



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

“Comparativa del desempeño de un controlador difuso y el algoritmo de perturbación y observación en el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos”

T E S I S

Que para obtener el Título de:

Ingeniero en Computación

Presenta:

Miguel Monroy López

Director de Tesis:

Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez

Atlacomulco, México; agosto del 2026.

RESUMEN

La extracción eficiente de energía en sistemas fotovoltaicos, particularmente en aplicaciones críticas como la alimentación de nanosatélites, requiere algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*) que respondan con precisión ante variables ambientales cambiantes. El objetivo de esta investigación es evaluar comparativamente el desempeño de un controlador de lógica difusa (*FLC*) de diseño propio frente al algoritmo clásico de perturbación y observación (*P&O*), para determinar cuál ofrece mayor precisión, velocidad de respuesta y eficiencia bajo condiciones variables de irradiancia (200-1000 W/m²) y temperatura (25-70 °C).

Mediante modelado y simulación en *Matlab/Simulink*, se integraron ambos algoritmos con convertidores *DC-DC* (*Buck-Boost* para el *FLC* y *Boost* para el *P&O*). Los resultados validan la hipótesis planteada: el *FLC* demuestra una precisión de seguimiento destacable, alcanzando eficiencias de hasta el 99.97% (a 1000 W/m² y 55 °C) y manteniéndose superior al 99% en la mayoría de los escenarios. En contraste, el algoritmo *P&O*, aunque eficiente a alta irradiancia (99.69%), sufre una caída drástica a bajas irradiancias (25.81% a 200 W/m²) y presenta oscilaciones constantes alrededor del punto de máxima potencia (*MPP*). Asimismo, el *FLC* cumple con un tiempo de respuesta dinámico muy inferior a 1 segundo (llegando a mínimos de 0.009 s).

Se concluye que, aunque el *FLC* es ampliamente superior en precisión, estabilidad y velocidad de rastreo, la eficiencia energética global del sistema también está condicionada por las pérdidas de conmutación del convertidor *DC-DC*, etapa donde el *P&O* mostró un mejor rendimiento. Como trabajo futuro, se propone el diseño de un algoritmo híbrido que combine la precisión del *FLC* con la eficiencia de conversión del *P&O*.

Palabras clave: Lógica difusa, algoritmos de *MPPT*, sistema fotovoltaico, convertidores *DC-DC*, nanosatélites, seguimiento del punto de máxima potencia.

ABSTRACT

Efficient energy extraction in photovoltaic systems, particularly in critical applications such as nanosatellite power supplies, requires Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms that respond accurately to changing environmental variables. The objective of this research is to comparatively evaluate the performance of a custom-designed Fuzzy Logic Controller (FLC) against the classic Perturb and Observe (P&O) algorithm, to determine which offers greater accuracy, response speed, and efficiency under variable irradiance (200-1000 W/m²) and temperature (25-70 °C) conditions.

Through modeling and simulation in Matlab/Simulink, both algorithms were integrated with DC-DC converters (Buck-Boost for the FLC and Boost for the P&O) to close the control loop and monitor system behavior. The results validate the proposed hypothesis: the FLC demonstrates exceptional tracking accuracy, reaching efficiencies of up to 99.97% (at 1000 W/m² and 55 °C) and remaining above 99% in most scenarios. In contrast, the P&O algorithm, although efficient at high irradiance (99.69%), suffers a drastic drop at low irradiance levels (25.81% at 200 W/m²) and exhibits constant oscillations around the MPP. Furthermore, the FLC achieves a dynamic response time well below 1 second (reaching minimums of 0.009 s).

It is concluded that although the FLC is vastly superior in tracking accuracy, stability, and speed, the overall energy efficiency of the system is also conditioned by the switching losses of the DC-DC converter, a stage where the P&O showed better performance. As future work, the design of a hybrid algorithm is proposed, combining the tracking precision of the FLC with the conversion efficiency of the P&O.

Keywords: Fuzzy logic, MPPT algorithms, photovoltaic system, DC-DC converters, nanosatellites, maximum power point tracking.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT	ii
ÍNDICE	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
1 INTRODUCCIÓN	1
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
2.1 Contexto y problemática	4
2.2 Definición técnica del problema	5
2.3 Objetivos de investigación	7
2.4 Preguntas de investigación.....	8
2.5 Hipótesis.....	9
2.6 Justificación.....	9
2.7 Impactos	10
2.8 Productos.....	11
3 ESTADO DEL ARTE	12
3.1 Conclusiones del análisis del estado del arte	30
4 MARCO TEÓRICO	33
4.1 Nanosatélites	33
4.1.1 El estándar CubeSat para nanosatélites.....	35
4.1.2 Aplicaciones.....	36
4.2 Energía solar y efecto fotoeléctrico.....	37

4.2.1	Recurso solar.....	37
4.2.2	Energía solar fotovoltaica	38
4.2.3	Efecto fotoeléctrico	39
4.2.4	Celdas fotovoltaicas	40
4.2.5	Irradiancia solar.....	40
4.2.6	Temperatura de la celda fotovoltaica	41
4.2.7	Componentes de un sistema fotovoltaico.....	41
4.3	Convertidores <i>DC-DC</i> y su clasificación.....	43
4.4	Algoritmos de <i>MPPT</i>	46
4.4.1	Seguidor del punto de máxima potencia	47
4.4.2	Curva Voltaje-Corriente y Curva Potencia-Voltaje	48
4.4.3	Algoritmo <i>P&O</i> (perturbación y observación)	50
4.5	<i>Fuzzy Logic Controller</i>	51
4.5.1	Lógica difusa.....	52
4.5.2	Principios del diseño de un <i>FLC</i>	54
5	MARCO METODOLÓGICO	57
5.1	Tipo y diseño de la investigación.....	57
5.2	Requerimientos y especificaciones	58
5.3	Diseño e implementación.....	59
5.3.1	Modelado de un sistema fotovoltaico en <i>Matlab/Simulink</i>	59
5.3.2	Modelado del convertidor <i>DC-DC</i> de tipo <i>Buck</i>	65
5.3.3	Modelado del convertidor <i>DC-DC</i> de tipo <i>Boost</i>	67
5.3.4	Modelado del convertidor <i>DC-DC</i> de tipo <i>Buck-Boost</i>	69
5.3.5	Sistema fotovoltaico con el convertidor <i>DC-DC Buck-Boost</i>	72

5.3.6	Diseño de algoritmos para seguimiento del punto de máxima potencia	74
	Diseño del controlador <i>MPPT</i> basado en el algoritmo de <i>Perturb & Observe</i>	74
	Diseño del algoritmo de <i>MPPT</i> número 2 (<i>FLC</i>)	75
	Diseño del algoritmo de <i>MPPT</i> número 3 (<i>FLC</i>)	78
5.3.7	Modelado del <i>FLC</i> con convertidor <i>Buck-Boost</i> y el sistema fotovoltaico	82
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	86
6.1	Sistema fotovoltaico.....	86
6.2	Simulación de los convertidores <i>DC-DC</i>	92
6.2.1	Convertidor <i>Buck</i>	92
6.2.2	Convertidor <i>Boost</i>	95
6.2.3	Convertidor <i>Buck-Boost</i>	99
6.2.4	Convertidor <i>Buck-Boost</i> conectado al sistema fotovoltaico.....	104
6.3	Controlador <i>MPPT</i> con el algoritmo <i>Perturb & Observe (P&O)</i>	109
6.4	Controlador <i>MPPT</i> con lógica difusa (<i>FLC</i>).....	121
6.4.1	Algoritmo de <i>MPPT</i> número 2 (<i>FLC</i>).....	121
6.4.2	Algoritmo de <i>MPPT</i> número 3 (<i>FLC</i>).....	133
	CONCLUSIONES	146
	REFERENCIAS.....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Técnicas para realizar el seguimiento del MPP en un sistema fotovoltaico.	14
Tabla 2. Matriz de referencias para determinar el estado del arte.	26
Tabla 3. Clasificación de satélites por el tamaño dado por su masa (Kg), referencia de (Cervone, et al., 2022).....	34
Tabla 4. Parámetros del modelo.....	61
Tabla 5. Datos del módulo.	62
Tabla 6. Parámetros considerados en el diseño del Buck-Boost Converter.....	71
Tabla 7. Tabla de reglas de inferencia.	78
Tabla 8. Tabla de reglas de inferencia	81
Tabla 9. Resultados obtenidos para los niveles de irradiancia establecidos, con una temperatura de 25 °C.....	89
Tabla 10. Datos sobre el voltaje y corriente, donde se produce el punto de máxima potencia, bajo distintos niveles de irradiancia.....	90
Tabla 11. Resultados obtenidos para los niveles de temperatura establecidos, con una irradiancia de 1000 W/m ²	91
Tabla 12. Datos sobre el voltaje y corriente, donde se produce el punto de máxima potencia, bajo distintos niveles de temperatura.....	91
Tabla 13. Resultados de la simulación del algoritmo MPPT número 1 (P&O).....	110
Tabla 14. Resumen de los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 1 (P&O).	121
Tabla 15. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 2 (FLC).....	123
Tabla 16. Resumen de los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del controlador MPPT número 2 (FLC).	133

Tabla 17. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 3 (FLC).....	134
Tabla 18. Resumen de resultados de simulación del controlador MPPT número 3 (FLC).	144
Tabla 19. Comparación de la eficiencia de seguimiento del MPP entre los tres algoritmos de MPPT.	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema fotovoltaico con la implementación de un controlador MPPT y un convertidor DC-DC.....	13
Figura 2. Diagrama de funcionamiento del controlador difuso propuesto.....	32
Figura 3. Estructura de un nanosatélite CubeSat, adaptado de (Alén Space, 2025).	35
Figura 4. Energía solar fotovoltaica (REPSOL Global, 2025), energía solar térmica (SolarBrother, 2024), energía solar concentrada y energía solar pasiva (REPSOL Global, 2025).	38
Figura 5. Efecto fotoeléctrico.....	39
Figura 6. Irradiancia en las celdas fotovoltaicas de un nanosatélite.	41
Figura 7. Componentes de un sistema fotovoltaico.	42
Figura 8. Topología del convertidor DC-DC Buck.....	44
Figura 9. Topología del convertidor DC-DC Boost.....	44
Figura 10. Topología del circuito convertidor DC-DC Buck-Boost.....	46
Figura 11. Representación de la curva V-I.....	48
Figura 12. Representación de la curva P-V.....	49
Figura 13. Representación de la curva P-V, con MPPs locales y el MPP global.	49
Figura 14. Representación de la curva V-I, con MPPs locales y el MPP global.	50
Figura 15. Algoritmo de perturbación y observación, adaptado de (Reisi, et al., 2013).	51
Figura 16. Función de pertenencia con forma triangular.	53
Figura 17. Función de pertenencia con forma trapezoidal.....	53
Figura 18. Función de pertenencia gaussiana.	54
Figura 19. Diagrama general de un sistema basado en Lógica Difusa.	55
Figura 20. Funciones de membresía del FLC.	56

Figura 21. Diagrama de un sistema fotovoltaico en Matlab/Simulink.	60
Figura 22. Parámetros de configuración del panel fotovoltaico.	63
Figura 23. Curvas V-I y V-P con distintos niveles de irradiancia, obtenidas en la configuración del PV Array.	64
Figura 24. Selección de una irradiancia y temperaturas específicas.	64
Figura 25. Curvas V-I y V-P con distintos grados de temperatura, obtenidos en la configuración del PV Array.	65
Figura 26. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo Buck.	66
Figura 27. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo Boost.	68
Figura 28. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo Buck-Boost.....	69
Figura 29. Diagrama del sistema fotovoltaico conectado al convertidor DC-DC Buck-Boost.	73
Figura 30. Sistema fotovoltaico, convertidor Boost y P&O.	73
Figura 31. Diagrama del diseño del P&O..	75
Figura 32. Sistema difuso diseñado.	76
Figura 33. Funciones de membresía de la variable de entrada $E(k)$	77
Figura 34. Funciones de membresía de la variable de entrada $CE(k)$	77
Figura 35. Funciones de membresía de la variable de salida $D(k)$	78
Figura 36. Sistema difuso diseñado.	79
Figura 37. Funciones de membresía para la variable de entrada ΔP	80
Figura 38. Funciones de membresía para la variable de entrada ΔV	80
Figura 39. Funciones de membresía para la variable de salida D	81
Figura 40. Sistema fotovoltaico, convertidor Buck-Boost y FLC.	83
Figura 41. Subsistema que contiene los bloques que componen al FLC.	83

Figura 42. Sistema fotovoltaico, convertidor Buck-Boost y FLC.	84
Figura 43. Configuración del valor de la resistencia en el circuito.....	87
Figura 44. Medición de voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico.....	88
Figura 45. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del convertidor DC-DC Buck.	95
Figura 46. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.....	95
Figura 47. Resultados obtenidos en la simulación del convertidor DC-DC Boost.	98
Figura 48. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.....	98
Figura 49. Resultados de la simulación del convertidor DC-DC Buck-Boost, operando en modo Buck.	102
Figura 50. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.....	102
Figura 51. Resultados obtenidos en la simulación del convertidor DC-DC Buck-Boost, operando en modo Boost.....	103
Figura 52. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.....	103
Figura 53. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.28.	105
Figura 54. Medición del voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.28.	106
Figura 55. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.7.	107
Figura 56. Medición del voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.7.	107
Figura 57. Definición del ciclo de trabajo en 0.51.	108
Figura 58. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.51.	108

Figura 59. Medición del voltaje, corriente y potencia; en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.51.....	109
Figura 60. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25 °C	111
Figura 61. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura de 25 °C	111
Figura 62. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 600 W/m^2 y una temperatura de 25 °C	112
Figura 63. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 400 W/m^2 y una temperatura de 25 °C	112
Figura 64. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 200 W/m^2 y una temperatura de 25 °C	113
Figura 65. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 40 °C	113
Figura 66. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 55 °C	114
Figura 67. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 70 °C	114
Figura 68. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 25).....	115
Figura 69. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 800 y 25).....	116
Figura 70. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 600 y 25).....	116
Figura 71. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 400 y 25).....	117

Figura 72. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 200 y 25).....	117
Figura 73. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 40).....	118
Figura 74. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 55).....	118
Figura 75. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 70).La eficiencia de seguimiento del MPP se obtiene mediante la ecuación (6.18), donde se expresa la relación entre la potencia medida en el panel fotovoltaico y la potencia esperada en el punto de máxima potencia.	119
Figura 76. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	124
Figura 77. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	124
Figura 78. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 600 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	125
Figura 79. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 400 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	125
Figura 80. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 200 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	126
Figura 81. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 40 °C.	126
Figura 82. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 55 °C.	127
Figura 83. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 70 °C.	127

Figura 84. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	128
Figura 85. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	129
Figura 86. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	129
Figura 87. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	130
Figura 88. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	130
Figura 89. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	131
Figura 90. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	132
Figura 91. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	132
Figura 92. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	135
Figura 93. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	135
Figura 94. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 600 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	136
Figura 95. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 400 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	136
Figura 96. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 200 W/m^2 y una temperatura de 25 °C.	137
Figura 97. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 40 °C.	137
Figura 98. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 55 °C.	138
Figura 99. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 70 °C.	138
Figura 100. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	139

Figura 101. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	140
Figura 102. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	140
Figura 103. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	141
Figura 104. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.	141
Figura 105. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor	142
Figura 106. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor	143
Figura 107. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor	143

1 INTRODUCCIÓN

Un sistema fotovoltaico tiene la capacidad de extraer la energía que se obtiene del sol a través de un fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico, un proceso mediante el que la luz del sol se convierte en energía eléctrica. Las partículas (fotones) que son transportadas por medio de la luz solar, al impactar contra las celdas fotovoltaicas, producen una liberación de electrones. Este movimiento de electrones generado por el choque entre los fotones y el material semiconductor de las celdas es lo que produce una corriente eléctrica; esta energía eléctrica es dirigida hacia el circuito externo para el cual es requerida.

La energía que se obtiene a través del sol con el sistema fotovoltaico, es conducida hacia la batería que requiere ser recargada para el funcionamiento de todos los componentes integrados en el circuito de un dispositivo electrónico, el cual puede ser, por ejemplo, un nanosatélite. Durante este proceso, se requiere contar con un convertidor de corriente directa, un dispositivo que funciona como enlace entre el sistema fotovoltaico y la carga que se alimenta. En este caso, la batería es el componente que almacena la energía y la suministra a todos los componentes electrónicos del nanosatélite para su funcionamiento.

El tema presentado en este documento de tesis se centra en el desarrollo, modelado y presentación de un algoritmo para adquirir de forma más eficiente la energía solar que es captada por medio del sistema fotovoltaico. Para ello, se busca diseñar un algoritmo para el seguimiento del punto de máxima potencia, también conocido como *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* por sus siglas en inglés.

La lógica difusa forma parte de la teoría de conjuntos difusos, una rama derivada de la inteligencia artificial (INESDI Business Techschool, 2024), que a su vez comprende una de las principales áreas de estudio de la ingeniería en computación. Como parte del desarrollo de este trabajo, se emplea esta técnica, que permite, entre otras cosas, modelar

un sistema asignando etiquetas y definiendo un conjunto de reglas que establecen una relación entre sus entradas y salidas.

El uso de lógica difusa como medio para extraer la potencia en un panel conectado a un nanosatélite, facilita el rastreo efectivo del punto de máxima potencia, *Maximum Power Point (MPP)* por sus siglas en inglés, aun cuando las condiciones ambientales se encuentran en constante variación, puesto que, su efectividad y ventaja sobre otras técnicas, radica en adaptarse rápidamente y en que no depende de un modelo matemático exacto del sistema, sino de un conjunto de reglas difusas (Ratnakar Babu, et al., 2021).

El funcionamiento del rastreador del punto de máxima potencia se basa en el desarrollo de un controlador de lógica difusa, o *FLC*, por sus siglas en inglés *Fuzzy Logic Controller*. Este controlador trabaja en conjunto con un convertidor *DC-DC (Direct Current-Direct Current)*, del inglés, que significa convertidor de corriente continua a corriente continua) de tipo *Buck-Boost* (reductor-elevador).

La potencia se refiere a la cantidad de energía eléctrica que el panel puede generar a partir de la radiación solar que recibe, es decir, la luz que proviene del sol. Otro factor que influye en la potencia es la temperatura de la celda solar. En función de la variación de la irradiancia solar y de las condiciones de temperatura, los valores de voltaje y corriente se modifican y, por tanto, también la potencia eléctrica suministrada. La potencia de una celda se obtiene como el producto de la corriente y el voltaje; por lo tanto, el *MPP* se alcanzará cuando el producto de ambos sea máximo. Debido a ese problema, se busca extraer la máxima potencia que el panel solar sea capaz de generar, aun con variaciones en estos parámetros, por medio del controlador *MPPT*

El convertidor *DC-DC* de tipo *Buck Boost*, es un dispositivo electrónico que realiza el ajuste del nivel del voltaje que proviene, en este caso, del panel solar, para disminuir o aumentar el voltaje de salida. Al modificar el voltaje, se modifica también, de forma indirecta, la corriente y, con ello, la potencia.

En la propuesta de modelo de *MPPT* que se presenta, lo referente al diseño del convertidor *Buck-Boost* y el algoritmo del seguimiento del *MPP* se realiza en *Matlab/Simulink*, un software dedicado a la simulación y modelado gráfico, que permite representar el comportamiento de los sistemas dinámicos (UPC Universitat Politècnica de Catalunya, 2024).

El rendimiento de un sistema fotovoltaico depende de tres factores: los materiales empleados en la construcción de las celdas fotovoltaicas, el algoritmo que se integra para efectuar el seguimiento para obtener la máxima potencia y las condiciones de irradiancia y temperatura (Farfán, et al., 2015). Este trabajo se centra únicamente en el diseño del algoritmo de *MPPT*.

Adicionalmente, se propone el desarrollo, el modelado y la comparación del rendimiento frente a un algoritmo tradicional de perturbación y observación (*P&O*, del inglés *Perturb and Observe*). Mediante esta comparación se pretende explicar y demostrar que el método basado en lógica difusa ofrece un rendimiento superior o, al menos, equivalente. Para ello, se evalúan ambos métodos y se determina si el algoritmo de lógica difusa es superior en términos de eficiencia y rapidez al realizar el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las siguientes secciones se explica con detalle la problemática que se busca abordar y resolver, se delimitan los resultados esperados, los objetivos del desarrollo de este trabajo, las motivaciones que lo impulsan y sus repercusiones. Fundamentalmente, se explica la propuesta de un algoritmo basado en lógica difusa, para demostrar que este método tiene la capacidad de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia bajo distintas condiciones ambientales, y que puede adaptarse de forma más rápida y precisa frente a estos cambios, en comparación con el algoritmo clásico de perturbar y observar.

2.1 Contexto y problemática

Una de las aplicaciones más relevantes de los sistemas fotovoltaicos se observa en la alimentación de nanosatélites. Los nanosatélites son pequeños dispositivos que se encuentran en órbita alrededor de la Tierra; tienen el propósito de recolectar datos, observar fenómenos naturales y también se emplean como medio para las telecomunicaciones (Cervone, et al., 2022).

Para funcionar, estos dispositivos cuentan con un sistema fotovoltaico que les permite captar energía solar. Este componente es una fuente de energía que se encarga de generar la energía eléctrica a partir de la irradiancia solar recibida y con ella alimentar al nanosatélite, con demandas típicas que oscilan entre 2.7 y 31 W, aunque esto depende de la clase del satélite y de la misión (Yaqoob, et al., 2022). La energía se conduce a una batería con la que se equipa el nanosatélite; este componente es el encargado de almacenar la energía y de suministrarla a todos los componentes electrónicos del nanosatélite para su funcionamiento (Turgeon, et al., 2024).

En este proceso, es necesario que el controlador del sistema fotovoltaico sea capaz de aprovechar de la mejor forma posible las distintas condiciones de luz solar a las que se encuentre expuesto el panel, procurando siempre mantener un punto de operación en el que el sistema fotovoltaico pueda producir la máxima potencia y suministrar esa energía a la batería del nanosatélite.

La lógica difusa, como una rama derivada de la inteligencia artificial y, a su vez, una de las principales áreas de estudio de la ingeniería en computación, es una de las técnicas mediante las cuales pueden modelarse los parámetros y variables asociados al seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico. Un algoritmo basado en lógica difusa, empleado como controlador *MPPT*, permite asignar etiquetas y definir un conjunto de reglas que establecen una relación entre las entradas y salidas de un sistema difuso, que en este caso corresponden principalmente al voltaje, la corriente y la potencia que produce el sistema fotovoltaico al estar expuesto a la radiación solar (Farfán, et al., 2015).

Los métodos empleados en el diseño de un controlador *MPPT* comprenden diversas técnicas y algoritmos; cada uno presenta un grado distinto de efectividad. El uso de lógica difusa como medio para extraer la máxima potencia de un panel solar conectado a un nanosatélite, facilita el rastreo efectivo del punto de máxima potencia, aun cuando las condiciones ambientales se encuentran en constante variación, puesto que, su principal ventaja sobre otras técnicas radica en adaptarse rápidamente gracias a que no depende de un modelo matemático exacto del sistema (Rajesh & Mabel, 2014).

Para demostrar que el algoritmo de *MPPT* basado en lógica difusa ofrece un buen rendimiento en la localización del *MPP*, se simula el sistema fotovoltaico, compuesto por un controlador *FLC* y un convertidor *DC-DC* que actúa como enlace entre el panel fotovoltaico y la carga. Esto incluye la comparación entre el desempeño del *FLC* y un controlador basado en el algoritmo *P&O*, que es un método ampliamente reconocido y efectivo para el rastreo del *MPPT* que funciona en diversas condiciones ambientales (Sera, et al., 2013), por lo que se propone como punto de comparación básico.

2.2 Definición técnica del problema

El diseño de un controlador *MPPT* requiere comprender cómo las celdas fotovoltaicas, que constituyen la base de un panel fotovoltaico, pueden suministrar potencia a partir de la radiación solar incidente, dado que la irradiancia varía según las condiciones ambientales. Otro factor importante es la temperatura en la celda fotovoltaica;

es una variable que también debe considerarse para entender por qué un sistema fotovoltaico no puede suministrar la máxima potencia si no se implementa un controlador que realice el seguimiento de la potencia del panel.

Una celda fotovoltaica es capaz de captar la energía solar y convertirla en electricidad. La energía que se extrae puede emplearse para proveer de energía a cualquier dispositivo electrónico y, en particular, a un nanosatélite, que, al estar en el espacio, depende casi por completo de la energía solar para funcionar. No obstante, uno de los principales inconvenientes de los sistemas fotovoltaicos es que la irradiancia no se mantiene constante, lo que provoca variaciones en la potencia eléctrica disponible.

El cambio en los niveles de irradiancia provoca variaciones en la potencia eléctrica. Por lo tanto, cuando la irradiancia alcance los niveles más altos posibles, el panel fotovoltaico puede operar en un punto cercano a su máxima potencia; sin embargo, al disminuir la irradiancia solar, la potencia generada también se reduce. Adicionalmente, la temperatura en la celda fotovoltaica es un factor determinante que incide en el desempeño del sistema, ya que el aumento de la temperatura reduce la eficiencia del panel y, en consecuencia, la potencia eléctrica.

Estudios previos han reportado eficiencias de seguimiento de alrededor del 97% para técnicas de *MPPT* tanto clásicas como inteligentes. Según lo reportado en (Bollipo, et al., 2020), se ha documentado una eficiencia del 97.6% para el algoritmo de *P&O*, mientras que para el *FLC* la eficiencia máxima es de 97.8% en el mejor de los casos (buenas condiciones de irradiancia y temperatura).

Sin importar las condiciones de irradiancia solar o de temperatura, el panel debe proveer la máxima potencia posible; es por ello, que en este trabajo se tiene como propósito desarrollar y presentar un modelo de *Matlab/Simulink*, que muestre el comportamiento del controlador *MPPT* basado en lógica difusa frente a un algoritmo de perturbar y observar, obteniendo como resultado el rastreo efectivo del punto de máxima potencia en función de la modificación de la irradiancia solar y la temperatura.

El alcance del trabajo descrito en este documento consiste en simular un modelo que integre un controlador *MPPT* que ajuste el ciclo de trabajo de un convertidor *DC-DC Buck-Boost* mediante un algoritmo basado en lógica difusa. Como forma de verificar su funcionamiento y sus ventajas, el resultado obtenido consiste en el monitoreo continuo de la capacidad del algoritmo para localizar el punto de máxima potencia bajo diversas condiciones de irradiancia y temperatura.

2.3 Objetivos de investigación

El presente trabajo tiene como finalidad el desarrollo e implementación, en el entorno de *Matlab/Simulink*, de dos estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*) para sistemas fotovoltaicos. La primera trata sobre un controlador basado en lógica difusa, mientras que la segunda emplea el algoritmo de perturbar y observar; ambos para extraer la máxima potencia del sistema fotovoltaico. Para ello, se han planteado los siguientes objetivos.

Objetivo general:

Evaluar comparativamente un controlador de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*) basado en lógica difusa, de diseño propio, frente al algoritmo clásico de Perturbación y Observación (*P&O*), para sistemas fotovoltaicos, con el propósito de determinar qué técnica ofrece mayor precisión, velocidad de respuesta y eficiencia energética bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura, utilizando un convertidor de corriente directa como acoplamiento de potencia.

Objetivos específicos:

1. Modelar un sistema fotovoltaico en *Matlab/Simulink*, incluyendo el panel solar, el convertidor *DC-DC Buck-Boost* y una carga, y considerando las variables de irradiancia y temperatura.

2. Diseñar un controlador *MPPT* basado en lógica difusa (*FLC*), definiendo las variables lingüísticas, las funciones de membresía y las reglas de inferencia para su implementación en el ajuste dinámico del ciclo de trabajo del convertidor.
3. Implementar un controlador *MPPT* basado en el algoritmo de Perturbación y Observación (*P&O*) utilizando el mismo sistema fotovoltaico y convertidor, para garantizar condiciones experimentales idénticas.
4. Evaluar el desempeño de ambos controladores mediante pruebas de simulación bajo diversas condiciones de irradiancia y temperatura, midiendo métricas de precisión, tiempo de respuesta y eficiencia energética.

2.4 Preguntas de investigación

Pregunta Central:

¿De qué manera un controlador *MPPT* basado en lógica difusa mejora la precisión, la velocidad de respuesta y la eficiencia energética en el seguimiento del punto de máxima potencia de sistemas fotovoltaicos para nanosatélites, en comparación con el algoritmo tradicional de Perturbación y Observación, bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura?

Preguntas Específicas:

1. ¿Cuál es el impacto de las variaciones de la irradiancia y la temperatura en la capacidad de ambos controladores para localizar y mantener el punto de máxima potencia?
2. ¿En qué medida la implementación de reglas de inferencia difusas permite al *FLC* adaptar el ciclo de trabajo del convertidor *Buck-Boost* de manera más rápida y precisa que el algoritmo *P&O*?
3. ¿Qué controlador *MPPT* ofrece el mejor compromiso técnico-operativo al evaluar simultáneamente la precisión en el rastreo del *MPP*, el tiempo de respuesta ante cambios ambientales y la eficiencia energética global del sistema?

2.5 Hipótesis

Un controlador de seguimiento del punto de máxima potencia (*MPPT*) basado en lógica difusa (*FLC*) en un sistema fotovoltaico presentará una precisión superior ($>90\%$), un tiempo de respuesta más rápido (<1 segundo ante cambios de irradiancia) y una eficiencia energética mayor ($>90\%$) en comparación con el algoritmo de Perturbación y Observación (*P&O*), cuando ambos se evalúan bajo condiciones variables de irradiancia ($200-1000 \text{ W/m}^2$) y temperatura ($25-70^\circ\text{C}$), debido a que el *FLC* no depende de un modelo matemático exacto del sistema y se adapta dinámicamente a las condiciones ambientales, mientras que el *P&O* presenta oscilaciones alrededor del *MPP* y trabaja con lentitud.

Los valores propuestos como medida de la precisión, la eficiencia energética y el tiempo de respuesta del algoritmo han sido establecidos como valores técnicos esperados para el desempeño de un controlador *MPPT* basado en lógica difusa y se fundamentan en el comportamiento reportado en la literatura del estado del arte consultada. La medida ($>90\%$) se propone con base en que los controladores difusos poseen la capacidad de rastrear y acercarse de manera efectiva al punto de máxima potencia. En cuanto al tiempo de respuesta esperado ante cambios de irradiancia, se considera (<1 segundo) porque la lógica difusa permite modificar el ciclo de trabajo de forma continua y rápida.

2.6 Justificación

Con la culminación de este trabajo, se cuenta con un modelo funcional que ilustra la implementación de un *MTTP* basado en lógica difusa. Esto permite que el rendimiento del sistema fotovoltaico sea más eficiente y que pueda ser empleado para el suministro de energía a un nanosatélite, mejorando así sus capacidades al estar en operación constante y sin limitarse por la falta de energía. Esta eficiencia se traduce, en que siempre se logra extraer la máxima potencia generada por el panel de acuerdo con las variaciones que lleguen a suceder.

Al emplear la lógica difusa como técnica para localizar el *MPP*, es posible lograr un mejor ajuste en el proceso de localización de la máxima potencia producida por los

paneles solares. Este seguimiento se logra bajo cambios en la irradiancia solar, puesto que, las reglas difusas que se establecen son las encargadas de efectuar este seguimiento. El funcionamiento del *FLC* se considera una técnica inteligente por su adaptabilidad a los cambios que puedan surgir, como la irradiancia y la temperatura.

El desarrollo de un *MPPT* basado en lógica presenta ciertas ventajas frente a otras técnicas; además, su implementación en sistemas fotovoltaicos diseñados para un nanosatélite ofrece una gran capacidad de adaptación a condiciones variables. Las condiciones de irradiancia solar en el espacio pueden variar debido a la órbita del nanosatélite y a cambios en su posición con respecto al Sol. El controlador basado en lógica difusa puede ajustar el punto de máxima potencia sin necesidad de contar con un modelo matemático preciso del sistema.

2.7 Impactos

Como aporte científico, el desarrollo de un *FLC* representa un avance al aplicar la lógica difusa para mejorar el rendimiento y la eficiencia de la producción de electricidad a través de paneles solares, logrando un mejor desempeño del *MPPT* ante cambios significativos de irradiancia y temperatura, además de alcanzar una capacidad de reacción rápida del sistema para encontrar el punto de máxima potencia.

Como parte de la contribución tecnológica, el modelo desarrollado en este trabajo representa una mejora en las capacidades de extracción de potencia máxima y aporta un controlador basado en lógica difusa capaz de maximizar la eficiencia del sistema fotovoltaico. Las reglas establecidas en el sistema difuso permiten manejar adecuadamente las constantes variaciones, logrando así un desempeño óptimo en la energía suministrada gracias al controlador *MPPT*.

Adicionalmente, se puede emplear este modelo de simulación para mejorar la captación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos, a fin de suministrar posteriormente esa energía a un nanosatélite. Con el *MPPT* implementado, se pueden

obtener los pares de voltaje y corriente más adecuados que corresponden al punto de máxima potencia en el que el panel puede operar.

Finalmente, dado que los nanosatélites son dispositivos muy pequeños, la energía es un factor limitado por sus dimensiones. Por eso, las baterías no suelen ser tan grandes para no aumentar demasiado su peso, por lo que el controlador *MPPT* que se implemente para obtener la máxima potencia posible de la energía solar para su funcionamiento es fundamental. De esta forma, se puede mejorar un sistema sin modificar el diseño físico del dispositivo.

2.8 Productos

El entregable que se presenta en este documento es una simulación realizada con el software de *Matlab/Simulink*, en la cual se ve implementado, el convertidor *Buck-Boost*, controlado por un sistema de lógica de difusa que se encarga de estar ajustando la frecuencia del ciclo de trabajo al cual deba estar operando el convertidor, en función de las condiciones de irradiancia y temperatura, para garantizar siempre el máximo rendimiento en la operación de los paneles solares.

La simulación del sistema fotovoltaico que integra el *FLC* desarrollado se compara con otra basada en el algoritmo de perturbación y observación. Esta comparación se realiza con el objetivo de obtener resultados que demuestren el rendimiento que puede alcanzar cada técnica de *MPPT*. Se busca evaluar qué técnica ofrece mayor precisión, velocidad de respuesta y eficiencia energética bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura, para realizar el seguimiento del punto en el que se alcanza la máxima potencia producida por el sistema fotovoltaico.

3 ESTADO DEL ARTE

Con la finalidad de desarrollar el trabajo descrito, se presenta la búsqueda realizada de artículos, investigaciones y trabajos similares previos en los que se aborde la metodología empleada para desarrollar un seguidor del punto de máxima potencia aplicado a sistemas fotovoltaicos.

En el proceso de obtención de la máxima potencia, se han desarrollado diversas técnicas que, junto con una implementación adecuada del convertidor *DC-DC*, permiten alcanzarla. La máxima potencia se refiere a la localización de los pares correspondientes de voltaje y corriente, de modo que el producto de ambos sea máximo.

Los algoritmos de *MPPT* operan en conjunto con un convertidor *DC-DC*, ajustando su ciclo de trabajo para optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico. Entre los convertidores *DC-DC* se encuentran el *Buck*, el *Boost* y el *Buck-Boost*, cada uno diseñado para una función específica, el convertidor *Buck* reduce el voltaje, el *Boost* lo incrementa, y el *Buck-Boost* realiza ambos, permitiendo tanto la reducción como el aumento del voltaje según sea necesario.

Un sistema de *MPPT* requiere un convertidor de potencia que actúe como interfaz entre el sistema fotovoltaico y la carga. Por lo tanto, el diseño del convertidor y el ciclo de trabajo al cual opera para obtener el punto de máxima potencia son factores muy importantes que se deben tomar en consideración para asegurar un óptimo rendimiento del sistema fotovoltaico.

En la Figura 1 se aprecia un esquema general de los elementos que intervienen en un sistema fotovoltaico, que incluye el panel solar y el *MPPT*, el cual establece el ciclo de trabajo del convertidor *DC-DC* para encontrar el punto de máxima potencia. El convertidor es el dispositivo que se conecta directamente a la carga que debe alimentar, en este caso, al nanosatélite, para cargar la batería que integra.

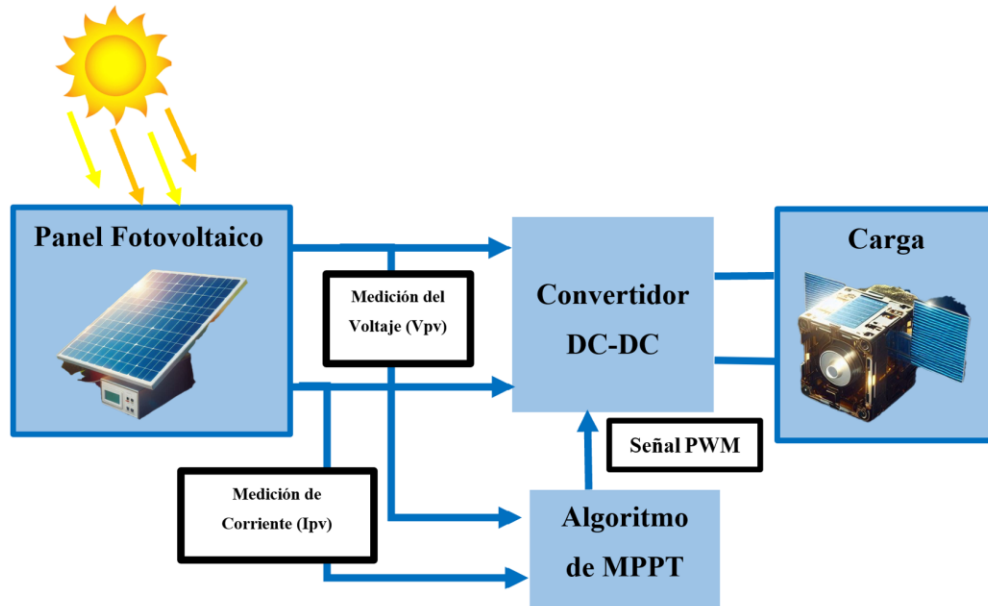


Figura 1. Sistema fotovoltaico con la implementación de un controlador MPPT y un convertidor DC-DC.

En el artículo “*Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation*” se explican 23 técnicas diferentes sobre cómo realizar el seguimiento del punto de máxima potencia, respaldado por publicaciones actuales acerca de distintas metodologías aplicadas en el diseño de hardware. Estas técnicas se encuentran categorizadas, en relación con la manera en la cual se puede clasificar un *MPPT*, las cuales se describen como clásica, inteligente y de optimización, según sea el algoritmo de seguimiento desarrollado (Bollipo, et al., 2020). El modelo de *FLC* pertenece a la categoría de inteligente, debido a la manera en la que se adapta a diversas condiciones ambientales.

Los algoritmos o técnicas descritos en el artículo de (Bollipo, et al., 2020), se observan en la Tabla 1, donde se presenta de manera más detallada la clasificación de las técnicas existentes para realizar el seguimiento del *MPP* en un sistema fotovoltaico (*PV System*).

Tabla 1. Técnicas para realizar el seguimiento del MPP en un sistema fotovoltaico.

MPPT Clásico	MPPT Inteligente	MPPT de Optimización
-Voltaje constante “ <i>Constant Voltage (CV)</i> ”	-Red Neuronal Artificial “ <i>Artificial Neural Network (ANN)</i> ”	-Optimización por Enjambre de Partículas “ <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i> ”
-Voltaje de Referencia Adaptativo “ <i>Adaptive Reference Voltage (ARV)</i> ”	-Controlador de Lógica Difusa “ <i>Fuzzy Logic Controller (FLC)</i> ”	-Optimización de Lobo Gris “ <i>Grey Wolf Optimization (GWO)</i> ”
-Voltaje de Circuito Abierto Fraccional “ <i>Fractional Open Circuit Voltage (FOCV)</i> ”	-Controlador de Modo Deslizante “ <i>Sliding Mode Controller (SMC)</i> ”	-Búsqueda Cuckoo “ <i>Cuckoo Search</i> ”
-Corriente de Cortocircuito Fraccional “ <i>Fractional Short Circuit Current (FSSC)</i> ”	-MPPT basado en la Serie de Fibonacci “ <i>Fibonacci Series based MPPT</i> ”	-Optimización por Colonia de Hormigas “ <i>Ant Colony Optimization (ACO)</i> ”
-Perturbación y Observación “ <i>Perturb & Observe (P & O)</i> ”	-Técnica basada en Gauss-Newton “ <i>Gauss Newton based Technique</i> ”	-MPPT por Colonia Artificial de Abejas “ <i>Artificial Bee Colony (ABC) MPPT</i> ”
-Paso Variable de Perturbación y Observación “ <i>Variable step P & O</i> ”		
-Escalado de Pendiente “ <i>Hill Climbing (HC)</i> ”		
-Conductancia Incremental “ <i>Incremental Conductance (InC)</i> ”		
-Control de Correlación de Ondulación “ <i>Ripple Correlation Control (RCC)</i> ”		
-Caída del Condensador de Enlace DC “ <i>DC link Capacitor Droop</i> ”		
-Punto de Máxima Potencia en Línea “ <i>On-line MPP</i> ”		
-Tabla de Consulta “ <i>Look up table</i> ”		
-MPPT por Linearización “ <i>Linearization MPPT</i> ”		

En el trabajo titulado “*A Comparative Analysis of Fuzzy Logic Control and Model Predictive Control in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking*” se analizan dos algoritmos para el seguimiento del *MPP*. Por un lado, el controlador de lógica difusa (*FLC*) y por otro el algoritmo de control predictivo de modelos (*MPC*). Este sistema emplea un convertidor *Boost* conectado al controlador *MPPT* ya sea de *FLC* o *MPC*. Las entradas del algoritmo difuso son el error “ $E(k)$ ” y el cambio en el error “ $CE(k)$ ”, la salida corresponde al ciclo de trabajo “ D ”, las funciones de membresía son de tipo triangulares y se definen las etiquetas lingüísticas NB (negativo grande), NM (negativo medio), NS (negativo pequeño), ZE (cero), PS (positivo pequeño), PM (positivo medio), PB (positivo grande). El *FLC* tiene un rendimiento superior, al resultar ser más veloz en alcanzar el primer punto, además de que no requiere un alto costo computacional, por otra parte, el *MPC* se comporta de manera más estable a largo plazo, aunque si requiere un procesamiento más exigente (Li, et al., 2025).

El estudio presentado en “*Analyses of PO-Based Fuzzy Logic-Controlled MPPT and Incremental Conductance MPPT Algorithms in PV Systems*” se muestra el desarrollo de un controlador *MPPT* híbrido que integra un *FLC* y un *P&O*, este diseño es comparado con un algoritmo de conductancia incremental (*IncCon*), y los resultados demostraron que el método propuesto es más estable, reduce las oscilaciones alrededor del *MPP* y tiene un tiempo de respuesta más rápido. El sistema utiliza un *Boost Converter*, que se encuentra conectado al controlador difuso compuesto por dos entradas, “ ΔP ” cambio en la potencia y “ ΔV ” cambio en el voltaje, a diferencia de otros *FLC* que emplean el error y cambio en el error, en este diseño se usa directamente la potencia y voltaje. La salida resultante es el cambio en el ciclo de trabajo “ ΔD ”, las variables difusas son NB (negativo grande), NS (negativo pequeño), S (cero), PS (positivo pequeño) y PB (positivo grande), de tipo triangular (Çakmak, et al., 2025).

El artículo “*Control of multi-level quadratic DC-DC boost converter for photovoltaic systems using type-2 fuzzy logic technique-based MPPT approaches*” presenta el diseño de un controlador basado en lógica difusa tipo dos, para un sistema fotovoltaico, este método busca reducir las oscilaciones que se presentan alrededor del

MPP. Opera en conjunto con un convertidor *DC-DC* más complejo, un convertidor de alta ganancia que utiliza la técnica de capacitores conmutados combinada con un convertidor *Boost* cuadrático, el cual permite reducir las pérdidas de potencia y mejorar su eficiencia general. Se comparan tres algoritmos distintos, el *FLC* tipo 2 (propuesto), un *FLC* estándar y el método de conductancia incremental. Las entradas del algoritmo son el cambio en la potencia “ ΔP ” y el cambio en el voltaje “ ΔV ”, la salida corresponde al ciclo de trabajo “ D ”. El sistema se compone por las etiquetas lingüísticas BN (negativo grande), MN (negativo medio), SN (negativo pequeño), Z (cero), SP (positivo pequeño), MP (positivo medio) y BP (positivo grande), estas funciones tienen un límite superior “*UMF*” (*Upper Membership Function*) que se traduce como Función de Pertenencia Superior y uno inferior “*LMF*” (*Lower Membership Function*) traducido como Función de Pertenencia Inferior, creando el área de incertidumbre sombreada “*FOU*”) Footprint of Uncertainty o Huella de Incertidumbre, es decir, bordes que permiten al sistema reducir errores y ruidos sin desestabilizarse (Belhadj, et al., 2025).

En el artículo “*Comparative Study of a Buck DC-DC Converter Controlled by the MPPT (P&O) Algorithm without or with Fuzzy Logic Controller*”, se muestra una comparación de dos algoritmos para localizar el punto de máxima potencia y suministrar esa energía a un sistema fotovoltaico, empleando en ambos casos un convertidor *DC-DC* de tipo *Buck*. Determinadas pruebas se llevan a cabo utilizando sólo el algoritmo de *P&O*, mientras que otras se realizan con la combinación del algoritmo de *P&O* implementado con un controlador basado en lógica difusa. El *MPPT* principal es el *P&O* y éste se complementa con el algoritmo de lógica difusa en uno de los modelos presentados, ambos fueron diseñados con *Matlab/Simulink*. El modelo que presenta mejores resultados es el que combina el *P&O* con el *FLC*. Las funciones de membresía del sistema difuso son de tipo triangulares con siete variables lingüísticas y emplea como entradas al error “ $E(k)$ ” y la derivada del error “ $dE(k)$ ”, la salida corresponde a la señal del error “ $u(k)$ ” (Livinti, et al., 2024).

En “*Comprehensive Analysis and Design of Electrical Power Systems for Nanosatellite Platforms: A Focus on Robust MPPT Control Using Sliding Mode Control*

Method” se realiza el diseño de un seguidor del punto de máxima potencia aplicado para nanosatélites. El método de rastreo empleado es la técnica de control de modo deslizante, (*SMC*) *Sliding Mode Control* por sus siglas en inglés, el cual en las pruebas realizadas muestra una muy buena precisión en el rastreo de la máxima potencia. El modelo que se presenta se encuentra diseñado en *Matlab/Simulink*, compuesto por un panel solar, la batería y el *MPPT* (Djamel Eddine, et al., 2024).

En el artículo “*Low-cost MPPT for triple-junction solar cells used in nanosatellites: A comparative study between P&O and INC algorithms*” se presenta un estudio acerca de una estructura específica de paneles solares que se utilizan en *CubeStats* (un tipo de nanosatélites que se caracterizan por ser pequeños y modulares diseñados en forma de cubo). El trabajo se centra en obtener la máxima potencia suministrada por los paneles solares al nanosatélite, empleando dos técnicas de *MPPT*. El método que se utiliza es *INC* y *Perturb and Observe*, ambos ofrecen como principal ventaja su bajo coste de implementación. Se utilizaron estas técnicas debido a que el método *P&O* es fácil de implementar, además de no requerir equipos complejos, asimismo, el método *INC* (conductancia incremental) brinda una muy buena precisión en el seguimiento del *MPP* bajo condiciones de irradiancia muy cambiantes, por esta razón, se realizó una comparativa entre ambas técnicas, la cual fue llevada a cabo mediante el desarrollo de una simulación creada en *Matlab/Simulink*, así como en su implementación física (Lemmassi, et al., 2024).

El artículo “*An Enhanced Perturb and Observe MPPT for Photovoltaic Systems Based on Fuzzy Step*” propone como metodología un algoritmo de *P&O*, con tamaño de paso variable ajustado mediante lógica difusa, esto permite evitar oscilaciones alrededor del *MPP* y obtener una mejor precisión. La lógica difusa se aplica para ajustar el tamaño de paso, y de esta manera complementar al método de *P&O*, todo el sistema opera en conjunto con un *Boost Converter*. El *FLC* implementado, se compone por cinco variables lingüísticas “*PVS*” positivo muy pequeño, “*PS*” positivo pequeño, “*PM*” positivo medio, “*PH*” positivo alto y “*PVH*” positivo muy alto. Las entradas son “*FS*” (tamaño de paso de la perturbación) y “*S*” (pendiente de la curva) que indica si la perturbación es a la izquierda

o a la derecha, la salida es “ VSS ” (tamaño de paso variable), cuyo valor corresponde al cambio en el ciclo de trabajo (Krim, et al., 2024).

En “*Study, simulation and realization of a fuzzy logic-based MPPT controller in an isolated DC microgrid*” se presenta el modelado de un FLC para un sistema fotovoltaico que se compara con un algoritmo de $P\&O$ para verificar su efectividad y resultados. Los resultados muestran que el FLC permite encontrar de forma más rápida el MPP , es más preciso y resulta mejor ante cambios en irradiancia. Se emplea un convertidor $Boost$ y para el controlador difuso este se compone por dos entradas, “ $E(k)$ ” error, “ $CE(k)$ ” cambio en el error y “ D ” *duty cycle* como salida. Las funciones de membresía son triangulares NB (negativo grande), NS (negativo pequeño), ZE (cero), PS (positivo pequeño) y PB (positivo grande) (Youssfi, et al., 2024).

En este trabajo al igual se implementa un algoritmo de lógica difusa para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico, modelado con *Matlab/Simulink* “*An Experimental Testing of Optimized Fuzzy Logic-Based MPPT for a Standalone PV System Using Genetic Algorithms*”. Este modelo presenta una mejor eficiencia en comparación con técnicas que sólo incluyen el FLC , debido a que, además de implementar el sistema difuso éste se optimiza con un algoritmo genético evolutivo. La combinación que se muestra permite que las funciones de pertenencia sean más robustas al ajustar de mejor forma los parámetros. El resultado obtenido con el diseño de este modelo logra una mejor precisión en la localización del MPP en condiciones que varían rápidamente. Este modelo integra un convertidor $DC-DC$ de tipo $Boost$. El sistema difuso se compone por funciones de membresía que integran cinco variables lingüísticas y recibe como entradas el error “ e ” y variación del error “ Δe ”, la salida que producen las funciones de membresía mediante sus reglas de inferencia es el valor del ciclo de trabajo “ ΔD_N ” (todas optimizadas por el algoritmo genético) (Yahiaoui, et al., 2023).

