables externas como la irradiancia y la temperatura, es necesario, realizar la programación en una tarjeta de desarrollo Explorer 16, debido a que esta, presenta un alto rendimiento en procesamiento. Así, se debe ingresar el voltaje y la corriente dados por el panel, de modo que esta, será la encargada de entregar la señal de control para el convertidor electrónico *BOOST*. Cabe señalar, que, para el buen funcionamiento de la tarjeta de desarrollo, es importante tener en cuenta la frecuencia del *PWM* y la resolución en bits del ciclo útil especificadas por el fabricante.

Al ser la disipación de potencia directamente proporcional a la cantidad de irradiancia, es necesario implementar alguna solución que reduzca la energía perdida. Para esto, existen circuitos auxiliares como los snubber, estos son un circuito que se implementa dentro del convertidor *BOOST*, haciendo que se reduzca el esfuerzo en el transistor, este tipo de arreglos modifican o limitan las señales de voltaje y corriente. Estas pueden llegar a ser activas o pasivas y ayudan al interruptor a conseguir una conmutación suave sin alterar las características que presenta el sistema. Los circuitos snubber sin pérdidas utilizan elementos almacenadores de energía que reciclan la misma dentro del circuito. Estos son preferidos por la eficiencia que permiten alcanzar ya que la salida del convertidor ofrece un rizo de corriente pequeño debido a la integración de un segundo convertidor.

Referencias

- Abdulkadir, Samosir, & Yatim. (2012). Modelling and simulation of maximum power point tracking of photovoltaic system in Simulink model. *IEEE international conference on power and Energy (PECon)*.
- Ahmad, S., Rashid, M., Ferdowsy, C., Islam, S., & Hassan, A. (2015). A technical comparison among different PV-MPPT algorithms to observe the effect of fast changing solar irradiation. *IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering* (págs. 155-158). Dhaka: IEEE.
- Alexandridis, A. T., & Krommydas, K. F. (2013). Dynamic Analysis and Control of dc/dc Boost Converters used in Stand-Alone PV Systems. *IEEE*, 1535-1540.
- Ben Salah, C., & Ouali, M. (2011). Comparison of fuzzy logic and neural network in maximum power point tracker for PV systems. *Electric Power Systems Research*, 43-50.
- Bounechba, H., Bouzid, A., Snani, H., & Lashab, A. (2016). Real time simulation of MPPT algorithms for PV energy system. *Electrical Power and Energy Systems*, 67-78.
- Castillo, Y., Castrillón, M., Vanegas, M., Valencia, G., & Villicaña, E. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía. *Prospectiva*, XIII(1), 39-51. Obtenido de http://ojs.uac.edu.co/index.php/prospectiva/article/viewFile/358/pdf_4
- Checa, F. J., Erazo de la Cruz, O. F., & Escobar Rosero, E. (2016). *Energía Fotovoltaica Basada en Silicio: Modelos y Respuesta en la Ciudad de Pasto*. San Juan de Pasto .
- Chiu, C.-S. (2010). T-S Fuzzy Maximum Power Point Tracking Control of Solar Power Generation Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion* , 1123 - 1132.
- Collado, E. (13 de Julio de 2015). *Energías Renovables*. Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713>
- Cordero, V. P. (2014). *Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máximo potencia en sistemas fotovoltaicos*.

- De Juana, J. M., Santos, F., Crespo, A., Herrero, M. A., De Francisco, A., & Fernandez, J. (2008). *Energías Renovables para el desarrollo*. Madrid España.
- Dolara, A., Faranda, R., & Leva, S. (2009). Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV Systems. *Electromagnetic Analysis & Applications*, 152-162.
- Duarte, L. I. (2020). *CPS - Chint Power Systems*. Obtenido de <https://chintpowerlatinoamerica.com/blog/energia-solar/la-energia-solar-en-colombia-legislacion/#:~:text=Actualidad%20de%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20en%20Colombia&text=La%20Ley%201715%20de%202014,la%20Solar%20y%20la%20E%C3%B3lica>.
- Galeano, S. (2014). Beneficios de la utilización de energía solar en la Escuela Básica N°4765 de la comunidad indígena La promesa en el departamento de Presidente Hayes. *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*, (págs. 1-9). Buenos Aires.
- Gallo, G., Ruiz, J., Bolaños, M., Osorio, G., & Angulo, F. (2017). Modeling and Event-Driven Simulation of a Photovoltaic System Controlled with Two Configurations of Perturb & Observe Maximum Power Point Tracking. *Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*.
- Garg, A., R.Saida Nayak, & Sushma Gupta. (2015). Comparison of P&O and Fuzzy Logic Controller in MPPT for Photo Voltaic (PV) Applications by Using MATLAB/Simulink.
- Garraoui, R., Mouna, B. H., Lassaad, S., & Barambones, O. (2013). MPPT controller for a photovoltaic power system based on increment conductance approach. *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*.
- Gomes de Brito, M. A., Galotto, L., Sampaio, L. P., Azevedo, G., & Canesin, C. A. (2011). Comparative analysis of MPPT techniques for PV applications. *IEEE*, 99-104.