El artículo “*Design and Simulation of Fuzzy logic controller based MPPT of PV module using Matlab Simulink*” muestra la implementación de un controlador de lógica difusa mediante una simulación en *Matlab/Simulink*, en el que se realiza el seguimiento

del *MPP* de un sistema fotovoltaico. En este modelo se utiliza un convertidor *DC-DC* de tipo *Boost*, que trabaja en conjunto con el *FLC*, este controlador se compone por cinco variables lingüísticas, teniendo como entradas el voltaje de salida “ ΔV ” y la potencia de salida “ ΔP ” del panel solar. La salida corresponde al valor del *PWM*, siglas en inglés de *Pulse Width Modulation*, que significa modulación por ancho de pulso, el cual define el control del ciclo de trabajo del *Boost Converter* (Boonraksa, et al., 2022).

El trabajo presentado en “*Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems*” muestra una comparación sobre distintas técnicas de *MPPT*, *P&O* (*Perturb and Observe* - Perturbar y Observar), *CV* (*Control of Voltage* - Voltaje Constante), *IncCond* (*Incremental Conductance* - Conductancia Incremental), combinadas con un tipo específico de convertidor *DC-DC*, un *Buck Converter* y un *Buck-Boost Converter*, para maximizar la potencia suministrada y el rendimiento del sistema. Se determina que no basta con contar con una buena metodología en la ejecución del *MPPT*, sino que también se debe considerar la implementación de un convertidor *DC-DC*; por ello, este trabajo permite entender la importancia de emplear un convertidor específico para evaluar si su implementación afecta el rendimiento del sistema. Los resultados obtenidos muestran en general una eficiencia del 99% para el *MPPT* de *IncConda* y *P&O*, con cualquier convertidor, aunque, al usar *CV* con *Buck/Boost* se produjo una eficiencia cercana al 93%, debido a que no es tan preciso cuando ocurren cambios en la temperatura (López Seguel, et al., 2021).

En el artículo “*Maximum Power Point Tracker Controller Using Fuzzy Logic Control with Battery Load for Photovoltaics Systems*” se realiza el modelado de un algoritmo de control basado en lógica difusa, el cual es aplicado hacia una “carga de batería” para poder modelar el comportamiento de un sistema fotovoltaico real, a diferencia de otros estudios donde se trata con una “carga resistiva” (una resistencia que representa la carga). Los resultados muestran que el *FLC* tiene un buen rendimiento debido a que no requiere demasiado tiempo en estabilizarse para localizar el *MPP* y su variación al encontrar ese punto se mantiene estable. Utiliza un convertidor *Boost* y para

el sistema difuso, tiene como entradas el error “ $E(k)$ ” y el cambio en el error “ $\Delta E(k)$ ”. Las funciones de membresía son: LP (positivo grande), MP (positivo medio), SP (positivo pequeño), Z (cero), SN (negativo pequeño), MN (negativo medio), y LN (negativo grande), y D1 a D7 para la salida (Baramadeh, et al., 2021).

En el artículo “*MPPT de lógica difusa para mejorar el rendimiento del sistema fotovoltaico*”, el autor describe que investigadores de universidades de Pakistán y de China, han desarrollado un nuevo método que permite rastrear el punto de máxima potencia, el cual está basado en un algoritmo de lógica difusa. Los avances alcanzados con esta implementación demuestran que es posible una obtención más rápida de los resultados que con otras técnicas convencionales, como la conducción incremental (Bellini, 2020).

Los autores del artículo “*Design and analysis of robust fuzzy logic maximum power point tracking based isolated photovoltaic energy system*”, presentan una técnica basada en un *Fuzzy Logic Controller*, diseñada y simulada con el software de *Matlab/Simulink*, bajo condiciones estándar de irradiancia y de temperatura. El funcionamiento de este *FLC* consiste básicamente, en la obtención del cambio de la potencia y de la corriente anterior para obtener el error, con ello se logra encontrar el punto de máxima potencia. Este sistema utiliza un convertidor *DC-DC Boost Push/Pull* (convertidor de empuje y tracción). El controlador *Fuzzy* está compuesto por funciones de membresía triangulares con siete variables lingüísticas y recibe como entrada dos variables: error (el cambio de potencia y el cambio de corriente en el instante actual) y cambio en el error (la diferencia entre el error actual y el error del instante anterior). La salida que se obtiene es el valor del *PWM*. En conjunto, el algoritmo de *MPPT* con los convertidores implementados, logran una gran eficiencia para el rastreo del punto de máxima potencia (Asif, et al., 2020).

En la tesis “*Control and Simulations of a Power Supply for Nanosatellites*”, se presenta un trabajo entorno al control y simulación mediante *Matlab/Simulink* sobre una fuente de alimentación para un nanosatélite. La fuente de alimentación tiene un control

que realiza el seguimiento del punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico, el control diseñado integra dos convertidores reductores *DC-DC* conectadas hacia las entradas de los paneles, junto con otros dos convertidores reductores *DC-DC* dirigidos a cada carga. La técnica de *MPPT* que se utiliza para rastrear el punto de máxima potencia de la fuente de alimentación del nanosatélite es el método *Perturb and Observe*, esta técnica fue considerada debido a los cambios lentos en la irradiancia esperados durante las pruebas (Lázaro, 2020).

Otra investigación presenta la implementación de algoritmos como la Conductancia incremental modificada (*Modified Incremental Conductance*) *INC* por sus siglas en inglés y el algoritmo de *P&O*, donde se ha obtenido una eficiencia entre el 96.26% y el 97.44%, en determinadas condiciones, esta información se expone en el artículo “*Modified MPPT Algorithms for step size and switching Frequency using Matlab/Simulink*”, donde se muestra como resultado una análisis de dos modelos que utilizan distintos algoritmos de *MPPT*. La comparativa gira en torno a los algoritmos modificados con respecto a algoritmos tradicionales de *INC* y *P&O*. El estudio determina que los algoritmos modificados resultan ser más eficientes para localizar el punto donde se alcanza la máxima potencia (Panda, 2020).

En el artículo “*An Enhanced Adaptive Perturb and Observe Technique for Efficient Maximum Power Point Tracking Under Partial Shading Conditions*” se presenta un algoritmo mejorado de *P&O* diseñado en *Matlab/Simulink*, en el cual se consigue una eficiencia del seguimiento del punto de máxima potencia muy cercana al 100%, bajo cualquier condición de irradiancia solar. El algoritmo de *P&O* opera en conjunto con un convertidor *DC-DC* de tipo *Boost* y a través de las pruebas ejecutadas para validar su rendimiento, se alcanzó una buena eficiencia en condiciones de sombreado parcial, contrario a los resultados obtenidos con algoritmos convencionales de *INC* y *P&O* con los cuales fue comparado (Mahmod Mohammad, et al., 2020).

En el artículo denominado “*A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application*” se muestra el diseño de un *Fuzzy Logic Controller*

creado en *Matlab/Simulink*, este modelo a diferencia de otros algoritmos propuestos que también utilizan lógica difusa, se caracteriza por tener tres entradas en el sistema difuso. Las entradas son la variación de la potencia de salida “ ΔP ” y la variación en el voltaje de salida “ ΔV ”, asimismo se añade una tercera entrada correspondiente al parámetro Beta “ β ”. La salida obtenida al aplicar las reglas de inferencia es la variación del ciclo de trabajo “ ΔD ” para controlar el *Boost Converter*. Las funciones de membresía son triangulares y tienen etiquetas lingüísticas distintas para cada variable del sistema difuso, el parámetro Beta tiene tres variables lingüísticas (β_{min} , β_{mid} , β_{max}), las variables ΔP y ΔV también se componen por tres variables (NS, ZE, PS) y por último, la salida ΔD posee cinco variables difusas (NB, NS, ZE, PS, PB) (Li, et al., 2019).

En “*Modeling and Simulation of Fuzzy Logic based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV Application*” se presenta el desarrollo de un algoritmo basado en lógica diseñado en *Matlab/Simulink*. El modelo realizado está orientado para su aplicación en un sistema fotovoltaico y muestra la eficacia de emplear esta técnica para el diseño de un controlador *MPPT*. Este controlador basado en lógica difusa es capaz de rastrear de manera precisa, cada punto de máxima potencia en condiciones ambientales que cambian de manera muy rápida. Una vez que sean obtenidos el voltaje (V) y la corriente (I), así como el cálculo de la potencia (P) de la energía proveniente del panel, el sistema difuso toma como entradas dos variables, el error “E” que representa la pendiente de la curva característica P-V y el cambio de error “CE” en el muestreo instantáneo K. La salida que se obtiene al aplicar las funciones de membresía es una variable correspondiente al valor del *Duty Cycle* (ciclo de trabajo) “ ΔD ”, este valor establece la frecuencia a la cual debe operar el convertidor *DC-DC (Buck-Boost)* para realizar el seguimiento del *MPP*. El *FLC* está compuesto por funciones de membresía triangulares con cinco variables lingüísticas (Saudi Samosir & Gusmed, 2018).

La información presentada en el artículo “*Fuzzy Logic Based MPPT Controller for a PV System*” muestra el diseño de un controlador de lógica difusa para realizar el seguimiento del *MPP* en un sistema fotovoltaico, en el cual se emplea un convertidor *DC-DC* de tipo *Buck*. En este artículo, se presenta una comparación entre el modelo realizado

en *Matlab/Simulink* sobre una técnica de *MPPT* que utiliza el algoritmo de *P&O* y otro modelo que utiliza un *FLC*. Al realizar esta comparativa se obtuvo como conclusión, que el controlador basado en lógica difusa es superior en precisión. En cuanto a los detalles más específicos del *FLC*, éste se encuentra diseñado con funciones de membresía triangulares asimétricas, con cinco variables lingüísticas. Una de las entradas del *Fuzzy* corresponde al error “ $E(k)$ ” que representa la pendiente de la curva P-V y define la ubicación del *MPP* en el módulo fotovoltaico, la otra entrada se refiere al cambio en el error “ $CE(k)$ ” que define si el movimiento del punto de operación está en la dirección del *MPP* o no. La variable de salida es el cambio en el ciclo de trabajo “ ΔD ” (Robles Algarín, et al., 2017).

Los resultados obtenidos para el rastreo del *MPP* en el artículo “*Optimization of a Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm Using the Particle Swarm Optimization Technique*” muestran una mejor precisión en cuanto al rastreo del *MPPT*, especialmente bajo condiciones de baja irradiancia. El trabajo que se desarrolla consiste en una técnica de *MPPT* basada en lógica difusa asimétrica (las funciones de membresía son asimétricas), optimizada mediante el algoritmo de optimización por enjambre de partículas, también denominado como *PSO* siglas en inglés de *Particle Swarm Optimization*. Este algoritmo se compara con métodos convencionales como el método de *P&O* y el *FLC* simétrico, logrando una mejor precisión. El *FLC* diseñado, está compuesto por funciones de membresía triangulares asimétricas, con cinco variables lingüísticas. Las entradas del sistema difuso corresponden a la variación en la potencia de salida “ ΔP_{PV} ” y la variación en el voltaje “ ΔV_{PV} ” del panel fotovoltaico, la salida que se obtiene define la variación de voltaje de referencia que el sistema usa para ajustar el ciclo de trabajo del convertidor *Boost* “ $\Delta V^*_{.PV}$ ” (Cheng, et al., 2015).

En el artículo denominado “*A fuzzy logic control method for MPPT of PV systems*”, se implementa un algoritmo de lógica difusa para rastrear el punto de máxima potencia que puede suministrar un sistema fotovoltaico. En este modelo se implementa un convertidor *DC-DC* de tipo *Buck-Boost*, que ajusta su ciclo de trabajo en función del *FLC*. Las pruebas realizadas en este modelo implementado en *Matlab/Simulink*, se basan en la

variación de la temperatura y la irradiancia para demostrar su efectividad. El sistema diseñado muestra una buena precisión en todas las pruebas efectuadas, esto significa que puede obtener de manera efectiva el *MPP* en cualquier condición de irradiancia y temperatura. El *FLC* utiliza dos entradas, el cambio en el voltaje “ ΔV ” y el cambio en la potencia “ ΔP ” del panel fotovoltaico. La salida es el cambio en la razón del ciclo de trabajo “ D ”, que ajusta el convertidor *DC-DC*. El sistema difuso contiene funciones de membresía triangulares con cinco variables lingüísticas para cada entrada y salida (Noman, et al., 2012).

La investigación presentada en “Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa” muestra el diseño de un modelo que realiza el seguimiento del *MPP* en un panel solar, mediante la lógica difusa. Este modelo se diseñó en *Matlab/Simulink* y se puso a prueba con diferentes condiciones ambientales para demostrar su rendimiento y la precisión que puede alcanzar el *MPPT* diseñado. El convertidor *DC-DC* que integra esta simulación es un *Buck Converter* y su rendimiento destaca por encontrar el punto de máxima potencia en diferentes condiciones con un tiempo de convergencia bastante bueno. El *FLC* recibe como entradas al error “ E ”, que es la pendiente de la curva P-V y la otra entrada corresponde al cambio en el error “ CE ”. La salida del controlador es el cambio del *Duty Cycle* “ ΔD ”, que ajusta la manera en la que opera el convertidor *DC-DC*. Las funciones de membresía definidas, son de tipo triangular con cinco variables lingüísticas para las entradas y de igual forma para la salida (Robles & Villa, 2011).

En referencia a toda la literatura consultada, la implementación de técnicas y algoritmos para el seguimiento del punto de máxima potencia se ha realizado principalmente en *Matlab/Simulink*. Estos modelos respaldan su uso como una buena herramienta para la simulación y el desarrollo de algoritmos de *MPPT*, todos orientados a su aplicación en sistemas fotovoltaicos.

Los artículos en los que se ha diseñado el controlador *MPPT* mediante un *FLC*, ya sea como único método para obtener el *MPP* o implementado junto con algún otro algoritmo para trabajar en conjunto y lograr una mayor efectividad, emplean *MFs*

(*Membership Functions* que significa funciones de membresía) triangulares y las etiquetas lingüísticas varían entre cinco y siete variables. Las variables lingüísticas son: NB, NS, ZE, PS, PB (negativo grande, negativo pequeño, cero, positivo pequeño y positivo grande). Los modelos que integran siete variables se componen de: NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB (negativo grande, negativo medio, negativo pequeño, cero, positivo pequeño, positivo medio y positivo grande).

En la Tabla 2 se presenta la matriz de referencias que contiene la información más importante del estado del arte; por ello, se incluye una breve explicación de la metodología empleada en cada estudio, un resumen del trabajo realizado y un apartado en el que se describen las posibles mejoras.

Tabla 2. Matriz de referencias para determinar el estado del arte.

Fuente	Resumen	Metodología	Áreas de oportunidad
(Belhadj, et al., 2025)	El estudio muestra el diseño de un controlador basado en lógica difusa de tipo 2 (T2FL) para el seguimiento del <i>MPP</i> aplicado a un convertidor <i>Boost</i> . El objetivo es superar las limitaciones de los métodos tradicionales de <i>MPPT</i> , como las oscilaciones del algoritmo de conductancia incremental.	EL diseño modelado en <i>MATLAB/Simulink</i> incluye un convertidor <i>Boost DC-DC</i> cuadrático de tres niveles en conjunto con el <i>MPPT</i> (<i>IncCon</i>, T1FL y T2FL) para comparar su rendimiento. El método T2FL propuesto utiliza dos entradas: cambio de potencia y cambio de voltaje, y una salida que corresponde al ciclo de trabajo. Se evaluaron los controladores bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.	Ventajas: El método basado en lógica difusa nivel 2 (T2FL) demostró una mejor eficiencia que el <i>FLC</i> nivel 1 y la <i>IncCon</i>. Desventajas: El costo computacional del método T2FL es mayor a diferencia de los otros dos métodos comparados. Mejoras sugeridas: Comprobar la eficiencia energética del algoritmo propuesto, debido a que en el estudio esto no se explica. Posible aplicación: Aplicado en sistemas fotovoltaicos donde es requerida una respuesta rápida y una buena estabilidad.
(Çakmak, et al., 2025)	El artículo presenta un algoritmo híbrido basado en lógica difusa y el método <i>P&O</i> para sistemas fotovoltaicos. El rendimiento del método propuesto se compara con el del algoritmo de Conductancia Incremental (<i>IncCon</i>).	Se modelan dos controladores <i>MPPT</i>: el método <i>IncCon</i> y el método híbrido propuesto basado en <i>FLC</i> y <i>P&O</i>. Para el <i>FLC</i>, se definieron dos entradas (cambio de potencia, y cambio de voltaje) y una salida (cambio en el ciclo de trabajo, con funciones de pertenencia triangulares. Las respuestas de ambos controladores fueron comparadas ante cambios en la irradiancia y con una temperatura constante.	Ventajas: El método propuesto reduce el rizado de voltaje, logrando mayor estabilidad que la conductancia incremental. Desventajas: Bajo condiciones ambientales óptimas el método <i>IncCon</i> produce una potencia ligeramente superior que el algoritmo híbrido propuesto. Mejoras sugeridas: Realizar pruebas del método propuesto bajo distintas condiciones de temperatura. Posible aplicación: Aplicado en sistemas fotovoltaicos donde sea requerida una buena estabilidad y bajo rizado de voltaje.
(Li, et al., 2025).	El artículo presenta un análisis comparativo entre un algoritmo de lógica difusa (<i>FLC</i>) y el modelo de control predictivo (<i>Model Predictive Control - MPC</i>) para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos.	En el documento se desarrollan modelos en <i>Simulink</i> de un sistema fotovoltaico con un <i>Buck Converter</i> Se implementan dos controladores <i>MPPT</i> (<i>FLC</i> y <i>MPC</i>) para ajustar el ciclo de trabajo del convertidor. Los resultados presentados muestran que el <i>MPC</i> es mejor ante perturbaciones y cambios ambientales pero el	Ventajas: El <i>FLC</i> tiene una mejor respuesta inicial e implica un bajo costo computacional y el <i>MPC</i> es superior ante perturbaciones y cambios ambientales. Desventajas: El <i>FLC</i> presenta mayores oscilaciones y el <i>MPC</i> tiene una alta demanda computacional. Mejoras sugeridas: Optimizar el MPC para sistemas de bajos recursos computacionales. Posible aplicación: Ambos métodos pueden ser aplicados en sistemas donde sea requerido una buena precisión y donde se

		<i>FLC</i> ofrece una mejor respuesta inicial.	consideren las capacidades computacionales necesarias para su ejecución
(Krim, et al., 2024).	El artículo presenta una estrategia mejorada de <i>MPPT</i> con el método de <i>P&O</i> utilizando un paso variable basado en lógica difusa para sistemas fotovoltaicos.	En la simulación se integra el sistema fotovoltaico un convertidor <i>DC-DC Boost</i>. El <i>FLC</i> está compuesto por dos entradas, el tamaño de paso fijo, y la pendiente de potencia en la curva. La salida obtenida corresponde al tamaño de paso variables. Todo el diseño se implementó en <i>Matlab/Simulink</i>.	Ventajas: Con esta propuesta se reducen las oscilaciones alrededor del <i>MPP</i>. Desventajas: El ajuste en el tamaño de paso debe ser muy preciso, debido a que si se usa un paso grande el controlador responde rápido frente a cambios de irradiancia, pero genera demasiadas oscilaciones. En cambio, en un paso pequeño las oscilaciones se reducen, pero el sistema se vuelve muy lento para rastrear el <i>MPP</i>. Mejoras sugeridas: Mejorar la eficiencia ajustando las variables lingüísticas y reglas difusas, realizar pruebas con la implementación de otro convertidor. Posible aplicación: Puede aplicarse en sistemas fotovoltaicos que requieran precisión y rapidez.
(Youssfi, et al., 2024).	El trabajo presenta un estudio, simulación e implementación de un controlador <i>MPPT</i> basado en lógica difusa, para un sistema fotovoltaico. Este método se compara con un algoritmo de <i>P&O</i>, y en las pruebas se demuestra que el sistema difuso es mucho más preciso.	Se modela el sistema fotovoltaico el convertidor <i>DC-DC Boost</i> y dos controladores <i>MPPT</i> (<i>P&O</i> y <i>FLC</i>) desarrollados en <i>Matlab/Simulink</i>. El controlador difuso utiliza como entradas el error y cambio en el error, la salida corresponde al ciclo de trabajo que se aplica a un convertidor <i>Boost</i>. En las pruebas de ejecución ambos métodos fueron evaluados bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura.	Ventajas: El <i>FLC</i> tiene un desempeño superior al algoritmo de <i>P&O</i>, logra un menor tiempo de respuesta y es preciso frente a cambios de irradiancia y temperatura. Desventajas: En este estudio se requiere un hardware adicional, debido a que para las pruebas del algoritmo también fue utilizado un Arduino mega y otros equipos. Mejoras sugeridas: Como mejora se puede desarrollar controladores <i>MPPT</i> basados en lógica difusa pero que sea combinado con otra técnica inteligente como redes neuronales o algoritmos genéticos. Posible aplicación: Sistemas fotovoltaicos que requieran un seguimiento eficiente y preciso del <i>MPP</i> en condiciones variables.
(Livinti, et al., 2024)	Se presentan dos controladores de <i>MPPT</i> , un modelo se basa en la técnica de <i>P&O</i> , mientras que el otro modelo se compone por la implementación del método <i>P&O</i> con un <i>FLC</i> .	Un controlador utiliza la técnica de <i>P&O</i>, el otro controlador emplea la misma técnica implementada con un controlador basado en lógica difusa, en ambos casos se emplea un Buck Converter. El <i>FLC</i> tiene <i>MFs</i> triangulares con siete variables lingüísticas, dos	Ventajas: La combinación del algoritmo de <i>P&O</i> con un <i>FLC</i> permite mejorar la precisión para localizar el <i>MPP</i>. Desventajas: El <i>FLC</i> demanda un mayor costo computacional a comparación del algoritmo de <i>P&O</i>. Mejoras sugeridas: Utilizar otro tipo de convertidor <i>DC-DC</i> para corroborar si el convertidor empleado es el que permite obtener los mejores resultados.

	El segundo modelo presenta mejores resultados.	entradas “E(k)”, “dE(k)” y una salida “u(k)”. Diseñado en <i>Matlab/Simulink</i> .	Posible aplicación: Se puede aplicar en sistemas que requieran un suministro constante de la energía, aún en condiciones ambientales cambiantes.
(Djamel Eddine, et al., 2024).	Se diseña un controlador <i>MPPT</i> basado en la técnica de control de modo deslizante, diseñado específicamente para encontrar el <i>MPP</i> de un sistema fotovoltaico, conectado a un nanosatélite.	El algoritmo presentado es el <i>SMC</i> , el cual, de acuerdo con las pruebas realizadas presenta una muy buena precisión para el rastreo del <i>MPP</i> . Este método se encuentra diseñado en <i>Matlab/Simulink</i> .	Ventajas: Esta técnica permite realizar un seguimiento preciso del <i>MPP</i> y se caracteriza por ser muy robusto frente a cambios ambientales drásticos. Desventajas: Al generar altas frecuencias de conmutación, se genera un mayor desgaste en los componentes electrónicos y eso provoca pérdidas en la energía. Mejoras sugeridas: Combinar el algoritmo <i>SMC</i> con otra técnica que también permita obtener el <i>MPP</i> como la lógica difusa, para realizar una comparación y saber si se obtiene una mejor precisión. Posible aplicación: Sistema fotovoltaico de un nanosatélite.
(Yahiaoui, et al., 2023)	En este artículo se diseña un algoritmo de <i>FLC</i> para encontrar el punto de máxima potencia. El controlador <i>MPPT</i> basado en lógica difusa se optimiza con un algoritmo genético evolutivo. Los resultados obtenidos muestran una mejor precisión a comparación de técnicas que sólo utilizan el controlador de lógica difusa.	La técnica diseñada en <i>Matlab/Simulink</i>, consiste en un <i>FLC</i> optimizado con un algoritmo genético y se utiliza un convertidor <i>DC-DC</i> de tipo <i>Boost</i>. El <i>FLC</i> tiene funciones de membresía con cinco variables lingüísticas, dos entradas: “e” y “Δe”, y para la salida “ΔD_N”.	Ventajas: La combinación del <i>MPPT</i> basado en lógica difusa, con la optimización por el algoritmo genético permite una mayor precisión en la localización del <i>MPP</i>. Desventajas: Se requiere más tiempo de procesamiento, por la demanda que surge con la implementación del algoritmo genético, y sino se cuentan con los recursos de procesamiento necesarios esto puede ser un obstáculo. Mejoras sugeridas: Buscar la manera en la que se pueda optimizar el algoritmo genético, modificando algunos parámetros del sistema difuso, como las funciones de membresía o las reglas de inferencia, además de usar otro tipo de convertidor <i>DC-DC</i>. Posible aplicación: Aplicado en sistemas fotovoltaicos que requieran una rápida obtención del punto de máxima potencia.
(Boonraksa, et al., 2022)	Se diseña un controlador basado en lógica difusa para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico.	El algoritmo presentado para realizar el rastreo del <i>MPP</i> es un <i>FLC</i> , que tiene en sus funciones de membresía cinco variables lingüísticas, con las entradas “ΔV”, “ΔP” y la salida “PWM”. La salida define el	Ventajas: La implementación del algoritmo basado en lógica difusa permite realizar una detección precisa del <i>MPP</i>, por lo que se mejora la eficiencia del panel al adaptarse rápidamente a cambios en irradiancia y temperatura. Desventajas: Las funciones de membresía deben estar bien definidas para lograr

	ciclo de trabajo al cual debe operar el <i>Boost Converter</i>. Este modelo se diseñó en <i>Matlab/Simulink</i>.	siempre una buena precisión en la localización del <i>MPP</i>. Mejoras sugeridas: Cambiar el tipo de funciones de membresía, agregar otras variables difusas, utilizar otro tipo de convertidor <i>DC-DC</i>, para analizar si es posible obtener un mejor rendimiento del controlador. Al igual, se puede combinar este algoritmo con otra técnica de <i>MPPT</i> para lograr mejores resultados. Posible aplicación: En sistemas fotovoltaicos de nanosatélites, para encontrar el <i>MPP</i> en condiciones que cambien de manera drástica.	
(Li, et al., 2019)	Este artículo muestra el diseño de un <i>Fuzzy Logic Controller</i>, que destaca sobre otros controladores de <i>MPPT</i>, por la implementación de otro parámetro en la entrada del sistema difuso, a diferencia de controladores de lógica difusa que sólo reciben dos entradas.	Este diseño de <i>MPPT</i>, presenta un modelo de <i>FLC</i>, compuesto por funciones de membresía triangulares con tres variables lingüísticas para las entradas y cinco variables para la salida. Las entradas son “ΔP”, “ΔV” y se añade una tercera entrada correspondiente al parámetro Beta “β”. La salida que se obtiene es el ciclo de trabajo “ΔD” que define la manera en la que opera el <i>Boost Converter</i>.	Ventajas: La implementación del parámetro Beta en las entradas del sistema difuso permite una mayor precisión para el rastreo del punto de máxima potencia, por lo que se obtiene un mejor rendimiento a diferencia de controladores que sólo emplean dos entradas. Desventajas: El parámetro Beta debe estar bien definido, para que las funciones de membresía ajusten correctamente la detección del <i>MPP</i>. Mejoras sugeridas: Modificar las funciones de membresía, definiendo <i>MFs</i> simétricas y asimétricas o añadiendo otras variables lingüísticas. Posible aplicación: cualquier sistema fotovoltaico.

3.1 Conclusiones del análisis del estado del arte

A partir de la información descrita sobre artículos e investigaciones realizadas con anterioridad relativas al desarrollo de algoritmos para el rastreo del punto de máxima potencia *MPP* (*Maximum Power Point*), es posible concluir que cada una de las técnicas vistas presentan una buena eficiencia para realizar el seguimiento del *MPP* y las técnicas que alcanzan mejores resultados, son aquellas que operan en conjunto; es decir, dos algoritmos distintos que se complementan a la vez para alcanzar una mayor precisión.

Otros algoritmos que destacan por su precisión para detectar el *MPP* de forma más rápida, incluso bajo condiciones de sombreado parcial en la celda fotovoltaica, son las denominadas técnicas inteligentes, como el controlador basado en lógica difusa, mientras que en situaciones de insolación uniforme, una técnica clásica como el algoritmo de perturbar y observar resulta muy conveniente.

En cuanto a las investigaciones donde se utiliza un algoritmo basado en un controlador de lógica difusa, estas comparten cierta similitud, puesto que todas emplean funciones de pertenencia con forma triangular, aunque esto no significa que no presenten ciertas diferencias durante la ejecución y en los resultados del algoritmo. Los cambios entre los modelos se refieren al número de parámetros considerados variables lingüísticas, así como a las variables de entrada y a la salida producida por el sistema difuso al evaluar las reglas de inferencia establecidas.

En general, las entradas consideradas en cada modelo retoman como principio el valor obtenido al calcular el error y su cambio, a partir del voltaje y la corriente producidos por el panel solar. La salida resultante corresponde a la variable que define el ciclo de trabajo en el que debe operar el convertidor *DC-DC* para localizar el punto de máxima potencia. Cada modelo que integra un controlador de lógica difusa ha sido mejorado modificando las variables de entrada, así como la forma de las funciones de membresía, que se mantienen triangulares o, en otros casos, asimétricas.

Con base en lo descrito con anterioridad, el algoritmo que se propone consiste en un controlador *MPPT* basado en lógica difusa de diseño propio, compuesto por dos entradas (error “e”, cambio en el error “CE”) y una salida “D”, referente al ciclo de trabajo.

Los parámetros de error y cambio en el error se obtienen a partir de la potencia obtenida con el producto de los valores de voltaje y corriente que se producen con la celda solar, el error “e” se determina con el cálculo de la pendiente de la curva Potencia-Voltaje mediante la ecuación (3.1), descrita en (Li, et al., 2019):

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \quad (3.1)$$

Donde $P(k)$ y $V(k)$ corresponden a la potencia de salida y al voltaje producido, por el sistema fotovoltaico en el instante de tiempo k . El cambio en el error “CE” es obtenido a partir del error al que se le resta un instante de tiempo anterior, esta relación se describe con la ecuación (3.2).

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (3.2)$$

La salida obtenida, “D”, representa la variación del ciclo de trabajo al que debe operar el convertidor DC-DC para alcanzar el punto de máxima potencia, dado que el convertidor utilizado es de tipo *Buck-Boost* (reductor-elevador).

Las funciones de membresía son de tipo triangulares, esto es tanto para las entradas como para la salida del sistema difuso. Este controlador de lógica difusa se compara con el algoritmo clásico de perturbar y observar, para así poder demostrar su efectividad para realizar el rastreo del punto de máxima potencia,

Con el diseño de este algoritmo se busca asegurar que el sistema fotovoltaico opere siempre con el máximo rendimiento posible, aún en condiciones ambientales variables. Esta energía extraída por el panel fotovoltaico se conduce a la carga que alimenta el

circuito (una resistencia) que representa la batería del nanosatélite, lo que garantiza su funcionamiento continuo, sobre todo cuando la exposición al sol y la temperatura del panel no estén en las mejores condiciones.

La Figura 2 muestra un diagrama de la estructura general del algoritmo propuesto, en el que se destaca el diseño del *FLC*, que operará en conjunto con el convertidor *DC-DC* y el sistema fotovoltaico.

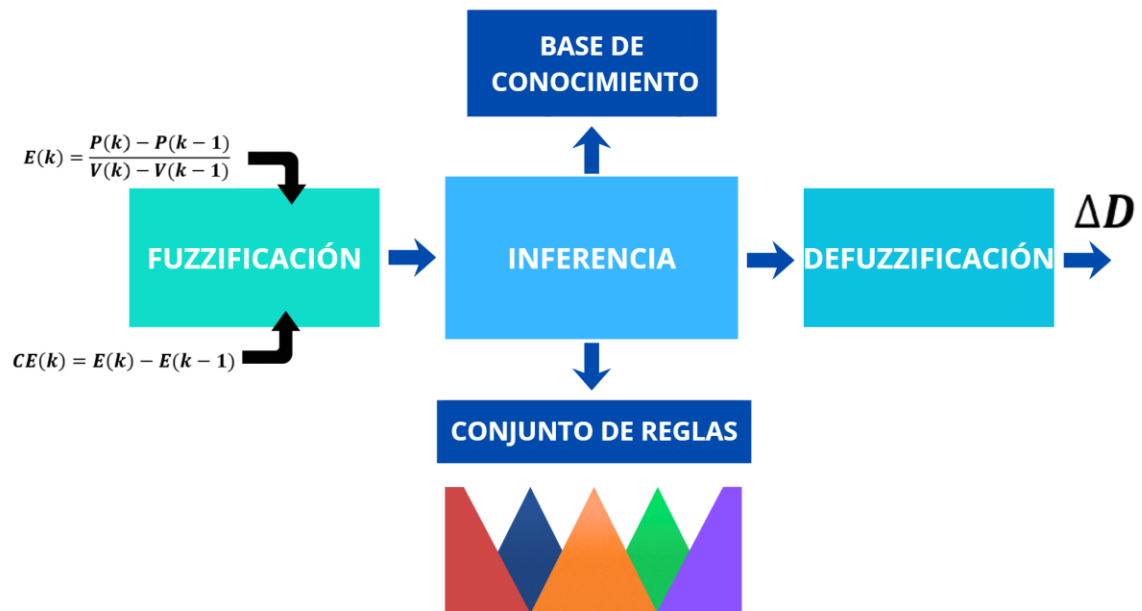


Figura 2. Diagrama de funcionamiento del controlador difuso propuesto.

En la siguiente sección se presenta el marco teórico, con definiciones que permiten comprender la terminología relacionada con nanosatélites, celdas fotovoltaicas y algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia, con especial atención a los controladores basados en lógica difusa. Asimismo, se incluye información teórica sobre los convertidores *DC-DC* (*Buck*, *Boost* y *Buck-Boost*). Este dispositivo es fundamental para el diseño del controlador *MPPT*, ya que actúa como enlace entre el sistema fotovoltaico y la carga alimentada.

4 MARCO TEÓRICO

Este capítulo presenta la información teórica que sustenta el proyecto desarrollado en el presente documento. En primera instancia, se muestran los términos asociados a los nanosatélites (pues en ellos radica la posible aplicación final de este trabajo), y cómo se genera energía eléctrica a partir del proceso mediante el cual las celdas fotovoltaicas captan la luz solar. Posteriormente, se describe la definición del seguimiento del punto de máxima potencia, se expone el principio de este algoritmo y se ofrece una breve explicación de la clasificación de los algoritmos de *MPPT*, con énfasis en el algoritmo de lógica difusa (*FLC*) y sus características. Finalmente, se presenta la información referente al convertidor *DC-DC*, los tipos de convertidores, su funcionamiento y cómo es que interviene este componente en un sistema fotovoltaico, debido a que, para localizar el punto de máxima potencia, es necesario modificar el ciclo de trabajo con el que opera el convertidor; este ajuste es realizado por el algoritmo de *MPPT*.

4.1 Nanosatélites

Un satélite es básicamente un cuerpo que orbita alrededor de otro cuerpo en el espacio exterior, y puede clasificarse como satélite natural o artificial. Por mencionar un ejemplo, la Luna es el satélite natural que orbita la Tierra y la denominación de satélite artificial o simplemente satélite, corresponde a un objeto hecho por el hombre lanzado al espacio para orbitar alrededor de un cuerpo (un planeta) en específico.

Los satélites son catalogados de acuerdo a su tamaño físico, que se encuentra dado por su masa; por ejemplo, un nanosatélite tiene una masa que no supera los 10 kg (Cervone, et al., 2022). La clasificación de satélites se detalla en la Tabla 3.

Un nanosatélite tiene una masa superior a 1 kg y menor a 10 kg, con características y funcionalidades que son similares a un satélite convencional, pero se distinguen de ellos en que éstos asumen misiones que son más específicas, operando en órbitas bajas. Los nanosatélites son lanzados al espacio con el objetivo de realizar observaciones hacia la Tierra; de igual manera, son empleados en las telecomunicaciones y en la meteorología.

Tabla 3. Clasificación de satélites por el tamaño dado por su masa (Kg), referencia de (Cervone, et al., 2022).

Tipo de satélite	Masa (kg)
Satélite grande	Mayor a 1000
Satélite pequeño	500 a 1000
Minisatélite	100 a 500
Microsatélite	10 a 100
Nanosatélite	1 a 10
Picosatélite	0.1 a 1
Femtosatélite	Menor a 0.1

De acuerdo con la explicación que cita Roibás Millán sobre nanosatélites y satélites convencionales, “la principal diferencia radica en la filosofía de diseño, que emplea lo que se llama aproximación design-to-cost. Se trata de incluir el coste como parámetro de diseño, de modo que la planificación del proyecto sea muy estricta. Se ha pasado de un escenario en el que solo un selecto grupo de países, agencias espaciales y grandes industrias construyen y lanzan satélites, a uno en el que muchos centros de investigación y universidades pueden hacerlo” (MAPFRE Global Risks, 2021).

Estos dispositivos han traído consigo una nueva forma de percibir las misiones espaciales, otorgando mayor acceso a la exploración espacial en sectores que no contaban con los recursos y la tecnología suficientes para adentrarse en este ámbito.

Como reglamento para nanosatélites, estos solo se lanzan en órbitas bajas de entre 400 a 650 km de altura y se desplazan a 28,800 km por hora. Los nanosatélites se distinguen de los satélites convencionales en que sus dimensiones son mucho más reducidas, los costos también son más accesibles y, desde luego, su tiempo de diseño, manufactura y ensamble se produce en un menor tiempo. “El costo de un satélite convencional puede exceder los 500 millones de dólares mientras el costo de un nanosatélite puede ser en promedio de 2 a 3 millones de dólares” (PAT Systems, 2017).

4.1.1 El estándar CubeSat para nanosatélites

El estándar *CubeSat* surgió a finales de los 90 y define una unidad mecánica externa como “1U” que especifica la forma de un cubo con unas medidas de 10 cm por cada lado y con una masa entre 1.0 kg y 1.33 kg (MAPFRE Global Risks, 2021). Este estándar fue establecido para los pico y nanosatélites, que, bajo esta clasificación, han sido contruidos con un conjunto de especificaciones acordes con el diseño estandarizado, que incluye la forma, el tamaño y el peso (PAT Systems, 2017). La Figura 3 muestra la estructura y los componentes de un nanosatélite construido según el estándar *CubeSat*.

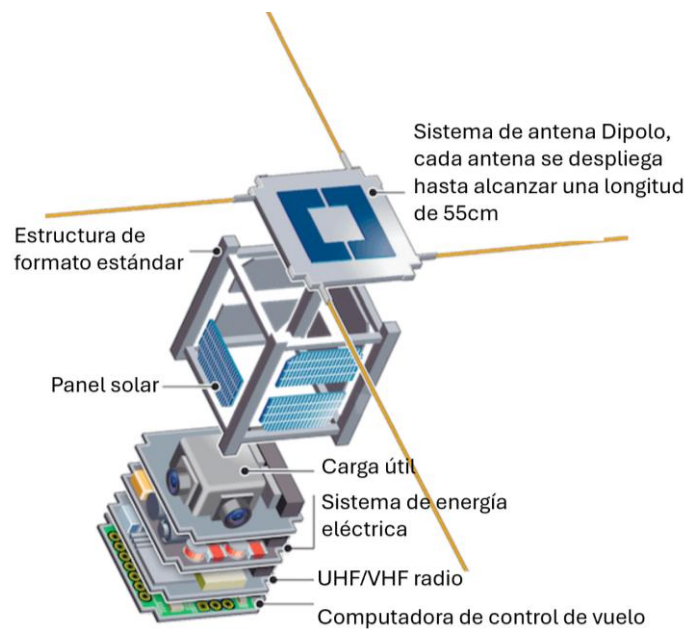


Figura 3. Estructura de un nanosatélite *CubeSat*, adaptado de (Alén Space, 2025).

Es necesario aprovechar la máxima cantidad de energía solar disponible, pero eso no solo implica que el sistema electrónico del satélite sea lo suficientemente capaz de captarla, sino que, durante su diseño, es muy importante considerar cómo se dispondrán los paneles solares, con el objetivo de instalar tantos como sea posible en toda la superficie del satélite. Este factor provocó que, para la disposición de los paneles, se tuviera la necesidad de estructurar el nanosatélite en forma de cubo para mejorar la captación de la energía solar; partiendo de esta consideración es que nace el término “*CubeSats*” (Cervone, et al., 2022).

4.1.2 Aplicaciones

La tendencia que se ha dado en el lanzamiento de nanosatélites representa un panorama que se centra en la idea de “más pequeño, más rápido y más eficiente” y, sobre todo, significa un menor costo de fabricación y operación. Estas características han contribuido a que la exploración espacial sea más rentable y más accesible a países y compañías que no cuenten con la infraestructura y recursos necesarios para realizar misiones espaciales que involucren el lanzamiento de satélites de gran tamaño, sino que con el lanzamiento de satélites más pequeños pueden iniciar en el ámbito de la exploración espacial y obtener información para las investigaciones que estén desarrollando. Este cambio ha sido posible gracias al desarrollo tecnológico, principalmente a los avances en microelectrónica y en el desarrollo de sistemas microelectromecánicos.

Con el surgimiento de este paradigma en la industria satelital, se ha desarrollado el interés por parte de los estudiantes para entrar en este ámbito, puesto que, el desarrollo de programas espaciales que involucren el diseño de nanosatélites comprende todas las etapas que se consideran en una misión satelital, que va desde el diseño del nanosatélite, su fabricación, el ensamblaje de todos sus componentes, las pruebas correspondientes, su lanzamiento, y por último, la operación del satélite. Por esta razón, una de las principales aplicaciones en el diseño de nanosatélites está en el ámbito educativo (Cervone, et al., 2022).

Desde el comienzo del desarrollo de los nanosatélites, estos han sido empleados para realizar trabajos de observación, pero desde 2013, esto ha cambiado debido a que empresas dedicadas al sector de las telecomunicaciones han empezado a lanzar sus propios nanosatélites con el objetivo de alcanzar una mayor presencia internacional. Otras aplicaciones son en meteorología, seguridad y defensa, o para realizar un seguimiento continuo de desastres naturales (MAPFRE Global Risks, 2021).

Estos dispositivos se emplean en la recolección de datos referentes a la observación de la Tierra, además de ser sumamente importantes para el desarrollo del Internet de las Cosas y así establecer una comunicación constante y efectiva entre dispositivos a nivel

global. Otras de las capacidades de los nanosatélites recaen en el seguimiento de la gestión de la logística, el control del tráfico marítimo, monitoreo ambiental, control de cultivos, y para otros temas científicos y de investigación (PAT Systems, 2017).

4.2 Energía solar y efecto fotoeléctrico

“La energía solar se genera mediante la fusión nuclear que ocurre en el Sol. Es necesaria para la vida en la Tierra y puede aprovecharse para usos humanos, como la generación de electricidad” (Turgeon, et al., 2024). Se conoce como energía solar al tipo de energía que se obtiene del sol, gracias esta energía es que la Tierra puede calentarse, se producen las corrientes de aire, el clima, y se permite el desarrollo de la vida vegetal y animal. La manera en que esta energía llega a la Tierra y a cualquier lugar del espacio donde se vislumbran los rayos del sol es mediante la radiación electromagnética. Esta radiación contiene la energía, el calor y la luz del Sol.

4.2.1 Recurso solar

La energía solar es una fuente de energía natural y renovable. Esto implica que sea ampliamente utilizada en lugares como escuelas, hospitales, la industria y el hogar. Este recurso es aprovechado mediante tecnologías aptas para convertir la radiación solar en energía útil, como en la generación de electricidad y como fuente de calor e iluminación.

Entre las tecnologías más reconocidas se encuentran los paneles solares (construidos a partir de la celda o célula fotovoltaica), que tienen como función convertir la radiación solar en electricidad. Otras tecnologías son la energía solar térmica (se transforma la radiación solar en calor por medio de colectores solares para calentar el agua), energía solar concentrada (por ejemplo, las estufas solares) y la arquitectura solar (energía solar pasiva) (Turgeon, et al., 2024). La Figura 4 muestra ejemplos de cómo se aprovecha la energía solar.



Figura 4. Energía solar fotovoltaica (REPSOL Global, 2025), energía solar térmica (SolarBrother, 2024), energía solar concentrada y energía solar pasiva (REPSOL Global, 2025).

4.2.2 Energía solar fotovoltaica

La energía fotovoltaica es una tecnología que aprovecha la energía solar para generar electricidad. Esta tecnología fue descrita por primera vez por Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Uno de los principales usos de la energía fotovoltaica es en el ámbito espacial para la generación de electricidad en los satélites que se lanzan al espacio, esto incluye desde luego, su uso para el abastecimiento de la energía que se necesita en la Estación Espacial Internacional (ISS) siglas en inglés *International Space Station*, la cual está equipada con un sistema fotovoltaico compuesto por dos alas de paneles solares, cada una con cerca de 33,000 células solares.

Un sistema fotovoltaico se compone por un conjunto de paneles solares, las celdas o células fotovoltaicas están compuestas por un material semiconductor, principalmente por silicio. En el momento en que el panel se expone a la radiación solar, el semiconductor absorbe esta luz, lo que provoca la liberación de electrones. En ese instante se genera un campo eléctrico que dirige los electrones sueltos hacia una corriente eléctrica que fluye en un sentido. La corriente resultante es dirigida a un medio externo (como un nanosatélite) para suministrarle la energía obtenida (Turgeon, et al., 2024).

4.2.3 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico fue descrito por primera vez en 1887 por Heinrich Rudolf Hertz, mientras realizaba investigaciones sobre ondas electromagnéticas. Posteriormente, Albert Einstein explicó este fenómeno en 1905, lo que le permitió obtener el premio Nobel (Rodríguez-Meza & Cervantes-Cota, 2006). El efecto fotoeléctrico es un fenómeno que ocurre cuando la radiación electromagnética incide sobre un material conductor o semiconductor; en ese caso, se liberan electrones y se genera una diferencia de potencial. Albert Einstein explicó la liberación de electrones en una superficie metálica como resultado de la incidencia de la luz solar sobre este objeto (Ruiz Dagua, 2016). “Si iluminamos una superficie metálica con un haz luminoso de frecuencia apropiada se emiten electrones de la superficie, esta emisión de electrones desde la superficie por la acción de la luz se denomina efecto fotoeléctrico” (Rodríguez-Meza & Cervantes-Cota, 2006).

Las celdas solares utilizan el efecto fotoeléctrico para convertir la luz del sol en energía eléctrica. Los fotones, partículas portadoras de la luz solar, inciden sobre las celdas solares. Este impacto genera electrones, y el movimiento de estos se denomina corriente eléctrica. Posteriormente, la corriente es conducida hacia un circuito externo para su utilización (Cogollo, 2019). En la Figura 5 se observa una representación del efecto fotoeléctrico y los electrones que se desprenden al incidir la luz del sol sobre la celda solar.

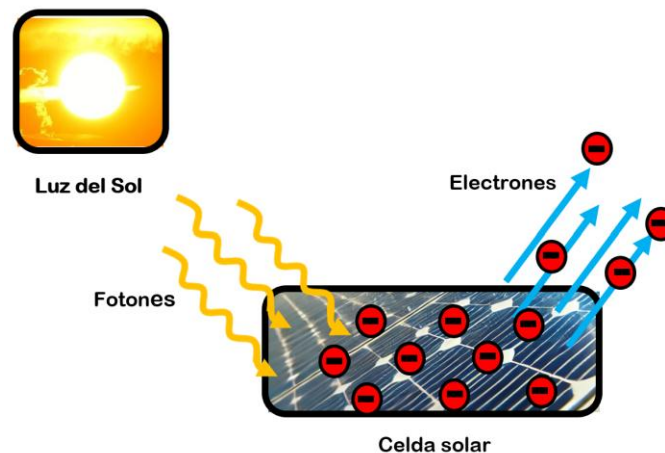


Figura 5. Efecto fotoeléctrico.

4.2.4 Celdas fotovoltaicas

“Una célula fotovoltaica es un dispositivo electrónico que convierte la energía procedente de la radiación solar que llega a la Tierra en forma de luz (fotones) en energía eléctrica (electrones) gracias al efecto fotoeléctrico” (Grupo Iberdrola, 2024).

Para su funcionamiento, la celda fotovoltaica está compuesta por dos materiales semiconductores con cargas de signo contrario: una carga corresponde a la parte positiva y la otra, a la negativa; ambos se encuentran separados por una junta neutra, donde se produce la unión positivo-negativo (P/N). En la unión P/N, se neutralizan las cargas y, al recibir luz solar en la capa N, se liberan electrones, lo que incrementa la diferencia de potencial entre las regiones negativa y positiva. En un circuito cerrado, esta diferencia genera la corriente eléctrica que se aprovecha como fuente de energía.

En un sistema fotovoltaico, la irradiancia incidente sobre las celdas solares es importante para obtener el máximo rendimiento; no obstante, la temperatura de las celdas solares es otro factor que, en conjunto, determina la eficiencia que puede alcanzar el sistema.

4.2.5 Irradiancia solar

La radiación electromagnética es la forma a través de la cual se propaga la energía solar; esto significa que la radiación se refiere a las ondas electromagnéticas emitidas por el Sol y que, al incidir sobre un sistema fotovoltaico, se genera electricidad (Grossi Gallegos, 2002).

En el proceso que ocurre en las celdas solares que aprovechan el efecto fotovoltaico para absorber la radiación electromagnética y generar electrones, interviene la cantidad de radiación incidente sobre el panel. Esta se denomina irradiancia solar y se utiliza como una magnitud que indica la potencia solar incidente sobre una superficie (celda solar). La irradiancia se mide en Watts por metro cuadrado (W/m^2). El valor que se utiliza como estándar para efectuar pruebas de operación de paneles solares en buenas condiciones de luz solar es de 1000 W/m^2 ; este valor corresponde al estándar de acuerdo

con la irradiancia que se puede percibir en la Tierra y, en la altitud a la que orbitan los nanosatélites, esta cifra es similar (Juan, 2020). Cuando la irradiancia sea igual o superior a 1000 W/m^2 , las celdas solares operarán a su máxima potencia; por debajo de ese valor, el panel reducirá su rendimiento. La Figura 6 muestra la incidencia de la radiación solar sobre las celdas de un nanosatélite.

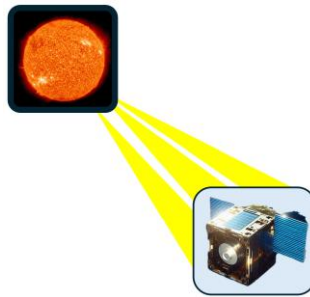


Figura 6. Irradiancia en las celdas fotovoltaicas de un nanosatélite.