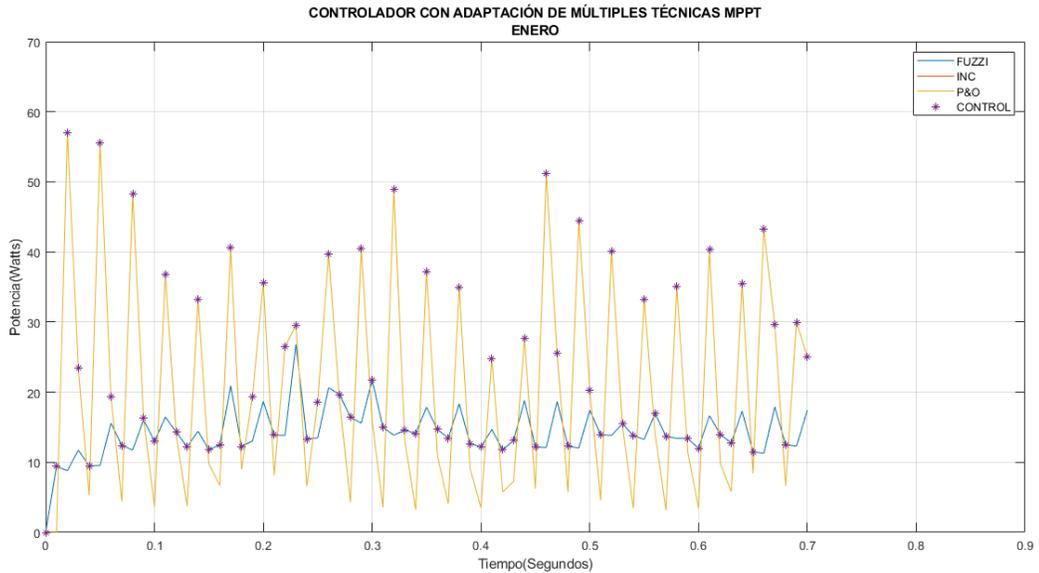
- Gupta, A., Chauhan, Y., & Pachauri, R. (15 de Octubre de 2016). A comparative investigation of maximum power point tracking methods for solar PV system. *Solar Energy*, 136, 236-253.
- Hard. (2001). *Electronica de potencia*. Pearson.
- Industriales, E. T. (s.f.). *Universidad de Castilla*. Obtenido de <http://edii.uclm.es/~arodenas/Solar/componentes4.htm>
- Ingelibre. (9 de Noviembre de 2014). *Influencia de la irradiación y temperatura sobre una placa fotovoltaica*. Obtenido de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/11/09/influencia-de-la-irradiacion-y-temperatura-sobre-una-placa-fotovoltaica/>
- Jiang, S., Wang, Y., & Ji, Z. (s.f.). Convergence analysis and performance of an improved gravitational search algorithm. *Applied Soft Computing*.
- Kazimierczuk, M. (2008). *Pulse-width Modulated DC–DC Power Converters*. Chichester: Wiley.
- Khateb, A. E., Rahim, N. A., Selvaraj, J., & Uddin, N. (2014). Fuzzy Logic Controller Based SEPIC Converter for Maximum Power Point Tracking. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*.
- Mahamudul, H., Saad, M., & Henk, M. I. (2013). Photovoltaic System Modeling with Fuzzy Logic Based. *Hindawi Publishing Corporation*.
- Mamarelis, E., Petrone, G., & Spagnuolo, G. (2014). A two-steps algorithm improving the P&O steady state MPPT efficiency. *Applied Energy*.
- MathWorks. (2020). *Trapz*. Obtenido de [Trapz: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html](https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html)
- Muralidhar, K., & Susovon, S. (2015). Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 5549-5559.
- Pierce, J. M. (2002). Photovoltaics -- a path to sustainable futures. *FUTURES*, 663-674.

- Programa de Ingeniería Electrónica. (2015). *Proyecto Educativo del Programa de Ingeniería Electrónica*. San Juan de Pasto. Inédito.
- Quijano Vodniza, A. (2009). *Guía de investigación cuantitativa*. San Juan de Pasto: TecnoGrafic.
- Selmi, T., Davis, A., Devis, L., & Abdul-Niby, M. (2014). P&O MPPT implementation using MATLAB/Simulink. *Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies*.
- Shen, C.-L., & Yang, S.-H. (2013). Multi-Input Converter with MPPT Feature for Wind PV-Power. *Hindawi Publishing Corporation*, 13.
- Simões, M. (1998). Fast convergence and robust FLC for MPPT based on boost converter for stand-alone PV and implemented using low-cost RISC microcontroller.
- Torres, M. D. (s.f). ¿Tiempo continuo o discreto? Un Problema de Control Óptimo. En M. D. Torres, *¿Tiempo continuo o discreto? Un Problema de Control Óptimo* (págs. 283-293).
- Valderrama, F. F., Moreno, H., & Vega, H. M. (2011). Análisis, simulación y control de un convertidor de potencia DC-DC tipo boost. *INGENIUM* .
- Veoso, C. (29 de Agosto de 2016). Que es el Duty Cycle o Ciclo de Trabajo .
- Vergara, R. C. (2008). *Adaptador de impedancia*. Santiago de Chile.

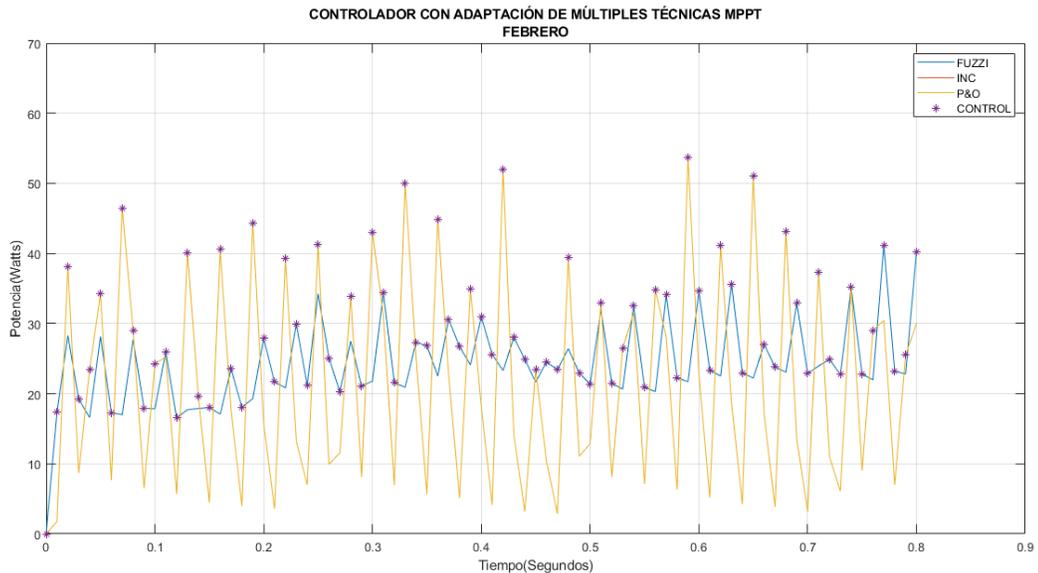
Anexo 1

En este anexo se encuentran las gráficas que genera el código del controlador con adopción de múltiples técnicas MPPT por mes.