4.2.6 Temperatura de la celda fotovoltaica

El calor es un problema para las celdas solares, puesto que a medida que la temperatura de la celda aumenta por encima de lo habitual, su rendimiento comienza a disminuir. El coeficiente de temperatura del panel es una medida que indica cuánto se reduce su rendimiento y se expresa como el porcentaje de reducción de la generación de energía por cada grado Celsius por encima de 25°C . Esta temperatura se considera un valor de referencia porque se utiliza para realizar las pruebas de eficiencia del sistema fotovoltaico.

La temperatura del panel repercute en su capacidad para la producción de electricidad, esto influye en la manera en la cual el exceso de calor pueda reducir la capacidad de la electrónica en la generación de energía, este efecto se relaciona con lo que establecen las leyes de la termodinámica (Cambio Energético, 2024).

4.2.7 Componentes de un sistema fotovoltaico

La energía eléctrica obtenida del recurso solar se aprovecha mediante un sistema fotovoltaico, equipado con diversos componentes que, en conjunto, permiten suministrar

la energía necesaria a la carga que alimenta. Los sistemas fotovoltaicos para nanosatélites como los *CubeSats* están diseñados para operar en el entorno espacial; esto implica que deben enfrentar obstáculos como el nivel de radiación, la temperatura y limitaciones debidas a su propia masa o volumen. Por lo tanto, un sistema fotovoltaico centrado en nanosatélites debe estar compuesto por: paneles fotovoltaicos, convertidor *DC-DC*, controlador de carga (*MPPT*), baterías, sensores y sistemas de monitoreo. En la Figura 7 se muestra un esquema de los componentes que conforman un sistema fotovoltaico.

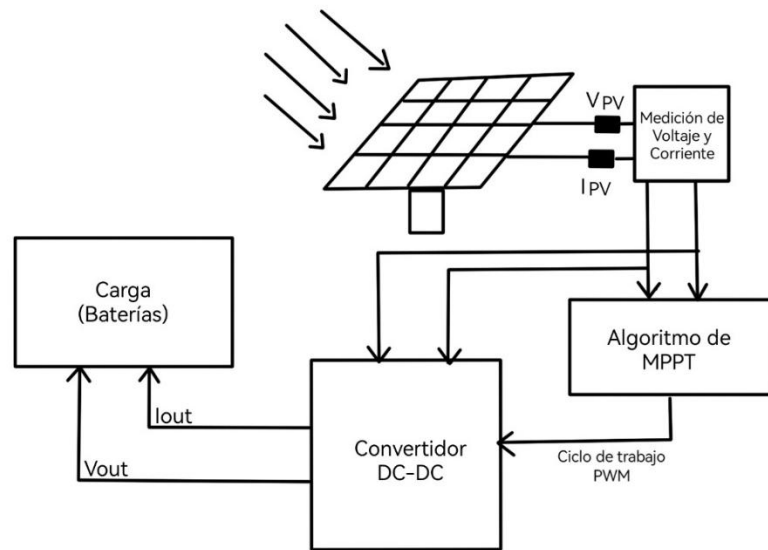


Figura 7. Componentes de un sistema fotovoltaico.

Los módulos fotovoltaicos convierten la radiación solar en electricidad mediante el efecto fotoeléctrico. Según las condiciones de irradiancia y temperatura, existirán distintos puntos donde se alcanza la máxima potencia; el algoritmo de *MPPT* identifica ese *MPP* para obtener el máximo rendimiento de las celdas (Patel & Beik, 2021).

El convertidor *DC-DC* adapta el voltaje generado por el sistema fotovoltaico para producir otro nivel de voltaje y conducirlo a la batería. El voltaje de salida obtenido corresponde al punto donde se genera la máxima potencia (Saavedra Montes, et al., 2013).

El controlador de carga regula el voltaje producido por las celdas para conducirlo a la batería, utilizando el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, que ajusta el ciclo de trabajo del convertidor *DC-DC* (Farfán, et al., 2015).

Las baterías almacenan la energía producida por los paneles solares, y su estado de carga depende del rendimiento y la eficiencia del módulo fotovoltaico (Divya & Østergaard, 2009).

Finalmente, sensores y sistemas de monitoreo realizan la medición de parámetros importantes como el voltaje, la corriente, la irradiancia y la temperatura, para proporcionar los datos necesarios para que el algoritmo de *MPPT* ajuste el ciclo de trabajo del convertidor *DC-DC* (Koutroulis, et al., 2001).

4.3 Convertidores *DC-DC* y su clasificación

El ciclo de trabajo del convertidor es determinado por el algoritmo de *MPPT* con el objetivo de obtener el máximo rendimiento del sistema fotovoltaico; es decir, que siempre opere sobre el punto de máxima potencia (Saavedra Montes, et al., 2013).

El algoritmo de *MPPT* modifica el ciclo de trabajo del convertidor para que este se adapte a las condiciones cambiantes de irradiancia y temperatura. Si la potencia generada por el sistema fotovoltaico es baja, el algoritmo de *MPPT* encontrará el *MPP* para que el convertidor opere con el ciclo de trabajo adecuado para generar la máxima potencia. El convertidor *DC-DC* recibe la energía producida por la celda y genera una salida que conduce esa corriente eléctrica a una carga externa, es decir, a la fuente de alimentación del dispositivo al que debe proveer energía. Este convertidor se encarga de transformar la energía obtenida a partir de una fuente de corriente continua, como las celdas fotovoltaicas, en una energía regulada (Bollipo, et al., 2020).

Los convertidores *DC-DC* se clasifican según su funcionamiento; es decir, la manera en que controlan el voltaje para dirigirlo a la carga que alimentan. Entre estos se

encuentran el *Buck*, *Boost* y *Buck-Boost*, los cuales se describen a continuación, presentando su topología típica.

En el convertidor *Buck*, el voltaje de salida, controlado por el algoritmo *MPPT*, es inferior al voltaje de entrada generado por las celdas solares. Este tipo de convertidor reduce el voltaje de entrada según el ciclo de trabajo definido por la salida del sistema *MPPT* (Robles & Villa, 2011). La Figura 8 presenta el diagrama del convertidor *Buck*.

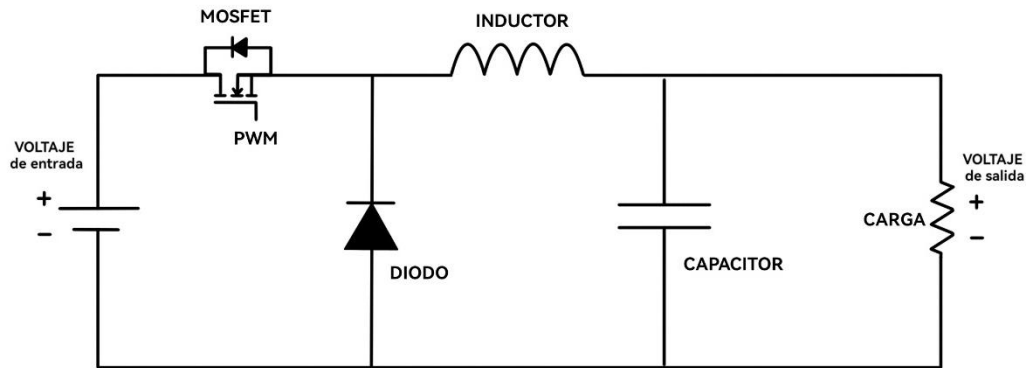


Figura 8. Topología del convertidor DC-DC Buck.

El convertidor *Boost* (Figura 9) modifica el voltaje de entrada de corriente continua a otro nivel de voltaje de corriente continua, ya regulado. Este convertidor está compuesto por un inductor, un diodo, el transistor MOSFET y un capacitor. Al operar en conjunto con el sistema de *MPPT*, el convertidor *Boost* modifica el voltaje de entrada para producir un nivel de voltaje de salida más alto (Mahmod Mohammad, et al., 2020).

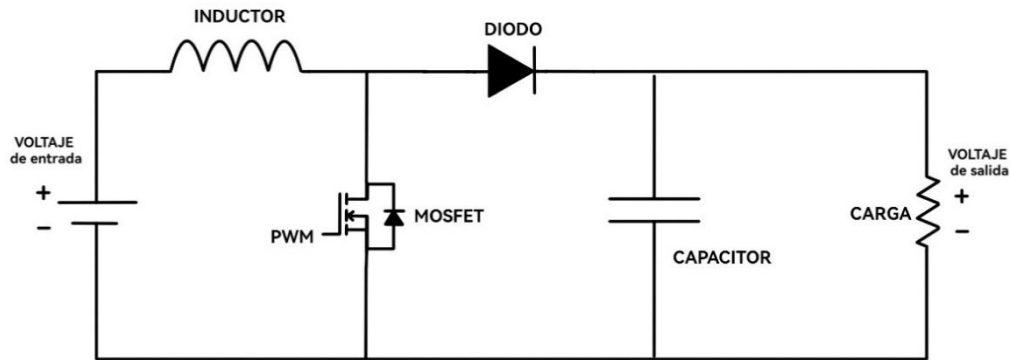


Figura 9. Topología del convertidor DC-DC Boost.

La última topología de esta familia es la denominada *Buck-Boost*. Esta es de gran importancia para un sistema eléctrico, ya que proporciona un voltaje de salida regulado a partir de un voltaje de entrada no regulado. El circuito convertidor *Buck-Boost* como su nombre lo indica, es un convertidor que está compuesto por un circuito que integra las funcionalidades y principios del diseño del *Buck* y *Boost*. El control del voltaje resulta en otro nivel de voltaje, que es más elevado o más bajo, que el voltaje de la fuente de alimentación, según se requiera por la carga (Shayeghi, et al., 2021).

El voltaje de salida del sistema fotovoltaico es el voltaje que recibe como entrada el convertidor, y este opera con el ciclo de trabajo establecido por el *MPPT* (Mahmod Mohammad, et al., 2020). Este circuito opera en modo *Buck* y en modo *Boost*, según el voltaje de entrada. Esto implica que el modo de operación *Boost* entra en funcionamiento cuando el voltaje de salida supera al de entrada. Por otro lado, el modo *Buck* se activa cuando el voltaje de salida es inferior al de entrada (You, et al., 2019). “El nombre de esta topología se debe a que permite obtener un voltaje de salida con una polaridad opuesta y con voltajes mayores o menores que la entrada” (González, et al., 2015).

Existen distintas aplicaciones en dispositivos eléctricos donde es necesario contar con un convertidor *DC-DC* que tenga estas capacidades, reducir o elevar el voltaje, la razón, de esto, es que los dispositivos pueden presentar cambios muy drásticos en el voltaje de salida, y al contar con la fuente de alimentación conmutada es posible controlar el voltaje de entrada para así obtener un voltaje de salida estable (Hwu & Peng, 2012). En la Figura 10 se observa el diagrama del convertidor *Buck-Boost*, con los componentes que integra: diodo, MOSFET, inductor, capacitor y su disposición.

En cuanto a los valores que deben asignarse a cada uno de estos componentes, se basan principalmente en el voltaje de entrada del circuito y en el voltaje de salida máximo deseado. El voltaje de entrada considerado para este estudio es el voltaje que proviene de la energía generada por el sistema fotovoltaico y el voltaje de salida corresponde, al máximo nivel de voltaje que es capaz de generar el panel en condiciones óptimas de irradiancia y temperatura.

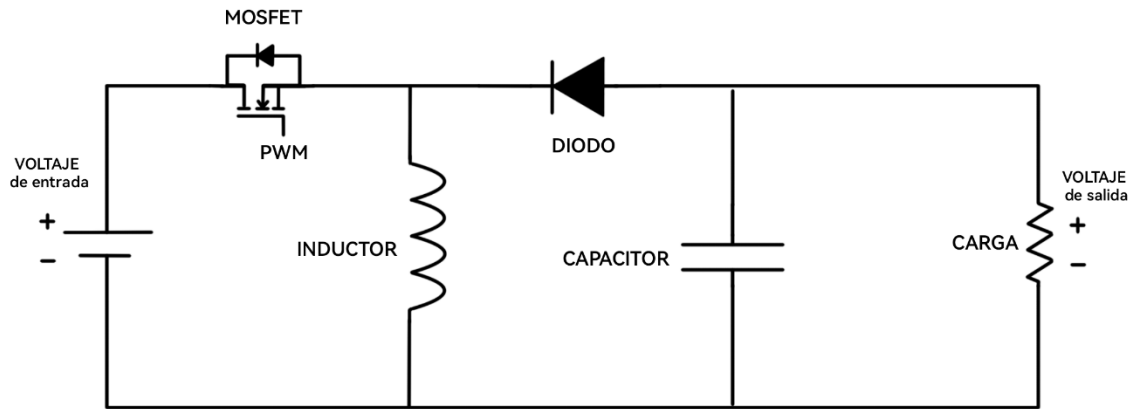


Figura 10. Topología del circuito convertidor DC-DC Buck-Boost.

4.4 Algoritmos de *MPPT*

La extracción de potencia máxima en el sistema fotovoltaico permite aprovechar mejor la energía producida por las células solares, aún bajo cualquier variación en condiciones de sombreado parcial (*PSC*) siglas en inglés de *Partial Shading Conditions*. En cualquier dispositivo electrónico que dependa únicamente de la energía percibida por los paneles solares, se requiere extraer la máxima potencia. El uso de una técnica adecuada para realizar el seguimiento del punto de máxima potencia es indispensable para lograrlo. Estas técnicas o algoritmos se categorizan de tres maneras: clásica, inteligente y de optimización. Los algoritmos de *FLC* y *P&O* pertenecen a la clasificación de inteligente y clásico, respectivamente (Bollipo, et al., 2020).

El algoritmo de *P&O* es el algoritmo de *MPPT* más utilizado debido al rendimiento y efectividad que puede proporcionar para el rastreo del *MPP*. Esta técnica consiste en perturbar el voltaje fotovoltaico en el sentido donde se incrementa la potencia fotovoltaica, es entonces que se obtiene un balance entre la velocidad de seguimiento y la pérdida de potencia en estado estable, mediante la definición del tamaño de la perturbación (Saavedra Montes, et al., 2013).

4.4.1 Seguidor del punto de máxima potencia

Un sistema fotovoltaico genera energía eléctrica en función de las condiciones de irradiancia y de temperatura de las celdas. Esto significa que existen distintos puntos de operación de acuerdo con las variaciones que se presenten (Saavedra Montes, et al., 2013). “Un *MPPT* es un adaptador de impedancia (implementado por un convertidor *DC/DC*) conectado entre el generador fotovoltaico y la carga” (Ríos, et al., 2020).

El *Maximum Power Point Tracker* o seguidor del punto de máxima potencia, es un controlador que permite que se logre la mejor eficiencia en la generación de electricidad del sistema fotovoltaico. El *MPPT*, permite la producción de la mayor cantidad de energía eléctrica que sea posible generar bajo las distintas condiciones a las que se encuentre expuesta la celda. El *MPPT* tiene como función el rastreo del punto de máxima potencia que se pueda generar por el sistema fotovoltaico, que depende de las condiciones ambientales (irradiancia y temperatura), debido a que este seguimiento se realiza de manera continua porque el *MPP* se encuentra en constante cambio por estos factores (Lara Ruiz, 2022). Para el seguimiento del *MPPT* se emplea alguna de las técnicas vistas en la Tabla 1, presentada con anterioridad (Bollipo, et al., 2020).

La potencia de la celda se obtiene del producto del voltaje (V) y la corriente (I) de la misma. De cada par V-I (potencia) generado durante la operación del panel se determina el máximo. Para entender lo que significa el punto de máxima potencia, es importante comprender que existe una estrecha relación entre el voltaje y la corriente producidos por la celda solar y estos valores son brindados por el fabricante del panel, mediante la curva corriente - voltaje (I-V). En los límites laterales, donde se registran valores más bajos de corriente o de voltaje, si el panel opera en esas zonas, su rendimiento es menor y genera menos potencia (Lara Ruiz, 2022). El punto de máxima potencia, en la práctica, no es un único punto, sino que varía con las variaciones de irradiancia y temperatura. Este *MPP* es el que rastrea el algoritmo *MPPT* (Ríos, et al., 2020). “Todo módulo fotovoltaico posee un rendimiento que no es lineal, esto significa que la corriente y la tensión estarán variando según las condiciones climáticas presentes en el emplazamiento” (Peña, 2021).

4.4.2 Curva Voltaje-Corriente y Curva Potencia-Voltaje

Los equipos fotovoltaicos, como controladores de carga, inversores conectados a la red o controladores de bombeo, utilizan tecnología *MPPT* para ajustar la resistencia interna del sistema, para que el voltaje y la corriente del panel operen en las mejores condiciones, para alcanzar la máxima potencia generada. Es con este concepto, que surge la curva V-I, en esta curva, la cual regularmente es proporcionada por el fabricante, se muestra la línea que se produce con cada par de V-I generados por la celda, en las distintas condiciones de irradiancia que puedan ocurrir (Peña, 2021).

En la Figura 11 se observa que cuando la irradiancia solar disminuye, la corriente generada también disminuye; sin embargo, el voltaje casi no presenta cambios. En la gráfica presentada, el eje “Y” muestra los valores relativos a la corriente y el eje X corresponde a los distintos niveles de voltaje; esto da como resultado distintas curvas, cada una producida según los niveles de irradiancia, y el punto donde se genera la máxima potencia se señala en rojo.

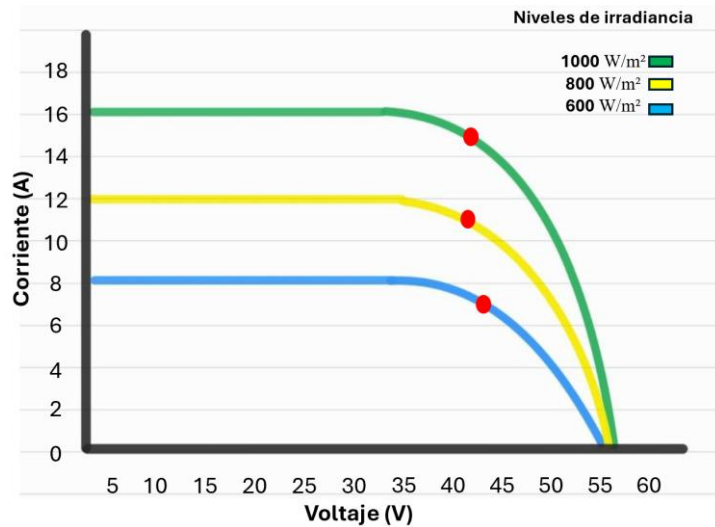


Figura 11. Representación de la curva V-I.

Por otro lado, la curva P-V es producida al graficar los puntos de *MPP* obtenidos al calcular el producto de cada par V-I, por lo que en la curva P-V se relacionan la potencia (P) y el voltaje (V) de la celda. Esta gráfica se muestra en la Figura 12.

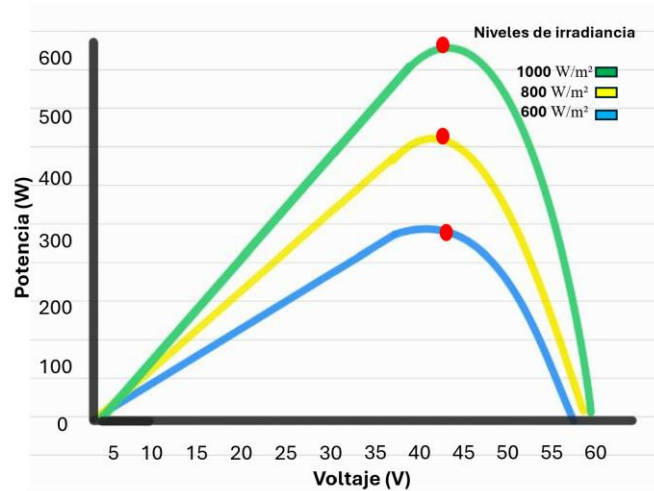


Figura 12. Representación de la curva P-V.

La gráfica de la Figura 13 muestra el *MPP* global y los *MPPs* locales. Cuando el nivel de irradiancia se mantiene constante sólo existirá un *MPP* en la curva P-V, y este punto representa la máxima potencia actual; en cambio cuando se presente más de un solo punto, uno es el *MPP* global y los demás puntos corresponden a *MPPs* locales, esto se produce cuándo existen condiciones de sombreado parcial, por ejemplo. Por otro lado, la Figura 14 muestra la formación de la curva V-I, con *MPPs* locales y el *MPP* global (Bollipo, et al., 2020).

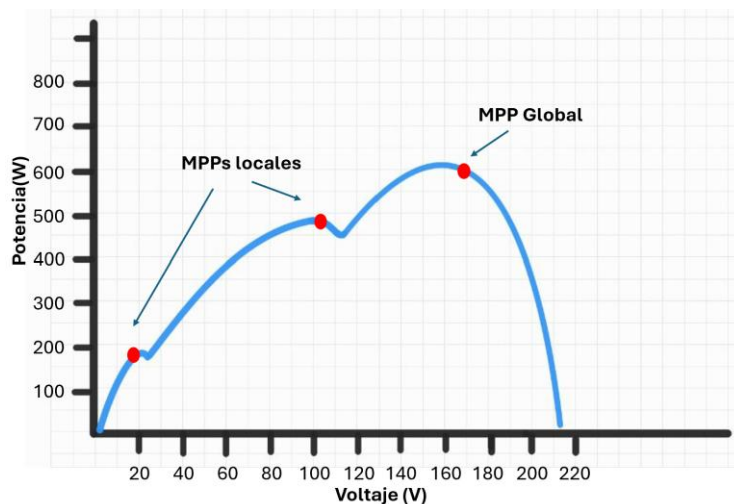


Figura 13. Representación de la curva P-V, con *MPPs* locales y el *MPP* global.

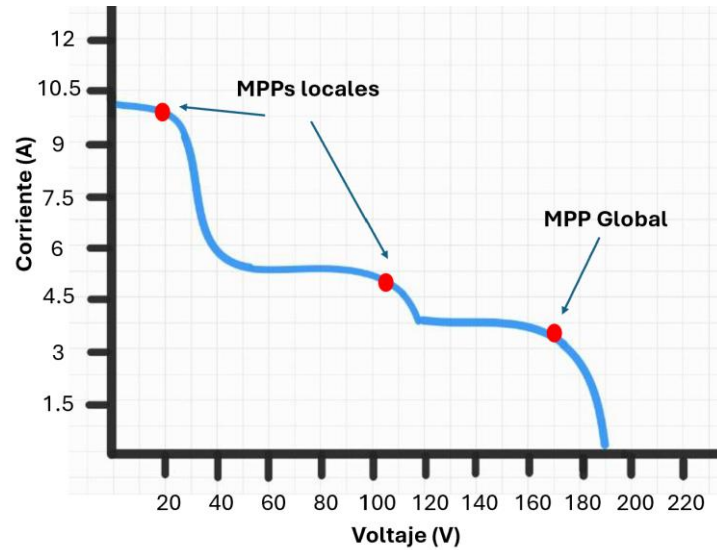


Figura 14. Representación de la curva $V-I$, con MPPs locales y el MPP global.

4.4.3 Algoritmo $P\&O$ (perturbación y observación)

El algoritmo de Perturbar y Observar ($P\&O$) es reconocido por su facilidad para ser implementado en sistemas de $MPPT$, lo que lo ha convertido en una de las técnicas más utilizadas para el rastreo del punto de máxima potencia (Sera, et al., 2013).

Este algoritmo se basa en el principio de que, en el instante en que se aplica una variación al voltaje de operación de un sistema fotovoltaico, es posible conocer su efecto midiendo la potencia generada. Si este cambio incrementa la potencia obtenida, esto significa que el punto de operación se aproxima al máximo rendimiento (MPP), por lo que se debe mantener la dirección del ajuste de voltaje. Por el contrario, si la potencia disminuye, significa que el sistema se aleja del punto de máxima potencia, requiriendo invertir la dirección de la perturbación para optimizar la obtención de energía del panel fotovoltaico (Femia, et al., 2005).

Por lo tanto, su funcionamiento consiste en ajustar el voltaje del panel fotovoltaico mediante pequeñas perturbaciones. Después de cada modificación, evalúa (observa) si la potencia generada aumenta o disminuye respecto al valor previo. Si la potencia se

incrementa, el algoritmo mantiene esa dirección, y en caso contrario, invierte la dirección de la perturbación (Pandey & Srivastava, 2019). En la Figura 15 se presenta el algoritmo de funcionamiento de la técnica de *P&O* mediante un diagrama de flujo.

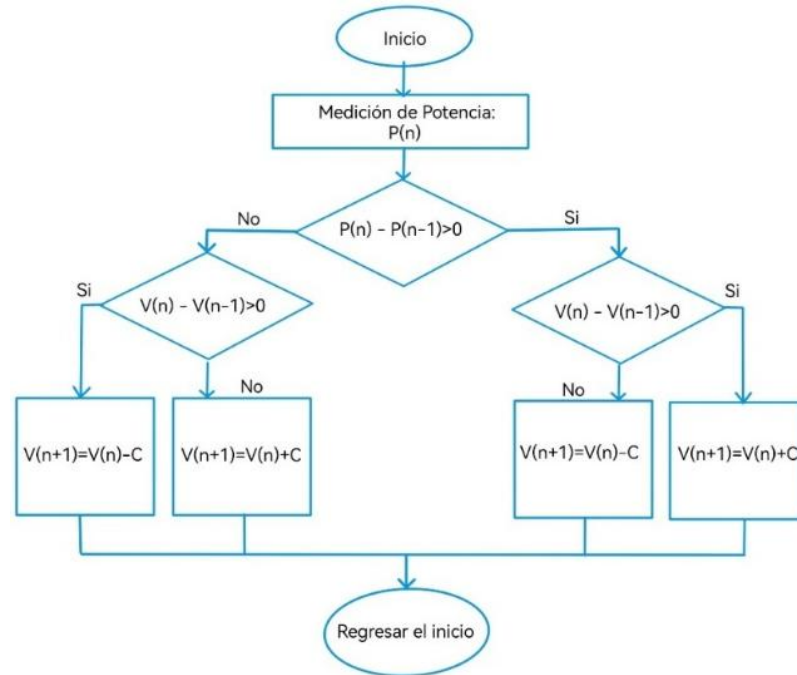


Figura 15. Algoritmo de perturbación y observación, adaptado de (Reisi, et al., 2013).

4.5 Fuzzy Logic Controller

El algoritmo *FLC* pertenece a la clasificación de técnicas de *MPPT* inteligentes, y se distingue por estar orientado a situaciones donde existen condiciones ambientales muy cambiantes y aun así mantener una buena precisión. Se caracteriza por tener una alta eficiencia y velocidad en el seguimiento del punto de máxima potencia. El algoritmo de *MPPT* realiza el seguimiento del punto de máxima potencia, contemplando de manera continua los cambios ambientales que influyen en la generación de energía en la celda. La implementación de este controlador es muy importante para optimizar el funcionamiento del sistema fotovoltaico (Bollipo, et al., 2020).

“Los *FLC* se utilizan ampliamente en diferentes sistemas de control, debido a que un diseño adecuado permite combinar velocidad y precisión en el control” (Farfán, et al.,

2015). En el diseño de un *FLC*, se definen los parámetros de entrada, la salida y las reglas del sistema difuso, de modo que el controlador MPPT ajuste el punto de operación del convertidor para generar la máxima potencia posible del sistema fotovoltaico. Las ventajas que ofrece este algoritmo son su velocidad y precisión para la detección del *MPP*.

4.5.1 Lógica difusa

La lógica difusa se utiliza en el diseño y control de sistemas, en la automatización de procesos, en el reconocimiento de patrones, en el aprovechamiento de sistemas de energía renovable, como los sistemas fotovoltaicos, y en otras situaciones que abarcan desde la industria hasta la investigación académica.

Las funciones de membresía definen el nivel de pertenencia de un elemento a un subconjunto asociado a una etiqueta específica. Dichas funciones son muy importantes para el desempeño global de la representación del sistema difuso y constituyen la parte principal de la teoría de conjuntos difusos, ya que definen las áreas de pertenencia de cada conjunto.

La precisión de un sistema difuso depende directamente de la formulación de las funciones de membresía; esto significa que la elección de la forma y los intervalos de las *MFs*, es determinante para resolver un problema, dado que esto influye en el funcionamiento del sistema de inferencia difusa. Las *MFs* más comunes presentan formas triangulares, trapezoidales o gaussianas y como restricción deben cumplir que su valor debe estar dentro del rango de 0 a 1 (Sadollah, 2018).

Las siguientes imágenes y ecuaciones que se muestran, descritas en (Benitez P., 2025), permiten visualizar las áreas de pertenencia para cada tipo de función de membresía. En la Figura 16 se observa una función de pertenencia triangular y la ecuación que la expresa (4.1).

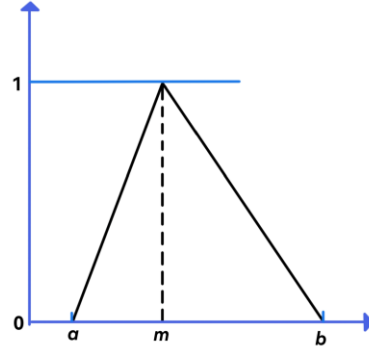


Figura 16. Función de pertenencia con forma triangular.

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b-x)/(b-m) & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (4.1)$$

La imagen de la Figura 17, muestra el ejemplo de una función de pertenencia trapezoidal, y la ecuación (4.2) define esta forma.

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \vee (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c, d) \end{cases} \quad (4.2)$$

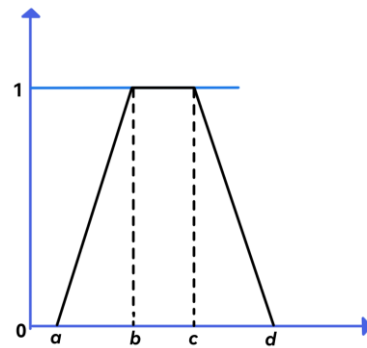


Figura 17. Función de pertenencia con forma trapezoidal.

Finalmente, en la imagen de la Figura 18, se puede visualizar una función de pertenencia con forma gaussiana, esta forma es descrita por la ecuación (4.3).

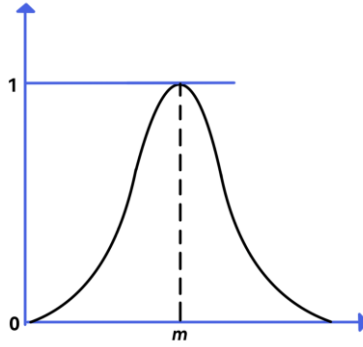


Figura 18. Función de pertenencia gaussiana.

$$A(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad (4.3)$$

4.5.2 Principios del diseño de un FLC

Esta técnica no necesita del modelado matemático preciso del sistema y es considerada como una técnica inteligente porque realiza el seguimiento del *MPP* sin importar que las fuentes de información sean inciertas. El diseño del controlador está sujeto a la experiencia, principalmente para la definición de las reglas difusas (Rajesh & Mabel, 2014). El sistema difuso está conformado tres puntos: el primero es la fuzzificación, el segundo son las reglas difusas (reglas de inferencia evaluadas de acuerdo con la base del conocimiento), por último, la defuzzificación (Reisi, et al., 2013).

Para el desarrollo del *FLC* se define primero la lógica que tendrá el sistema difuso antes de su implementación para establecer la base del conocimiento, y posteriormente determinar los parámetros a considerar y cómo va a actuar el sistema en las condiciones establecidas (Farfán, et al., 2015). La técnica de *FLC* es muy eficiente debido a que no necesita conocer a profundidad todos los detalles internos del sistema que controla, sino que, al solo trabajar información cualitativa y reglas difusas, se simplifica su implementación (Bollipo, et al., 2020). El diseño del *FLC* conlleva la formulación de las variables de entrada y salida del sistema, así como la definición de las reglas de inferencia y funciones de membresía. En la Figura 19 se observa un esquema con las partes que integran un sistema difuso.

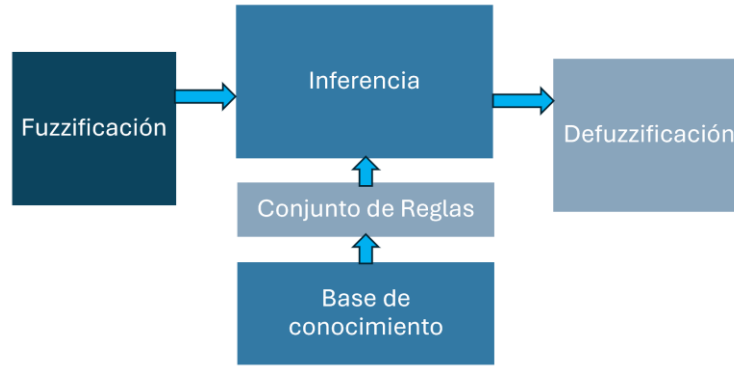


Figura 19. Diagrama general de un sistema basado en Lógica Difusa.

En el *FLC*, la fuzzificación corresponde a las variables lingüísticas que recibe como entradas referentes a los parámetros del sistema fotovoltaico, es entonces que las variables iniciales (numéricas) se transforman en variables difusas. Las reglas de inferencia son reglas que se determinan bajo el formato “if” “then”, es decir, “si” se cumple una condición, “entonces” se produce un determinado resultado (Reisi, et al., 2013). Con la formulación de estas reglas se asigna a las variables lingüísticas una correlación de entrada y salida, de acuerdo con la base de conocimiento formulada por la comprensión humana para satisfacer los requerimientos del sistema. En la defuzzificación se lleva a cabo un proceso contrario a la fuzzificación, debido a que es aquí donde los parámetros que se convirtieron a variables lingüísticas y al haber sido evaluados por las reglas difusas, se extraen esas entradas para obtener como resultado una salida definida como variable lingüística, la cual es convertida a una variable numérica (Bollipo, et al., 2020). La salida es el valor de la señal modulada que define el ciclo de trabajo de operación del convertidor DC-DC para rastrear el punto en el que se alcanza la máxima potencia (Rajesh & Mabel, 2014).

Por su parte, las funciones de membresía describen el grado de pertenencia de una variable a un conjunto difuso. La configuración correcta y que mejor se adapte a las necesidades del sistema hace posible la alta efectividad del *FLC* (Bollipo, et al., 2020).

Las entradas del sistema difuso generalmente son el error y el cambio en el error, esto a partir de los valores de voltaje y corriente de la energía producida por la celda, los

cuales se modifican por las condiciones de irradiancia y temperatura. La salida obtenida es el ciclo de trabajo, o el voltaje y la corriente donde se encuentra el *MPP* con los cuales pueda ser generado el ciclo de trabajo (Reisi, et al., 2013). En la Figura 20, se muestra un ejemplo ilustrativo de la formulación de funciones de membresía triangulares para las entradas y la salida del *FLC*.

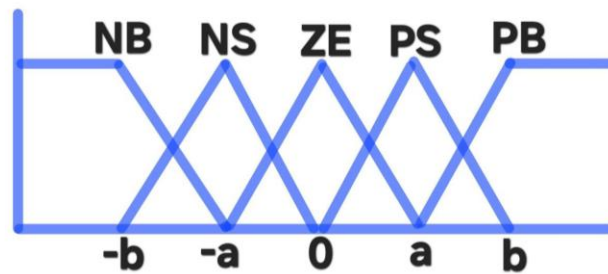


Figura 20. Funciones de membresía del FLC.

5 MARCO METODOLÓGICO

La eficiencia de un sistema fotovoltaico depende de sus materiales de construcción, de las condiciones de irradiancia y de temperatura y de la capacidad del algoritmo encargado de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia. Este documento se centra en esta última parte, es decir, en el desarrollo e implementación del algoritmo de rastreo del punto de máxima potencia, con el propósito de garantizar que el sistema fotovoltaico opere en dicho punto.

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para obtener un algoritmo capaz de rastrear eficazmente el punto en el que el panel fotovoltaico puede suministrar la máxima potencia a la carga que debe alimentar. El estudio realizado incluye la elaboración de modelos para simular el rendimiento de un sistema fotovoltaico, la implementación del convertidor *DC-DC* y la integración con el algoritmo *MPPT*. Por lo tanto, el modelo final consiste en un sistema fotovoltaico compuesto por un convertidor *Buck-Boost*, controlado por un algoritmo difuso (*FLC*) de diseño propio, para el seguimiento del punto de máxima potencia.

5.1 Tipo y diseño de la investigación

La presente investigación se clasifica, conforme a los criterios de (Hernández Sampieri, et al., 1997) y (Behar Rivero, 2008) como un estudio de enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección y análisis estadístico de datos numéricos derivados de métricas de desempeño de controladores *MPPT*. Su alcance es correlacional-comparativo con elementos explicativos, pues contrasta el desempeño de dos algoritmos distintos (*FLC* y *P&O*) bajo condiciones controladas, y explica las causas arquitectónicas que determinan sus diferencias operativas. El diseño empleado es cuasiexperimental de tipo comparativo transversal, caracterizado por la manipulación deliberada de la variable independiente (tipo de controlador *MPPT*) y el control estricto de las variables externas (hardware, software y condiciones ambientales simuladas), con recolección de datos en un único momento posterior a la simulación. La investigación combina fuentes

documentales (revisión sistemática de la literatura científica) con fuentes de campo experimentales (ejecución de pruebas de simulación en *Matlab/Simulink*).

5.2 Requerimientos y especificaciones

En cuanto a los requerimientos que deben ser considerados para el desarrollo de este algoritmo de *MPPT*, estos consisten en el desarrollo y modelado utilizando el entorno de simulación de *Matlab/Simulink* en el cual se presenta como algoritmo para el rastreo del punto de máxima potencia un controlador basado en la técnica inteligente de *Fuzzy Logic Controller* y que este sea comparado con la técnica clásica de *Perturb & Observe*. El controlador *MPPT* debe operar en conjunto con un convertidor *DC-DC* de tipo reductor-elevador (*Buck-Boost*) para regular el voltaje de salida.

El panel fotovoltaico integrado en la simulación varía su comportamiento; esto significa que, según las condiciones de irradiancia y temperatura, el panel proveerá distintos niveles de voltaje. El controlador *MPPT* al emplear ambos algoritmos debe tener la capacidad de rastrear de manera rápida y precisa el punto donde se alcanza la máxima potencia, este punto corresponde al voltaje y corriente adecuados con los cuales el sistema fotovoltaico puede suministrar la máxima cantidad de energía posible, bajo cualquier variación en irradiancia y temperatura.

La manera de corroborar que el modelo presentado rastrea correctamente el punto de máxima potencia es mediante la comparación de la potencia obtenida en la simulación integrada por el panel fotovoltaico, el convertidor *DC-DC* y controlador *MPPT*, con las gráficas de las curvas Corriente-Voltaje y Potencia-Voltaje, proporcionadas en los detalles de configuración del propio sistema fotovoltaico modelado en *Matlab/Simulink*, que indica la máxima potencia que puede ser generada por el panel, en las condiciones de irradiancia y temperatura establecidas. Por lo tanto, la potencia obtenida con el controlador *MPPT* debe ser lo más cercana posible a la potencia indicada por la configuración del panel (potencia ideal o de referencia).

5.3 Diseño e implementación

Los detalles del proceso de diseño de los modelos realizados en *Matlab/Simulink* se presentan en este apartado, donde se describen las especificaciones particulares de cada modelo y los parámetros asignados en la configuración del panel fotovoltaico. Para el caso de los circuitos, se presentan las ecuaciones que permiten calcular el valor que se asigna a cada uno de los componentes de los convertidores *DC-DC*, y en especial, las ecuaciones asociadas al convertidor *Buck-Boost*, tomando como referencia la configuración del panel fotovoltaico, con respecto al voltaje de salida. Como parte del diseño del algoritmo se incluyen diagramas que explican el principio de funcionamiento de las técnicas para el rastreo del punto de máxima potencia: *P&O* y *FLC*.

5.3.1 Modelado de un sistema fotovoltaico en *Matlab/Simulink*

El primer modelo consiste en la simulación de un sistema fotovoltaico en el entorno de *Matlab/Simulink*. Se considera como punto de partida el rendimiento de un panel fotovoltaico representado con este software, para posteriormente considerar todos los componentes que intervienen en un sistema fotovoltaico más completo.

En la Figura 21 se muestra el diagrama que permite identificar un modelo básico que integra como elemento principal, el panel fotovoltaico. Este bloque, denominado “*PV Array*”, se encuentra en la biblioteca de *Simscape Electrical* de *Matlab/Simulink*. A este componente se encuentran conectados dos bloques de entrada con las constantes de irradiancia y temperatura, con valores de 1000 W/m^2 y 25°C , respectivamente. Estos valores han sido establecidos así, debido a que es el estándar que indica las condiciones óptimas bajo las cuales el panel puede generar la máxima potencia de acuerdo con la literatura consultada (Baramadeh, et al., 2021).

Otros componentes son los empleados para realizar la medición del voltaje y la corriente producidos por el sistema fotovoltaico mediante el uso de un “*Bus Selector*” que recibe las mediciones de ambos parámetros y muestra estos valores en las pantallas “*Displays*” conectadas a la salida del “*Bus Selector*”. Se añade un bloque “*Product*” con

el que se obtiene el producto entre el voltaje y la corriente del panel, que corresponde a la potencia en *Watts* producida por el sistema fotovoltaico.

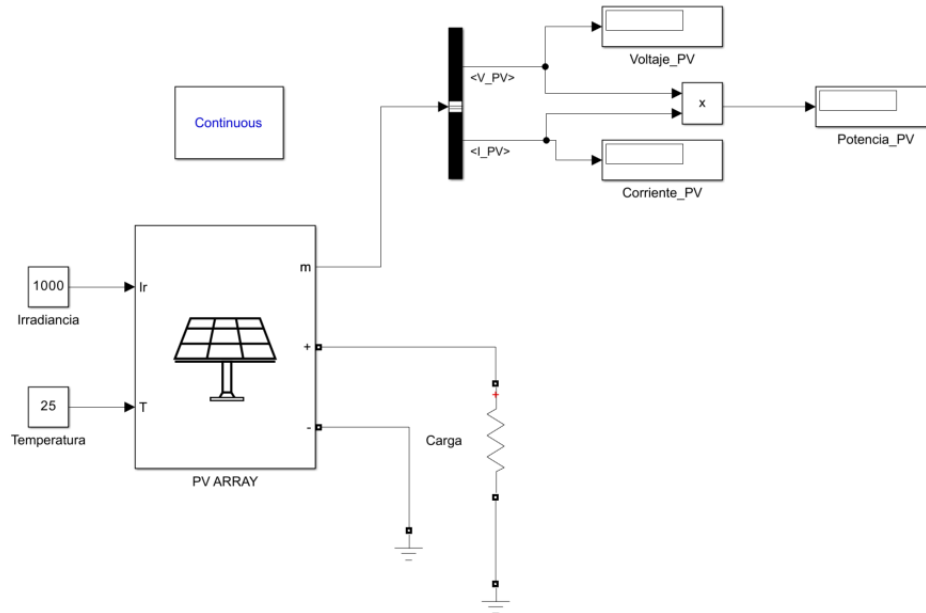


Figura 21. Diagrama de un sistema fotovoltaico en Matlab/Simulink.

Además de estos elementos, el bloque “*Powergui*” establecido como “*Continuous*” es necesario cuando se añade un elemento de la biblioteca *Simscape Electrical*, como el “*PV Array*”. La carga que alimenta el panel se representa mediante una resistencia cuyo valor se calcula con la Ley de Ohm, según la ecuación (5.1) (Pérez & Ávila, 2021).

$$R = \frac{V}{I} \quad (5.1)$$

Donde:

R = Resistencia (Ω)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

Para determinar la potencia producida por el sistema fotovoltaico se emplea la ecuación (5.2) (Pandey & Srivastava, 2019).

$$P = V \times I \quad (5.2)$$

Donde:

P = Potencia (W)

V = Voltaje (V)

I = Corriente (A)

El sistema fotovoltaico simulado incorpora los parámetros listados en la Tabla 4 y la Tabla 5. Al observar estos datos, se puede notar que las especificaciones del panel son de 36.3 V y 7.84 A, esto, bajo la consideración de que dichos parámetros se obtienen mediante el voltaje de circuito abierto (cuando no existe una carga conectada al panel) y la corriente de cortocircuito (máxima corriente exigible). La potencia producida por el panel en el punto de máxima potencia es de 213.15 W, con un voltaje de 29 V y una corriente de 7.35 A.

Tabla 4. Parámetros del modelo.

Parámetros	Valor
Corriente generada por la luz I_L	7,8654 A
Corriente de saturación del diodo I_0	2,973e-10 A
Factor de idealidad del diodo	0.98119
Resistencia de derivación R_{sh}	313,0553 Ω
Resistencia en serie R_s	0.39381 Ω

Tabla 5. Datos del módulo.

Parámetros	Valor
Máxima Potencia	213.15 W
Celdas por módulo	60
Voltaje de circuito abierto	36.3 V
Corriente de cortocircuito	7.84 A
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp)	29 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imp)	7.35 A
Coeficiente de temperatura de Voc	-0.36099 %/°C
Coeficiente de temperatura de Isc	0.102 %/°C
Mostrar las características de I-V y P-V para un módulo de...	Un módulo con 25° Celsius, y niveles de irradiancia específicos
Irradiancia W/m ²	Niveles de irradiancia establecidos en: 1000, 800 y 500 W/m ²

La configuración específica del panel fotovoltaico se detalla en la Figura 22. Como se puede apreciar, sólo se encuentra seleccionado un módulo conectado en serie y en paralelo; esto es suficiente para realizar toda la experimentación correspondiente al algoritmo de *MPPT* que se va a implementar. Adicionalmente, la Figura 22 muestra los detalles de la configuración del “*PV Array*”, que incluye la información de las tablas previas.

La selección de la configuración de la irradiancia considera una sola temperatura (25 °C) con distintos niveles de irradiancia (1000, 800, 600, 400 y 200 W/m^2). Esta configuración será modificada posteriormente para establecer una sola irradiancia (1000 W/m^2) con distintos grados de temperatura (70, 55, 40 y 25 °C). Estas variaciones permiten obtener gráficas que muestran las diferencias entre las configuraciones.

Figura 22. Parámetros de configuración del panel fotovoltaico.

Las gráficas obtenidas al habilitar la opción “Plot” muestran las curvas de Voltaje-Corriente y de Voltaje-Potencia. En la Figura 23 se puede visualizar el *MPP* para cada nivel de irradiancia (1000, 800, 600, 400 y 200 W/m^2) con una misma temperatura (25 °C). En estas gráficas se señala en rojo el punto en el que se alcanza la potencia máxima.

La otra configuración seleccionada es la correspondiente a una sola irradiancia (1000 W/m^2) para distintos grados de temperatura (70, 55, 40 y 25 °C), y se ilustra en la Figura 24. La gráfica resultante de esta configuración se presenta en la Figura 25, donde se observa el *MPP* obtenido en cada nivel de temperatura.

Al analizar dichas gráficas, se puede determinar la importancia del nivel de irradiancia y de la temperatura en la producción de energía de un sistema fotovoltaico, aunque el factor más significativo es la irradiancia. Los valores seleccionados para ambos parámetros y el *MPP* resultante a cada variación, serán comparados con el resultado

obtenido al implementar el controlador *MPPT*, y de esta manera evaluar su eficiencia y precisión, en la sección de resultados.

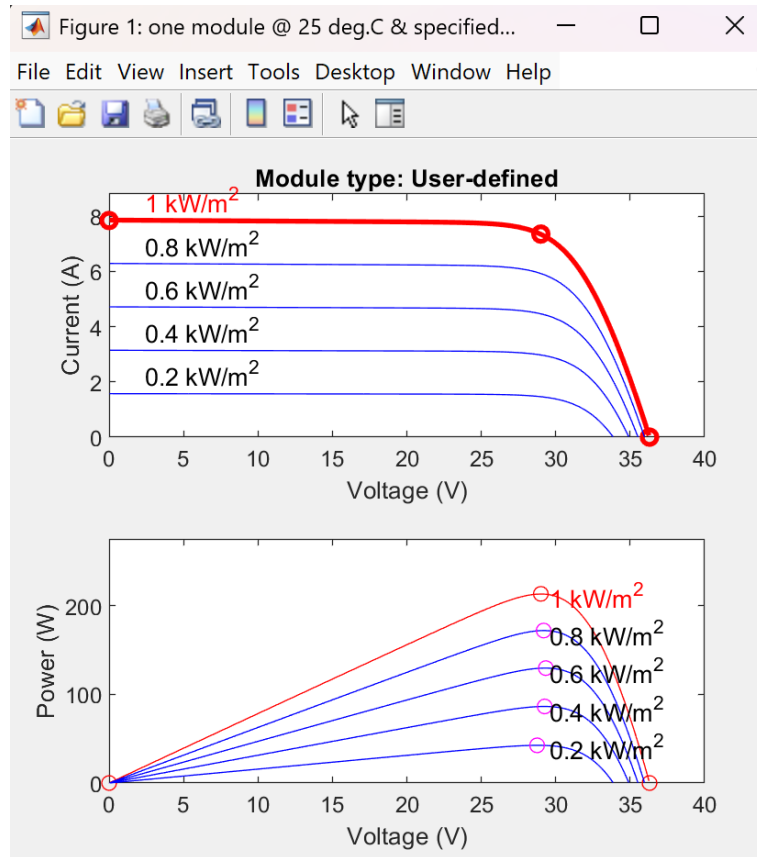


Figura 23. Curvas V - I y V - P con distintos niveles de irradiancia, obtenidas en la configuración del PV Array.

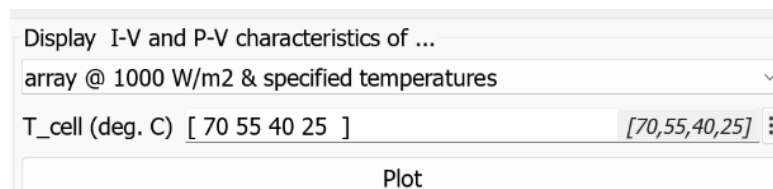


Figura 24. Selección de una irradiancia y temperaturas específicas.