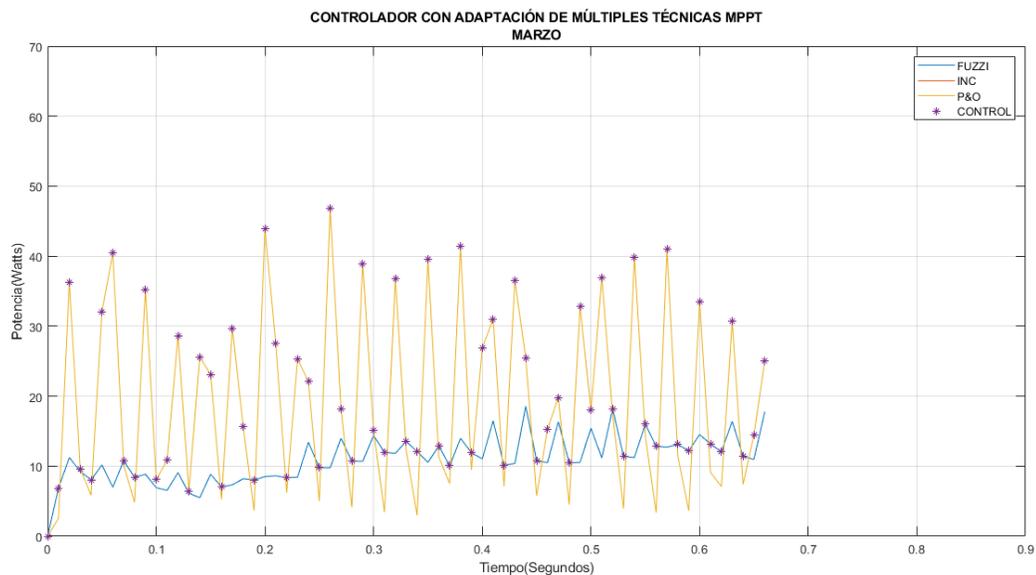
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de enero.



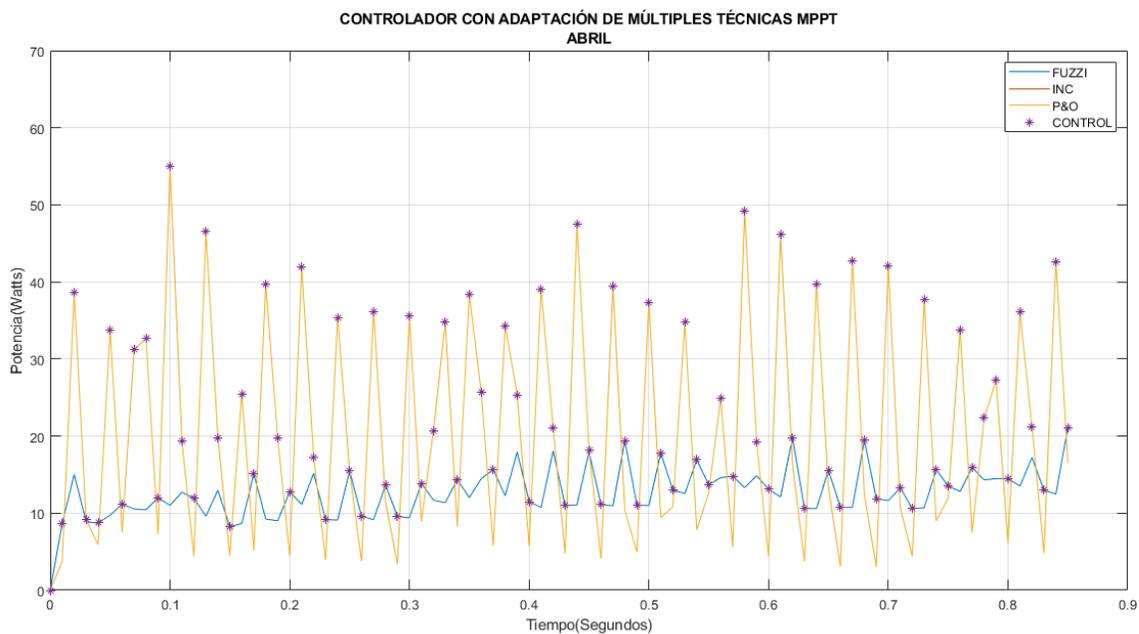
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de febrero.