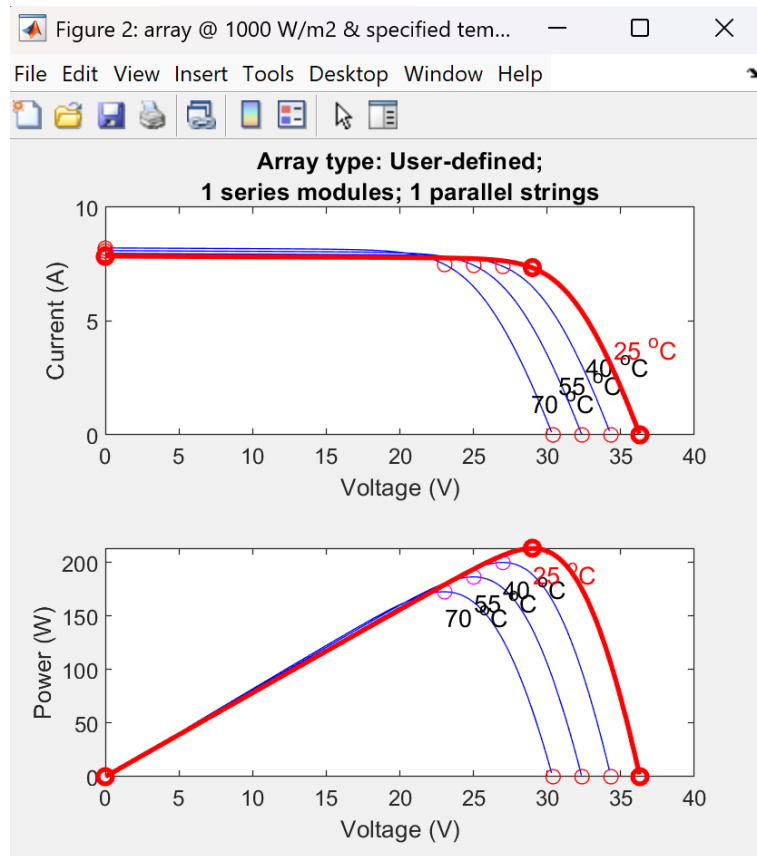


Figura 25. Curvas $V-I$ y $V-P$ con distintos grados de temperatura, obtenidos en la configuración del PV Array.

5.3.2 Modelado del convertidor $DC-DC$ de tipo *Buck*

A continuación, se describe el desarrollo de las simulaciones relativas al diseño y la configuración del convertidor $DC-DC$, mostrando la información correspondiente a cada tipo de convertidor y las ecuaciones que permiten obtener los valores de cada parámetro de los circuitos.

El convertidor *Buck* reduce el voltaje para entregar un valor de salida inferior al de entrada. Los parámetros considerados para su operación corresponden al voltaje de entrada que recibe del sistema fotovoltaico y al voltaje de salida que se dirige a la carga. La Figura 26 muestra el diagrama del convertidor *Buck* en *Matlab/Simulink*.

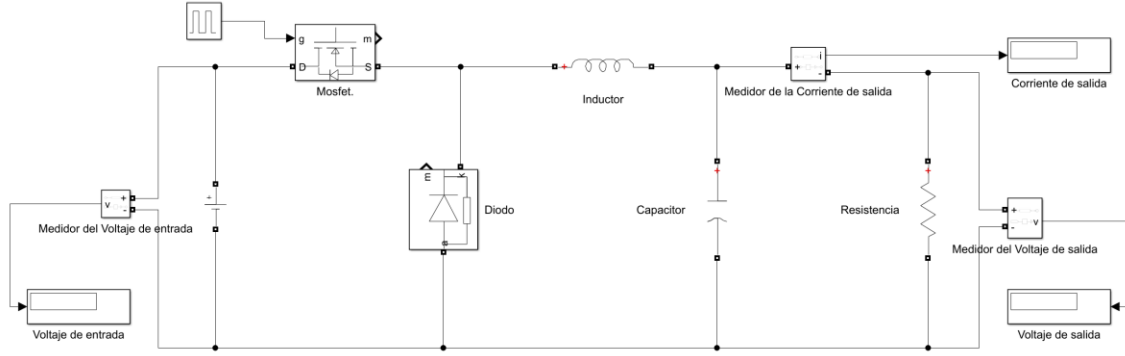


Figura 26. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo Buck.

Las siguientes ecuaciones que se presentan en (Robles & Villa, 2011), permiten el cálculo de todos los parámetros asociados al diseño de este convertidor.

Para el diseño del inductor, se debe considerar el cálculo de la corriente mínima de salida del convertidor, el rizado de la corriente de salida, el rizado en el inductor y el valor mínimo del inductor. La ecuación (5.3) permite obtener el valor de la corriente mínima de salida del convertidor.

$$i_o(crit) \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (5.3)$$

Para mantener un balance entre el tamaño del inductor y del capacitor, se considera como buena medida que el rizado de la corriente de salida se encuentre entre 10% y 30%, como se expresa en la ecuación (5.4).

$$0.3 i_o(crit) \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (5.4)$$

El rizado en el inductor se obtiene (durante el tiempo de encendido del MOSFET) con la ecuación (5.5).

$$\Delta i_L(on) = \frac{(V_i - V_o)}{L} T_{on} \quad (5.5)$$

A partir de la reformulación de las dos ecuaciones anteriores, se puede determinar el valor mínimo del inductor, como se muestra en la ecuación (5.6).

$$L_{min} \geq \frac{V_o \left(1 - \frac{V_o}{V_i}\right) T_s}{2i_o(crit)(0.3)} \quad (5.6)$$

El rizado de corriente en el inductor es obtenido con la ecuación (5.7).

$$\Delta i_L = 2(0.3)(i_o) \quad (5.7)$$

Para el cálculo del valor asignado al capacitor, se toma como referencia que el rizado de la corriente del inductor, es conducido por medio del capacitor y que la corriente directa fluye a través de la carga, por lo tanto, el valor de capacitancia de salida se obtiene con la ecuación (5.8).

$$C \geq \frac{\Delta i_L T_s}{8\Delta V} \quad (5.8)$$

Dado que en un convertidor se desea que el rizado no supere en 1% el voltaje de salida, el capacitor está diseñado para un rizado del 0.1%, como se observa en la ecuación (5.9).

$$C \geq \frac{\Delta i_L T_s}{8(0.001)\Delta V} \quad (5.9)$$

5.3.3 Modelado del convertidor *DC-DC* de tipo *Boost*

En el convertidor *Boost* el voltaje de entrada es modificado para obtener un nivel de voltaje que sea superior y conducir ese voltaje de salida hacia la carga. En la Figura 27, se visualiza el diagrama del convertidor *Boost*, diseñado también en *Matlab/Simulink*.

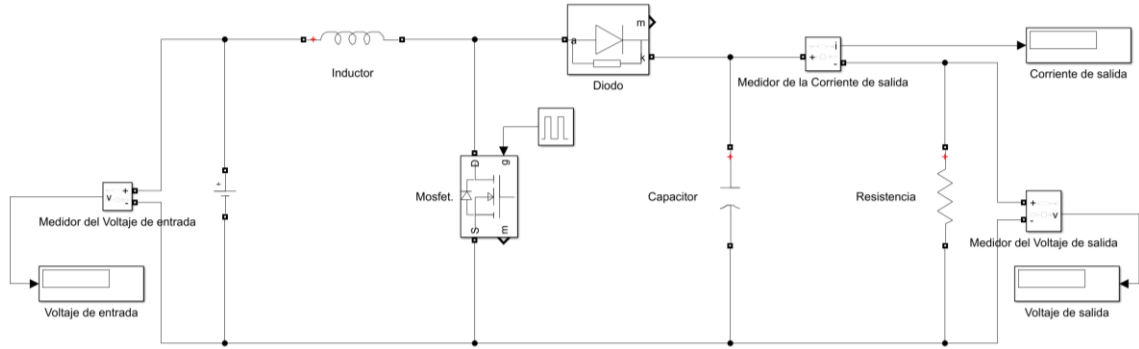


Figura 27. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo Boost.

Para el diseño de los parámetros en los componentes que integra este convertidor, se emplea la ecuación presentada en (Satapathy, et al., 2018), que permite realizar el cálculo del ciclo de trabajo (5.10).

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D} \quad (5.10)$$

En el cálculo de los valores que deben ser asignados al inductor y al capacitor, estos se encuentran descritos en (D'Alessio, et al., 2014) donde, para obtener la inductancia mínima se emplea la ecuación (5.11), y mediante el despeje de la ecuación (5.12), se puede determinar la capacitancia, como se muestra en la ecuación (5.13).

La ecuación (5.11) determina el valor de la inductancia ideal, que corresponde al valor límite, donde el convertidor opera entre conducción continua y discontinua.

$$L_{min} = \frac{D \times R \times (1 - D)^2}{2 \times f_{sw}} \quad (5.11)$$

La ecuación (5.12) describe la representación de la aproximación lineal de descarga del condensador de salida, a partir de una carga resistiva R, en el instante en el que el interruptor está en posición ON.

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = \frac{D}{R \times C \times f_{sw}} \quad (5.12)$$

A partir de la ecuación anterior se obtiene el valor de capacitor, mediante la ecuación (5.13).

$$C = \frac{D}{R \times f_{sw} \times \frac{\Delta V_o}{V_o}} = \quad (5.13)$$

5.3.4 Modelado del convertidor DC-DC de tipo *Buck-Boost*

Este convertidor regula el voltaje que recibe como entrada, para suministrar un voltaje de salida que sea superior o inferior, dado que este convertidor es el que se utiliza para el algoritmo de *MPPT* que se propone, es importante mencionar que los valores que se tendrán en cuenta para los cálculos asociados al diseño de este convertidor son un voltaje de entrada que abarca un rango de 6 V y 36 V, para obtener en la salida un voltaje de 14 V. En la imagen de la Figura 28, se visualiza el diagrama del *Buck-Boost Converter*, que ha sido diseñado en *Matlab/Simulink*.

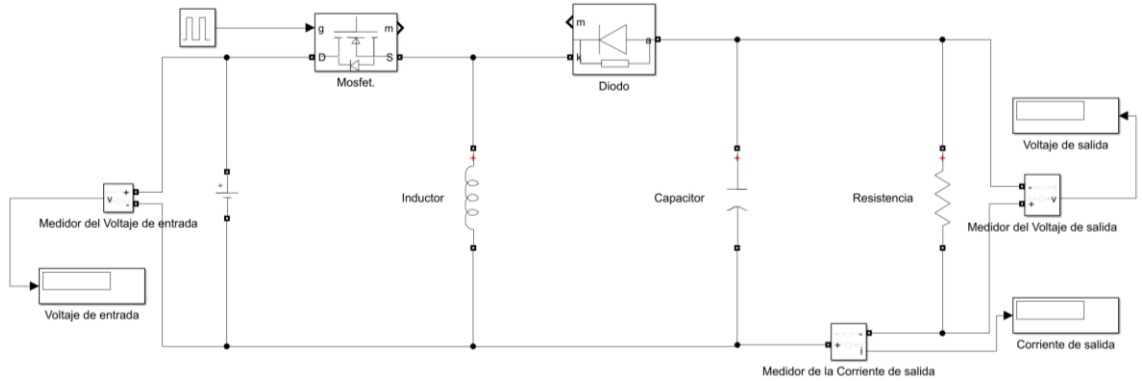


Figura 28. Diagrama del convertidor DC-DC de tipo *Buck-Boost*.

En (González, et al., 2015) se explica el diseño de un circuito convertidor *Buck-Boost* que modifica la operación de un panel fotovoltaico a través de una señal *PWM* (modulación por ancho de pulso, del inglés, *pulse width modulation*). En primer lugar, la relación entre el voltaje de entrada y el de salida se expresa mediante la ecuación (5.14).

$$V_o = V_{in} \times \frac{d}{(1 - d)} \quad (5.14)$$

Despejando d , se determina el ciclo de trabajo, como muestra la ecuación (5.15).

$$d = \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \quad (5.15)$$

El modo de conducción límite entre conducción discontinua (*DCM*) del inglés *Discontinuous Conduction Mode*, y el modo de conducción continua (*CCM*) del inglés *Continuous Conduction Mode*, depende de tres parámetros, estos se relacionan en la ecuación (5.16), donde interviene el valor del ciclo de trabajo, inductancia y frecuencia de conmutación.

$$L_{\min} \geq \frac{R(1-d)^2}{2f_{sw}} \quad (5.16)$$

En la ecuación (5.17) se determina la corriente promedio máxima en el inductor, esto se calcula considerando el punto de operación crítico en el punto de máxima potencia.

$$\langle I_L \rangle_{\max} = \frac{1}{1-d_{mp}} \sqrt{\frac{P_{mp}}{R}} \quad (5.17)$$

Otro parámetro importante que considerar es la capacidad de corriente que debe tener el inductor, cuyo valor debe ser mayor que el obtenido con la ecuación (4.3), debido a que la inductancia disminuye al aumentar la corriente. Es por esta razón, que su valor debe ser superior, como regla general la corriente de saturación del inductor $I_{(L1)(sat)}$, debe ser por lo menos un 20% mayor, esta idea se expresa en la ecuación (5.18).

$$I_{(L1)(sat)} = 1.20 \times \langle I_L \rangle_{\max} \quad (5.18)$$

El condensador o capacitor de salida del convertidor puede determinarse con la ecuación (5.19).

$$C_o = \frac{V_o d}{R \Delta V_o f_{sw}} \quad (5.19)$$

Por otro lado, el condensador de entrada es calculado con la ecuación (5.20).

$$C_i \geq \frac{I_{mp}(1 - d_{mp})}{\Delta V_{pv} f_{sw}} \quad (5.20)$$

De manera sintetizada, en la ecuación (5.15) se muestra cómo puede ser obtenido el ciclo de trabajo, a partir del voltaje de entrada que recibe el convertidor y el voltaje de salida que se desea obtener. El valor para el voltaje de entrada que se retoma es de 36 V, este valor corresponde al voltaje de circuito abierto del panel fotovoltaico. Esto es, bajo la determinación de que el rango del voltaje en el que funciona el convertidor se encuentra de entre 6 V y 36 V, por lo tanto, el ciclo de trabajo es calculado nuevamente para obtener el valor en el que el convertidor debe operar para entregar un voltaje de 14 V cuando recibe 6 V. En cuanto al cálculo de la inductancia, esta se determina mediante la ecuación (5.16), donde se menciona que el valor que se obtiene, se encuentra dentro del límite del modo de conducción continua y el modo de conducción discontinua.

En el diseño de este convertidor, como se observa en el diagrama de la Figura 28, sólo se añade un capacitor, este es el capacitor de salida, cuyo valor es determinado mediante la ecuación (5.19). Asimismo, se calcula el valor para el capacitor de entrada con la ecuación (5.20); sin embargo, este componente se agrega en la simulación que ya integra el panel fotovoltaico como fuente de alimentación.

En la Tabla 6 se presenta una descripción de los parámetros que intervienen en el desarrollo de las ecuaciones del convertidor *Buck-Boost*.

Tabla 6. Parámetros considerados en el diseño del Buck-Boost Converter.

Parámetro	Descripción	Unidad de Medida
V_o	Voltaje de salida	V
V_{in}	Voltaje de entrada	V
d	Ciclo de trabajo	%
$L_{mín}$	Inductancia mínima	μH

R	Resistencia	Ω
f_{sw}	Frecuencia de conmutación	Hz
$\langle I_L \rangle_{m\acute{a}x}$	Corriente promedio máxima del inductor	A
d_{mp}	Ciclo de trabajo en el punto de máxima potencia	%
P_{mp}	Punto de máxima potencia	
C_o	Capacitor de salida	μF
ΔV_o	Rizado de voltaje de salida deseado	%
C_i	Capacitor de entrada	μF
I_{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia	A
ΔV_{pv}	Rizado de voltaje	%
$I_{(L1)(sat)}$	Corriente de saturación del inductor	A

5.3.5 Sistema fotovoltaico con el convertidor *DC-DC Buck-Boost*

El convertidor empleado en la simulación, que ya integra un algoritmo de MPPT, es de tipo *Buck-Boost*. Antes de continuar con esta simulación, se presenta el modelado del *Buck-Boost Converter* conectado directamente al panel fotovoltaico como fuente de alimentación, sustituyendo al componente mostrado en los diagramas anteriores, que se utilizaba como voltaje de entrada del circuito.

En la Figura 29 se muestra el diagrama que integra el sistema fotovoltaico conectado al convertidor *DC-DC*. En este esquema se puede observar un capacitor agregado entre el panel y el circuito del convertidor; este capacitor de entrada tiene como propósito reducir el rizado de corriente en la salida del sistema fotovoltaico, esto de acuerdo con lo descrito en (González, et al., 2015). Otros bloques añadidos, corresponden a componentes necesarios para realizar la medición con el osciloscopio sobre parámetros como el voltaje, corriente y potencia, para el sistema fotovoltaico y para los valores obtenidos en la salida del convertidor *Buck-Boost*.

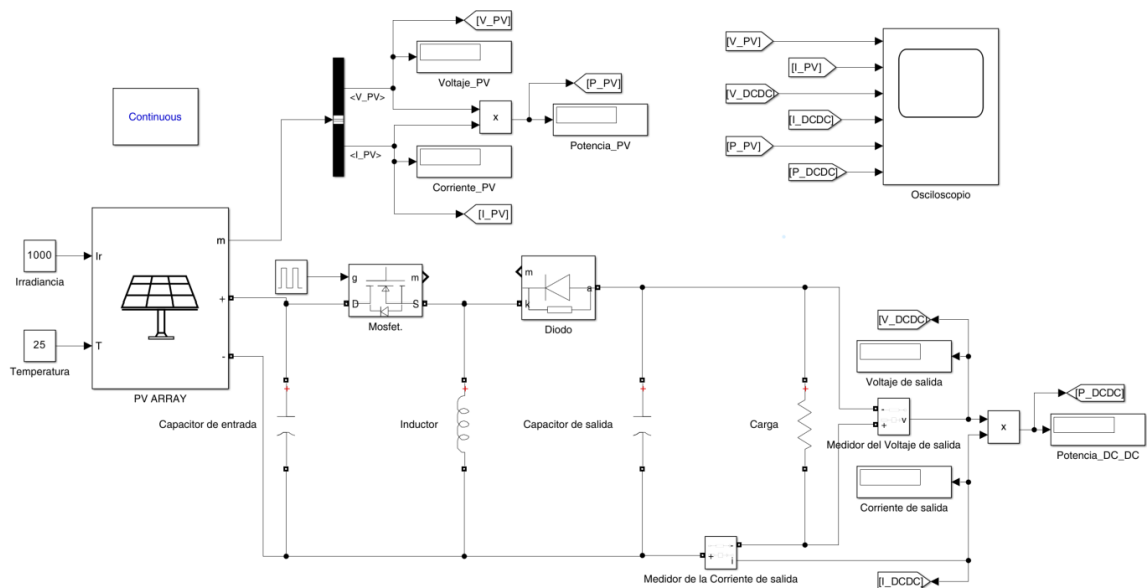


Figura 29. Diagrama del sistema fotovoltaico conectado al convertidor DC-DC Buck-Boost.

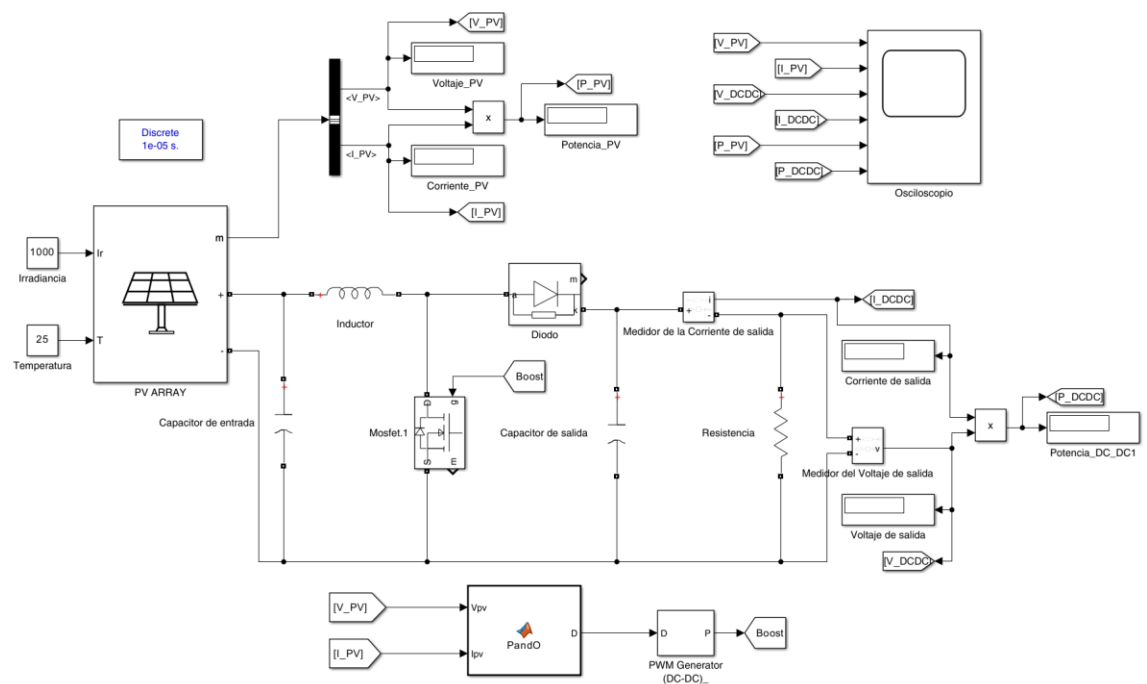


Figura 30. Sistema fotovoltaico, convertidor Boost y P&O.

5.3.6 Diseño de algoritmos para seguimiento del punto de máxima potencia

En esta sección se presentan las especificaciones de los parámetros asociados al diseño de cada uno de los algoritmos de *MPPT* comparados para evaluar el rendimiento, la eficiencia y la precisión que pueden alcanzar en la búsqueda del punto de máxima potencia. Es importante mencionar que en este trabajo se comparan básicamente tres algoritmos:

- Algoritmo de *MPPT* número 1: método *P&O*, adaptado de (Reisi, et al., 2013).
- Algoritmo de *MPPT* número 2: compuesto por un *FLC* y un convertidor *Buck-Boost*, adaptado de (Youssfi, et al., 2024).
- Algoritmo de *MPPT* número 3: compuesto por un *FLC* y un convertidor *Buck-Boost*, adaptado de (Belhadj, et al., 2025).

Diseño del controlador *MPPT* basado en el algoritmo de *Perturb & Observe*

En esta sección se muestra el desarrollo del algoritmo de *MPPT* con el método de perturbar y observar (*P&O*). Como forma de explicar su funcionamiento se muestra un diagrama en la Figura 31, donde se puede observar la forma en la que actúa el algoritmo a partir de las entradas que recibe, con el propósito de obtener como resultado el valor de ciclo de trabajo que debe ser aplicado al convertidor *Boost* para localizar el punto donde se alcanza la máxima potencia.

En la Figura 30 se observó previamente el esquema de simulación que integra el sistema fotovoltaico con el controlador *MPPT* implementado. Las especificaciones del panel son las mismas que se presentan en la Figura 22 y el convertidor empleado en este caso corresponde a un *Boost Converter*, con los siguientes valores para cada uno de sus componentes: Inductor = $5.17631 \mu H$, Capacitor = $362.07614 \mu F$, Resistencia = 3.9455Ω y Capacitor de entrada = $2,753.87597 \mu F$. El algoritmo de *P&O* que se integra en este modelo corresponde al visto en (Reisi, et al., 2013).

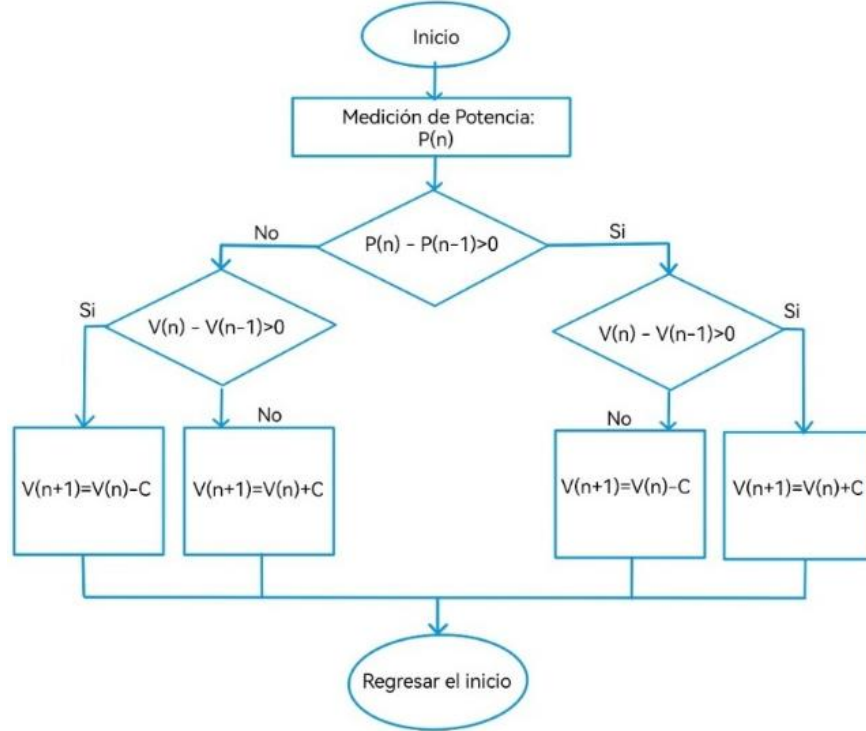


Figura 31. Diagrama del diseño del P&O..

Diseño del algoritmo de MPPT número 2 (FLC)

Con base al algoritmo propuesto en el estudio abordado en (Youssfi, et al., 2024) se tienen los siguientes parámetros para el diseño del sistema difuso. Las entradas son:

Error $E(k)$: Representa la pendiente de la curva Potencia-Voltaje ($P - V$). Indica hacia qué lado del punto de máxima potencia se encuentra operando el sistema. Esto se establece en la ecuación (5.21).

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (5.21)$$

Cambio del error $CE(k)$: Es la diferencia entre el error actual y el error de la iteración anterior, el cual indica la dirección en la que se está moviendo el punto de operación, esta relación se indica en la ecuación (5.22).

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (5.22)$$

Salida: Variación del Ciclo de Trabajo (ΔD), identificada como “D”. Esta salida del *FLC*, no corresponde directamente al ciclo de trabajo absoluto, sino que hace referencia al valor que indica cuánto debe cambiar (ΔD) en ese instante k . El ciclo real aplicado al convertidor será como se establece en la ecuación (5.23).

$$D(k) = D(k - 1) + \Delta D(k) \quad (5.23)$$

En la Figura 32 se observa el sistema difuso diseñado en Matlab/Simulink, un esquema de Mamdani compuesto por dos entradas y una salida.

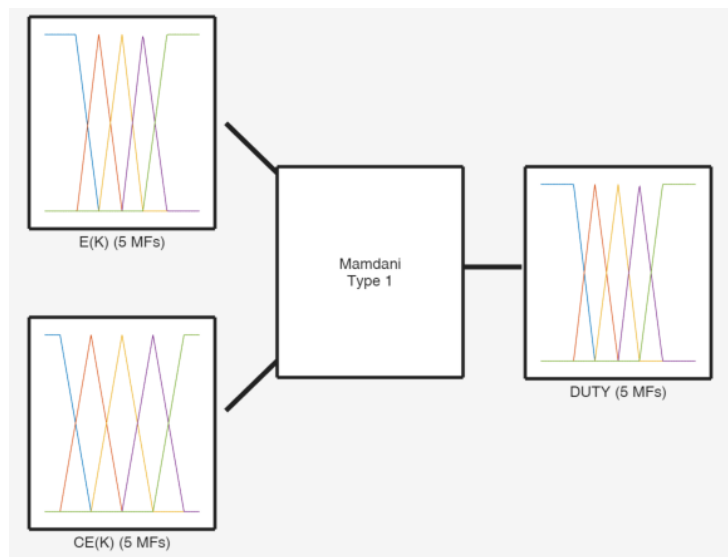


Figura 32. Sistema difuso diseñado.

En las siguientes imágenes se observa con detalle la definición de las funciones de membresía y etiquetas lingüísticas para las entradas Error (Figura 33), Cambio del Error (Figura 34) y la salida, Variación del Ciclo de trabajo (Figura 35).

- NB: (Negative Big / Negativo Grande)
- NS: (Negative Small / Negativo Pequeño)
- ZE: (Zero / Cero)
- PS: (Positive Small / Positivo Pequeño)
- PB: (Positive Big / Positivo Grande)

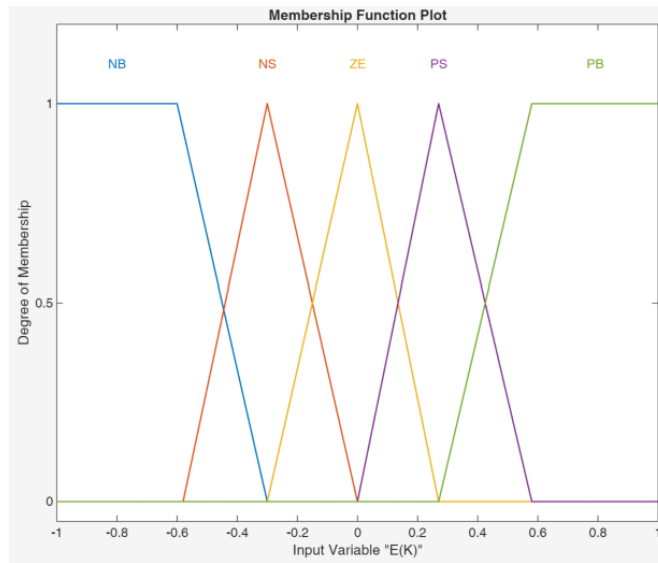


Figura 33. Funciones de membresía de la variable de entrada $E(k)$.

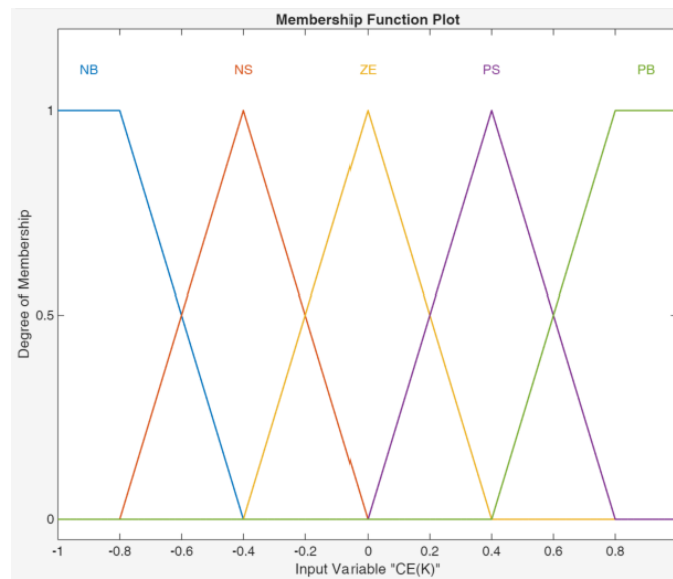


Figura 34. Funciones de membresía de la variable de entrada $CE(k)$.

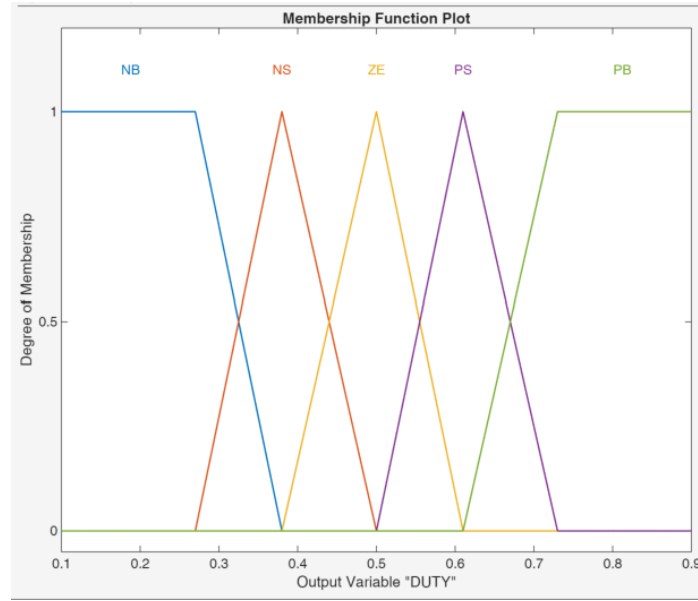


Figura 35. Funciones de membresía de la variable de salida $D(k)$.

Por último, se muestra la Tabla 7, la cual contiene todas las reglas de inferencia de este *FLC*.

Tabla 7. Tabla de reglas de inferencia.

$E(K) \setminus CE(K)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Diseño del algoritmo de *MPPT* número 3 (*FLC*)

De acuerdo con el diseño del algoritmo para el controlador difuso, visto en (Belhadj, et al., 2025), el *FLC* tiene como entradas: la variación de la potencia (ΔP), que representa el cambio en la potencia generada por el sistema fotovoltaico, y la variación del voltaje (ΔV), que representa el cambio en el voltaje de salida del sistema fotovoltaico.

Como salida, se tiene el ciclo de trabajo (D , *duty cycle*), el controlador ajusta este valor para regular el convertidor con el objetivo de rastrear el punto de máxima potencia.

En la imagen de la Figura 36 se puede observar el sistema difuso diseñado en *Matlab/Simulink*, se trata de un esquema de Mamdani de nivel 2, compuesto por dos entradas y una salida.

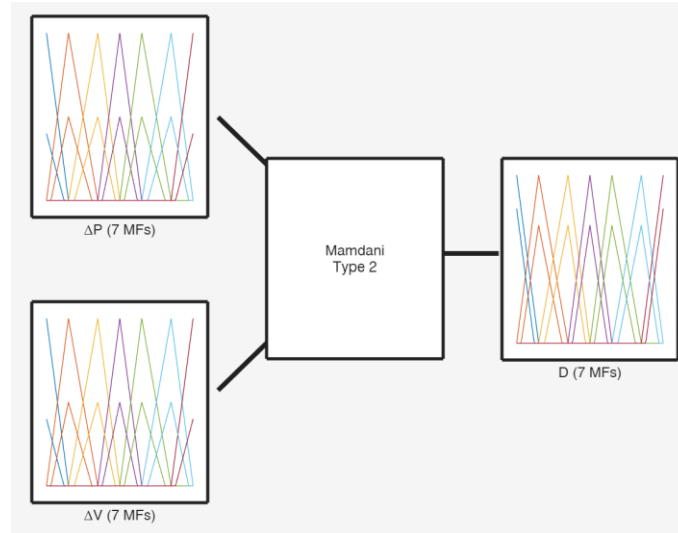


Figura 36. Sistema difuso diseñado.

Las siguientes imágenes permiten visualizar la definición de las funciones de membresía y etiquetas lingüísticas, este sistema difuso emplea 7 etiquetas lingüísticas para clasificar tanto las variables de entrada Figura 37 y Figura 38, como la salida Figura 39.

- BN: (Big Negative / Negativo Grande)
- MN: (Medium Negative / Negativo Medio)
- SN: (Small Negative / Negativo Pequeño)
- ZE: (Zero / Cero)
- SP: (Small Positive / Positivo Pequeño)
- MP: (Medium Positive / Positivo Medio)
- BP: (Big Positive / Positivo Grande)

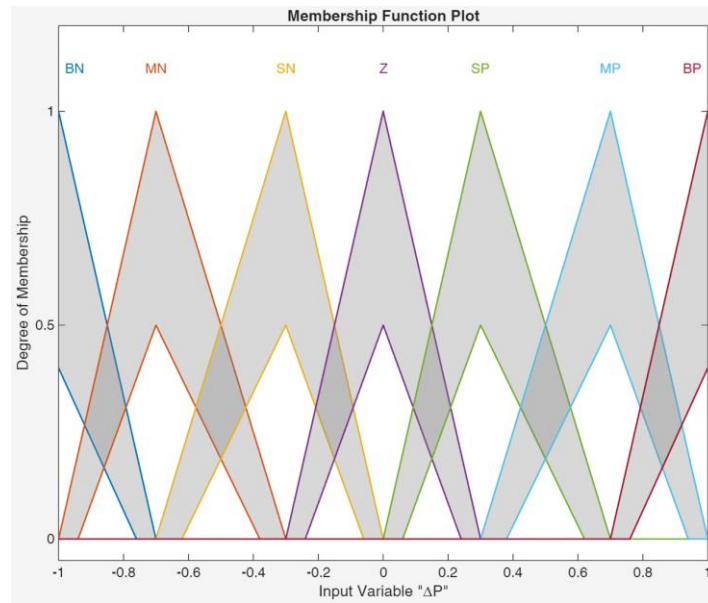


Figura 37. Funciones de membresía para la variable de entrada ΔP .

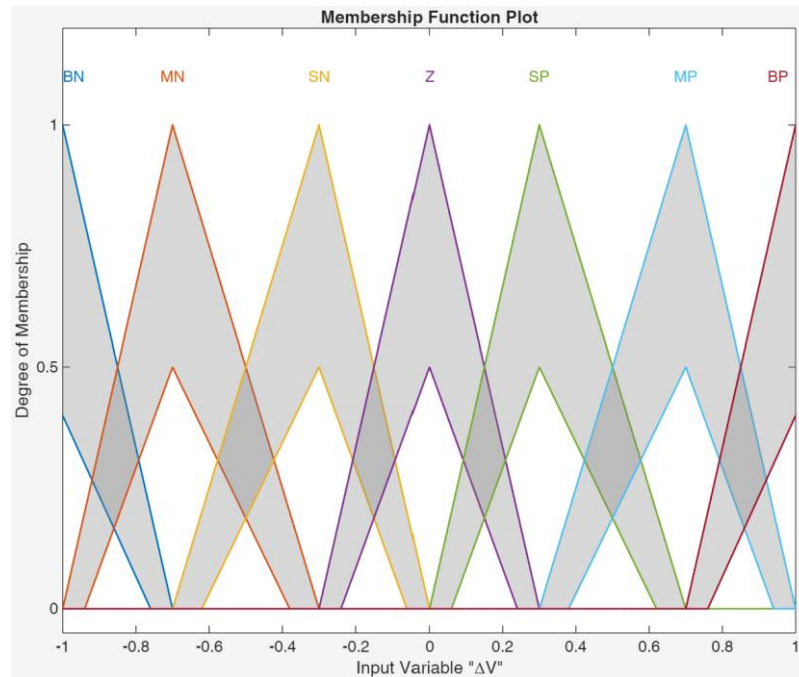


Figura 38. Funciones de membresía para la variable de entrada ΔV .

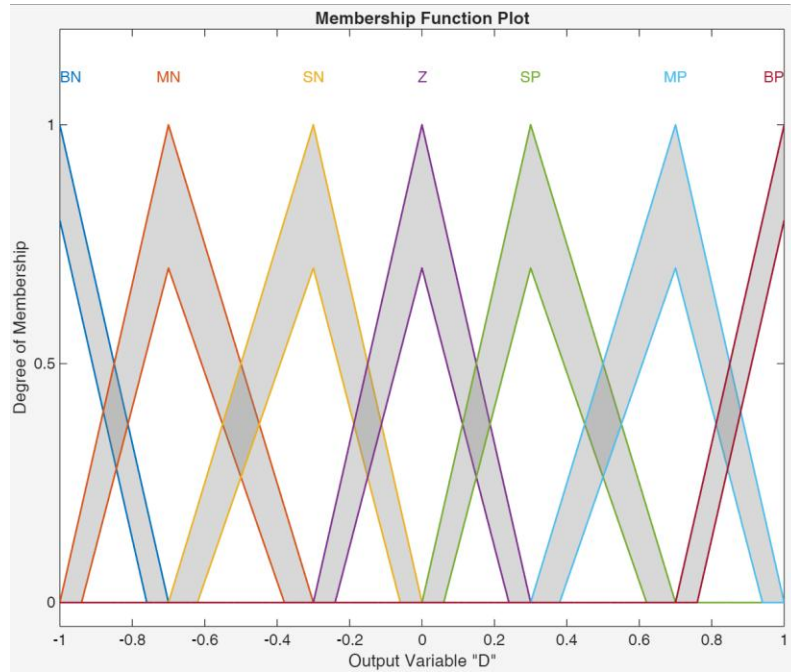


Figura 39. Funciones de membresía para la variable de salida D.

Las reglas de inferencia de este FLC, se encuentran definidas en la Tabla 8.

Tabla 8. Tabla de reglas de inferencia

$\Delta P/\Delta V$	BN	MN	SN	Z	SP	MP	BP
BN	BP	BP	MP	BN	MN	MN	BN
MN	BP	MP	SP	MN	SN	MN	BN
SN	MP	SP	SP	SN	SN	SN	MN
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
SP	MN	SN	SN	SP	SP	SP	MP
MP	BN	MN	SN	MP	SP	MP	BP
BP	BN	BN	MN	BP	MP	BP	BP

5.3.7 Modelado del *FLC* con convertidor *Buck-Boost* y el sistema fotovoltaico

En cuanto a las especificaciones de los elementos que integran esta simulación, es importante definir que ambos controladores tienen la misma configuración para el panel fotovoltaico y para el convertidor, los parámetros del panel son los que se muestran en la Figura 22. El convertidor que se emplea para regular el ciclo de trabajo, es de tipo *Buck-Boost* y los valores para cada uno de sus componentes son los siguientes: Inductor: $204.53472 \mu H$, Capacitor: $2,838.67697 \mu F$, Resistencia: 3.9455Ω y Capacitor de entrada: $2,753.87597 \mu F$.

La primera simulación, denominada como algoritmo de *MPPT* número 2 (*FLC*), está compuesta por el sistema fotovoltaico, el convertidor *DC-DC* y como controlador se integra el *Fuzzy Logic Controller* presentado en (Youssfi, et al., 2024). La segunda simulación, denominada algoritmo de *MPPT* número 3 (*FLC*), emplea como controlador al *Fuzzy Logic Controller* presentado en (Belhadj, et al., 2025), para realizar el rastreo del punto donde se produce la máxima potencia.

En la imagen de la Figura 40, se observa la simulación correspondiente al algoritmo de *MPPT* número 2, compuesta por el panel fotovoltaico, el convertidor *Buck-Boost* y el *FLC*, en conjunto con un osciloscopio que permite recopilar datos importantes sobre el voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor para monitorear los resultados que se obtienen al ejecutar la simulación. En la Figura 41 se puede observar el subsistema del *FLC* y los bloques que lo componen.

La simulación del algoritmo de *MPPT* número 3, se puede visualizar en la Figura 42, donde se encuentran los mismos elementos mencionados anteriormente, la única diferencia es en el diseño del controlador *MPPT* que se encuentra conectado al convertidor *Buck-Boost*.

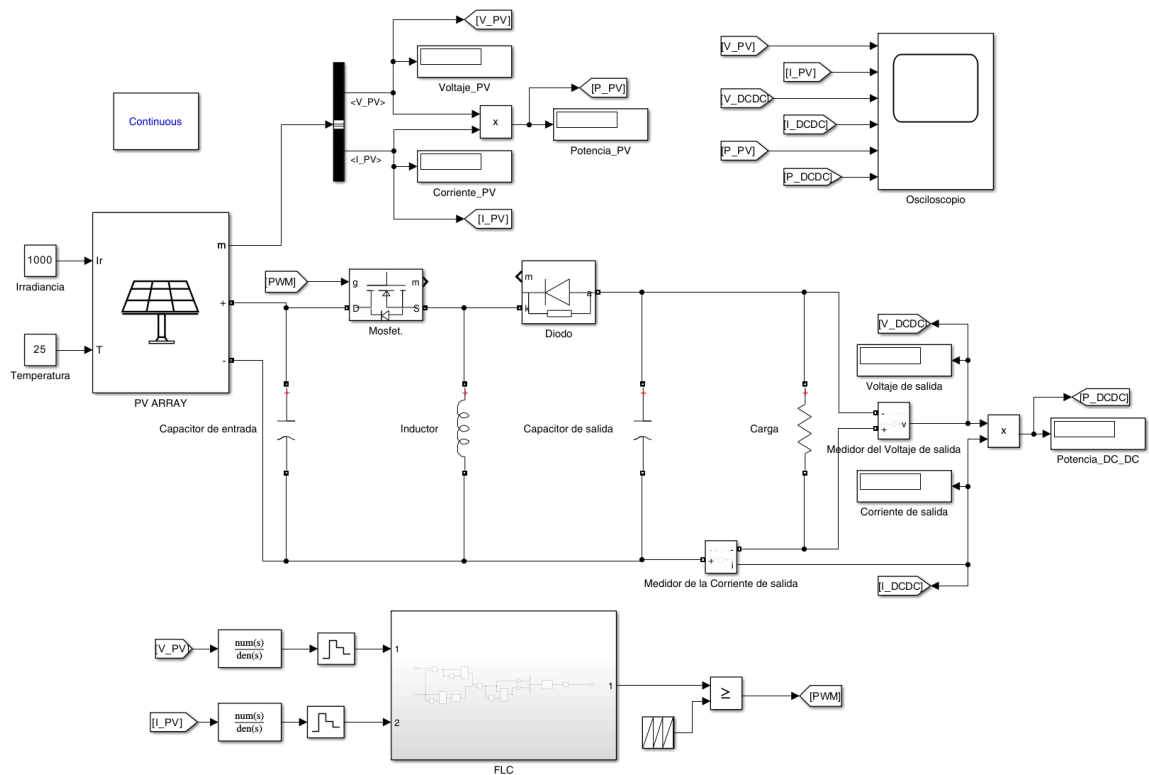


Figura 40. Sistema fotovoltaico, convertidor Buck-Boost y FLC.

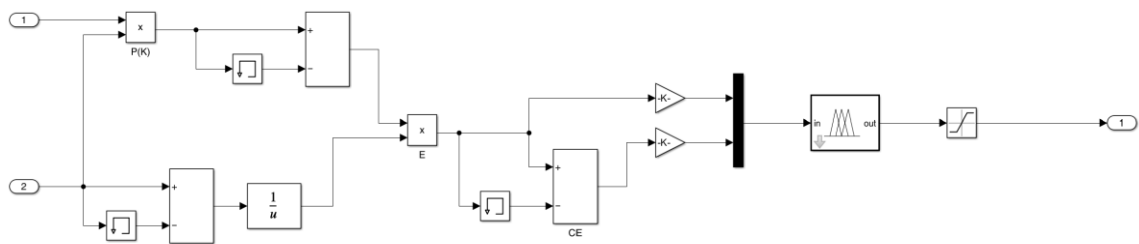


Figura 41. Subsistema que contiene los bloques que componen al FLC.

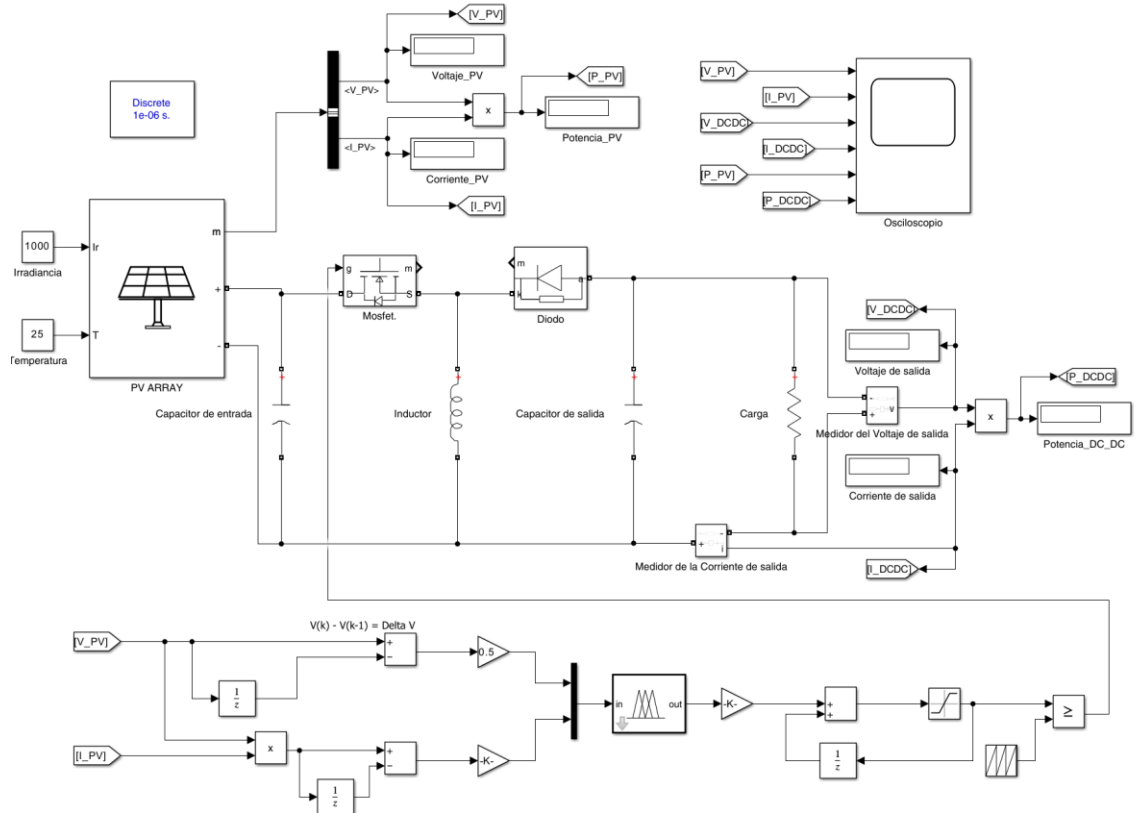


Figura 42. Sistema fotovoltaico, convertidor Buck-Boost y FLC.

Cada uno de los modelos de *Matlab/Simulink* presentados en esta sección forma parte de las simulaciones por realizar, y se describe cada componente que interviene en un sistema fotovoltaico que integra un controlador *MPPT*. A modo de resumen, a continuación se describen brevemente los modelos.

El primer modelo incluye el panel fotovoltaico conectado a una resistencia que representa la carga que se alimenta, además de componentes que permiten identificar el voltaje, corriente y potencia del panel, bajo un nivel de irradiancia y temperatura óptimas. Posterior a esto, se incluyen modelos referentes a cada una de las distintas topologías de convertidores *DC-DC* estudiadas (*Buck Converter*, *Boost Converter* y *Buck-Boost Converter*); cada convertidor se encuentra conectado a un voltaje de entrada y a una resistencia que representa la carga, para obtener como resultado otro nivel de voltaje.

Otro modelo diseñado corresponde al sistema fotovoltaico conectado a un convertidor *DC-DC* de tipo *Buck-Boost*. En este se agregan bloques de medición que permiten identificar los valores de voltaje, corriente y potencia obtenidos en el panel y en la salida del convertidor al modificar manualmente el ciclo de trabajo.

Por último, se incluyen los modelos, a partir del diseño anterior, que se compone del panel fotovoltaico y del convertidor *DC-DC*, ahora se integra el controlador *MPPT* para cerrar el lazo y, de esta manera, lograr que el sistema fotovoltaico pueda operar cerca del punto donde se produce la máxima potencia de la energía que se extrae de la celda fotovoltaica bajo distintos niveles de irradiancia y temperatura.

Los algoritmos de *MPPT* diseñados en *Matlab/Simulink* comprenden el algoritmo de *P&O*, y dos métodos distintos basados en algoritmos de lógica difusa. Estos tres algoritmos de *MPPT* serán evaluados en la sección de resultados bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura para determinar cuál ofrece la mayor precisión, velocidad y eficiencia.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los datos y resultados alcanzados en las pruebas correspondientes a cada modelo realizado en *Matlab/Simulink*, hasta obtener la simulación compuesta por el sistema fotovoltaico y el controlador *MPPT* diseñado para controlar el *Buck-Boost Converter*, y proveer la máxima potencia de energía eléctrica.

En primer lugar, se presenta el modelo inicial desarrollado, correspondiente a la simulación en la que sólo se encuentra el panel fotovoltaico alimentando a una carga. Posteriormente, se presentan el modelado y la ejecución de la simulación de cada uno de los convertidores *DC-DC* diseñados, centrándose principalmente en el convertidor *Buck-Boost*. Por último, se integra el resultado de una evaluación sobre la eficiencia entre el modelo que integra el algoritmo de *P&O* y el otro algoritmo de *MPPT* que está compuesto por el algoritmo de lógica difusa diseñado. Este análisis se realiza con el propósito de determinar la eficiencia y precisión que alcanza cada controlador en el rastreo del punto de máxima potencia, y mediante esta forma demostrar las capacidades del *FLC* propuesto.

6.1 Sistema fotovoltaico

En la Figura 44 se muestra el desarrollo de la simulación presentada en la sección anterior, correspondiente al diagrama de la Figura 21. El tiempo para la prueba fue establecido en un segundo, tiempo suficiente para obtener la medición de la corriente y voltaje, así como la potencia obtenida.

Este modelo solo involucra el cálculo de la resistencia conectada al circuito, cuyo componente representa la carga, y el correspondiente a la potencia producida por el panel fotovoltaico. El valor de la resistencia es obtenido mediante la ecuación (5.1) y el resultado de esta operación se muestra en la ecuación (6.1). El voltaje y corriente de referencia son los parámetros referentes al *MPP* de la Tabla 5, donde se describen las especificaciones del módulo fotovoltaico; estos son 29 V y 7.35 A.

$$R = \frac{29 \text{ V}}{7.35 \text{ A}} = 3.9455 \Omega \quad (6.1)$$

En la Figura 43 se observa la resistencia conectada al circuito, configurada con este valor.

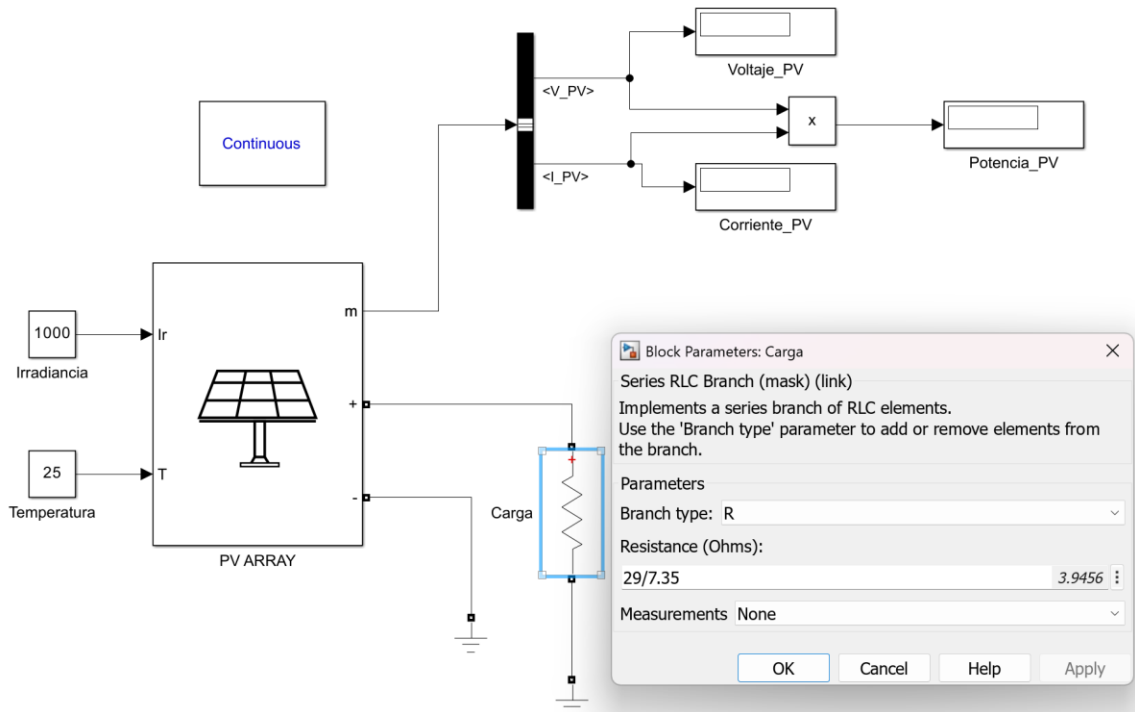


Figura 43. Configuración del valor de la resistencia en el circuito.

El resultado del cálculo de la potencia que otorga el panel es obtenido con la ecuación (6.2), esto es bajo una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C .

$$P = 29 \text{ V} \times 7.35 \text{ A} = 213.15 \text{ W} \quad (6.2)$$

En la Figura 44, se aprecian los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del circuito, donde, como producto de la irradiancia y temperatura especificadas, se obtiene la medición de un voltaje de 28.99 V y una corriente de 7.346 A , esto da como resultado una potencia de 212.9 W .

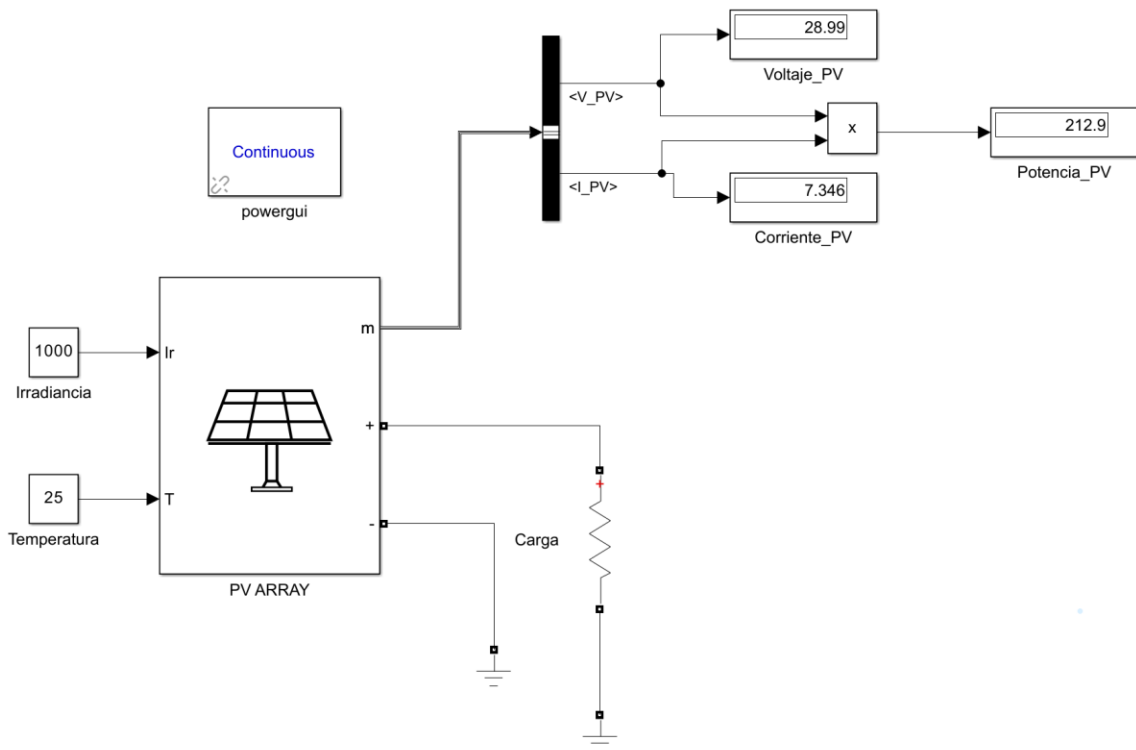


Figura 44. Medición de voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico.

El voltaje y la corriente en esta simulación corresponden a cifras muy cercanas a los valores obtenidos como resultado en las ecuaciones presentadas. Esto se refleja en que el valor para cada parámetro tan solo difiere en números decimales, otorgando una potencia de 212.9 W, muy cercana a los 213.15 W vistos previamente en los detalles de configuración del panel. Esta diferencia debe ser compensada por el controlador *MPPT*.

Para mostrar más detalles sobre la ejecución de este modelo realizado en *Matlab/Simulink*, se incluyen las siguientes tablas, que ofrecen más datos acerca de los resultados obtenidos al ejecutar diferentes pruebas sobre distintos niveles de irradiancia con una temperatura específica, así como para distintos grados de temperatura para una sola irradiancia. De esta manera, se permite comprender el comportamiento del sistema fotovoltaico en diversas situaciones.

Como primer punto se tiene la Tabla 9, en la que se observan los resultados de haber ejecutado la simulación, ajustando manualmente el nivel de irradiancia a 200, 400,

600, 800 y 1000 W/m^2 , para observar mediante los “displays” integrados al circuito, el voltaje, corriente y potencia que se produce en cada caso. Esta simulación contempla una temperatura que se establece en 25 °C para todos los niveles de irradiancia mencionados.

Tabla 9. Resultados obtenidos para los niveles de irradiancia establecidos, con una temperatura de 25 °C.

Parámetro	Nivel de irradiancia (W/m^2)				
	200	400	600	800	1000
Voltaje	6.19 V	12.34 V	18.47 V	24.49 V	28.99 V
Corriente	1.569 A	3.129 A	4.68 A	6.208 A	7.346 A
Potencia	9.71 W	38.63 W	86.42 W	152 W	212.9 W

En la Tabla 10 se visualiza la información de las especificaciones del panel fotovoltaico, en donde se proporcionan detalles sobre las curvas de V-I y V-P, que se generan a 25 °C con las irradiancias especificadas. Esta tabla muestra el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp}), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp}) y el producto de ambos parámetros, que corresponde a la potencia del panel, es decir, al punto donde se alcanza la máxima potencia. Al comparar la información mostrada en ambas tablas, se determina que el circuito modelado, al no integrar un controlador encargado de realizar el seguimiento del *MPP*, el sistema fotovoltaico no genera toda la potencia que es capaz de producir y, sobre todo, cuando el nivel de irradiancia es más bajo, la diferencia con respecto al *MPP*, se incrementa, haciéndose más significativa. Por ejemplo, con una irradiancia de 400 W/m^2 , se obtiene una potencia de tan solo 38.63 W, cuando en realidad esta cifra debería estar cercana a los 86.2652 W, que corresponden al punto donde se produce la máxima potencia, en las especificaciones del panel.

Tabla 10. Datos sobre el voltaje y corriente, donde se produce el punto de máxima potencia, bajo distintos niveles de irradiancia.

Parámetro	Nivel de irradiancia (W/m^2)				
	200	400	600	800	1000
Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp})	28.7487 V	29.2583 V	29.3342 V	29.1907 V	29 V
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp})	1.47700 A	2.94840 A	4.41494 A	5.88536 A	7.35 A
Punto de máxima potencia (MPP)	42.4619 W	86.2652 W	129.509 W	171.798 W	213.15 W

Ahora, para el caso contrario, al ejecutar la misma simulación donde se tiene un solo nivel de irradiancia ($1000 W/m^2$) y distintos grados de temperatura, en específico con 70, 55, 40 y 25 °C, se obtienen los resultados que se pueden visualizar en la Tabla 11. En esta tabla se muestran el voltaje, la corriente y la potencia que se producen en cada situación, donde el nivel de temperatura ha sido ajustado para permitir la observación de los cambios que se producen en la potencia del panel.

De igual forma, los datos anteriores pueden ser contrastados con los datos que se proporcionan en las especificaciones del panel fotovoltaico, puesto que, como se observa en la Tabla 12, los parámetros de voltaje y corriente corresponden al punto donde se alcanza la máxima potencia. Esto da como resultado la potencia del panel, definida como el valor del *MPP*. La información vista en esta tabla es la que se obtiene al definir el mismo nivel de irradiancia para los distintos grados de temperatura establecidos.

Tabla 11. Resultados obtenidos para los niveles de temperatura establecidos, con una irradiancia de 1000 W/m^2 .

Parámetro	Nivel de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
	70	55	40	25
Voltaje	25.16 V	26.63 V	27.93 V	28.99 V
Corriente	6.377 A	6.748 A	7.078 A	7.346 A
Potencia	160.4 W	179.7 W	197.7 W	212.9 W

Tabla 12. Datos sobre el voltaje y corriente, donde se produce el punto de máxima potencia, bajo distintos niveles de temperatura.

Parámetro	Nivel de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
	70	55	40	25
Voltaje en el punto de máxima potencia (V_{mp})	23.0428 V	25.0178 V	26.996 V	29 V
Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp})	7.48580 A	7.44833 A	7.40246 A	7.35 A
Punto de máxima potencia (MPP)	172.494 W	186.341 W	199.837 W	213.15 W

En este caso, al utilizar distintos valores de temperatura, la diferencia entre la medición obtenida con la ejecución de la simulación y la información de las especificaciones del sistema fotovoltaico es menor, en comparación con la diferencia observada al aplicar diferentes niveles de irradiancia. Como se observa, a la mayor temperatura la diferencia es de 12 W, siendo 172.494 W, el punto de máxima potencia y 160.4 W el resultado obtenido al ejecutar la simulación, la cual no integra un controlador *MPPT* que permita aprovechar la máxima potencia que es capaz de suministrar el panel.

6.2 Simulación de los convertidores *DC-DC*

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la ejecución de las simulaciones, en las que se modela cada uno de los tipos de convertidores DC-DC: *Buck*, *Boost* y *Buck-Boost*.

6.2.1 Convertidor *Buck*

Primero, se muestran los cálculos asociados al diseño del convertidor, teniendo como referencia las ecuaciones presentadas en la sección anterior, en la cual se especifican las consideraciones aplicadas al diseño del *Buck Converter*. Considerando que el panel “*PV Array*” de la simulación, maneja un rango de voltajes entre 6 y 36 V, y que se alimenta a una carga de 14 V, se formulan los siguientes cálculos.

El valor mínimo para el inductor es calculado con la ecuación (5.6), y el resultado de sustituir los valores correspondientes se encuentra en la ecuación (6.3)

$$L_{min} \geq \frac{14 \text{ V} \left(1 - \frac{14 \text{ V}}{28.7487 \text{ V}}\right) \left(\frac{1}{100,000 \text{ Hz}}\right)}{2(1.47700 \text{ A})(0.3)} = 81.0460 \mu\text{H} \quad (6.3)$$

Donde:

$V_o = 14 \text{ V}$ Es el voltaje de salida deseado (el voltaje que necesita la carga)

$V_i = 28.7487 \text{ V}$ Es el voltaje en el punto de máxima potencia para una irradiancia de 200 W/m^2

$i_o = 1.47700 \text{ A}$ Es la corriente en el punto de máxima potencia para la misma irradiancia

$T_s = 1/100 \text{ KHz}$ Es el periodo de conmutación, definido a partir la frecuencia de conmutación, establecida en 100,000 Hz.

Por lo tanto, el valor para la inductancia mínima debe ser de $81.0460 \mu\text{H}$.

Asumiendo que el inductor tiene una tolerancia del 20%, como lo establece la ecuación (5.18) el cálculo del valor de la inductancia se obtiene con la ecuación (6.4).

$$L = L_{min}(1.20) = (81.0460 \mu H)(1.20) = 97.2552 \mu H \quad (6.4)$$

La capacidad del inductor en el circuito debe ser de 97.2552 μH . Y el rizado de corriente en el inductor es obtenido con la ecuación (5.7), cuyo resultado se muestra en la ecuación (6.5).

$$\Delta i_L = 2(0.3)(1.47700 A) = 886.2 mA \quad (6.5)$$

Partiendo de que el rizado de la corriente del inductor, fluye mediante del capacitor, y que en el convertidor se define que el rizado sea del 0.1%, el valor del capacitor se determina con la ecuación (5.9) y el resultado de sustituir esos parámetros, con los definidos en el modelo realizado, en muestran en la ecuación (6.6).

$$C \geq \frac{0.8862 A \left(\frac{1}{100,000} \right)}{8 (0.001) (14 V)} \quad (6.6)$$

$$C \geq \frac{0.8862 A \left(\frac{1}{100,000} \right)}{8 (0.014)}$$

$$C \geq 79.125 \mu F$$

Donde:

$\Delta i_L = 0.8862 A$ Es el rizado de corriente en el inductor

$T_s = 1/100 KHz$ Es el periodo de conmutación, definido a partir la frecuencia de conmutación, establecida en 100,000 Hz.

$8 = Factor$ 8 Es el resultado de integrar la forma de onda triangular del rizo de corriente en el capacitor

$\Delta V = 0.014$ Es el rizado de voltaje permitido (asumiendo un rizo del 0.1% del voltaje de salida $V = 14 V$)

Con estos cálculos se determina que el valor del capacitor es de $79.125 \mu F$. El último parámetro por considerar es el ciclo de trabajo, el cual es estimado con la ecuación (5.10) y el resultado de este cálculo se muestra en la ecuación (6.7)

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{14 V}{36 V} = 0.38888 \quad (6.7)$$

El ciclo de trabajo obtenido para el voltaje de entrada y el voltaje de salida deseado, es de 0.38888. A partir de todos los valores calculados, se desarrolla la simulación correspondiente a este convertidor en el cual se asignan los siguientes parámetros:

Inductor = $97.2552 \mu H$

Capacitor = $79.125 \mu F$

Ciclo de trabajo = 0.38888

Voltaje de entrada = 36 V

Resistencia = 3.9455Ω

El valor de la resistencia se obtiene con la ecuación (6.1) y las especificaciones del diodo y del MOSFET son las que vienen por defecto en su configuración.

En la Figura 45 se muestra la ejecución de la simulación en *Matlab/Simulink*. Para esta se ha establecido un tiempo de ejecución de 5s, para observar las variaciones que ocurren. Como se puede observar, se añaden bloques de medición y un osciloscopio, para obtener datos sobre el voltaje de entrada, así como el voltaje y corriente de salida. Con una fuente de 36 V y el ciclo de trabajo establecido, el convertidor proporciona un voltaje de salida de 13.39 V y una corriente de salida de 3.39 A.

La gráfica de la Figura 46, establecida en un tiempo de 0.005 s, corresponde a la medición del voltaje de entrada en el convertidor, señalado en color azul. La línea de color rojo representa la medición de la corriente de salida y la línea en verde pertenece a la medición del voltaje de salida. Al analizar esta gráfica, se puede determinar que las variaciones que se presentan durante la ejecución de la simulación son mínimas, esto significa que el circuito se comporta de manera estable.

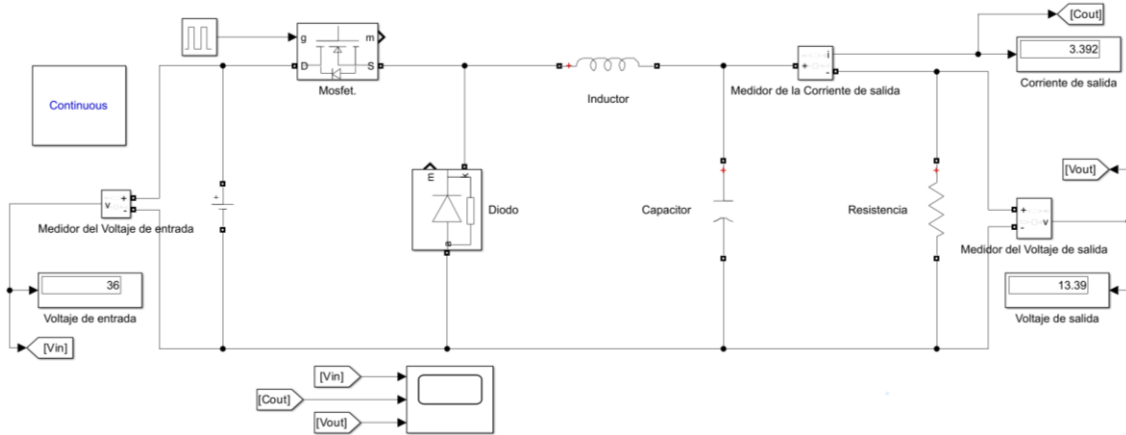


Figura 45. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del convertidor DC-DC Buck.

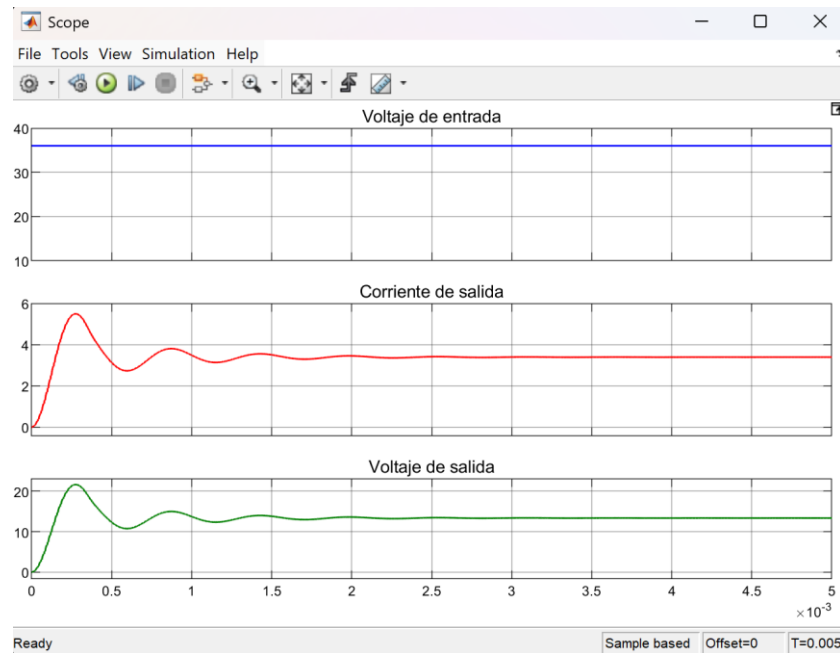


Figura 46. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.

6.2.2 Convertidor Boost

Bajo la misma consideración de que el panel fotovoltaico “PV Array”, maneja un rango de voltajes entre 6 y 36 V, y la carga que alimenta es de 14 V, se plantean las siguientes ecuaciones, que permiten obtener los parámetros correspondientes al diseño del convertidor Boost. Retomando la ecuación (5.10) para obtener el ciclo de trabajo, esta

puede ser despejada de la siguiente manera, como se determina en la ecuación (6.8), para obtener este valor.

$$Duty\ Cycle = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D}$$

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = 1 - D$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (6.8)$$

$$D = 1 - \frac{6\ V}{14\ V} = 1 - 0.42857142857 = 0.57142857143$$

El ciclo de trabajo obtenido para un voltaje de entrada de 6 V y un voltaje de salida de 14 V, es de 0.57142857143.

En la ecuación (5.11) se describe como puede ser obtenido el valor del inductor, y al sustituir cada uno de los parámetros correspondientes, se obtiene la inductancia mostrada en la ecuación (6.9).

$$L_{min} = \frac{0.57142857143 \times 3.9455\ \Omega \times (1 - 0.57142857143)^2}{2 \times 40,000\ \text{Hz}} \quad (6.9)$$

$$= 5.17631\ \mu H$$

Donde:

$D = 0.57142857143$ Es el ciclo de trabajo

$R = 3.9455\ \Omega$ Es el valor de la resistencia

$f_{sw} = 40\ \text{kHz}$ Es la frecuencia de conmutación, definido en 40,000 Hz

Por lo tanto, la inductancia que se obtiene es de $5.17631 \mu H$. Por último, para obtener la capacitancia se emplea la ecuación (5.13), y el resultado de realizar este cálculo se muestra en la ecuación (6.10).

$$C = \frac{0.57142857143}{3.9455 \Omega \times 40,000 \text{ Hz} \times \frac{(0.01)(14)}{14}} \quad (6.10)$$

$$= \frac{0.57142857143}{3.9455 \Omega \times 40,000 \text{ Hz} \times 0.01} = 362.07614 \mu F$$

Donde:

$D = 0.57142857143$ Es el ciclo de trabajo

$R = 3.9455 \Omega$ Es el valor de la resistencia

$f_{sw} = 40 \text{ kHz}$ Es la frecuencia de conmutación, definido en 40,000 Hz

$\frac{\Delta V_o}{V_o} = 0.01$ Se refiere al rizado del voltaje de salida, considerando del 1%.

Con estos cálculos se determina que el valor para el capacitor es de $362.07614 \mu F$.

A partir de estos valores obtenidos, se desarrolla la simulación sobre este tipo de convertidor *DC/DC*, en el cual se asignan los siguientes parámetros en el circuito:

Inductor = $5.17631 \mu H$

Capacitor = $362.07614 \mu F$

Ciclo de trabajo = 0.57142857143

Voltaje de entrada = 6 V

Resistencia = 3.9455Ω

El valor de la resistencia es obtenido con la ecuación (6.1) y las especificaciones del diodo y del MOSFET son las que vienen por defecto en su configuración.

La ejecución de la simulación en *Matlab/Simulink* para este convertidor se muestra en la Figura 47. El tiempo de ejecución ha sido establecido en 5 para poder visualizar las variaciones que pueden suscitarse en este intervalo de tiempo. Para obtener datos sobre el

voltaje de entrada y principalmente el voltaje y corriente de salida, se encuentran añadidos bloques de medición que permiten visualizar estos datos desde un osciloscopio. A partir del ciclo de trabajo definido y con una fuente de 6 V, el circuito proporciona en la salida un voltaje de 13.49 V y una corriente de 3.41 A. La gráfica resultante de la medición, con un tiempo establecido en 0.001 s, se puede visualizar en la Figura 48.

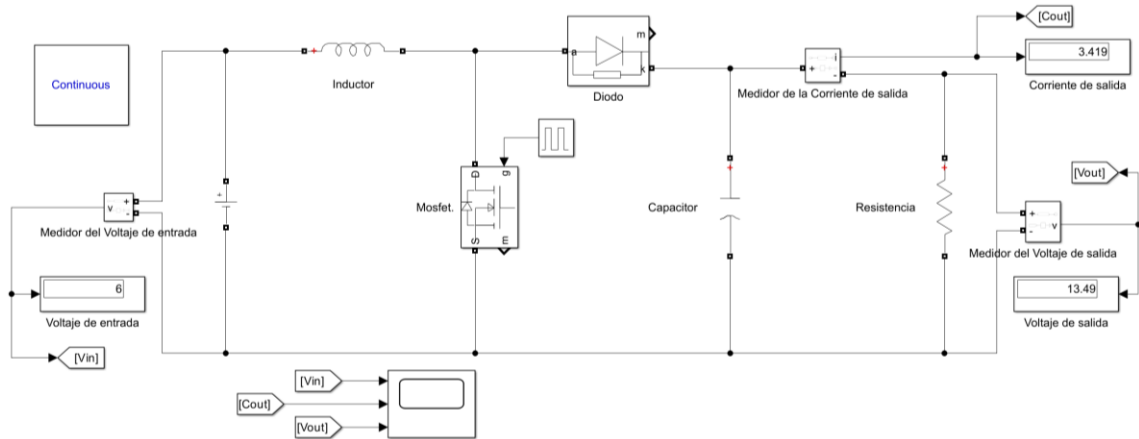


Figura 47. Resultados obtenidos en la simulación del convertidor DC-DC Boost.

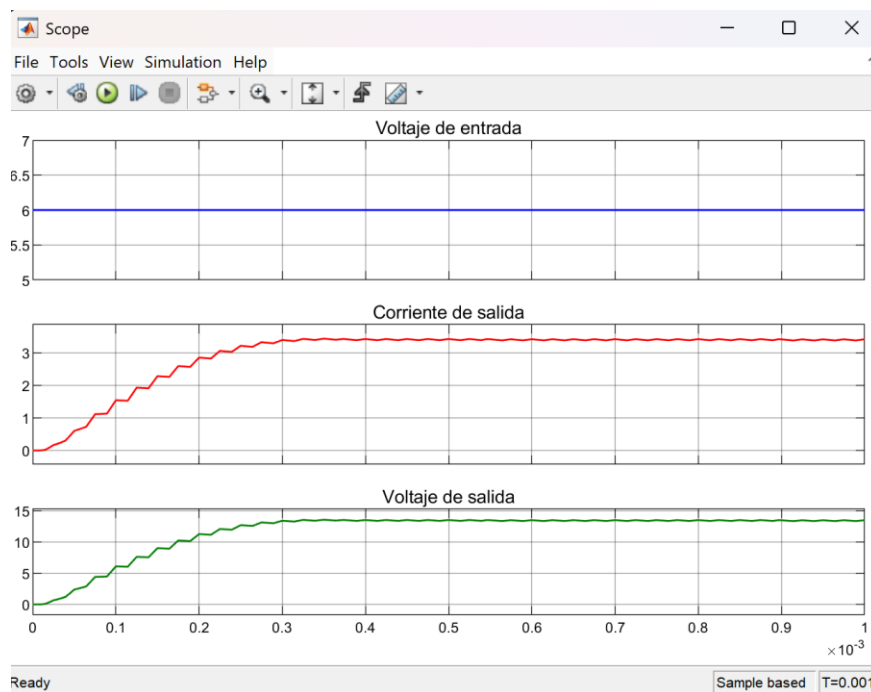


Figura 48. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.

En la Figura 48, la línea en color azul corresponde al voltaje de entrada que recibe el convertidor; la línea en color rojo muestra la medición de la corriente de salida y, por último, la línea en color verde corresponde al voltaje de salida. Las variaciones que se presentan durante la medición del voltaje y la corriente de salida se presentan sólo al inicio de la simulación; después se estabiliza la señal.

6.2.3 Convertidor *Buck-Boost*

El convertidor *Buck-Boost* modifica el voltaje que recibe, para obtener otro nivel de voltaje que sea superior o inferior. Este convertidor es el encargado de operar conjuntamente con el sistema fotovoltaico y el algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, ya sea mediante el controlador de lógica difusa (*FLC*) o el método de perturbación y observación (*P&O*), con el propósito de garantizar el seguimiento y aprovechamiento adecuado del *MPP*. Bajo la misma determinación propuesta para los convertidores anteriores, el rango de voltaje considerado para realizar los cálculos derivados del diseño de este circuito, son 6 y 36 V. Para la carga que alimenta este circuito, se toma como referencia al igual 14 V.

Los siguientes cálculos, son el resultado de sustituir los parámetros correspondientes en cada ecuación, donde se determinan los valores de cada uno de los componentes que integra el circuito *Buck-Boost*. Con un voltaje de entrada de 36 V, se desea obtener un voltaje de salida de 14 V, para cumplir este objetivo, el circuito debe operar en modo Buck. Los cálculos asociados a este modo se muestran a continuación, primero se determina el valor del ciclo de trabajo considerando $V_{in} = 36V$ y $V_o = 14V$, a partir de esto, se obtiene la inductancia y la capacitancia.

En la ecuación (5.15) se expresa cómo realizar el cálculo del ciclo de trabajo, al sustituir los valores correspondientes, se obtiene el resultado que se muestra en la ecuación (6.11).

$$D = \frac{14 V}{14 V + 36 V} = 0.28 \quad (6.11)$$

La ecuación (5.16) describe cómo se puede obtener la inductancia mínima, con la sustitución de cada parámetro se determina este valor, cuyo resultado es obtenido en la ecuación (6.12)

$$L_{min} = \frac{3.9455 \Omega (1 - 0.28)^2}{2 (5,000 \text{ Hz})} = 204.53472 \mu H \quad (6.12)$$

Donde:

$R = 3.9455 \Omega$ Es el valor de la resistencia

$d = 0.28$ Es el valor del ciclo de trabajo

$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$ Es la frecuencia de conmutación, definido en 5,000 Hz

Por lo tanto, la inductancia obtenida es de $204.53472 \mu H$. El valor de la capacitancia es determinado con la ecuación (5.19) y el resultado de realizar este cálculo se muestra en la ecuación (6.13).

$$C_o = \frac{14 \text{ V} (0.28)}{(3.9455 \Omega)(0.07)(5,000)} = 2,838.67697 \mu F \quad (6.13)$$

Donde:

$V_o = 14 \text{ V}$ Es el valor del voltaje de salida

$d = 0.28$ Es el valor del ciclo de trabajo

$R = 3.9455 \Omega$ Es la resistencia que representa la carga conectada al circuito

$\Delta V_o = 0.07$ Se refiere al rizado del voltaje de salida (14 V) del 0.5%

$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$ Es la frecuencia de conmutación, definido en 5,000 Hz

El capacitor debe tener un valor de $2,838.67697 \mu F$. Con estos valores obtenidos, se realiza la configuración de la simulación correspondiente al diagrama visto en la Figura 28, los parámetros que se asignan a cada componente son los siguientes:

Inductor: $204.53472 \mu H$

Capacitor: $2,838.67697 \mu F$

Ciclo de trabajo: 0.28

Voltaje de entrada: 36 V

Resistencia: 3.9455 Ω

La resistencia es obtenida con la ecuación (6.1), y otros componentes como el diodo o el MOSFET son agregados al circuito con las mismas especificaciones que tienen por defecto en su configuración.

El resultado de ejecutar la simulación del convertidor *Buck-Boost* diseñado en *Matlab/Simulink* se puede visualizar en la imagen de la Figura 49. Con el propósito de poder apreciar el comportamiento del convertidor durante el instante inicial, el tiempo ha sido establecido en 5 segundos. En la simulación se encuentran agregados bloques que permiten realizar la medición de parámetros como el voltaje de entrada y salida, junto con la corriente de salida, cada uno de estos datos se puede observar con el osciloscopio conectado. Con un voltaje de entrada de 36 V, el convertidor suministra un voltaje de salida de 13.5 V y una corriente de 3.421 A.

En la Figura 50, se muestra el resultado obtenido al realizar la medición con el osciloscopio integrado en la simulación. La línea en color azul corresponde al voltaje de entrada, la línea graficada en color rojo muestra la corriente de salida y, por último, la gráfica con la línea en color verde permite observar el cambio en el voltaje de salida. Estas mediciones han sido obtenidas al establecer un tiempo de 0.01 para analizar los cambios que se producen al inicio de la ejecución de la simulación.

Para comprobar que el circuito puede operar también en modo *Boost*, se consideran los mismos valores obtenidos con los cálculos mostrados anteriormente, el único cambio que se debe realizar, es referente al voltaje de entrada que se toma como referencia, ahora se considera un voltaje de entrada de 6 V, con el mismo voltaje de salida de 14 V. El valor obtenido para el ciclo de trabajo con estas modificaciones se muestra en la ecuación (6.14)

$$D = \frac{14 \text{ V}}{14 \text{ V} + 6 \text{ V}} = 0.7 \quad (6.14)$$

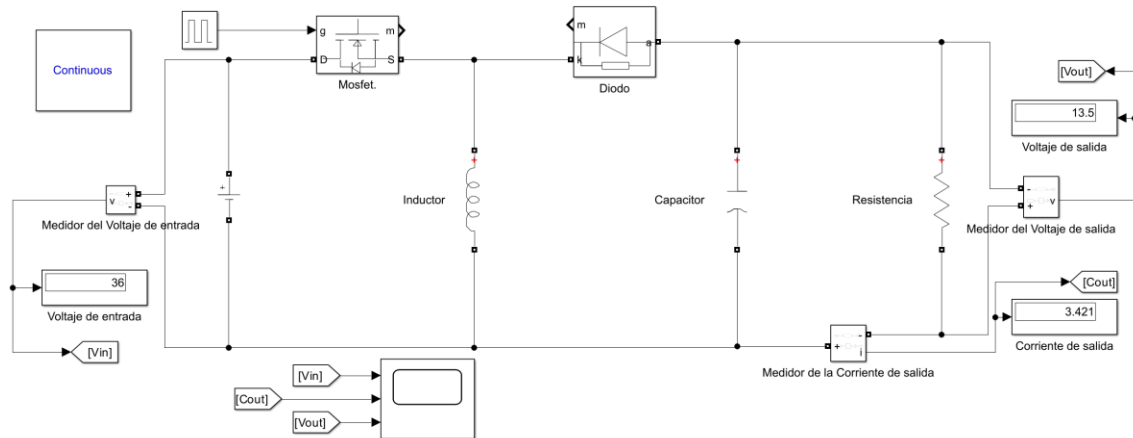


Figura 49. Resultados de la simulación del convertidor DC-DC Buck-Boost, operando en modo Buck.

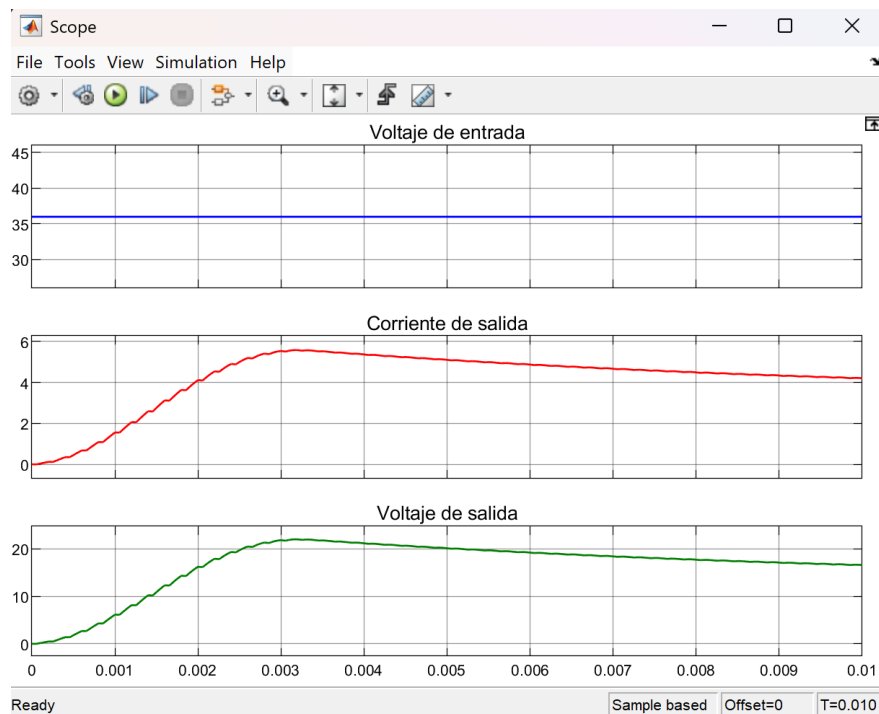


Figura 50. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.

En la simulación se ha establecido este valor en 0.75 para obtener en la salida un voltaje más cercano a 14 V. El resultado de esto se muestra en la Figura 51, donde el voltaje de entrada es de 6 V y se obtiene un voltaje de salida de 13.25 V, en un tiempo de ejecución definido en 5.0.

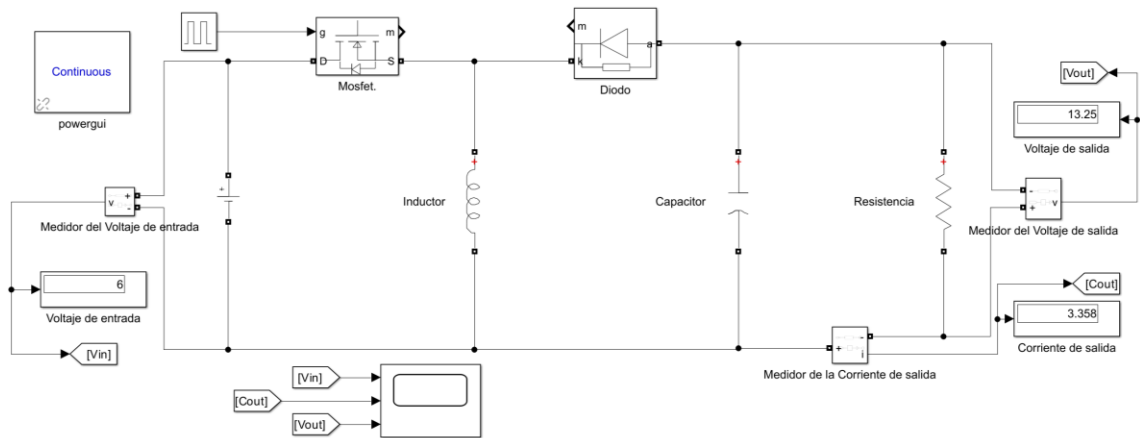


Figura 51. Resultados obtenidos en la simulación del convertidor DC-DC Buck-Boost, operando en modo Boost.

Al realizar la medición con el osciloscopio, se obtuvo el resultado que se muestra en la Figura 52, donde se puede observar que se cambió el tiempo para definirlo en 0.02 y con ello observar los cambios que se suscitan al inicio de la simulación.

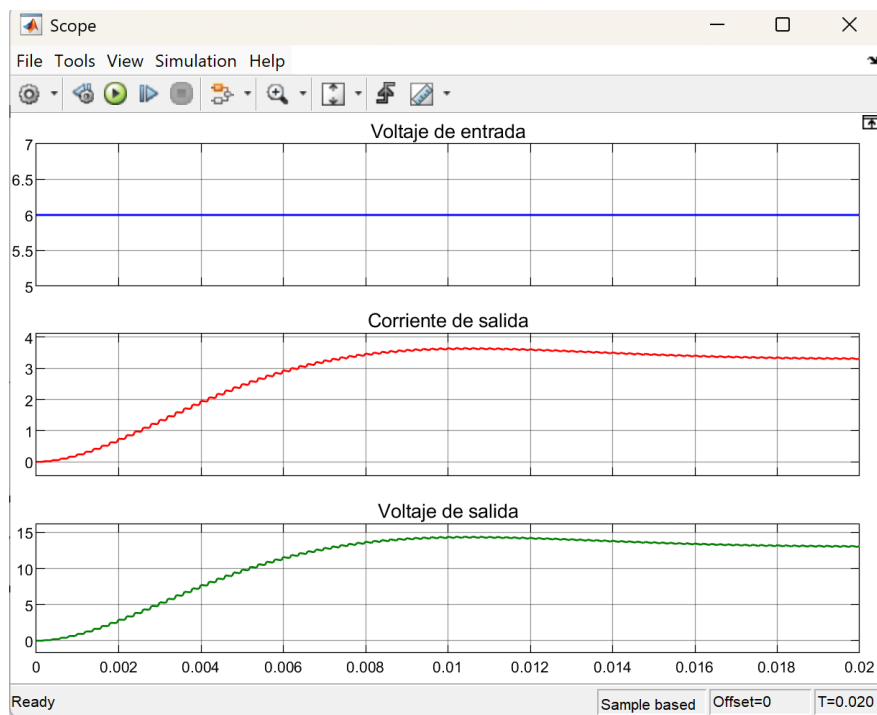


Figura 52. Medición del voltaje de entrada, corriente y voltaje en la salida.

6.2.4 Convertidor *Buck-Boost* conectado al sistema fotovoltaico

A partir de la simulación anterior, en la que se presentan los resultados del modelado del funcionamiento del convertidor *Buck-Boost*, ahora se muestran los resultados de la ejecución de la simulación propuesta en el diagrama de la Figura 29, en la que el convertidor *Buck-Boost* está conectado al sistema fotovoltaico.

Es importante antes, determinar el valor de otro parámetro asociado al diseño del convertidor *DC-DC*: el capacitor de entrada. Este capacitor se conecta entre el sistema fotovoltaico y los demás componentes del circuito *Buck-Boost*, sustituyendo la posición que ocupaba la fuente de voltaje mostrada en la Figura 28.

La ecuación (5.20) muestra cómo se determina el valor del capacitor de entrada, y al sustituir cada uno de los parámetros correspondientes se obtiene el resultado que se muestra en la ecuación (6.15).

$$\begin{aligned} C_i &\geq \frac{7.35 \text{ A} (1 - 0.32558139535)}{(0.36)(5,000 \text{ Hz})} \\ &\geq 2,753.87597 \mu\text{F} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Donde:

$I_{mp} = 7.35 \text{ A}$ Es la corriente en el punto de máxima potencia

$d_{mp} = 0.32558139535$ Es el valor del ciclo de trabajo en el punto de máxima potencia, obtenido mediante la ecuación (6.16).

$$d_{mp} = \frac{14 \text{ V}}{14 \text{ V} + 29 \text{ V}} = 0.32558139535 \quad (6.16)$$

$\Delta V_{pv} = 0.36$ Se refiere al rizado del voltaje del panel (36 V), con un rizado del 1%

$f_{sw} = 5 \text{ kHz}$ Es la frecuencia de conmutación, definido en 5,000 Hz

Por lo tanto, el capacitor de entrada debe tener un valor de 2,753.87597 μF .

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del esquema mostrado en la Figura 29. Con un ciclo de trabajo en 0.28 y el tiempo establecido en 5 segundos, se obtienen los resultados que se observan en la Figura 53. El voltaje, corriente y potencia obtenidos en la medición del sistema fotovoltaico son de 35.5 V, 1.321 A y 46.88 W, respectivamente, y para el caso de la medición en la salida del convertidor *DC-DC* estos valores son de 13.31 V, 3.373 A y 44.9 W.

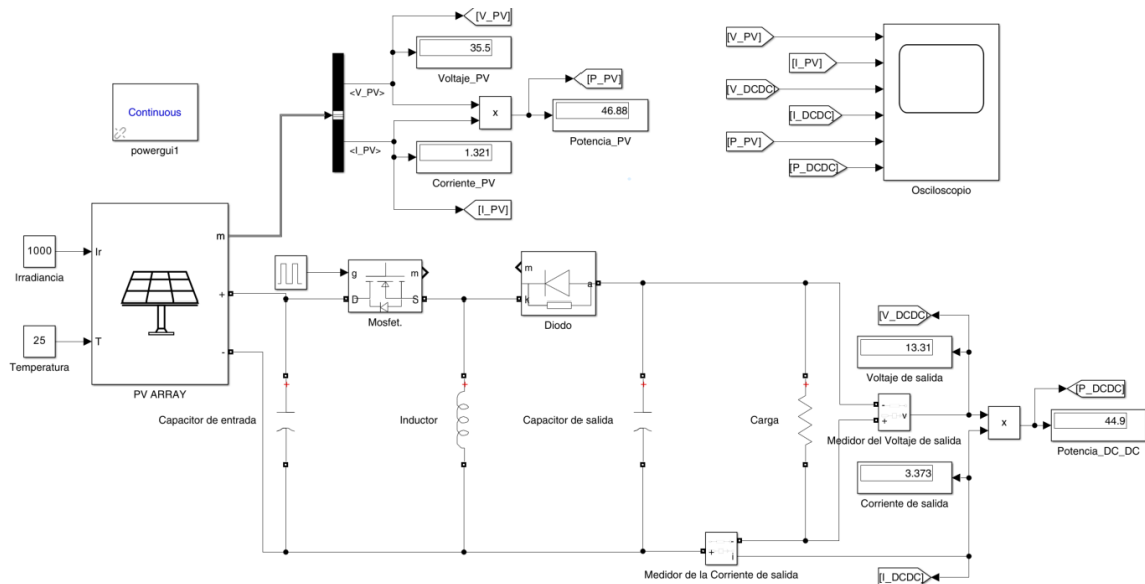


Figura 53. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.28.

En la medición con el osciloscopio, con un tiempo de 0.040 segundos, se obtuvieron las gráficas que se muestran en la Figura 54, donde se observa el comportamiento del convertidor al definir el ciclo de trabajo de 0.28, es decir, cuando el convertidor opera en modo *Buck*. El voltaje, corriente y potencia del sistema fotovoltaico se encuentran señalados en color azul, rojo y rosa respectivamente, y la medición de estos mismos parámetros obtenidos en la salida del convertidor *Buck-Boost*, son graficados en color verde para el voltaje, amarillo para la corriente y naranja para la potencia.

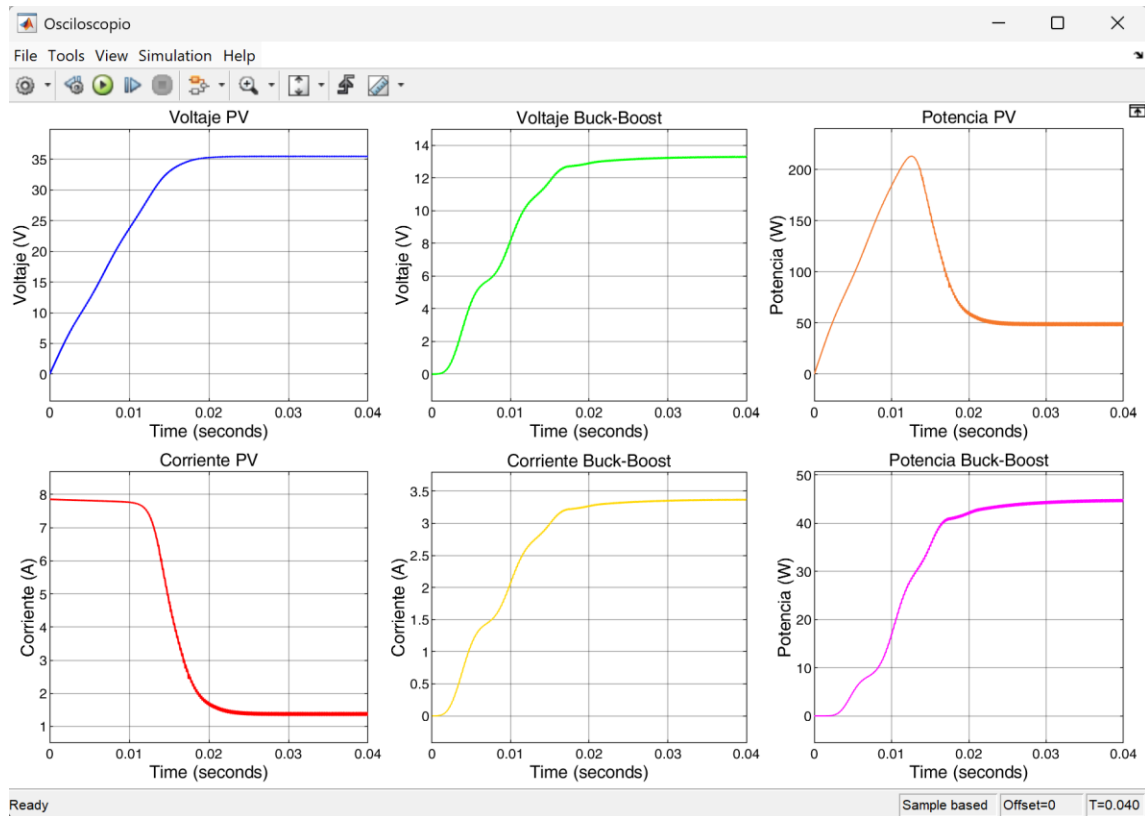


Figura 54. Medición del voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.28.