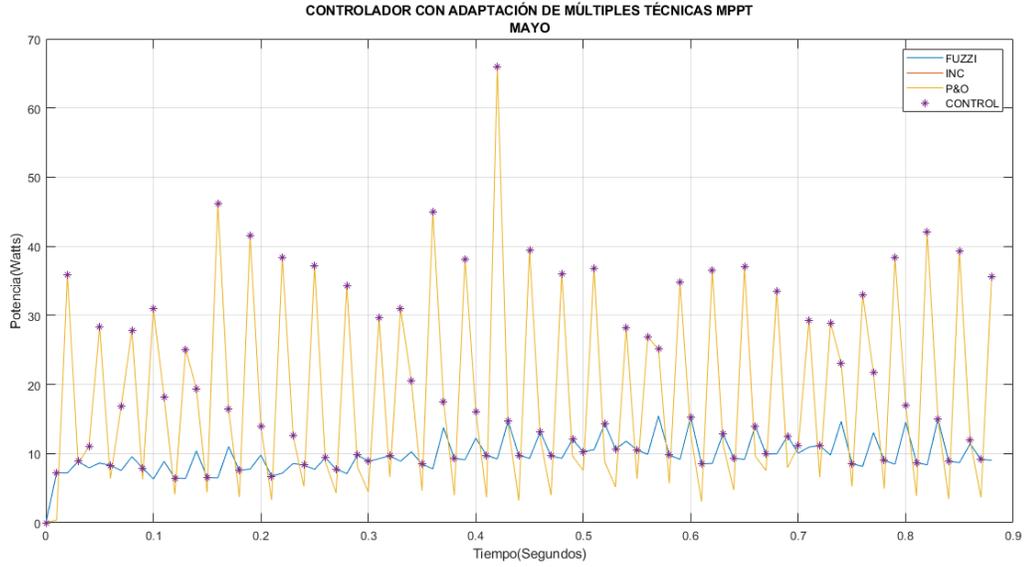
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de marzo.



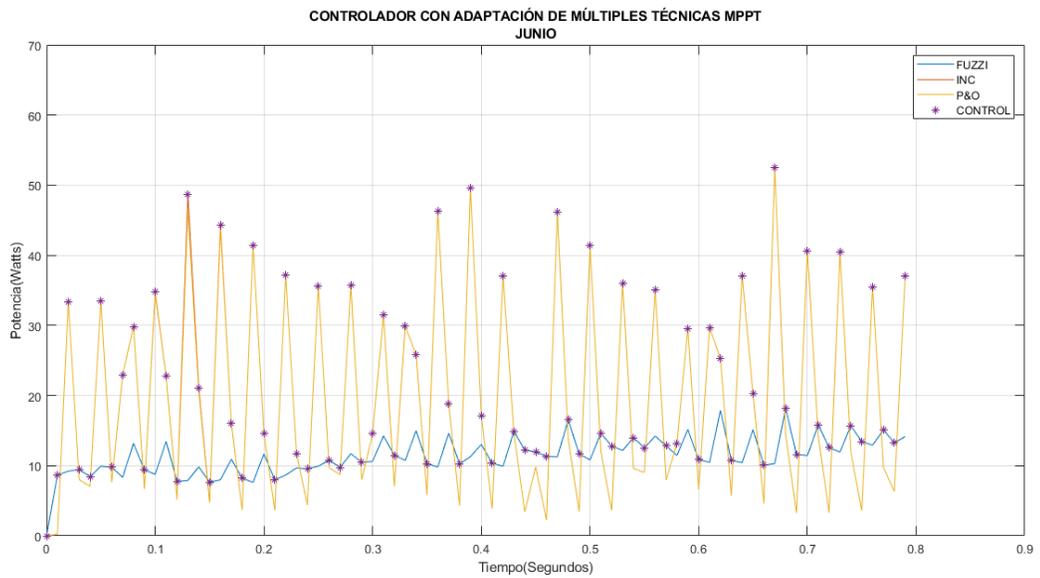
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de abril.