Al modificar el ciclo de trabajo a 0.7, con un tiempo de 5 segundos, los resultados que se obtienen son los que se visualizan en la Figura 55. El voltaje, corriente y potencia obtenidos al medir estos valores del sistema fotovoltaico son de 7.18 V, 7.833 A y 56.24 W, respectivamente. En la medición del osciloscopio de la salida del convertidor se obtienen 13.25 V, 3.357 A y 44.47 W.

La Figura 56 muestra la medición de todos los parámetros mencionados en un tiempo de 0.075 segundos para observar el comportamiento del sistema durante el instante inicial. Estos resultados se obtuvieron al definir el ciclo de trabajo en 0.7; se considera este valor debido a que es el valor obtenido para el convertidor cuando opera en modo *Boost*.

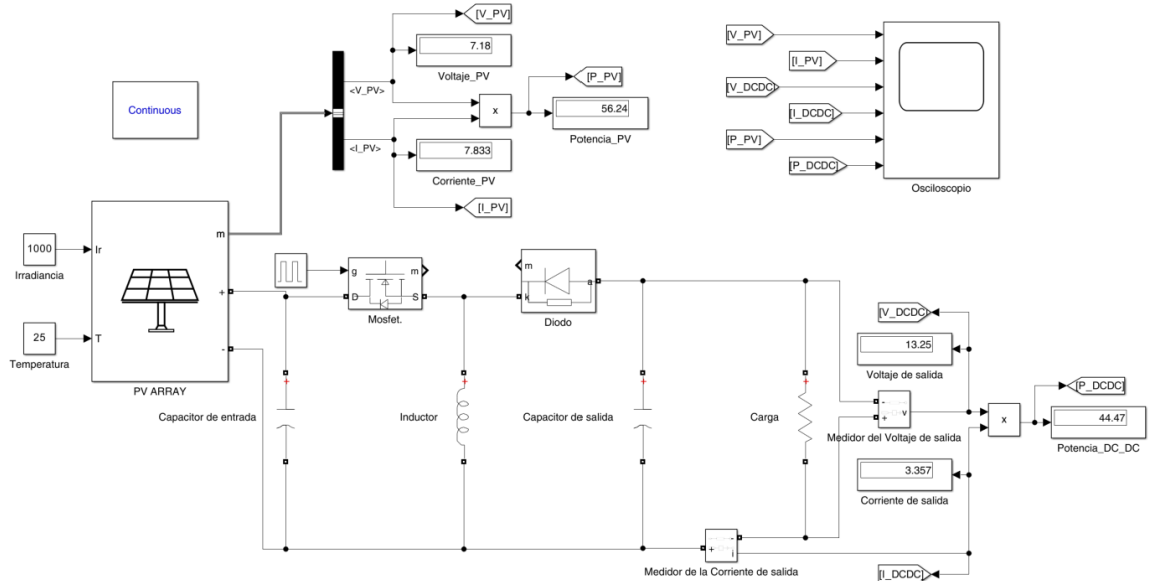


Figura 55. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.7.

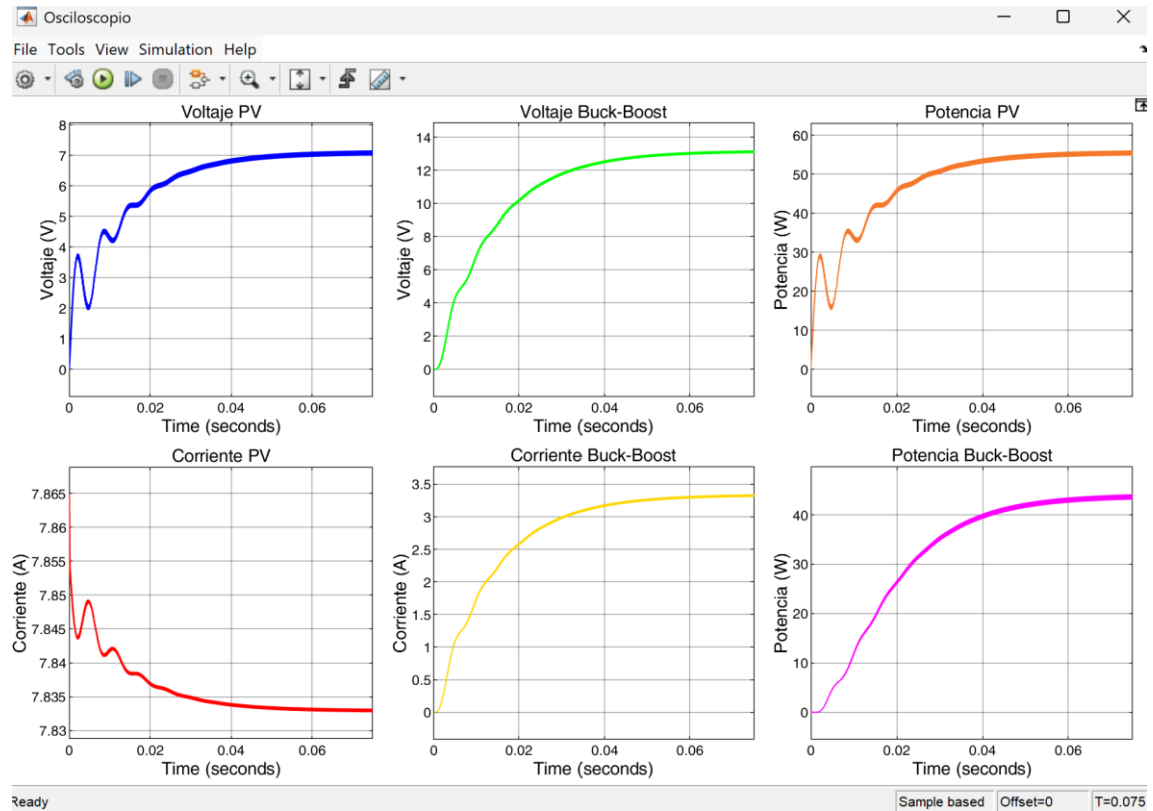


Figura 56. Medición del voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.7.

Por último, se modifica el ciclo de trabajo a 0.51 para acercarse al punto en el que se alcanza la máxima potencia (213.15 W) con 29 V y 7.35 A, como lo indican las especificaciones del “PV Array”. La Figura 57, muestra este cambio.

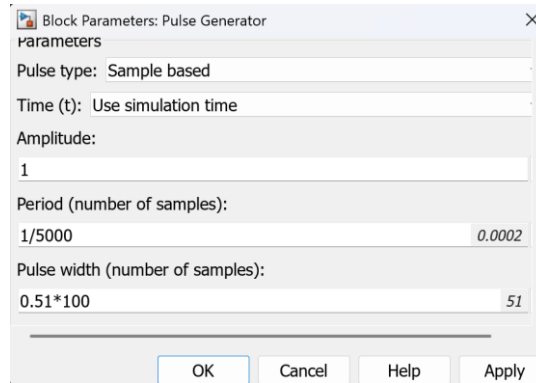


Figura 57. Definición del ciclo de trabajo en 0.51.

Con esta modificación y un tiempo de 5 segundos, se obtienen los resultados de la Figura 58. En estos, destaca el voltaje y corriente del panel, siendo 28.94 V y 7.359 A, valores muy cercanos al voltaje y corriente en el punto de máxima potencia, la potencia obtenida es de 213 W. Por otra parte, en el convertidor se obtiene un voltaje de 27.79 V y una corriente de 7.043 A, obteniendo una potencia de 195.7 W.

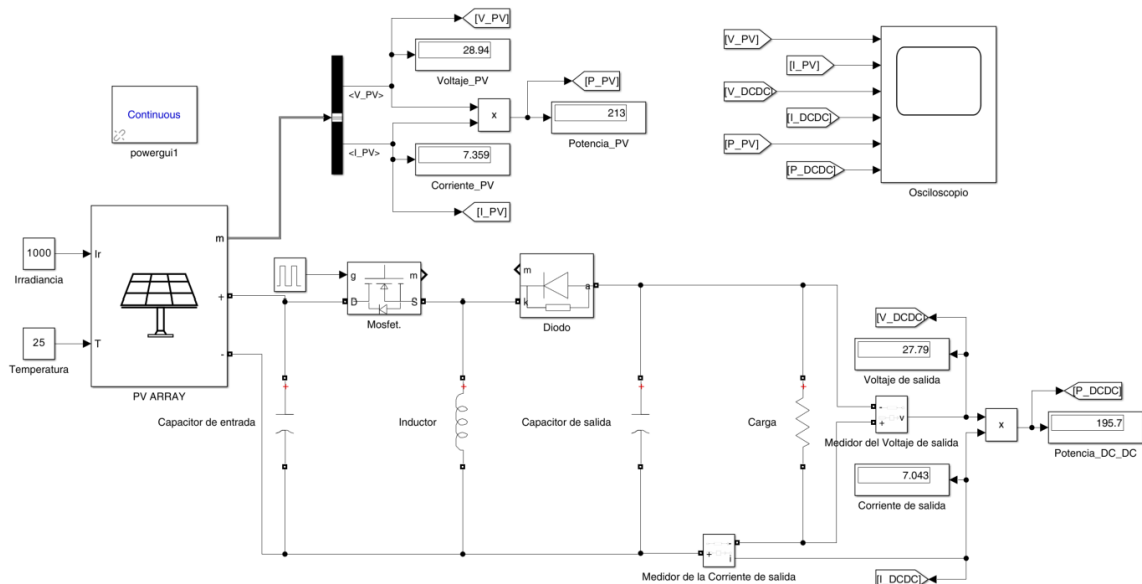


Figura 58. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del sistema fotovoltaico con el Buck-Boost Converter, bajo un ciclo de trabajo definido en 0.51.

Las gráficas que se obtienen con el ciclo de trabajo en 0.51 se muestran en la Figura 59, estos resultados son obtenidos al definir un tiempo de 0.13 segundos, donde se pueden analizar el comportamiento del convertidor y del panel fotovoltaico durante el inicio de la simulación, hasta el momento en que los valores comienzan a estabilizarse.

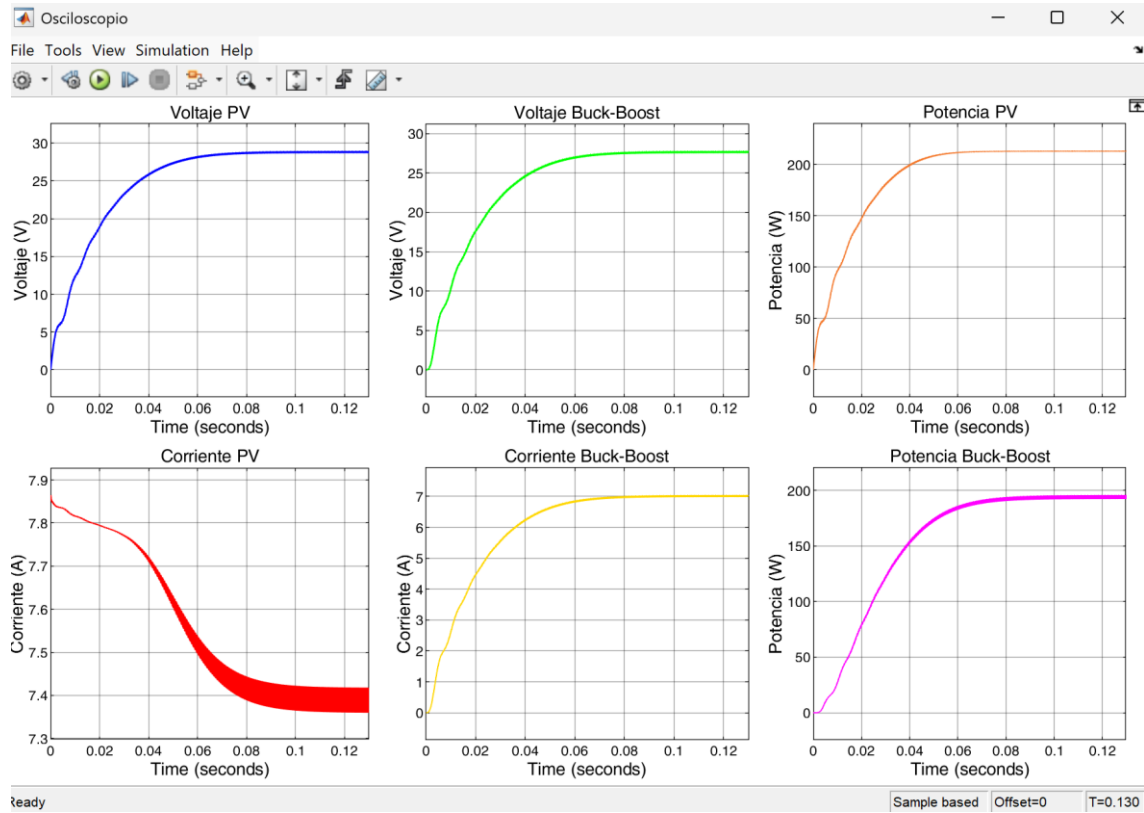


Figura 59. Medición del voltaje, corriente y potencia; en el sistema fotovoltaico y en el convertidor, bajo un ciclo de trabajo de 0.51.

6.3 Controlador *MPPT* con el algoritmo *Perturb & Observe (P&O)*

En la Tabla 13 se presentan los resultados del modelo que integra el algoritmo *P&O* y un convertidor *Boost Converter*. La primer columna contiene los datos de irradiancia y temperatura; la segunda muestra la figura correspondiente a cada resultado. En las columnas restantes se presentan el voltaje y la corriente en el sistema fotovoltaico y en la salida del convertidor, así como la potencia generada. Por último, se muestra también la potencia obtenida en el punto de máxima potencia, de acuerdo con las especificaciones del panel fotovoltaico.

Tabla 13. Resultados de la simulación del algoritmo MPPT número 1 (P&O).

Irradiancia (W/m^2) y Temperatura (° C)	Ejecución de la simulación (Figura)	Voltaje (V) y Corriente (A) del sistema fotovoltaico	Voltaje (V) y Corriente (A) del convertidor	Potencia (W) del sistema fotovoltaico	Potencia (W) del convertidor	Potencia (W) en el MPP
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 60	29.31 V 7.25 A	27.39 V 6.942 A	212.5	190.1	213.15
Irradiancia: 800 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 61	25.25 V 6.195 A	24.44 V 6.195 A	156.4	151.4	171.798
Irradiancia: 600 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 62	19.26 V 4.67 A	18.46 V 4.678 A	90.12	86.35	129.509
Irradiancia: 400 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 63	13.14 V 3.128 A	12.34 V 3.128 A	41.11	38.6	86.2652
Irradiancia: 200 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 64	6.989 V 1.568 A	6.187 V 1.568 A	10.96	9.703	42.4619
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 40° C	Figura 65	27.24 V 7.289 A	26.83 V 6.801 A	198.5	182.5	199.837
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 55° C	Figura 66	23.58 V 7.792 A	26.74 V 6.778 A	183.8	181.3	186.341
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 70° C	Figura 67	24.51 V 6.757 A	23.48 V 5.951 A	165.6	139.7	172.494

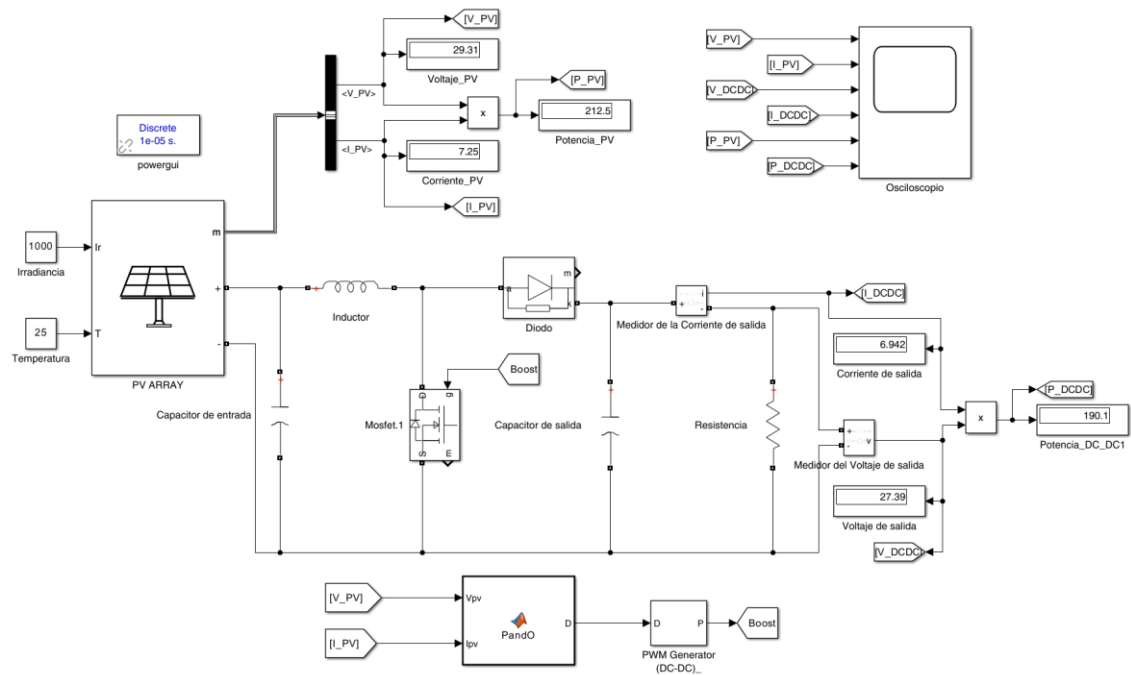


Figura 60. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C

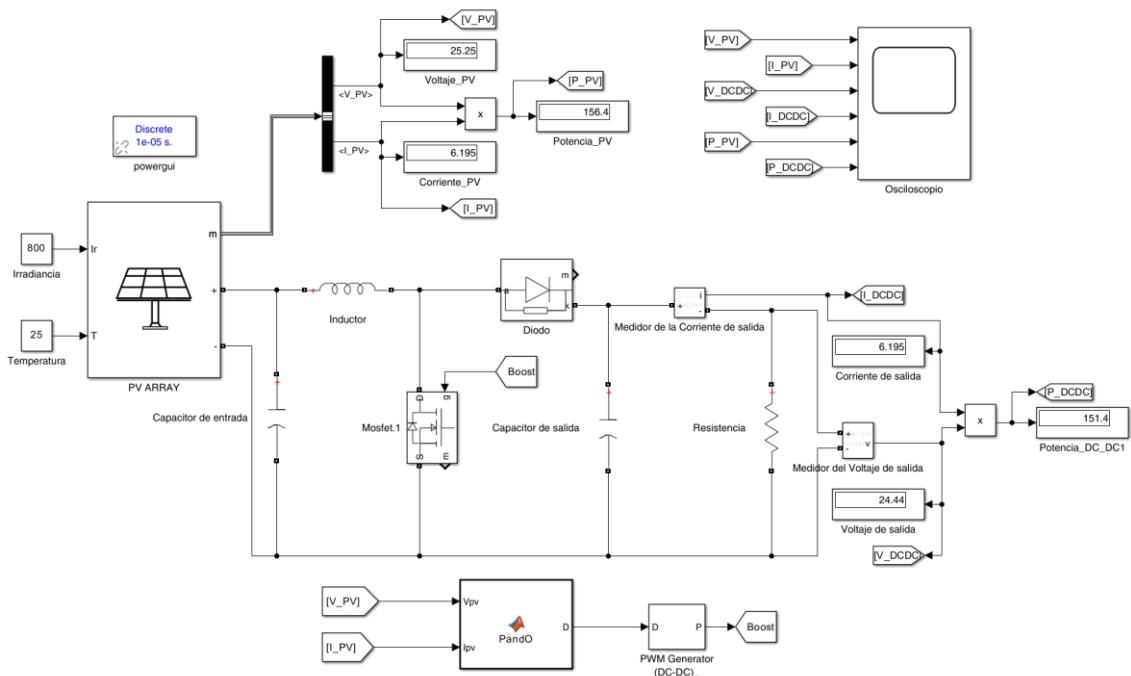


Figura 61. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura de 25°C

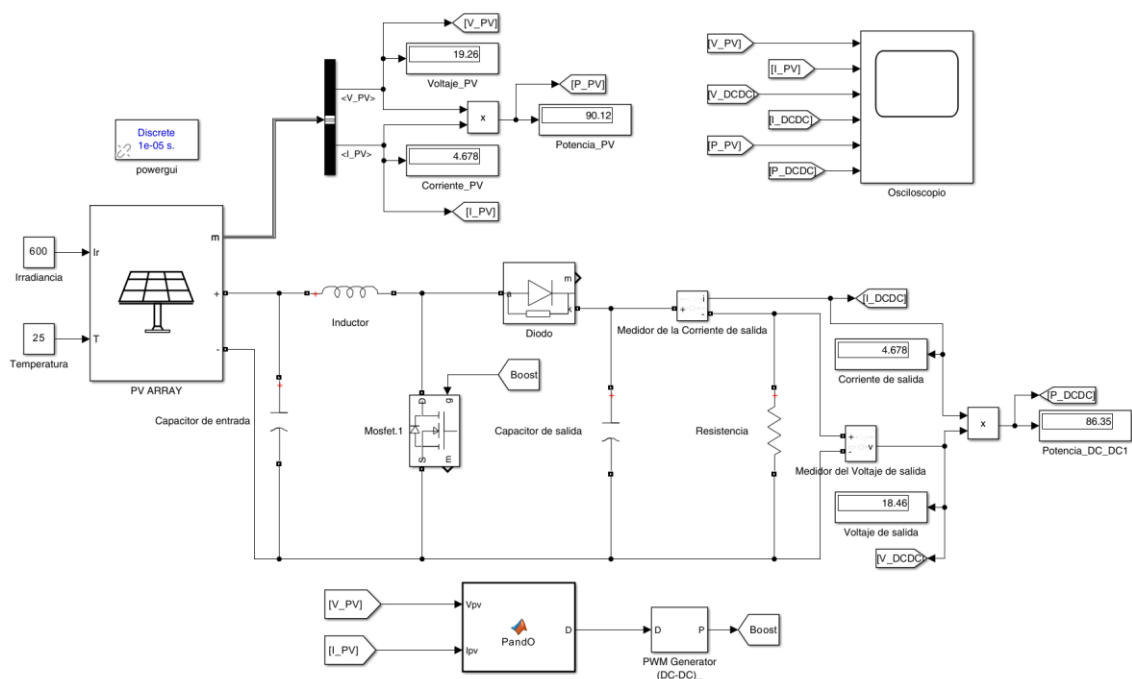


Figura 62. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 600 W/m² y una temperatura de 25 °C

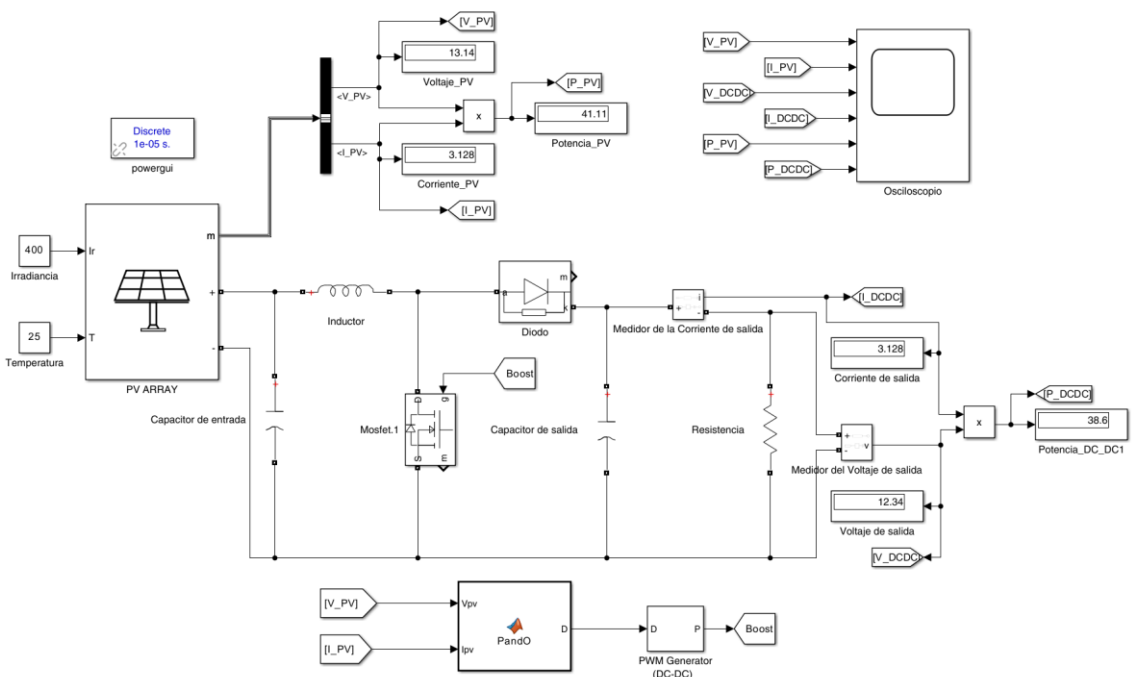


Figura 63. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 400 W/m² y una temperatura de 25 °C

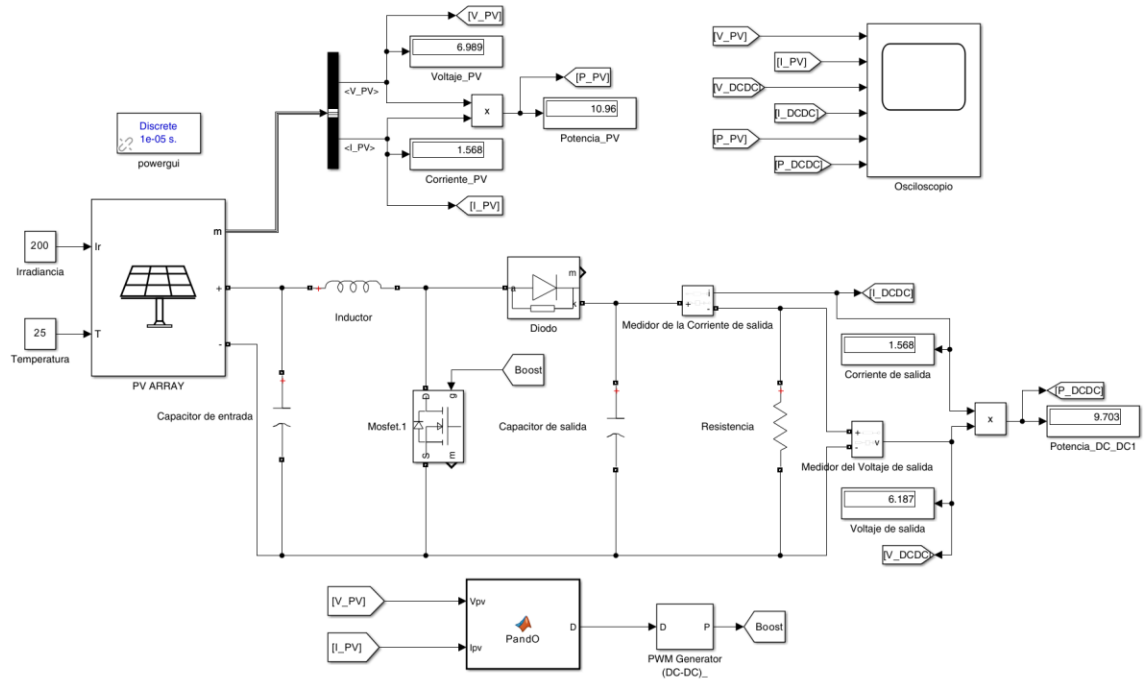


Figura 64. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 200 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$

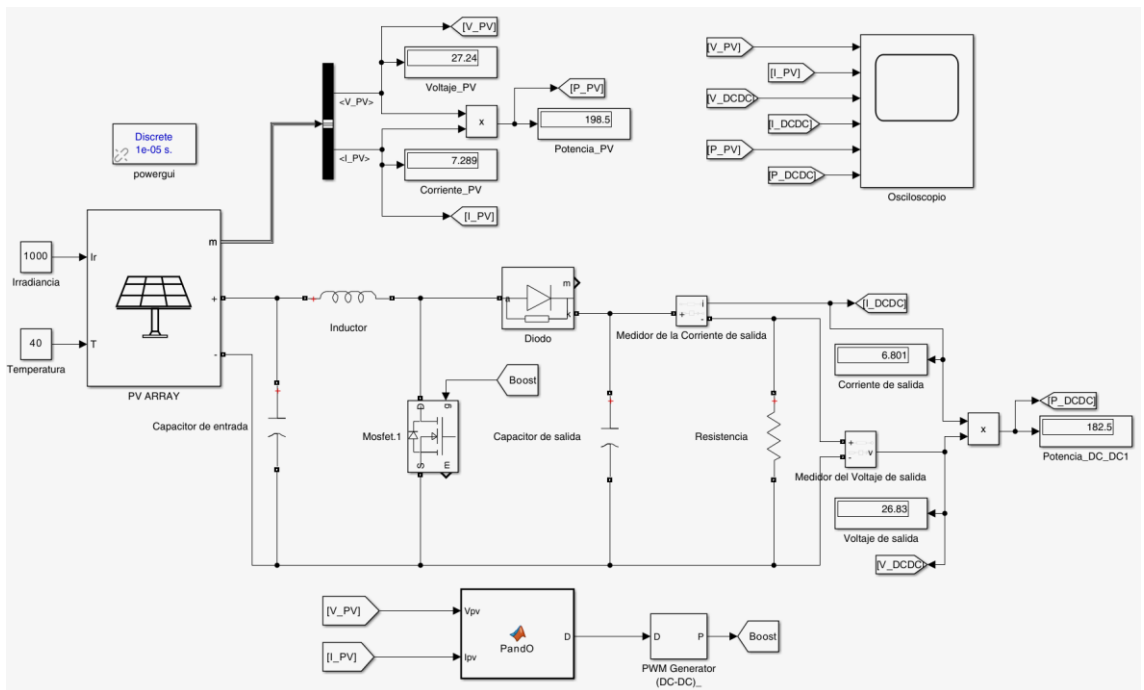


Figura 65. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

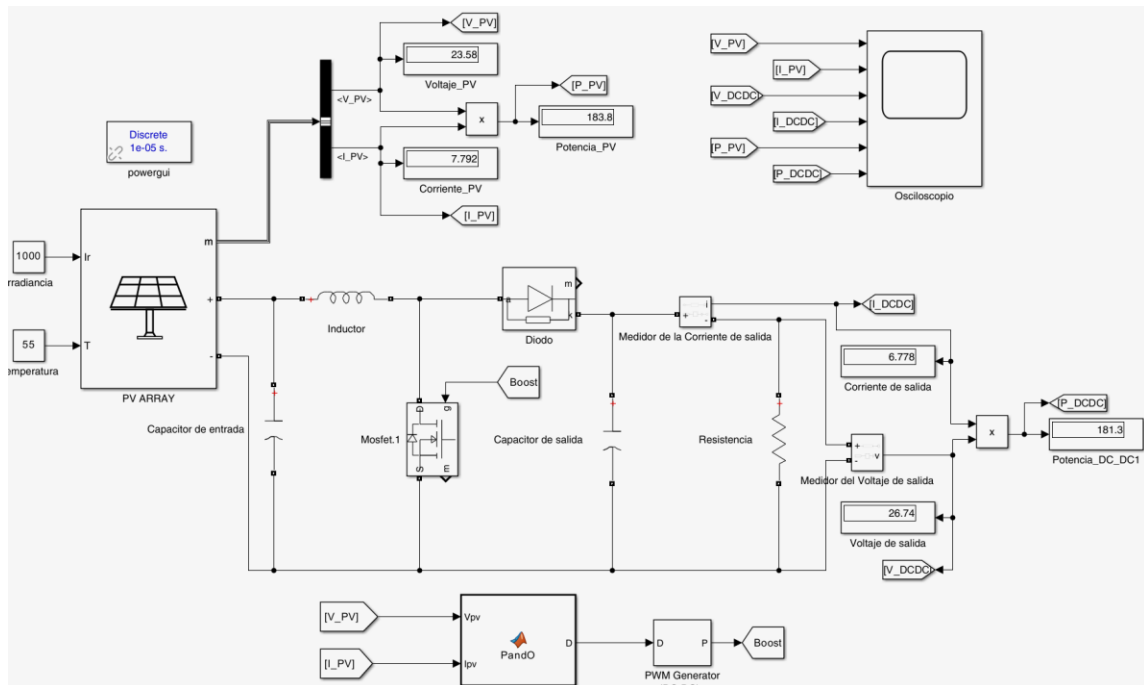


Figura 66. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$

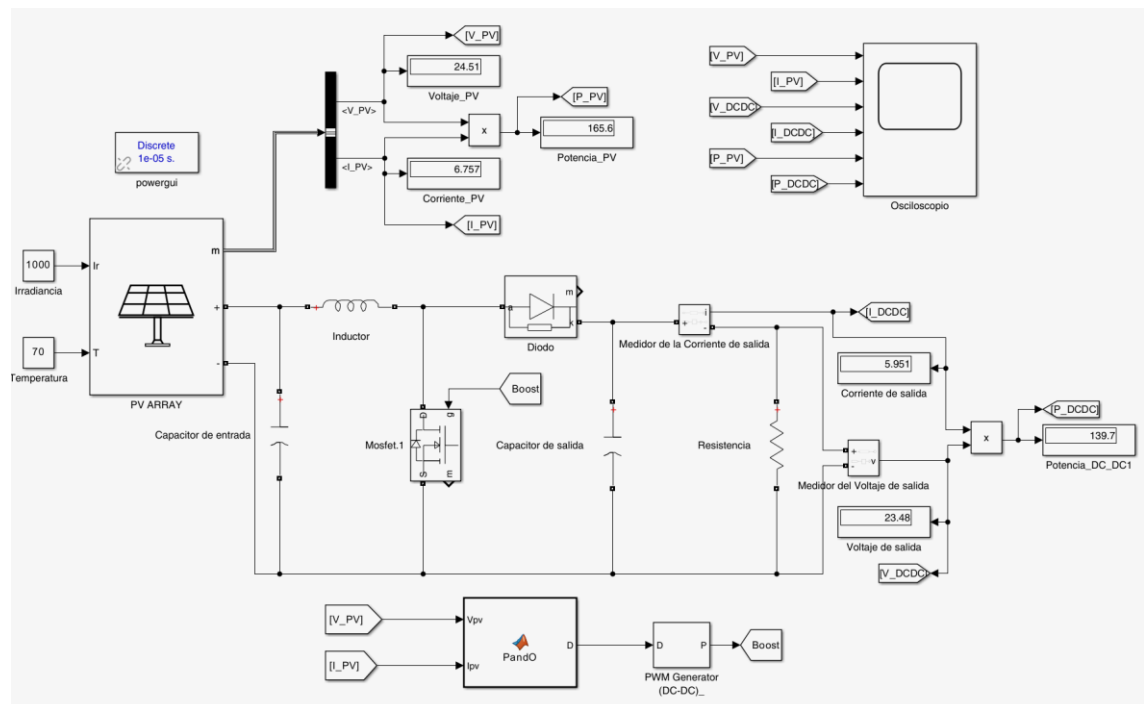


Figura 67. Resultados del controlador MPPT número 1, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$

En las siguientes imágenes se muestran las gráficas resultantes de ejecutar la simulación del algoritmo de perturbar y observar bajo distintas condiciones de irradiancia y temperatura. Como se puede analizar, el algoritmo tiene una buena respuesta en la búsqueda del *MPP*, sin embargo, en varios casos presenta demasiadas oscilaciones alrededor de este punto. Para el tiempo de estabilización se considera el instante en el que el algoritmo localiza el *MPP*, y se produzcan las oscilaciones alrededor de ese punto.

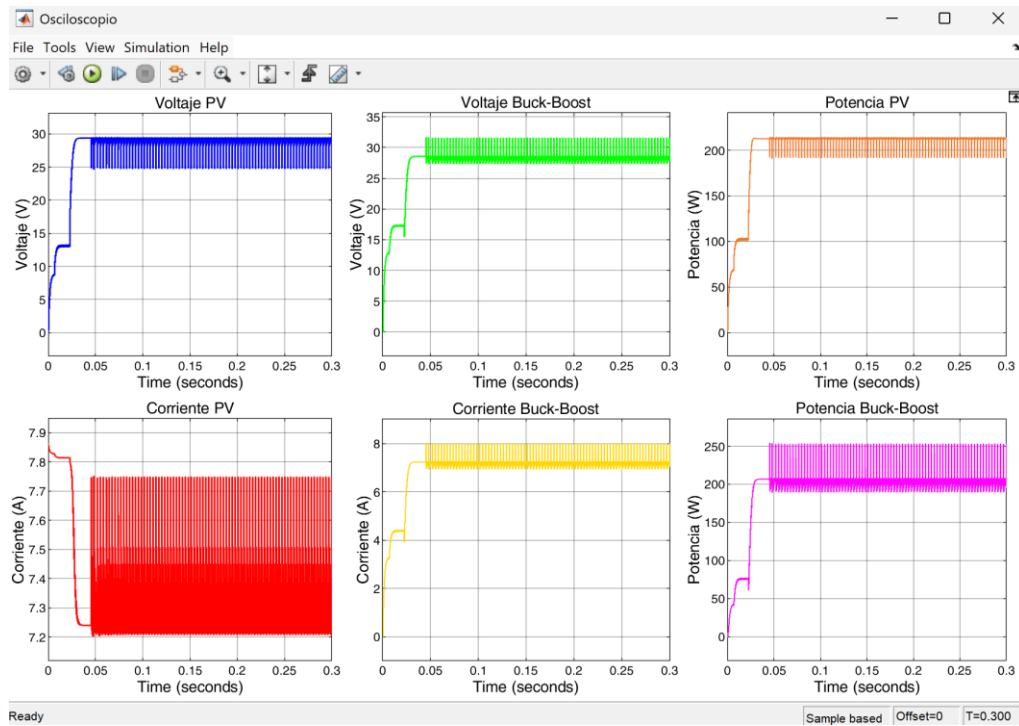


Figura 68. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 25)

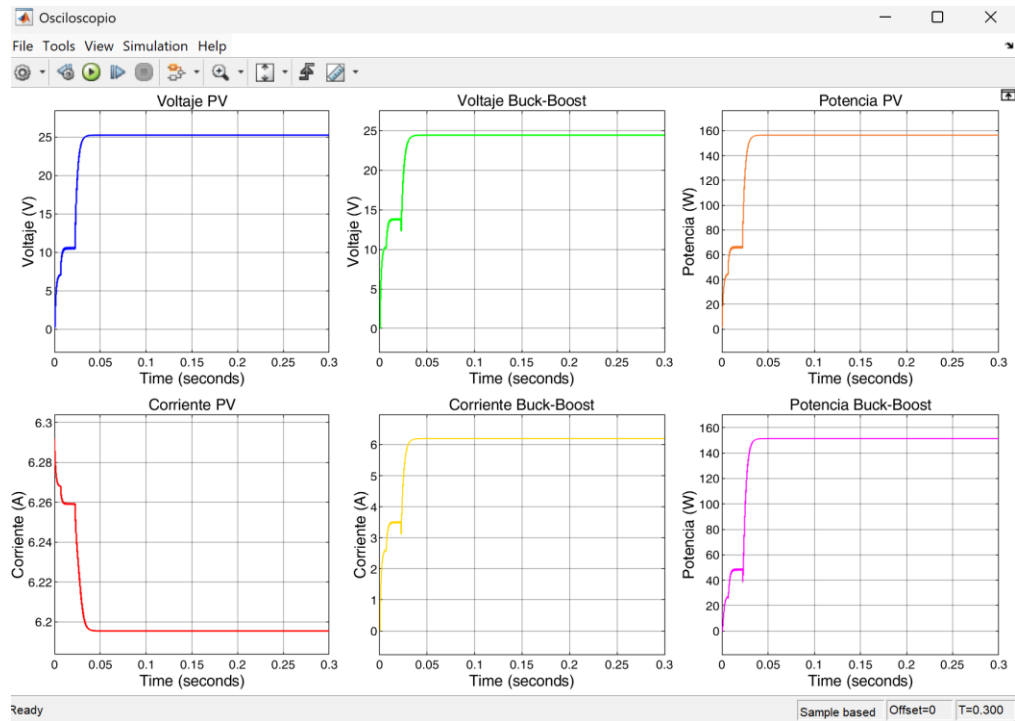


Figura 69. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 800 y 25).

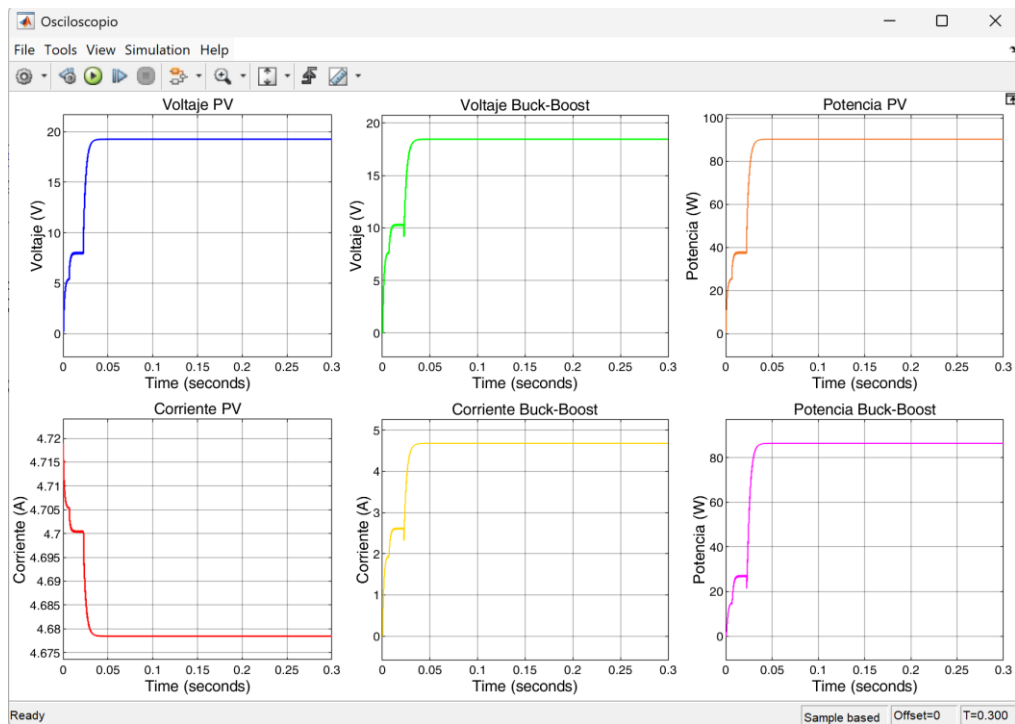


Figura 70. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 600 y 25).

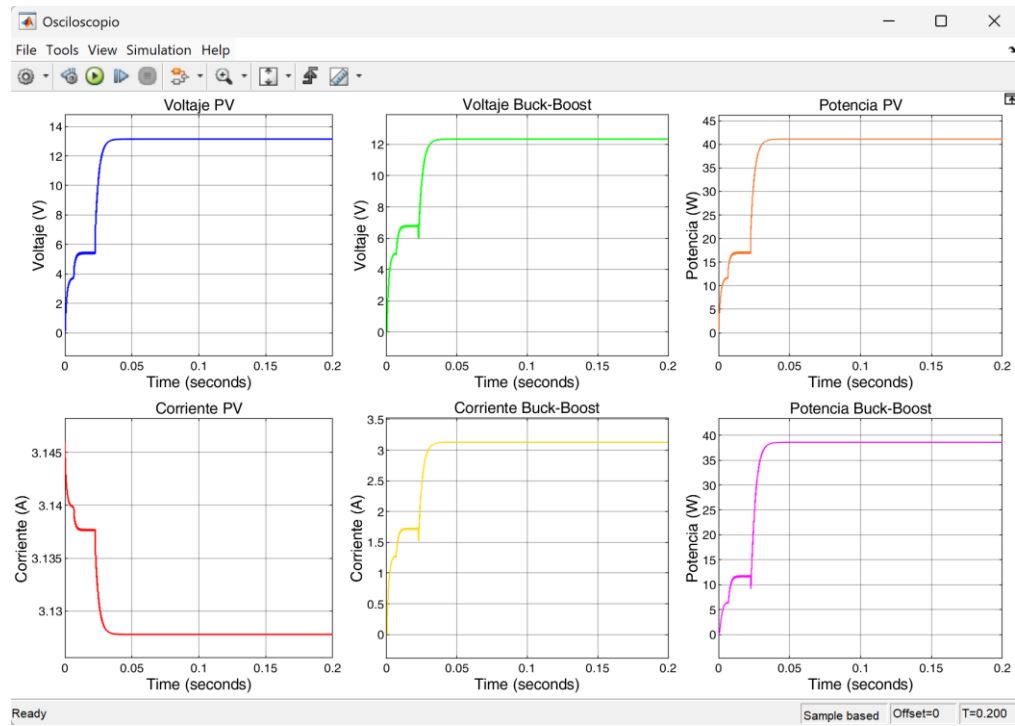


Figura 71. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 400 y 25)

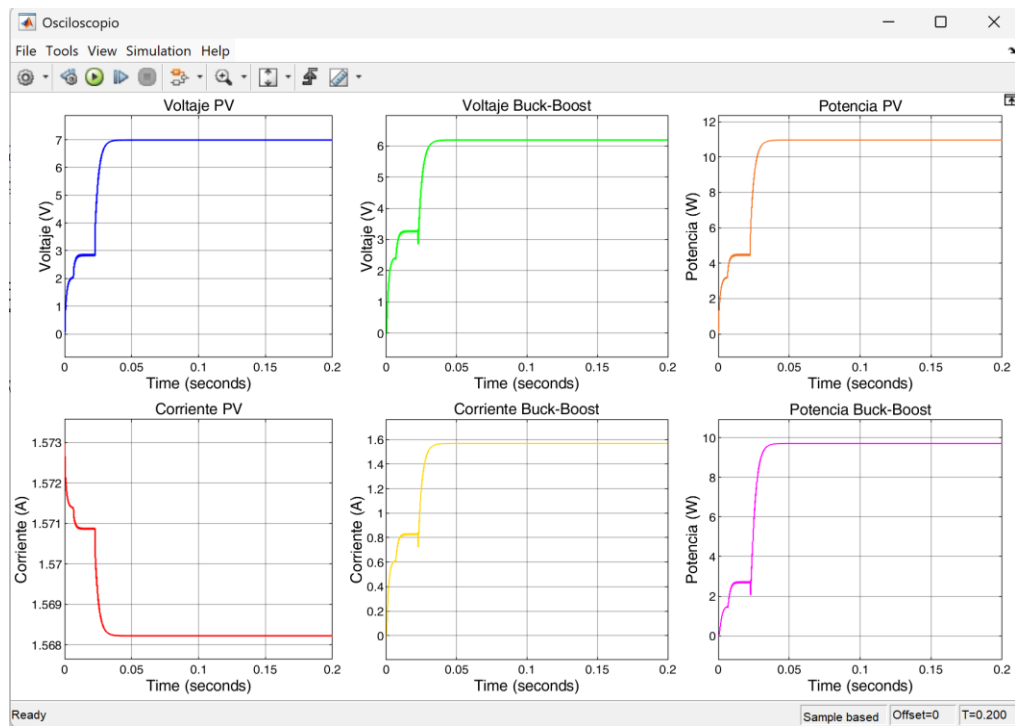


Figura 72. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 200 y 25).

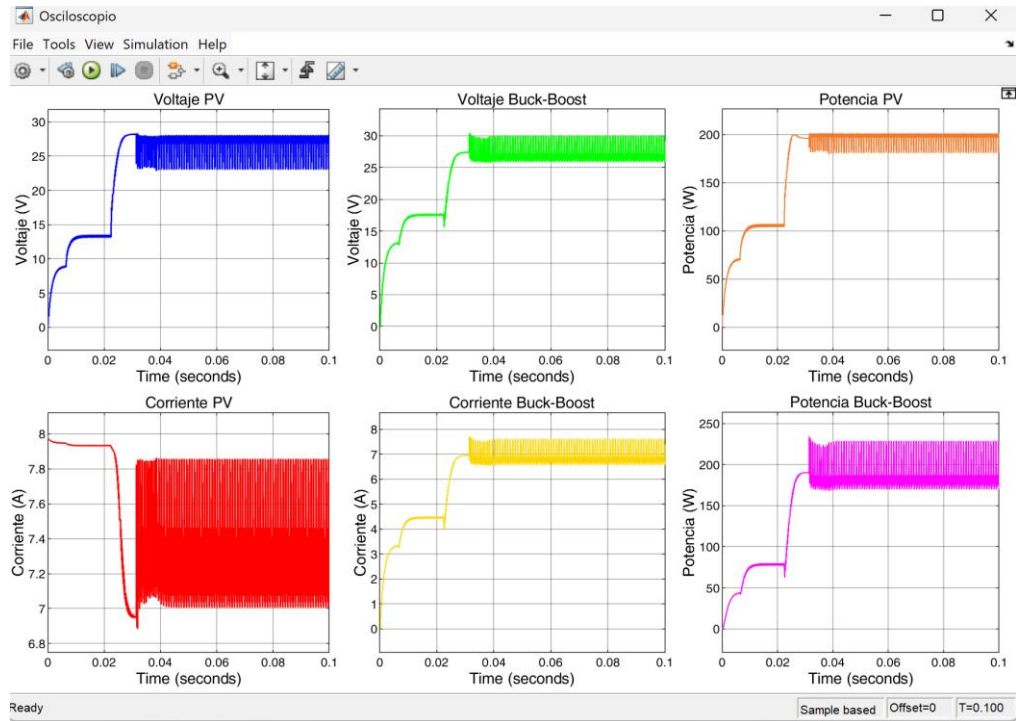


Figura 73. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 40).

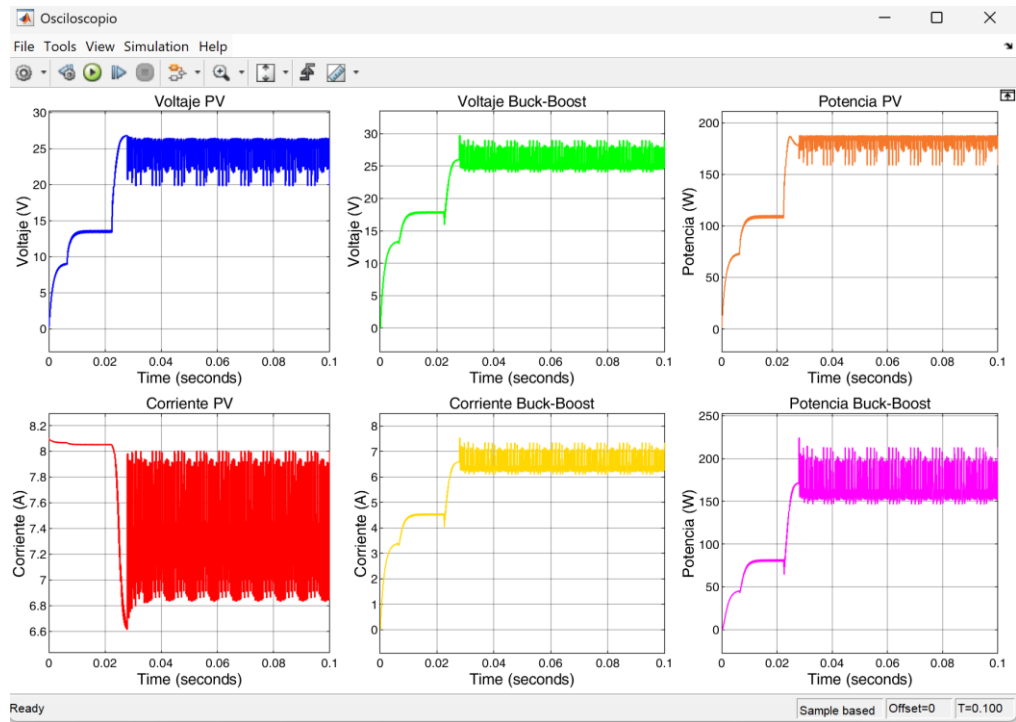


Figura 74. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 55).

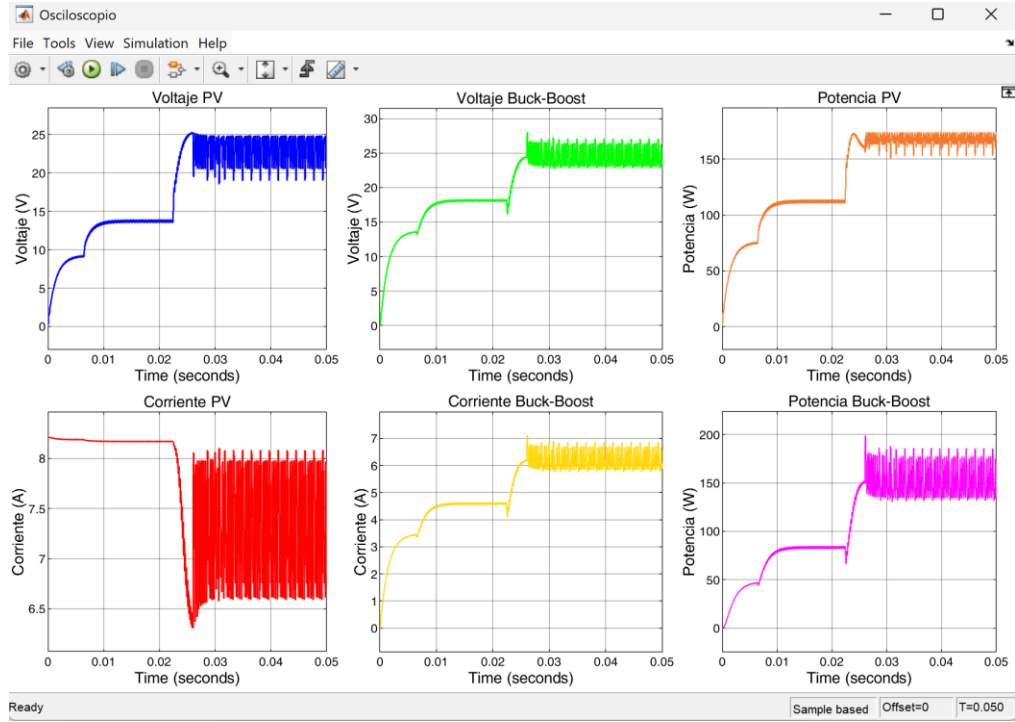


Figura 75. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor (Irradiancia y temperatura: 1000 y 70). La eficiencia de seguimiento del MPP se obtiene mediante la ecuación (6.18), donde se expresa la relación entre la potencia medida en el panel fotovoltaico y la potencia esperada en el punto de máxima potencia.

$$Eficiencia_{MPPT} = \left(\frac{P_{PV}}{P_{MPP}} \right) \times 100 \quad (6.18)$$

La ecuación (6.19) permite calcular la eficiencia del convertidor *DC-DC*, esta medida se emplea para evaluar las pérdidas de energía que existen en el convertidor, durante el proceso de conmutación (apertura y cierre del *MOSFET* y por el consumo de los otros componentes: diodo, inductor y capacitor) a medida que la energía pasa a través del convertidor para ser conducida hacia la carga.

$$Eficiencia_{CONVERTIDOR} = \left(\frac{P_{salida_convertidor}}{P_{PV}} \right) \times 100 \quad (6.19)$$

Por último, también se muestra el tiempo de estabilización (medido en segundos), este valor es obtenido a partir de los resultados vistos al ejecutar la simulación bajo distintos niveles de irradiancia y temperatura.

Tabla 14 se presentan los valores porcentuales de las principales métricas utilizadas para evaluar el comportamiento del controlador y del convertidor en conjunto con el panel fotovoltaico, bajo diferentes condiciones de irradiancia y temperatura.

En esta tabla se puede visualizar el porcentaje que indica la diferencia que existe entre la potencia obtenida en el sistema fotovoltaico, con respecto a la referencia de la potencia en el *MPP*, es decir, el error relativo porcentual el cual se expresa en la ecuación (6.17).

$$E = \left(\frac{P_{MPP} - P_{PV}}{P_{MPP}} \right) \times 100 \quad (6.17)$$

La eficiencia de seguimiento del *MPP* se obtiene mediante la ecuación (6.18), donde se expresa la relación entre la potencia medida en el panel fotovoltaico y la potencia esperada en el punto de máxima potencia.

$$Eficiencia_{MPPT} = \left(\frac{P_{PV}}{P_{MPP}} \right) \times 100 \quad (6.18)$$

La ecuación (6.19) permite calcular la eficiencia del convertidor *DC-DC*, esta medida se emplea para evaluar las pérdidas de energía que existen en el convertidor, durante el proceso de conmutación (apertura y cierre del *MOSFET* y por el consumo de los otros componentes: diodo, inductor y capacitor) a medida que la energía pasa a través del convertidor para ser conducida hacia la carga.

$$Eficiencia_{CONVERTIDOR} = \left(\frac{P_{salida_convertidor}}{P_{PV}} \right) \times 100 \quad (6.19)$$

Por último, también se muestra el tiempo de estabilización (medido en segundos), este valor es obtenido a partir de los resultados vistos al ejecutar la simulación bajo distintos niveles de irradiancia y temperatura.

Tabla 14. Resumen de los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 1 (P&O).

Algoritmo de MPPT	Irradiancia (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$)	Diferencia respecto al MPP (%)	Eficiencia de seguimiento del MPP	Eficiencia del convertidor (%)	Tiempo de estabilización (segundos)
Algoritmo N° 1 (P&O)	1000 y 25	0.30 %	99.69 %	89.45 %	0.05
	800 y 25	8.96 %	91.03 %	96.61 %	0.04
	600 y 25	30.41 %	69.58 %	95.81 %	0.04
	400 y 25	52.34 %	47.65 %	93.89 %	0.04
	200 y 25	74.18 %	25.81 %	88.53 %	0.04
	1000 y 40	0.66 %	99.33 %	91.93 %	0.3
	1000 y 55	1.36 %	98.63 %	98.63 %	0.025
	1000 y 70	3.99 %	96.00 %	84.35 %	0.025

6.4 Controlador MPPT con lógica difusa (FLC)

En esta sección se muestran los resultados obtenidos al ejecutar cada uno de los modelos diseñados en *Matlab/Simulink*, que corresponden a los modelos compuestos por el sistema fotovoltaico, el convertidor *DC-DC* y el controlador *MPPT* basado en lógica difusa.

6.4.1 Algoritmo de MPPT número 2 (FLC)

Como primer punto de análisis, se presentan los resultados obtenidos al ejecutar la simulación compuesta por el sistema fotovoltaico, el convertidor *Buck-Boost* y el algoritmo de *MPPT* número 2 (FLC).

En las siguientes imágenes que se muestran, se puede observar los resultados obtenidos al ejecutar la simulación, donde se obtienen los valores del voltaje, corriente y potencia en el sistema fotovoltaico y en el convertidor *Buck-Boost*. Las pruebas de ejecución para este modelo son realizadas considerando niveles de irradiancia de 1000, 800, 600, 400 y 200 W/m^2 para una temperatura de 25 °C. Al igual, se ejecutan pruebas bajo una misma irradiancia definida en 1000 W/m^2 y con los siguientes niveles de temperatura: 25, 40, 55 y 70 °C.

Los resultados de estas pruebas se pueden visualizar en la Tabla 15, donde se encuentran de forma detallada los valores de voltaje, corriente y potencia del sistema fotovoltaico y los obtenidos en la salida del convertidor, obtenidos para cada nivel de irradiancia y temperatura en específico. Estos datos son contrastados con los valores vistos en la Tabla 10 y Tabla 12, que indican el punto donde se alcanza la máxima potencia para cada variación de irradiancia y temperatura.

Tabla 15. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 2 (FLC).

Irradiancia (W/m^2) y Temperatura (° C)	Ejecución de la simulación (Figura)	Voltaje (V) y Corriente (A) del sistema fotovoltaico	Voltaje (V) y Corriente (A) del convertidor	Potencia (W) del sistema fotovoltaico	Potencia (W) del convertidor	Potencia (W) en el <i>MPP</i>
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 76	29.87 V 7.065 A	27.58 V 6.99 A	211	192.8	213.15
Irradiancia: 800 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 77	26.22 V 6.17 A	24.16 V 6.124 A	161.8	148	171.798
Irradiancia: 600 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 78	19.88 V 4.67 A	18.14 V 4.598 A	93	83.41	129.509
Irradiancia: 400 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 79	13.63 V 3.127 A	12.22 V 3.097 A	42.61	37.85	86.2652
Irradiancia: 200 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 80	7.21 V 1.568 A	6.105 V 1.547 A	11.31	9.448	42.4619
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 40° C	Figura 81	28.64 V 6.724 A	26.42 V 6.697 A	192.6	177	199.837
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 55° C	Figura 82	27.23 V 6.356 A	25.13 V 6.369 A	173.1	160.1	186.341
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 70° C	Figura 83	25.49 V 6.154 A	23.47 V 5.949 A	156.9	139.6	172.494

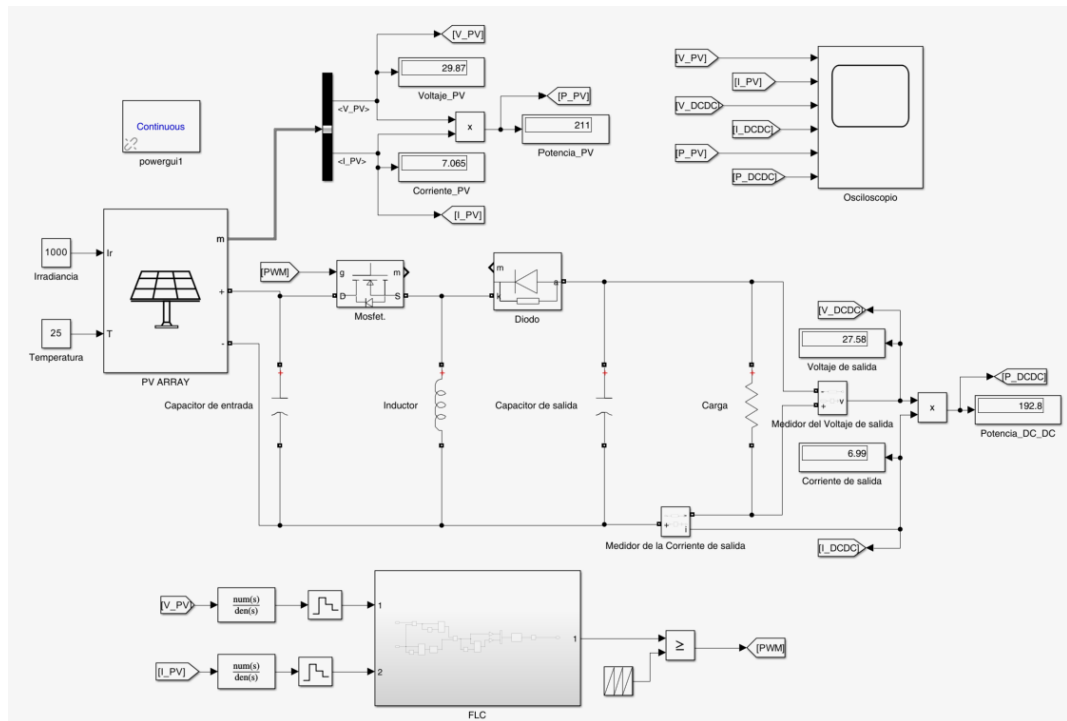


Figura 76. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de 25 °C.

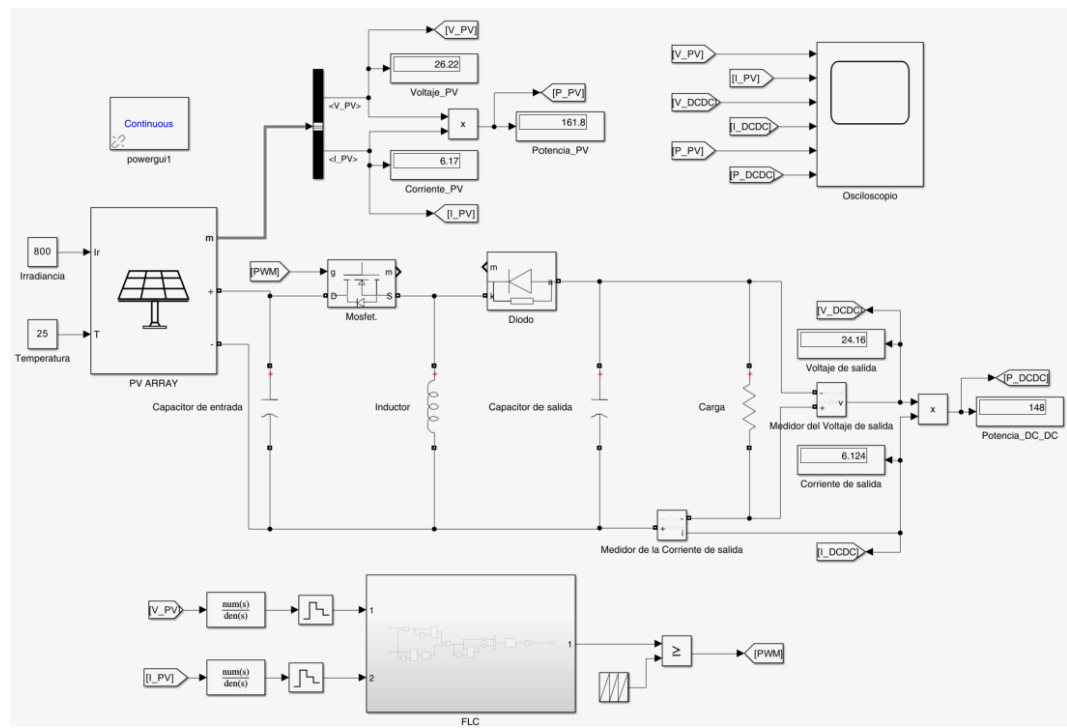


Figura 77. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 800 W/m² y una temperatura de 25 °C.

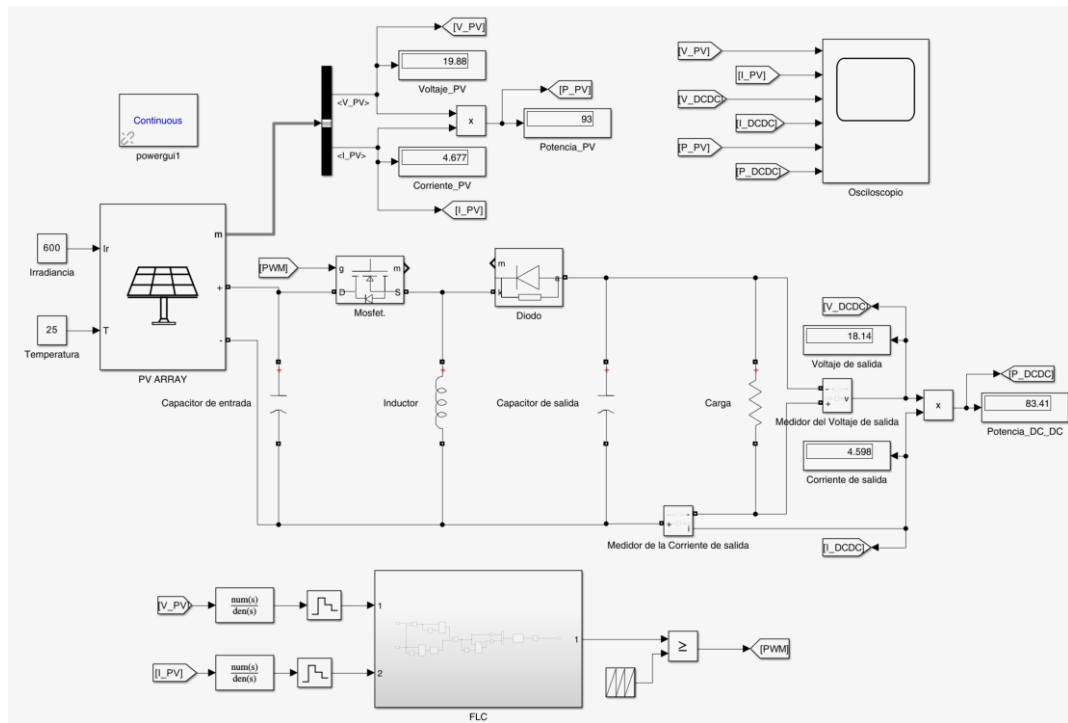


Figura 78. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 600 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

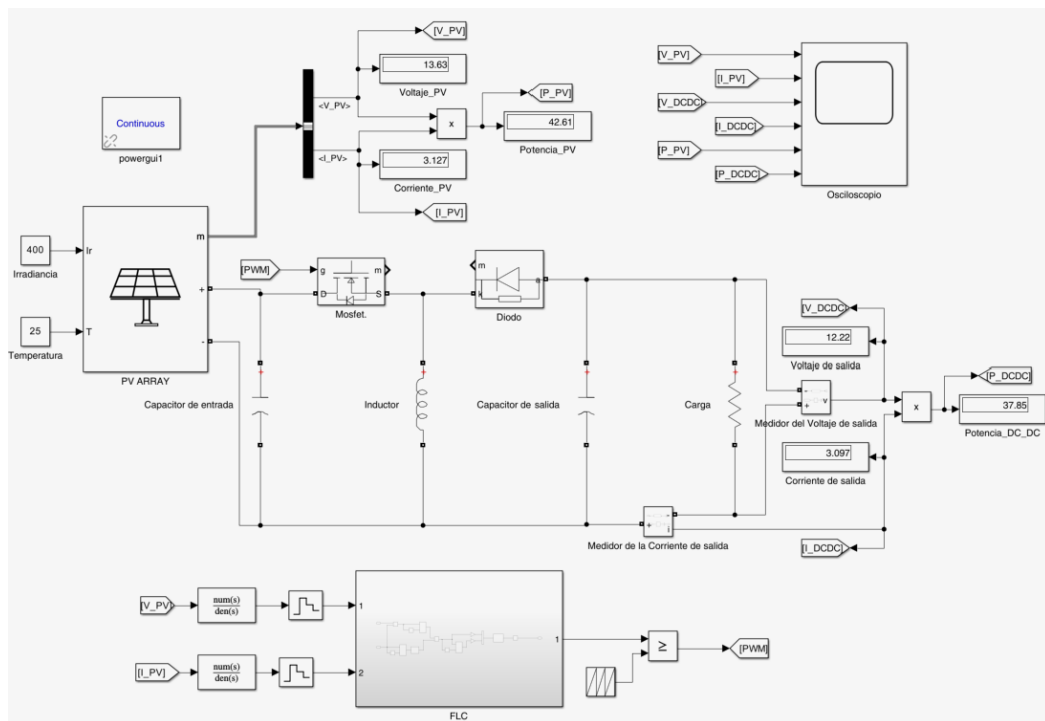


Figura 79. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 400 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

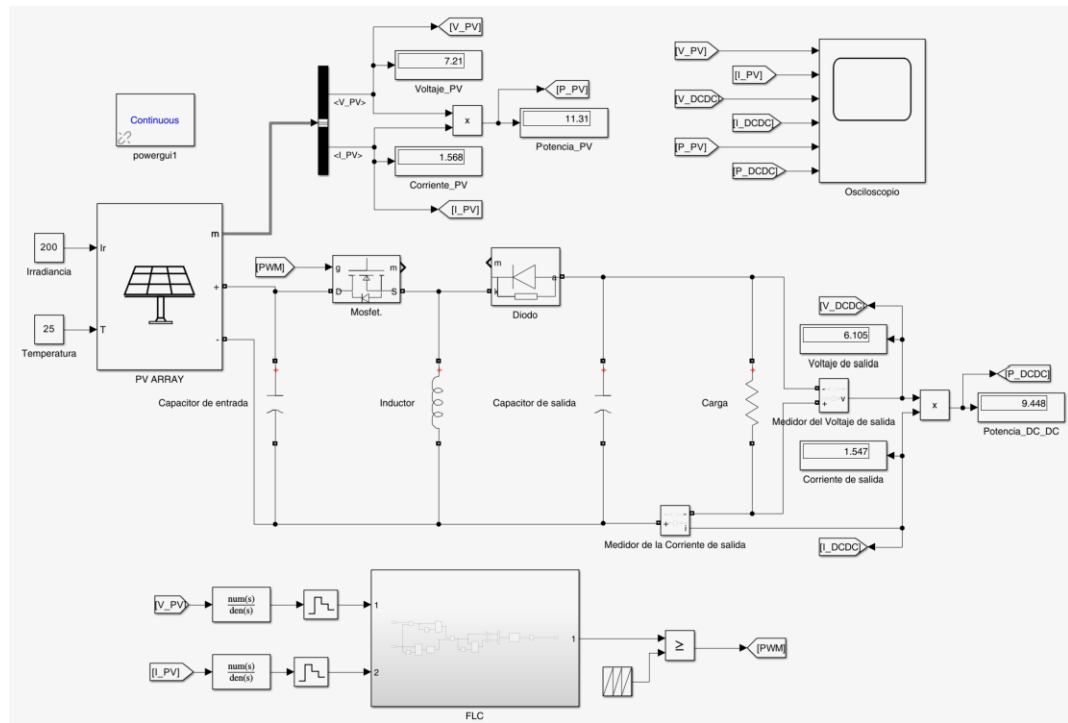


Figura 80. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 200 W/m^2 y una temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

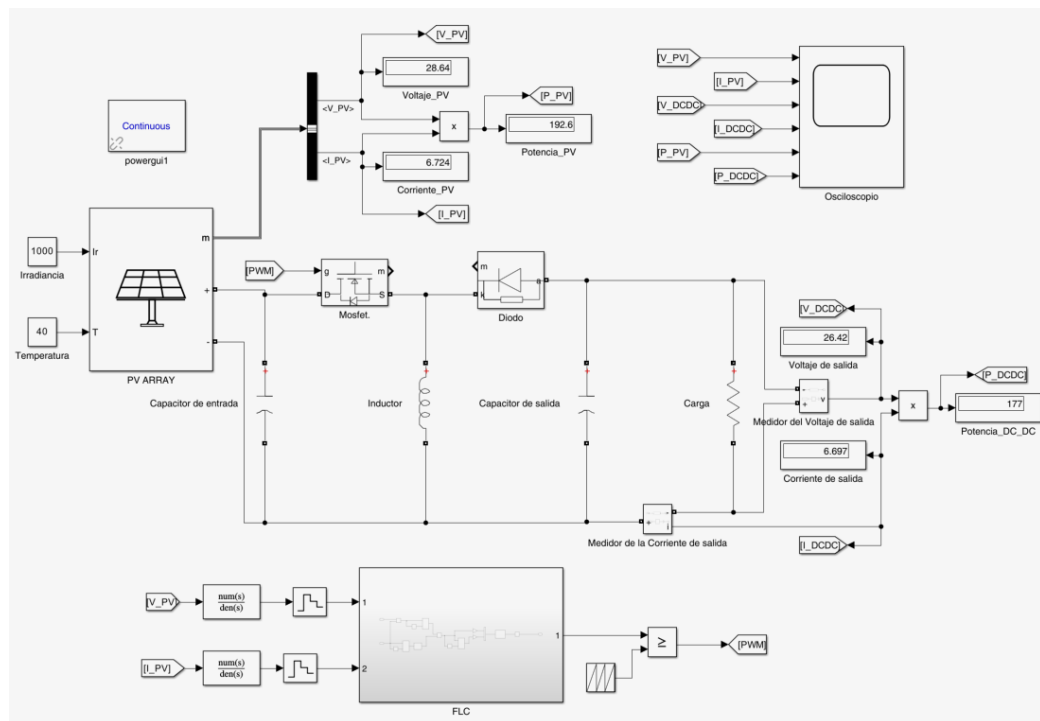


Figura 81. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

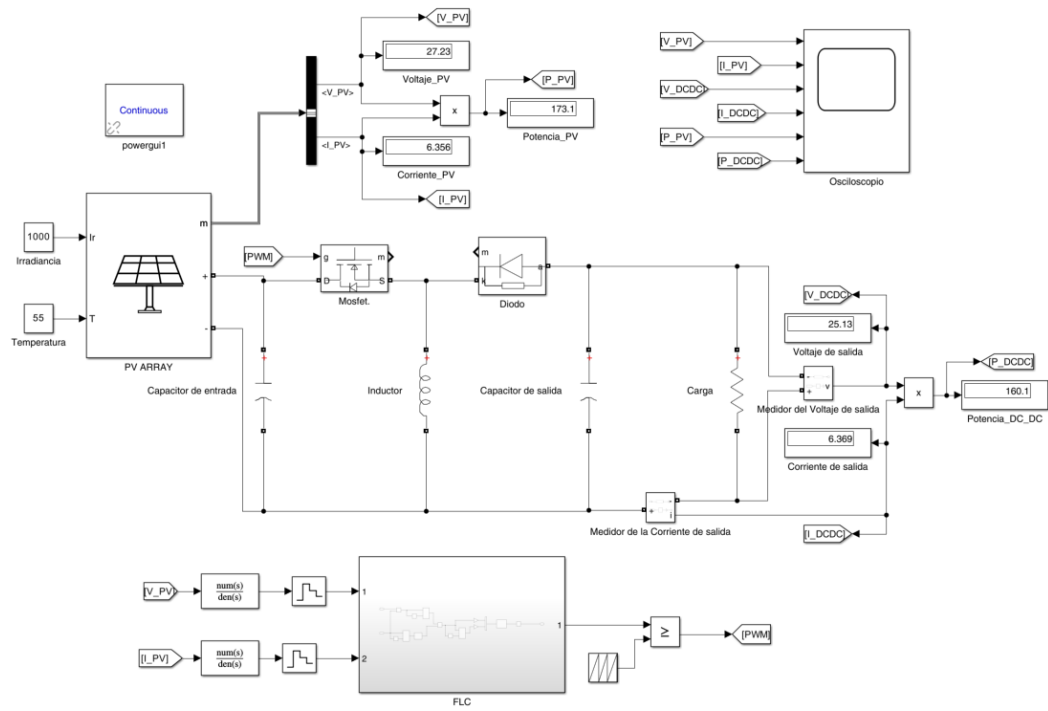


Figura 82. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$.

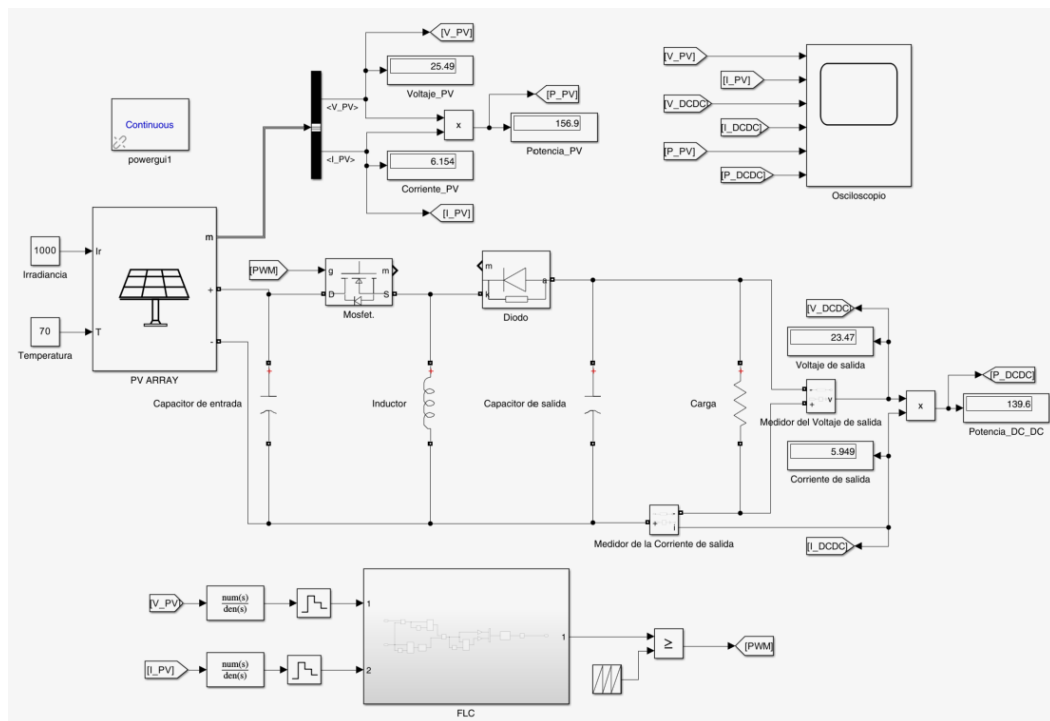


Figura 83. Resultados del controlador MPPT número 2, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

A continuación, encuentran las gráficas resultantes de la ejecución de cada una de las simulaciones presentadas anteriormente. Se puede visualizar el comportamiento del controlador (*FLC*) durante el instante inicial de la simulación; en este tiempo inicial es donde se puede visualizar la respuesta del algoritmo: la rapidez en la detección del *MPP*, la precisión, la eficiencia del convertidor y el tiempo de estabilización.

La Figura 84, permite apreciar las gráficas obtenidas, donde se encuentra el valor del voltaje, corriente y potencia obtenidos en el sistema fotovoltaico y en el convertidor *Buck-Boost*, bajo una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25° C .

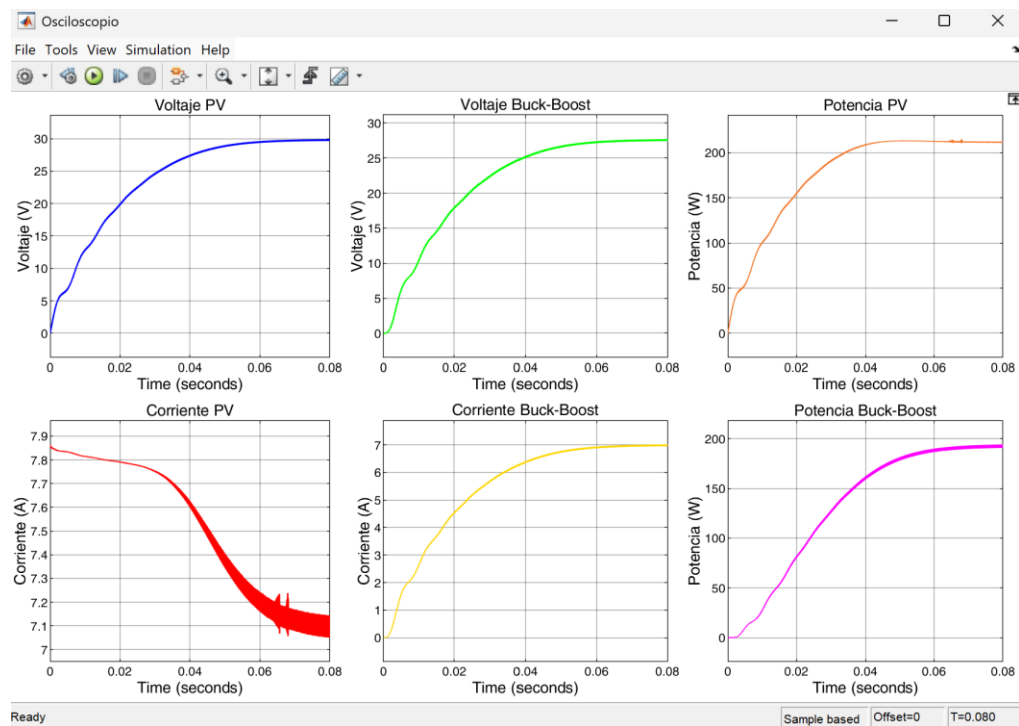


Figura 84. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

En las siguientes imágenes se presentan las gráficas obtenidas, considerando distintos niveles de irradiancia y una misma temperatura de 25° C . La Figura 85 contiene las gráficas resultantes para una irradiancia de 800 W/m^2 , la Figura 86 muestra las gráficas bajo una irradiancia de 600 W/m^2 , la Figura 87 ha sido obtenida con una irradiancia de 400 W/m^2 . Por último, en la Figura 88 se puede visualizar las gráficas obtenida bajo una irradiancia de 200 W/m^2 .

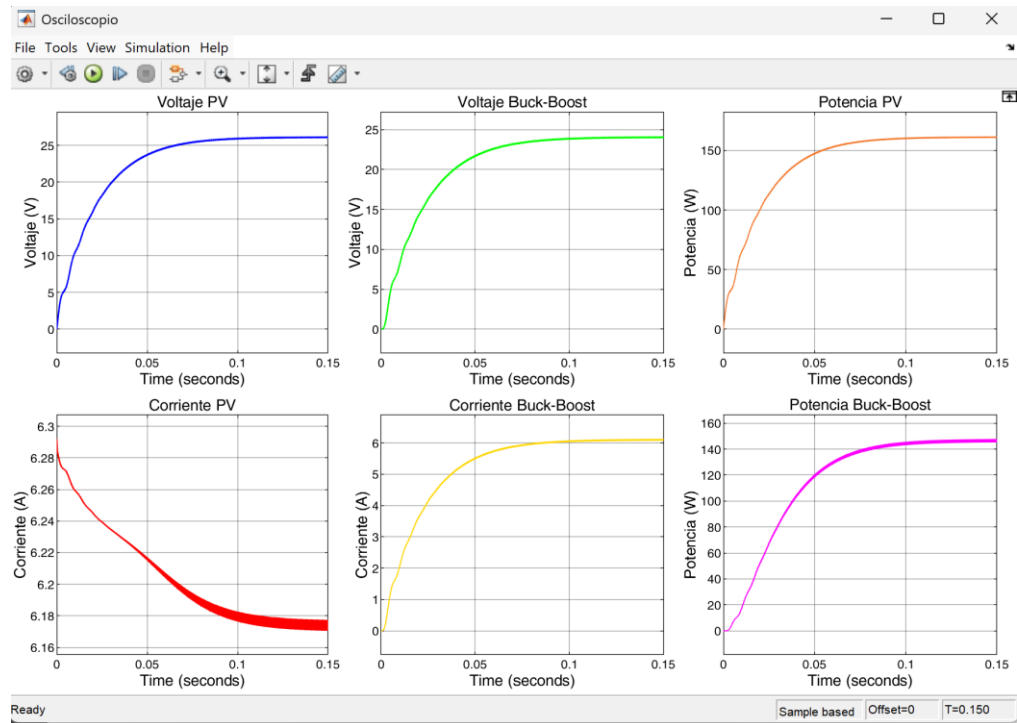


Figura 85. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

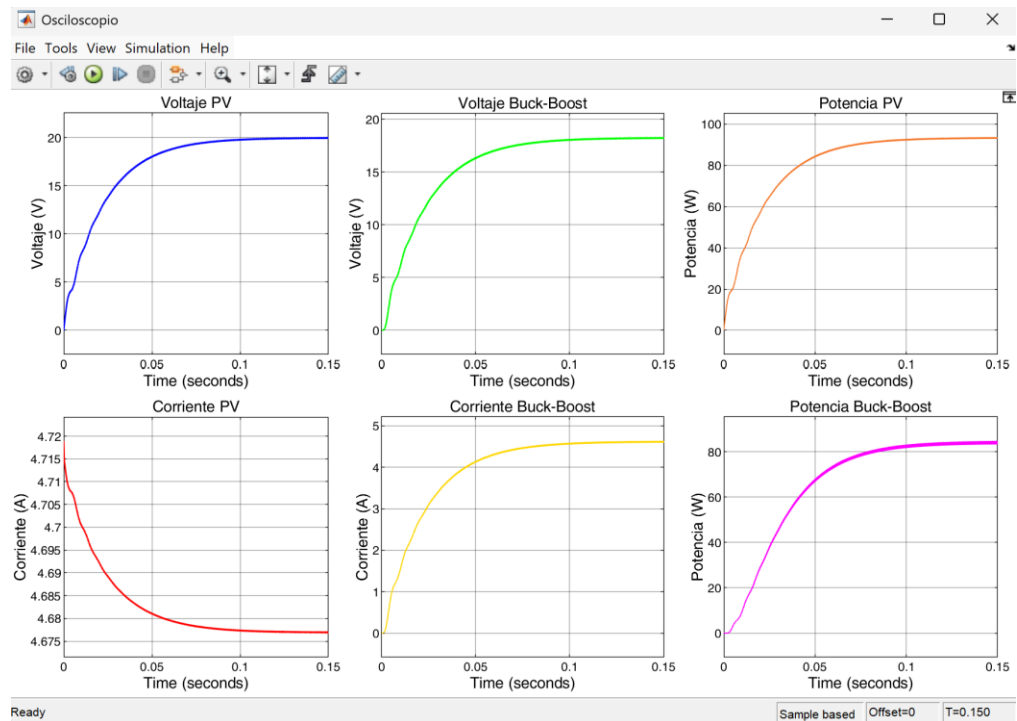


Figura 86. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

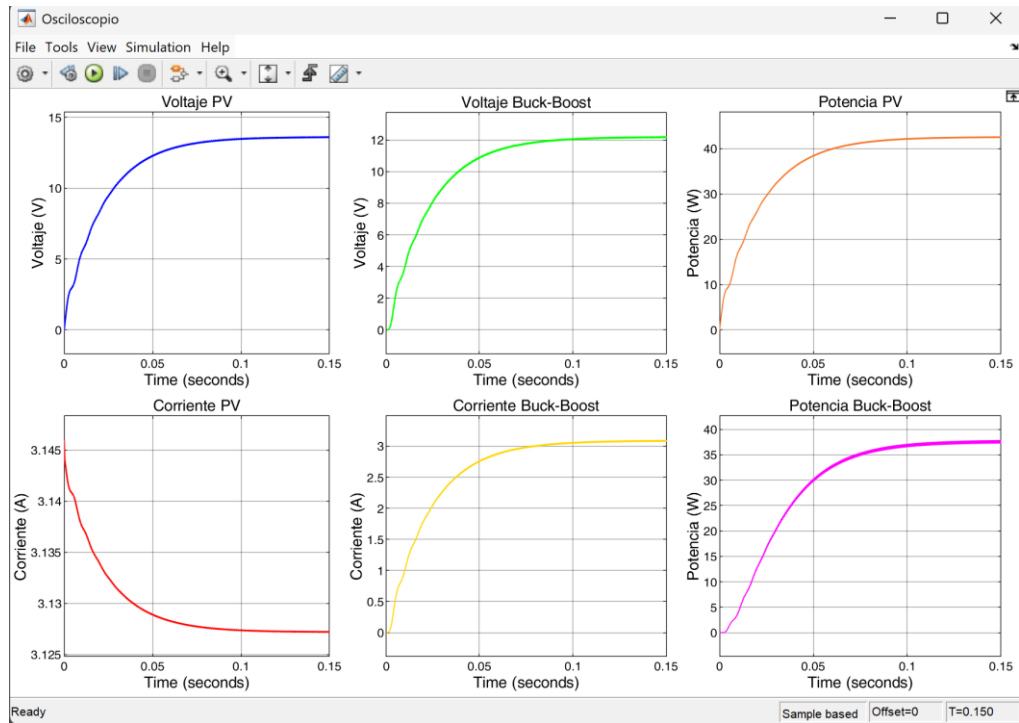


Figura 87. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

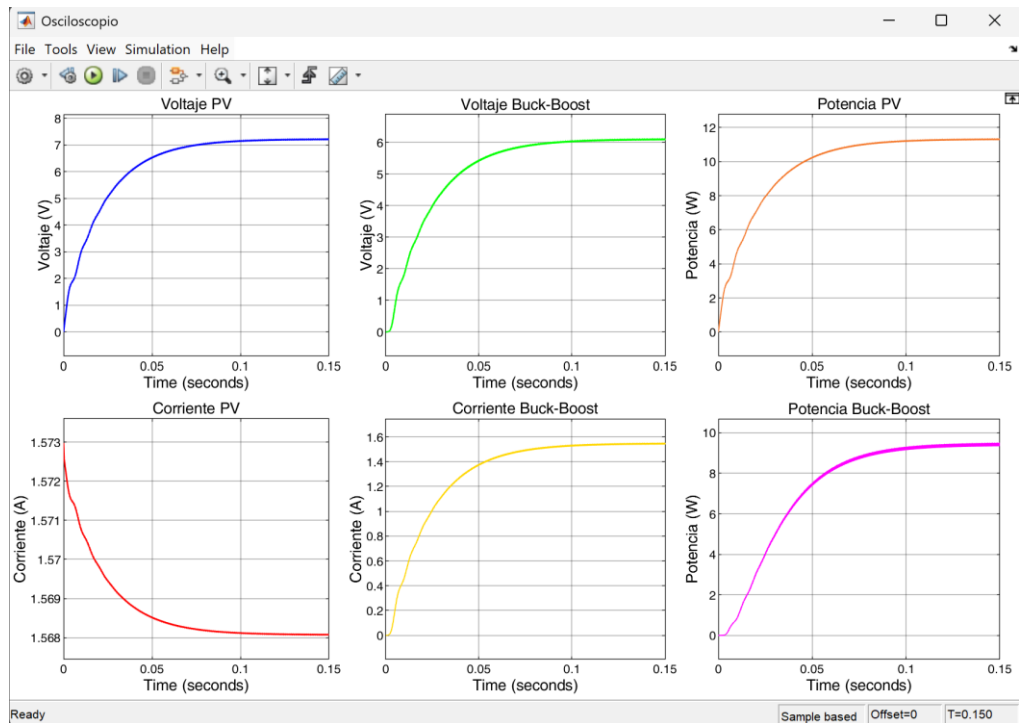


Figura 88. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas con la ejecución de la simulación donde se ha considerado una irradiancia de 1000 W/m^2 y distintos niveles de temperatura. La imagen de la Figura 89 muestra el resultado con una temperatura establecida en 40° C , en la Figura 90 se observa las gráficas al haber considerado una temperatura de 55° C , y finalmente, en la Figura 91 se muestran las gráficas resultantes al definir una temperatura de 70° C .

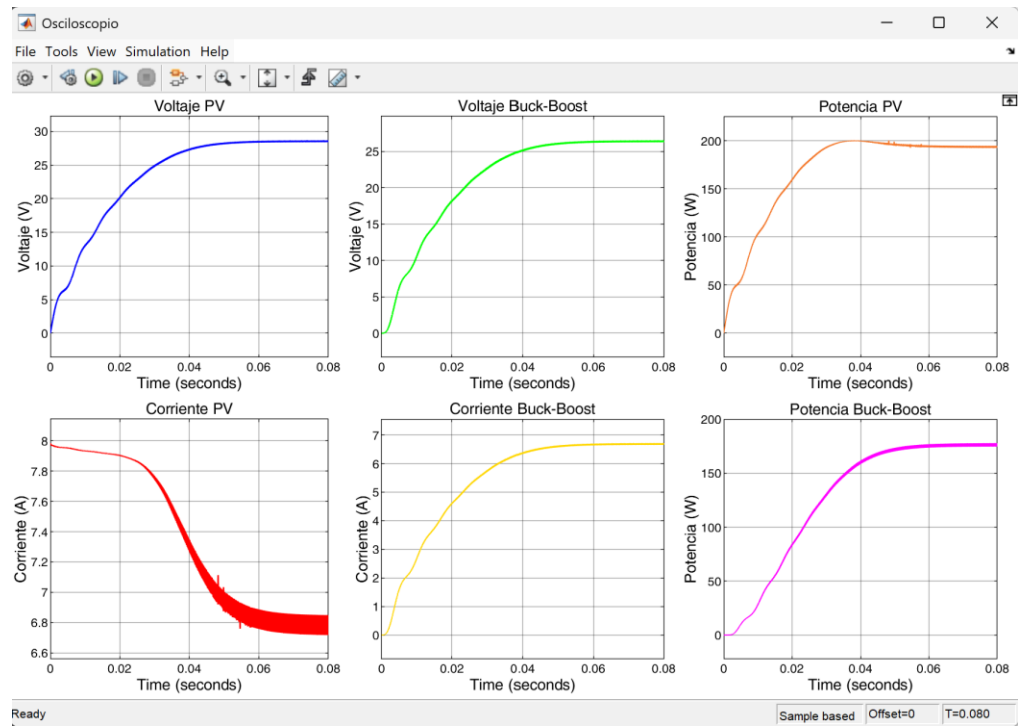


Figura 89. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

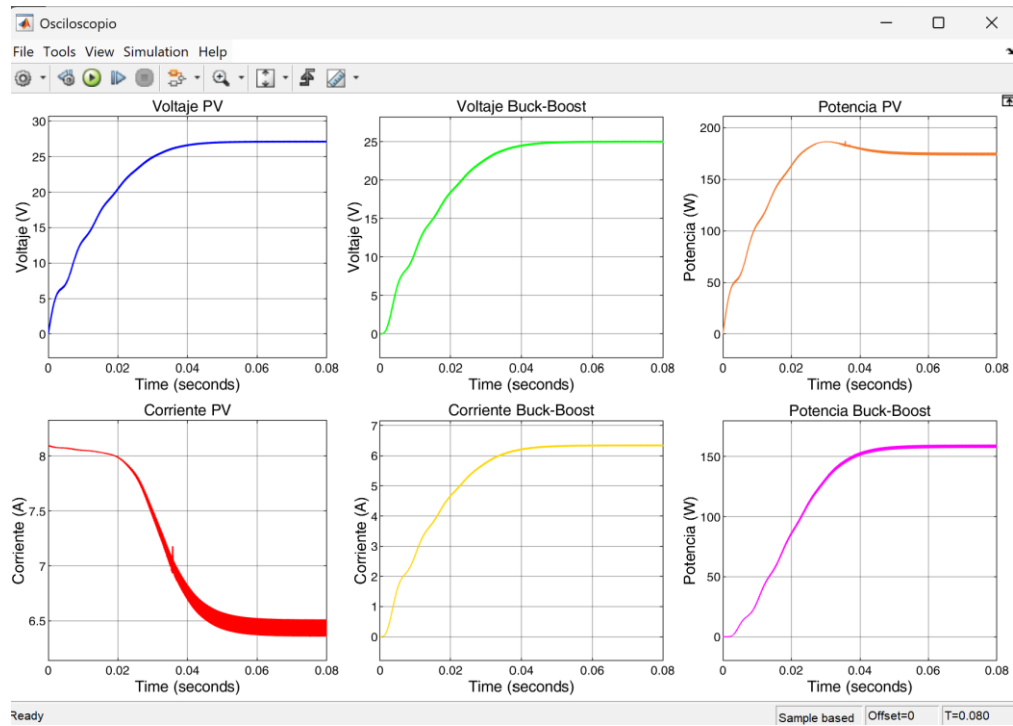


Figura 90. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

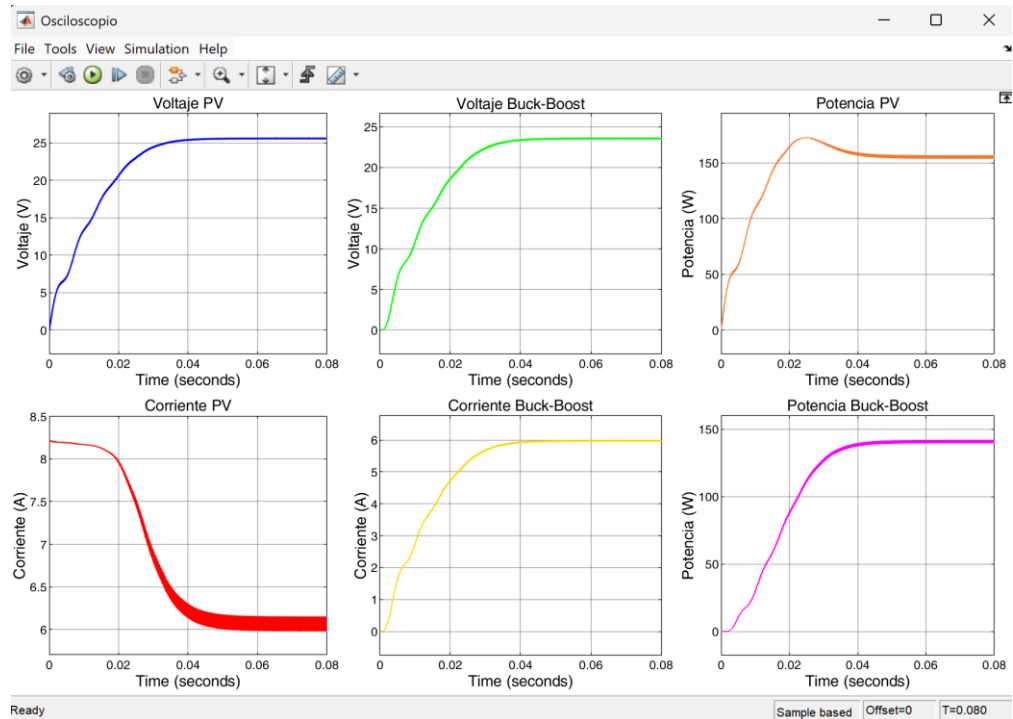


Figura 91. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

En la Tabla 16. se resumen los resultados de la evaluación del desempeño del controlador difuso bajo cada nivel de irradiancia y temperatura especificado.