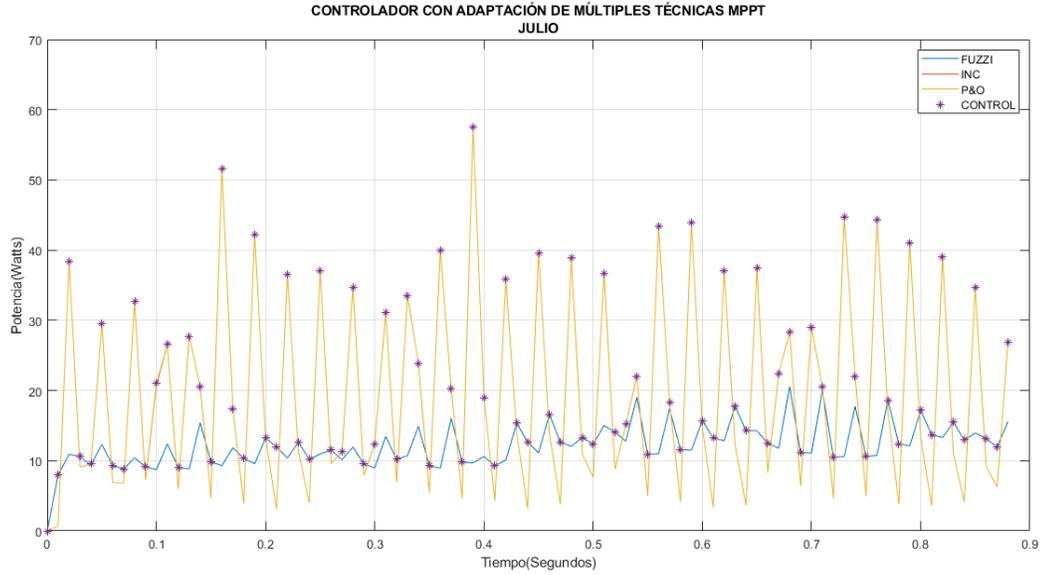
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de mayo.



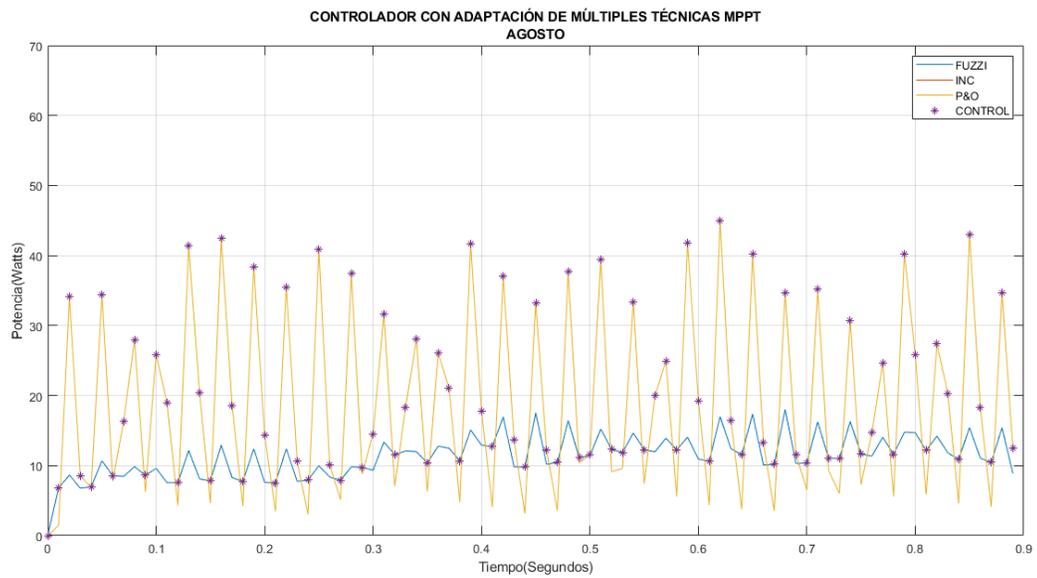
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de junio.



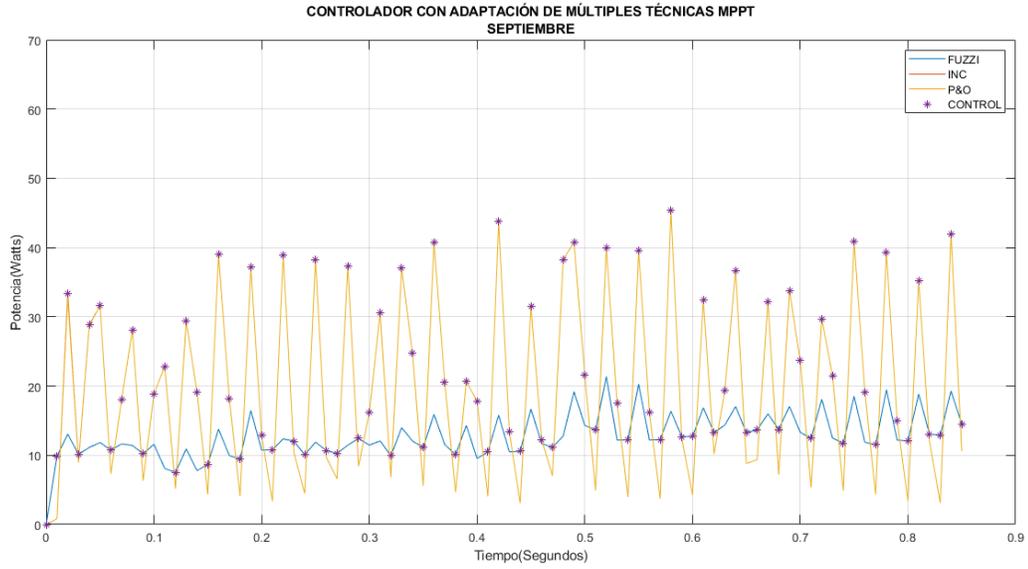
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de julio.



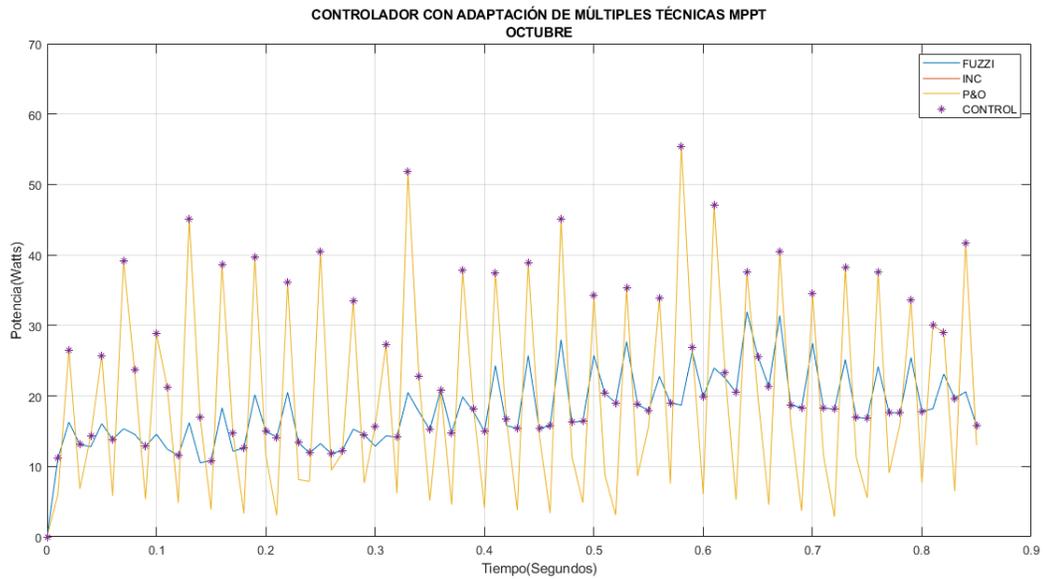
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de agosto.



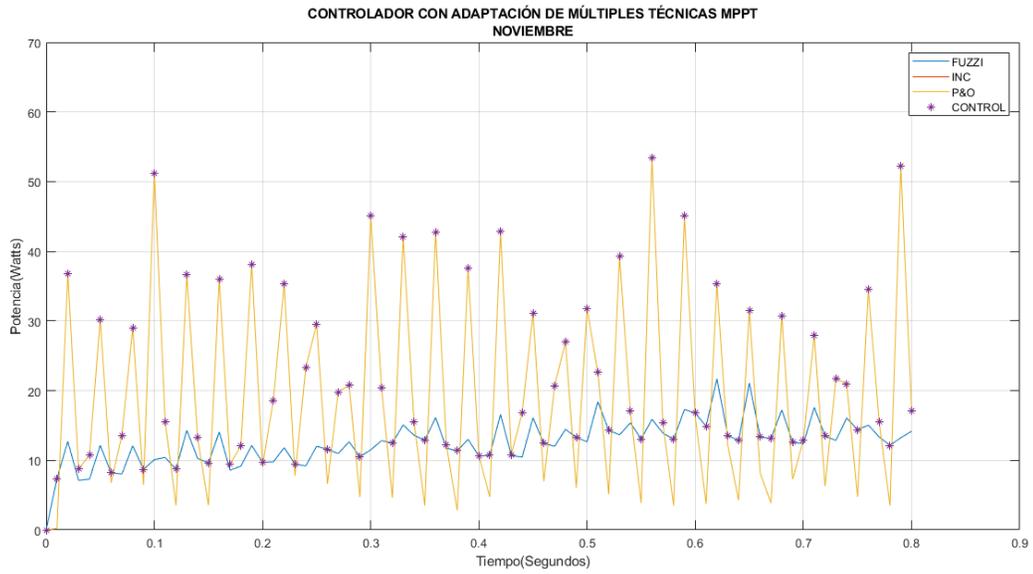
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de septiembre.



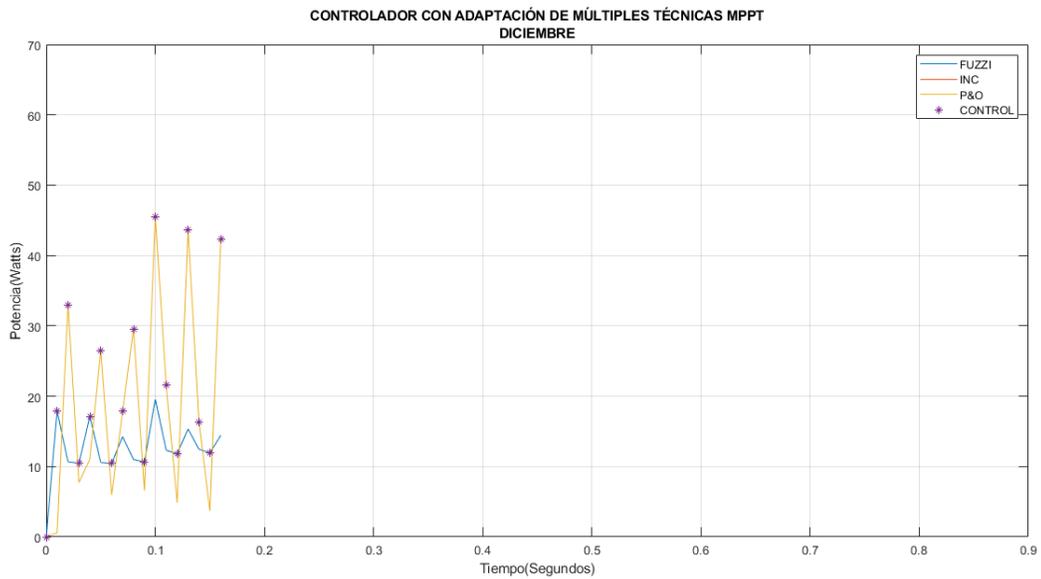
- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de octubre.



- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de noviembre.



- Simulación del controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para el mes de diciembre.



 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 30 de septiembre de 2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para un sistema fotovoltaico OFF GRID, presentado por el (los) autor(es) Paola Andrea España Martínez del Programa Académico Ingeniería electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,

(Firma del Asesor)


Mg. Edisson Escobar
Ingeniería Electrónica
3148615425

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Paola Andrea España Martínez	Documento de identidad: 1152455023
Correo electrónico: ingpaoesma@gmail.com	Número de contacto: 3002703025
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Edison Escobar	Documento de identidad: 14802308
Correo electrónico: ingenieroescobar@gmail.com	Número de contacto: 3148615425
Título del trabajo de grado: Estudio de la eficiencia de un controlador con adaptación de múltiples técnicas MPPT para un sistema fotovoltaico OFF GRID	
Facultad y Programa Académico: Ingeniería – Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

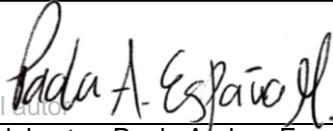
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 30 días del mes de SEPTIEMBRE del año 2024

 Firma del autor Nombre del autor: Paola Andrea España Martínez	 Firma del asesor Nombre del asesor: Edison Escobar
--	---



UNIVERSIDAD
CESMAG
NIT: 800.109.387-7
VIGILADA MINEDUCACIÓN

**AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE
GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN
REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

CÓDIGO: AAC-BL-FR-031

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022