Tabla 16. Resumen de los resultados obtenidos al ejecutar la simulación del controlador MPPT número 2 (FLC).

Algoritmo de MPPT	Irradiancia (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$)	Diferencia respecto al MPP (%)	Eficiencia de seguimiento del MPP	Eficiencia del convertidor (%)	Tiempo de estabilización (segundos)
Algoritmo N° 2 (FLC)	1000 y 25	1 %	99 %	91.37 %	0.07
	800 y 25	5.82 %	94.18 %	91.47 %	0.11
	600 y 25	28.19 %	71.80 %	89.68 %	0.13
	400 y 25	50.60 %	49.39 %	88.82 %	0.13
	200 y 25	73.36 %	26.63 %	83.53 %	0.13
	1000 y 40	3.62 %	96.37 %	91.90 %	0.06
	1000 y 55	7.10 %	92.89 %	92.48 %	0.05
	1000 y 70	9.04 %	90.95 %	88.97 %	0.05

6.4.2 Algoritmo de MPPT número 3 (FLC)

En este apartado se presentan los resultados de la simulación del sistema fotovoltaico que integra el convertidor *Buck-Boost* y el algoritmo de MPPT número 3 (FLC). Las pruebas de ejecución son realizadas considerando irradiancias de 1000, 800, 600, 400 y 200 W/m^2 para una temperatura de 25 $^{\circ}C$. Otras pruebas se realizan considerando una misma irradiancia (1000 W/m^2) y niveles de temperatura de 25, 40, 55 y 70 $^{\circ}C$. Los resultados de estas pruebas se pueden visualizar en la Tabla 17, donde se encuentra de forma detallada los valores de voltaje, corriente y potencia, obtenidos en el sistema fotovoltaico y en la salida del convertidor. Estos datos son contrastados con los valores vistos en la Tabla 10 y Tabla 12, que indican el punto donde se alcanza la máxima potencia para cada variación de irradiancia y temperatura.

Tabla 17. Resultados obtenidos al ejecutar la simulación del algoritmo de MPPT número 3 (FLC).

Irradiancia (W/m^2) y temperatura (° C)	Ejecución de la simulación (Figura)	Voltaje (V) y Corriente (A) del sistema fotovoltaico	Voltaje (V) y Corriente (A) del convertidor	Potencia (W) del sistema fotovoltaico	Potencia (W) del convertidor	Potencia (W) en el <i>MPP</i>
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 92	28.66 V 7.422 A	11.52 V 2.92 A	212.7	33.64	213.15
Irradiancia: 800 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 93	29.43 V 5.834 A	11.78 V 2.987 A	171.7	35.21	171.798
Irradiancia: 600 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 94	28.93 V 4.471 A	11.56 V 2.93 A	129.3	33.88	129.509
Irradiancia: 400 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 95	29.78 V 2.885 A	13.86 V 3.513 A	85.94	48.69	86.2652
Irradiancia: 200 W/m^2 Temperatura: 25° C	Figura 96	23.69 V 1.555 A	11.41 V 2.891 A	36.83	32.98	42.4619
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 40° C	Figura 97	26.7 V 7.479 A	10.86 V 2.753 A	199.7	29.91	199.837
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 55° C	Figura 98	24.93 V 7.475 A	9.914 V 2.513 A	186.3	24.91	186.341
Irradiancia: 1000 W/m^2 Temperatura: 70° C	Figura 99	23.33 V 7.386 A	8.926 V 2.262 A	172.3	20.19	172.494

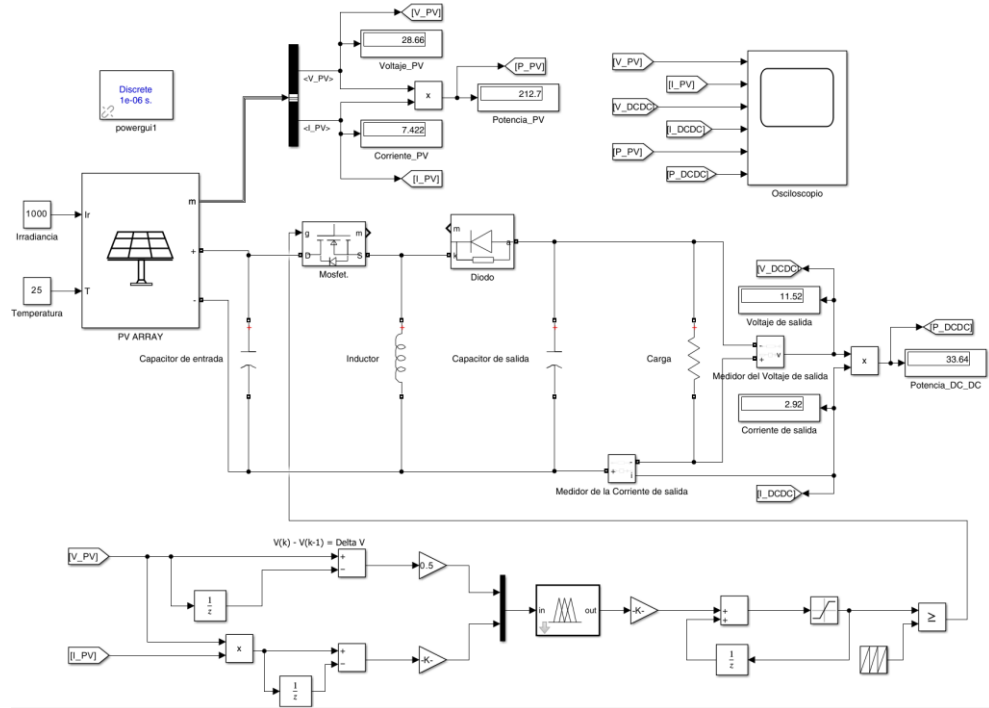


Figura 92. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de 25 °C.

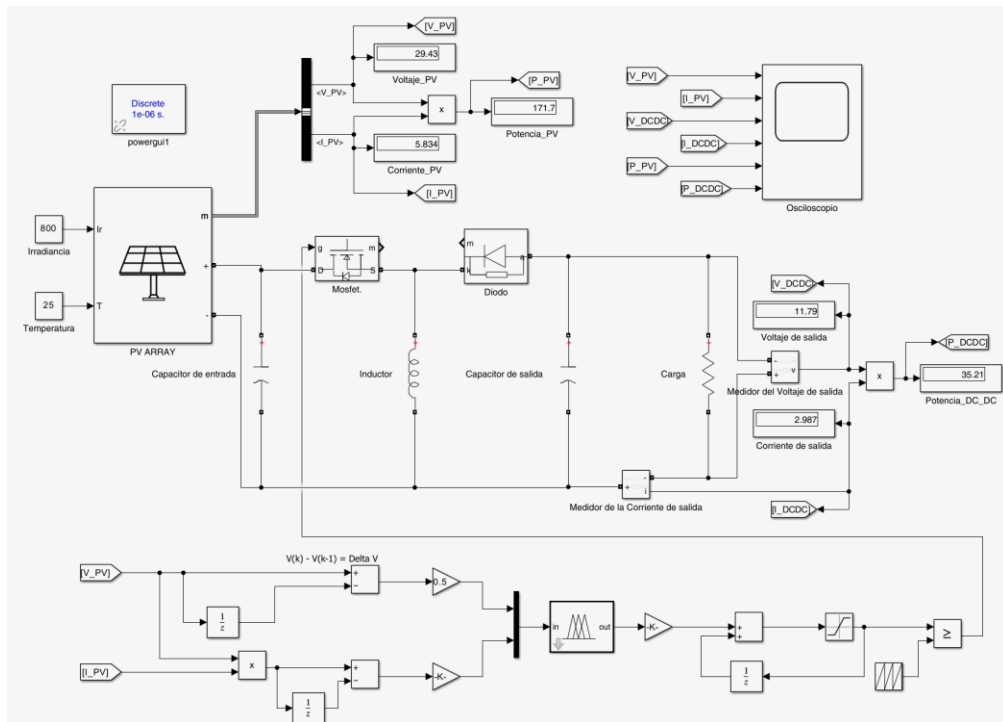


Figura 93. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 800 W/m² y una temperatura de 25 °C.

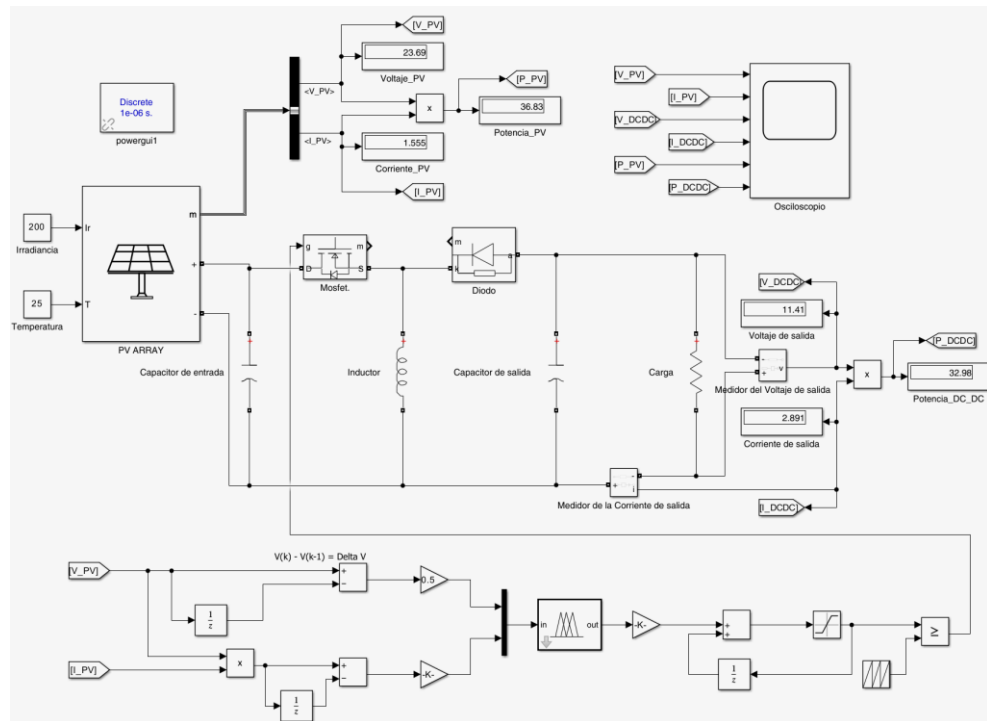


Figura 96. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 200 W/m² y una temperatura de 25 °C.

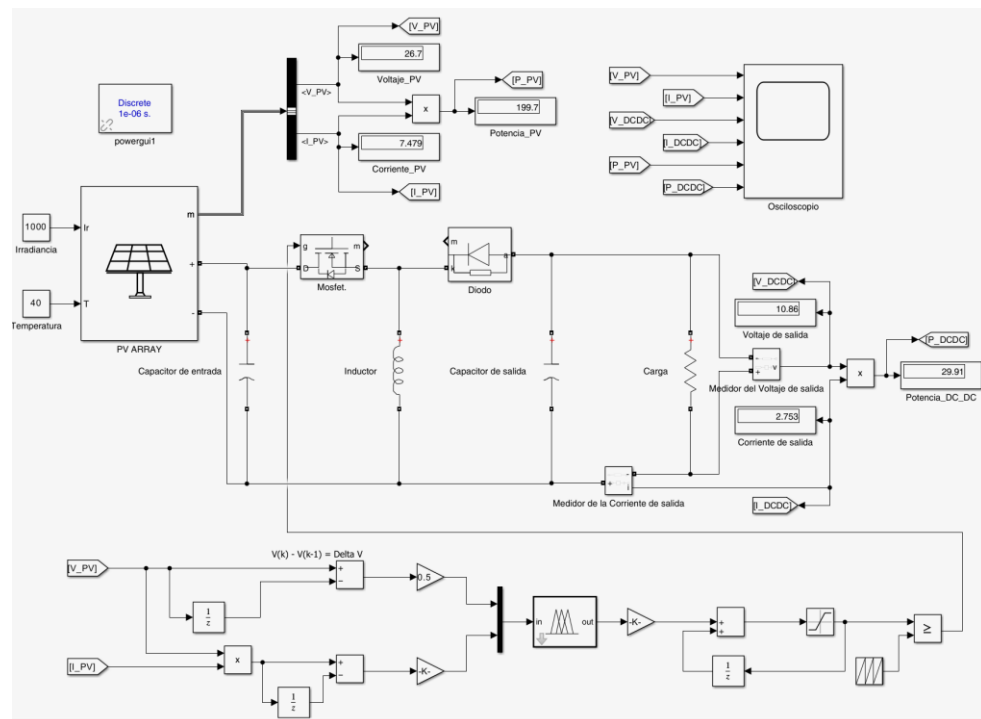


Figura 97. Resultados del controlador MPPT número 3, al establecer una irradiancia de 1000 W/m² y una temperatura de 40 °C.

En las siguientes imágenes se visualizan las gráficas resultantes de la ejecución de cada una de las simulaciones vistas correspondientes al *MPPT* número 2. En estas gráficas se puede observar el comportamiento del controlador (*FLC*) durante el instante inicial de la simulación, para cada nivel de irradiancia y temperatura especificado.

La imagen de la Figura 100 muestra las gráficas para una irradiancia de 1000 W/m^2 , la Figura 101 muestra el resultado de establecer la irradiancia en 800 W/m^2 , la Figura 102 contiene las gráficas obtenidas bajo una irradiancia de 600 W/m^2 , en la imagen de la Figura 103 se observa el resultado de establecer una irradiancia de 400 W/m^2 , y por último, en la Figura 104 se encuentran los resultados de ejecutar la simulación con una irradiancia de 200 W/m^2 . Cabe mencionar que todas estas gráficas han sido obtenidas bajo una misma temperatura de 25°C .

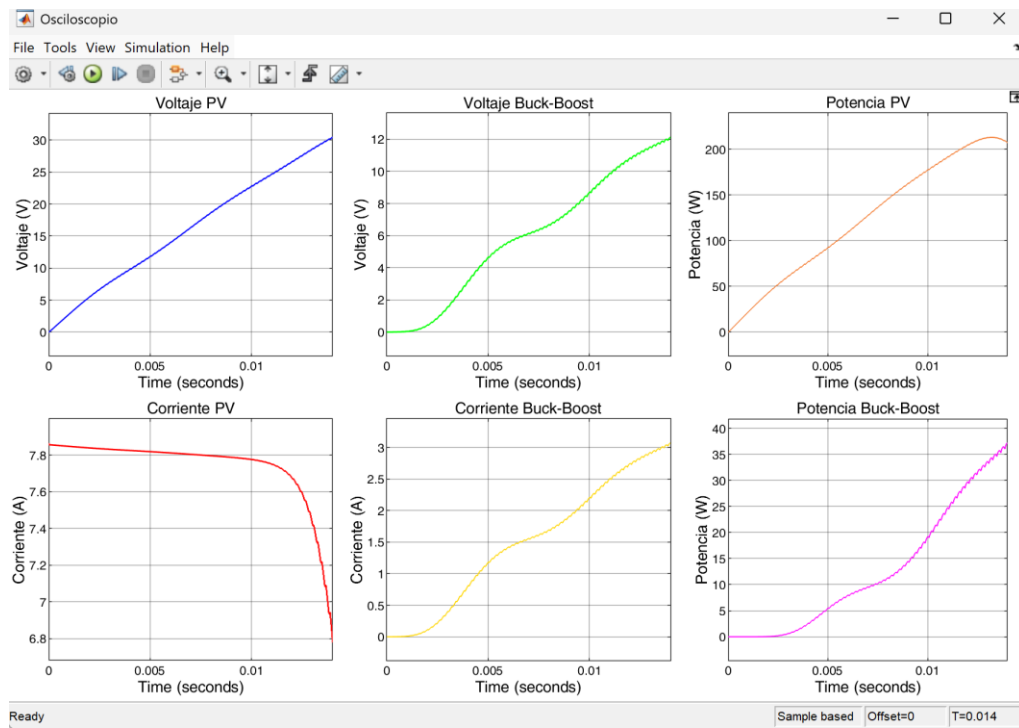


Figura 100. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

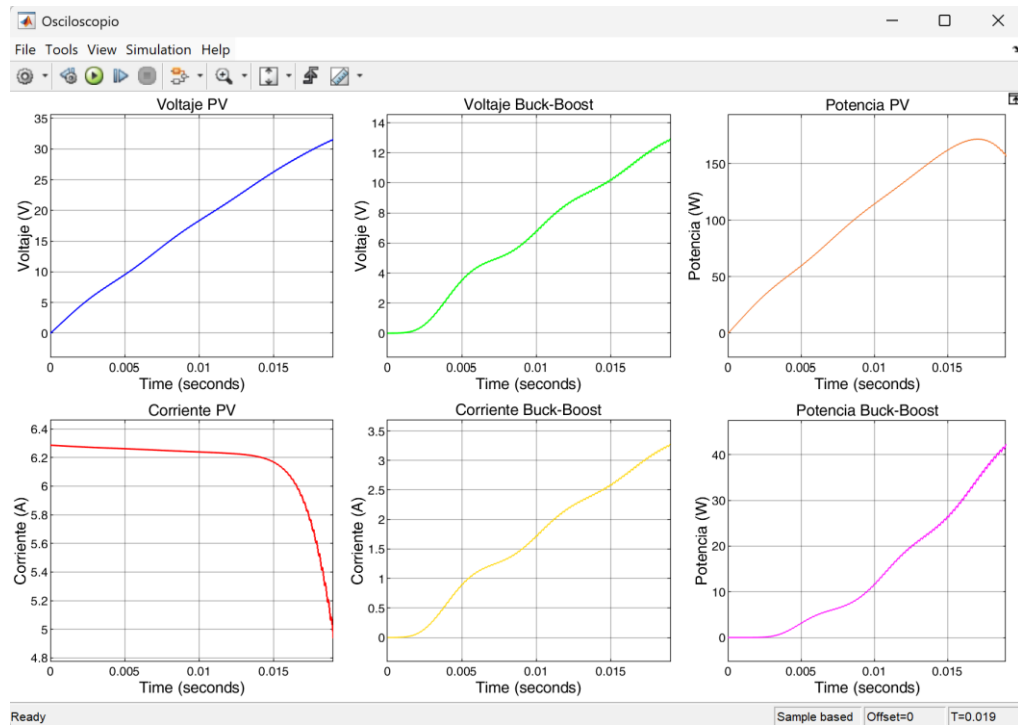


Figura 101. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

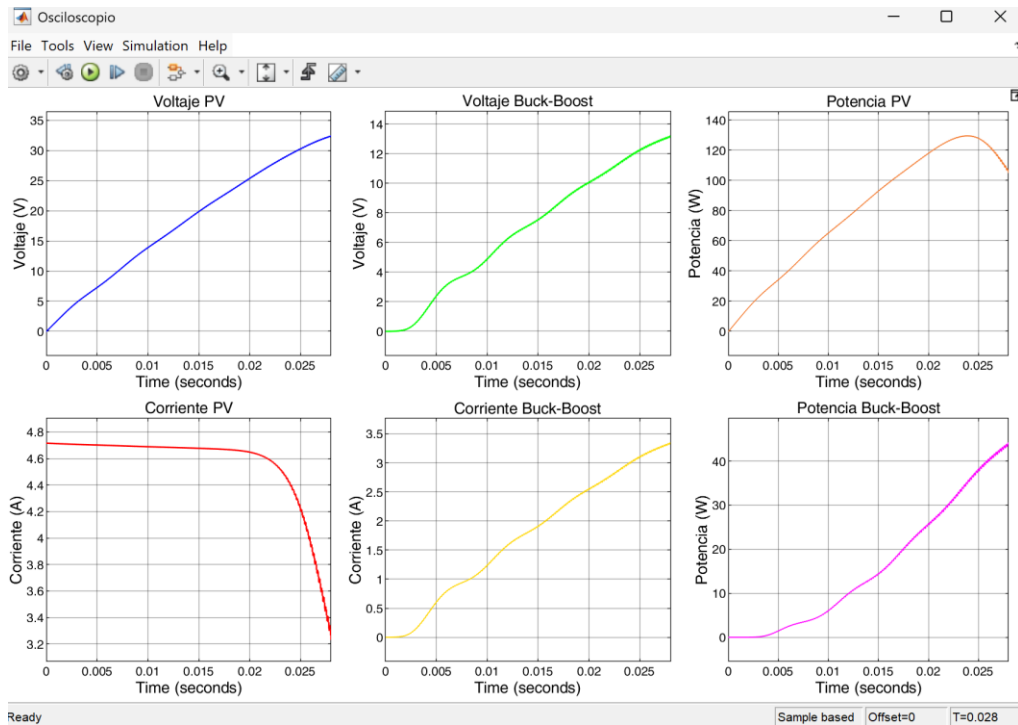


Figura 102. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

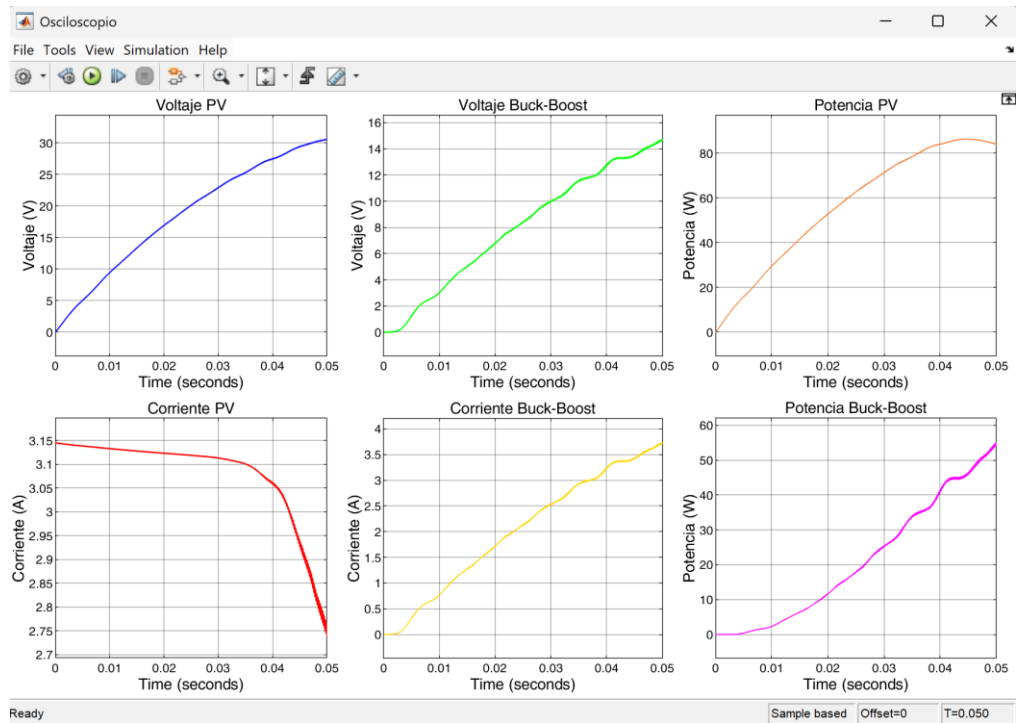


Figura 103. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

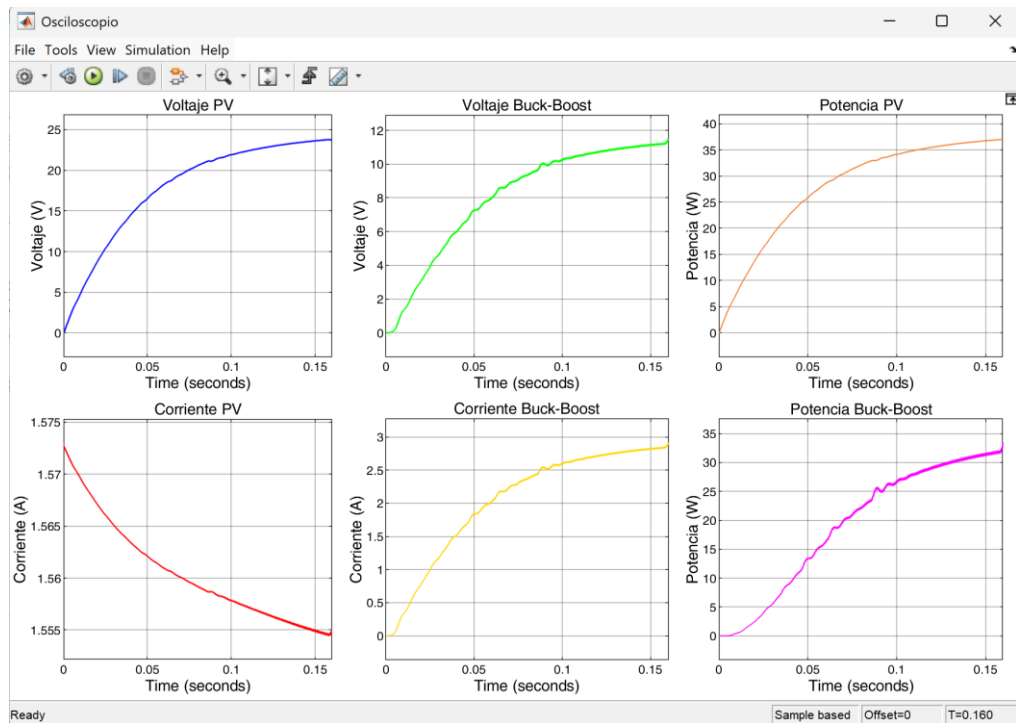


Figura 104. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor.

Como parte de los resultados, también se incluyen las gráficas resultantes de haber ejecutado las simulaciones con una misma irradiancia de 1000 W/m^2 , y considerando una temperatura de 40° C Figura 105, 55° C Figura 106, y 70° C Figura 107.

Con las gráficas obtenidas se obtienen métricas que permiten analizar las capacidades del *FLC*, estos datos se muestran en la Tabla 18.

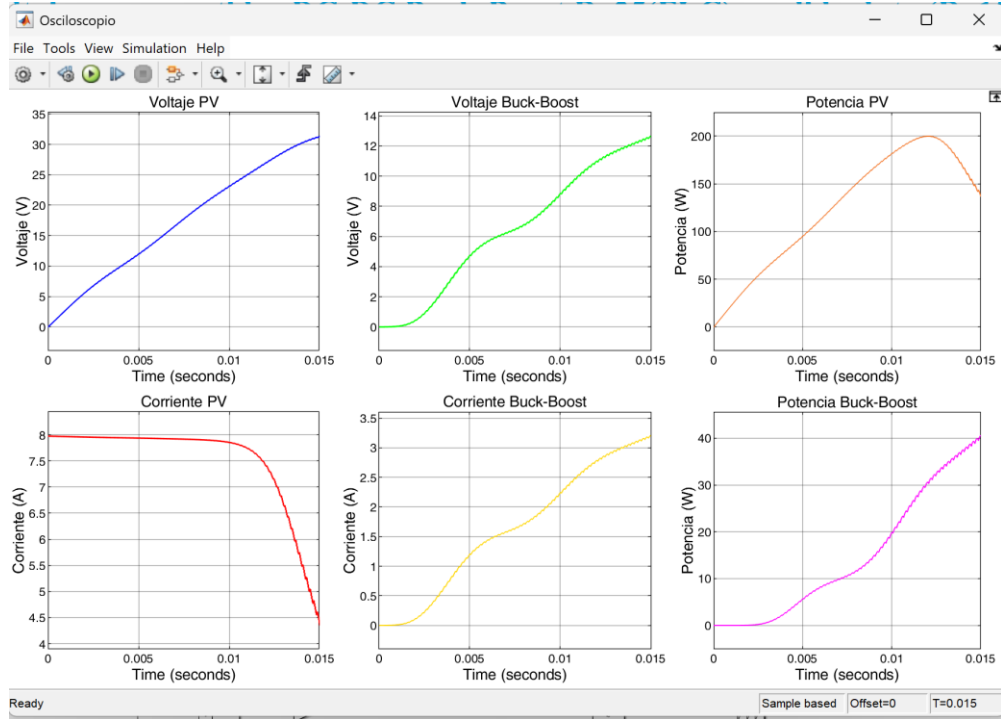


Figura 105. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor

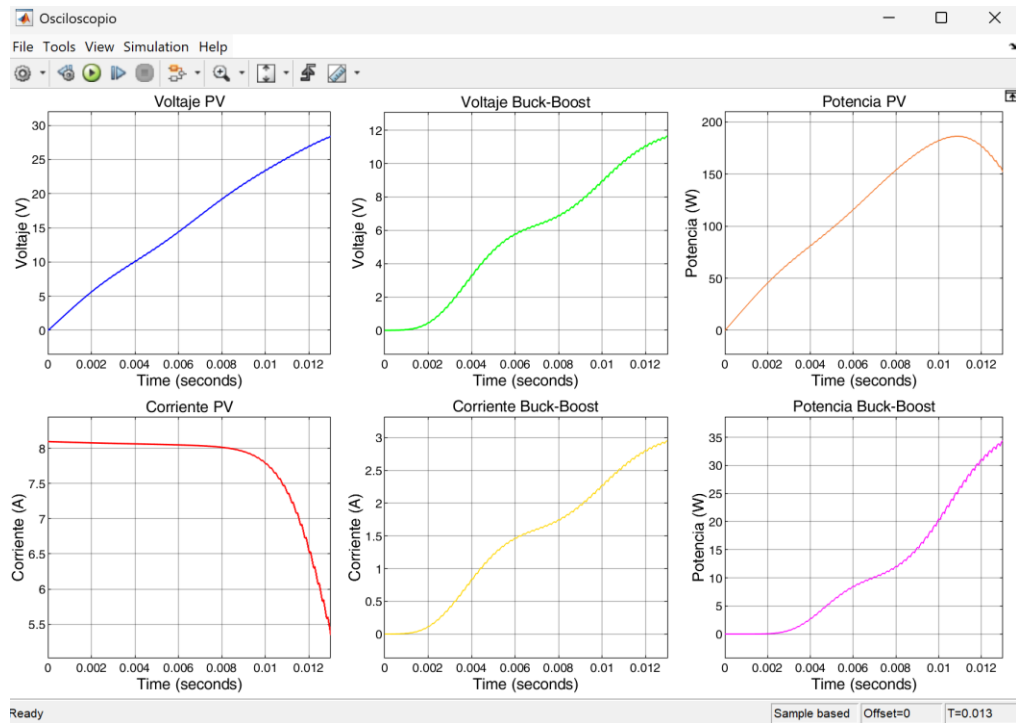


Figura 106. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor

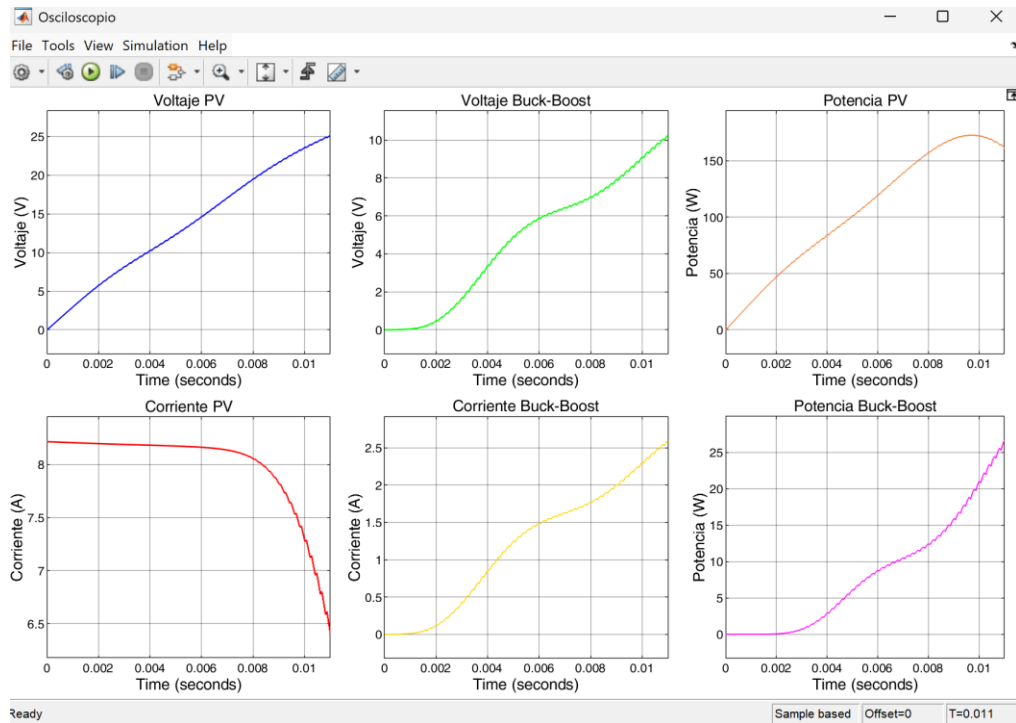


Figura 107. Gráficas de voltaje, corriente y potencia, del panel y del convertidor

En la Tabla 18 se observan las métricas que definen el comportamiento del algoritmo al ser evaluado bajo distintos niveles de irradiancia y temperatura.

Tabla 18. Resumen de resultados de simulación del controlador MPPT número 3 (FLC).

Algoritmo de MPPT	Irradiancia (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$)	Diferencia respecto al MPP (%)	Eficiencia de seguimiento del MPP	Eficiencia del convertidor (%)	Tiempo de estabilización (segundos)
Algoritmo N° 3 (FLC)	1000 y 25	0.21 %	99.78 %	15.81 %	0.015
	800 y 25	0.05 %	99.94 %	20.50 %	0.017
	600 y 25	0.16 %	99.83 %	26.20 %	0.024
	400 y 25	0.37 %	99.62 %	56.65 %	0.043
	200 y 25	13.26 %	86.73 %	89.54 %	0.16
	1000 y 40	0.06 %	99.93 %	14.97 %	0.012
	1000 y 55	0.02 %	99.97 %	13.37 %	0.011
	1000 y 70	0.11 %	99.88 %	11.71 %	0.009

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones desarrolladas en *Matlab/Simulink*, permitieron observar el comportamiento que tiene en conjunto todo el sistema fotovoltaico al implementar el controlador *MPPT*, y de esta manera validar su funcionamiento bajo las condiciones de operación establecidas. La integración del algoritmo para realizar el rastreo del punto de máxima potencia permite comprobar el rendimiento integral del sistema fotovoltaico y de cada uno de los elementos que lo conforman; de esta manera, se valida el funcionamiento de los algoritmos bajo las condiciones de operación establecidas.

El análisis y presentación de resultados de forma individual, para el panel fotovoltaico, las distintas topologías de convertidores *DC-DC* y el sistema integrado con el convertidor *Buck-Boost (FLC)* y convertidor *Boost* para el método de *P&O*, sirve como base para comprender la interacción entre estos componentes y la manera en la que cada

uno de estos elementos han sido simulados, para saber cómo es que influyen en el voltaje, corriente y potencia que puede producir el sistema fotovoltaico. Además de considerar la importancia que tiene el ajuste del ciclo de trabajo para la generación de la energía que se pretende conducir hacia la carga conectada a todo este sistema.

La integración de los controladores *MPPT*, permite cerrar el lazo de control del sistema fotovoltaico y evaluar su capacidad para estar realizando el seguimiento del punto de máxima potencia ante las distintas condiciones de irradiancia y temperatura. A partir de las simulaciones realizadas en *Matlab/Simulink* se obtuvieron las métricas necesarias que permiten identificar las capacidades de cada algoritmo. Los parámetros considerados incluyen la precisión en el seguimiento del *MPP*, el error relativo porcentual, el tiempo de respuesta y la eficiencia del convertidor implementado.

Como resumen de todos los resultados, en la Tabla 19 se visualizan los tres algoritmos que fueron analizados y comparados. En esta tabla se aprecia, sobre todo, la eficiencia alcanzada por cada algoritmo de *MPPT*.

Tabla 19. Comparación de la eficiencia de seguimiento del MPP entre los tres algoritmos de MPPT.

Algoritmo de <i>MPPT</i>	Valores de prueba	<i>MPPT</i> N° 1 (<i>P&O</i>)	<i>MPPT</i> N° 2 <i>FLC</i>	<i>MPPT</i> N° 3 <i>FLC</i>
Irradiancia (W/m^2) y temperatura ($^{\circ}C$)	1000 y 25	99.69 %	99 %	99.78 %
	800 y 25	91.03 %	94.18 %	99.94 %
	600 y 25	69.58 %	71.80 %	99.83 %
	400 y 25	47.65 %	49.39 %	99.62 %
	200 y 25	25.81 %	26.63 %	86.73 %
	1000 y 40	99.33 %	96.37 %	99.93 %
	1000 y 55	98.63 %	92.89 %	99.97 %
	1000 y 70	96.00 %	90.95 %	99.88 %

CONCLUSIONES

Como parte del análisis de los algoritmos *Perturb & Observe (P&O)* y *Fuzzy Logic Controller (FLC)*, ambos métodos han sido comparados con el propósito de identificar las capacidades de cada uno, así como su eficiencia en el seguimiento del punto de máxima potencia, el porcentaje de error, la eficiencia del convertidor y el tiempo de respuesta.

Los algoritmos fueron simulados y contrastados bajos las mismas condiciones, con las mismas especificaciones definidas en la configuración del panel fotovoltaico y los mismos cálculos asociados al voltaje de entrada y voltaje de salida que debe regular el convertidor. Como única diferencia, para el algoritmo de *P&O* se emplea un *Boost Converter* y para el *FLC* se emplea un *Buck-Boost Converter*, debido a que así se obtuvieron los mejores resultados en la búsqueda del *MPP*. Ambos convertidores fueron simulados también de forma individual en dos condiciones (una con una fuente ideal y la otra con el sistema fotovoltaico conectado como fuente). Los resultados demostraron que ambos trabajan adecuadamente regulando el voltaje aplicado a la carga.

Con los resultados de la simulación del algoritmo de *MPPT* con el método *P&O*, se puede deducir que en un principio a niveles de irradiancia altos y con una temperatura de 25 °C, el algoritmo tiene buena respuesta. Con una irradiancia de 1000 W/m^2 la eficiencia de seguimiento de esta técnica es de 99.69% y con 800 W/m^2 de irradiancia se tiene una eficiencia de 91.03%. Sin embargo, a niveles más bajos; irradiancia de 600 W/m^2 , 400 W/m^2 y 200 W/m^2 se alcanza una eficiencia de 69.58%, 47.65%, 25.81% respectivamente. Esto indica que el algoritmo es preciso a niveles de irradiancia altos, pero a niveles más bajos la eficiencia comienza a disminuir de manera significativa.

En la simulación de este mismo algoritmo con un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 y con temperaturas variables de 40, 55 y 70 °C, los resultados se encuentran entre el 96% para la temperatura más alta y 98.63% para la temperatura más baja, con un valor intermedio de 98.63% para una temperatura de 55°. Esto refleja que el algoritmo de *P&O* presenta un buen comportamiento en condiciones de temperatura variables. Una limitante

observada de este algoritmo, a diferencia de los algoritmos de lógica difusa, es que se presentan demasiadas oscilaciones alrededor del *MPP*, cuando se realizan variaciones tanto en irradiancia como en temperatura.

En cuanto a la eficiencia con el convertidor agregado a la simulación donde se integra al *P&O*, los resultados muestran que se logra alcanzar una buena eficiencia a distintos niveles de irradiancia y temperatura, obteniendo un porcentaje de 98.63% (con valores de 1000 W/m^2 y 55°) para el valor más alto y un porcentaje de 84.35% (1000 W/m^2 y 70°) para el valor más bajo. Por su parte, el tiempo que tardó el algoritmo en localizar el *MPP* en la simulación para distintos niveles de irradiancia y temperatura es mucho menor a un segundo en todos los casos, por lo que el tiempo de estabilización es el esperado para los resultados de esta técnica de *P&O*.

Por otra parte, en la simulación del algoritmo de *MPPT* número 2, donde emplea al *FLC* como controlador para el sistema fotovoltaico, los resultados obtenidos para niveles de irradiancia definidos desde 200 W/m^2 hasta 1000 W/m^2 , y considerando una misma temperatura definida en 25°C , se obtuvo que la eficiencia más alta es del 99%, al establecer una irradiancia de 1000 W/m^2 . A una irradiancia de 800 W/m^2 la eficiencia es de 94.18% y todavía con un nivel de 600 W/m^2 se alcanza una eficiencia de 71.80%. Con las pruebas ejecutadas, al establecer niveles de irradiancia más bajos (400 W/m^2 y 200 W/m^2) se obtiene como resultado valores de 49.39% y 26.63%.

Ahora bien, al simular condiciones donde la temperatura es la que varía entre 40 y 70°C , se obtiene una eficiencia superior al 90%. Con el mismo nivel de irradiancia para todos los casos (1000 W/m^2) y con niveles de temperatura de 40 , 55 y 70°C , se alcanza una eficiencia de 96.37%, 92.89% y 90.95%, respectivamente. Esto demuestra que el algoritmo realiza de forma adecuada el seguimiento del *MPP* bajo distintos niveles de temperatura, acercándose al punto donde de máxima potencia de manera efectiva.

En cuanto a la eficiencia obtenida para el desempeño del convertidor se obtuvieron valores que resultan ser superiores al 83%, siendo 92.48% el valor más alto alcanzado

para una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$, y el valor más bajo (83.53%) corresponde a una irradiancia de 200 W/m^2 y temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. El tiempo de estabilización del algoritmo es menor a un segundo, obteniendo como valor más bajo un tiempo de 0.05 segundos y como valor más alto un tiempo de 0.13 segundos.

En la siguiente fase, correspondiente a los resultados de la simulación del algoritmo de *MPPT* número 3, se muestra que el controlador difuso es capaz de alcanzar una eficiencia de hasta 99.97% con un nivel de irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Para otros casos donde se ha considerado una misma temperatura (25°) y distintos niveles de irradiancia, los resultados muestran una eficiencia superior al 99% y solamente un caso donde es cercana al 87%. En concreto, para una irradiancia de 1000 W/m^2 la eficiencia es de 99.78%, y para irradiancias de 800, 600, 400 y 200 W/m^2 , se obtuvieron porcentajes de 99.94%, 99.83%, 99.62%, 86.73%, respectivamente.

La eficiencia obtenida para simulaciones donde se considera un mismo nivel de irradiancia (1000 W/m^2) y distintos niveles de temperatura, se obtuvo como resultado los siguientes valores: para una temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ se obtuvo una eficiencia de 99.93%, con $55 \text{ }^\circ\text{C}$ la eficiencia es de 99.97% y para $70 \text{ }^\circ\text{C}$ la eficiencia alcanzada es de 99.88°. Estos resultados demuestran que el algoritmo ofrece una eficiencia de seguimiento del *MPP* superior a la del algoritmo de *P&O*.

En cuanto a la eficiencia reportada para el funcionamiento del convertidor, el valor más alto alcanzado es de 89.54% y el valor mínimo es de 11.71%. En este caso, los valores de eficiencia del convertidor para distintas condiciones de irradiancia y temperatura son inferiores a los de los otros dos algoritmos analizados. Estos resultados permiten concluir que no se encontró una técnica que funcione de forma universal en todos los casos posibles ni que ofrezca el mejor desempeño en todas las condiciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos durante la ejecución de los algoritmos *MPPT* número 2 y número 3 (ambos con *FLC*), se puede deducir que su tiempo de respuesta para la búsqueda del punto de máxima potencia es el esperado, inferior a un

segundo. Para el *MPPT* número 2, entre menor sea la irradiancia, el *MPP* calculado por el algoritmo se aleja cada vez más del resultado que se pretende obtener. Por otro lado, cuando la variable que se está modificando es la temperatura, el *MPP* localizado para distintos niveles de temperatura ofrece una mejor aproximación en comparación con los valores esperados.

En la ejecución del algoritmo de *MPPT* número 3, los resultados demuestran que el controlador difuso puede localizar de forma precisa el punto de máxima potencia, a distintos niveles de irradiancia, desde 200 W/m^2 hasta 1000 W/m^2 . El algoritmo también muestra una buena precisión en el rastreo del *MPP* bajo distintas condiciones de temperatura. Es bastante preciso y tiene la velocidad esperada, pero su principal limitante es la baja eficiencia del *Buck-Boost Converter* en relación con la potencia de salida del sistema fotovoltaico.

De este modo, se concluye que el *FLC* puede ofrecer una precisión muy alta para la localización del punto de máxima potencia, pero la eficiencia obtenida con el convertidor resulta muy baja en algunos casos; en cambio, en el algoritmo de *P&O*, la eficiencia alcanzada es mayor, pero el *MPP* localizado no se acerca lo suficiente al verdadero punto donde se sitúa el *MPP* de acuerdo con las especificaciones del panel fotovoltaico.

Por lo tanto, como continuación de este estudio, se propone un algoritmo de *MPPT* que combine ambas técnicas (*FLC* y *P&O*). Con esto se esperaría poder compensar la baja eficiencia reportada en ciertos casos, donde no se han podido alcanzar los valores de *MPP* esperados; es decir, para niveles de irradiancia y temperatura donde la eficiencia de seguimiento es baja y donde la eficiencia del convertidor no es lo suficientemente alta. Adicionalmente, es importante considerar la demanda energética intrínseca de los componentes del sistema (pérdidas internas), lo que implica que no se puede aprovechar al 100% la energía extraída por el panel. Por ello, otra área de oportunidad es el uso de convertidores más avanzados.

REFERENCIAS

Alén Space, 2025. *Diseño Fabricación y operación de pequeños satélites*. [En línea]

Available at: <https://alen.space/es/guia-basica-de-nanosatelites/>
[Último acceso: 16 enero 2025].

Asif, R. M. y otros, 2020. Design and analysis of robust fuzzy logic maximum power point tracking based isolated photovoltaic energy system. *Engineering Reports*, 2(9), p. 16.

Baramadeh, M. Y., Abouelela, M. A. A. & Alghuwainem, S. M., 2021. Maximum Power Point Tracker Controller Using Fuzzy Logic Control with Battery Load for Photovoltaics Systems. *Smart Grid and Renewable Energy*, Issue 12, pp. 163-181.

Behar Rivero, D. S., 2008. *Metodología de la Investigación*. Madrid: Shalom.

Belhadj, S. M. y otros, 2025. Control of multi-level quadratic DC-DC boost converter for photovoltaic systems using type-2 fuzzy logic technique-based MPPT approaches. *Journal Heliyon*, Volumen 11.

Bellini, E., 2020. *MPPT de lógica difusa para mejorar el rendimiento del sistema fotovoltaico*. [En línea]

Available at: <https://www.pv-magazine-latam.com/2020/07/31/mppt-de-logica-difusa-para-mejorar-el-rendimiento-del-sistema-fotovoltaico/>
[Último acceso: 20 diciembre 2024].

Benitez P., J. C., 2025. *Conjuntos difusos*. [En línea]
Available at: <https://es.slideshare.net/slideshow/utp-sirns17-conjuntos-difusos-i-20122/15525847#1>

[Último acceso: 21 enero 2025].

Bollipo, y otros, 2020. Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 14(9), pp. 1433-1452.

Bollipo, y otros, 2020. Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation. *IET Renewable Power Generation*, 14(9), pp. 1433-1452.

Boonraksa, P. y otros, 2022. *Design and Simulation of Fuzzy logic controller based MPPT of PV module using Matlab Simulink*. s.l.:IEEE Explore.

Çakmak, F., Aydoğmuş, Z. & Tür, M. R., 2025. Analyses of PO-Based Fuzzy Logic-Controlled MPPT and Incremental Conductance MPPT Algorithms in PV Systems. *Energies*, 18(233).

Cambio Energético, 2024. *Coeficiente de temperatura de un panel solar: ¿es importante tenerlo en cuenta?*. [En línea] Available at: <https://www.cambioenergetico.com/blog/coeficiente-temperatura-panel-solar/> [Último acceso: 28 diciembre 2024].

Cervone, A. y otros, 2022. *Space Micropropulsion for Nanosatellites Progress, Challenges and Future*. 1st ed. China: Matthew Deans.

Cheng, P.-C. y otros, 2015. Optimization of a Fuzzy-Logic-Control-Based MPPT Algorithm Using the Particle Swarm Optimization Technique. *Energies*, Volumen 8, p. 23.

Cogollo, J., 2019. *¿Cómo se genera la energía solar fotovoltaica?*. [En línea] Available at: <https://youtu.be/q5bMAz4NK0c?si=6h86sosX3ISzpjH> [Último acceso: 27 diciembre 2024].

D'Alessio, L. A., González, L. G. & Cáceres, R. O., 2014. Design and Construction of Small Power Boost Converter with Educational and Research Purposes. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 6(2), pp. 15-20.

Divya, K. C. & Østergaard, J., 2009. Battery energy storage technology for power systems An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4), pp. 511-520.

Djamel Eddine, K. K. y otros, 2024. Comprehensive Analysis and Design of Electrical Power Systems for Nanosatellite Platforms: A Focus on Robust MPPT Control Using Sliding Mode Control Method. *International Journal of Energy Research*, 2024(4879696), p. 32.

Farfán, R. F., Cadena, C. A. & Villa, L. T., 2015. Experiencia en el uso de la Lógica Difusa para el Control del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en

Convertidores para Módulos Fotovoltaicos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 12(2), pp. 208-217.

Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G. & Vitelli, M., 2005. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(4), pp. 963-973.

González, L. G., Farfán, E. & Zamora, H., 2015. Diseño de un banco de pruebas para paneles solares fotovoltaicos, mediante un convertidor reductor - elevador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(1), pp. 14-19.

Grossi Gallegos, H., 2002. *Notes on Solar Radiation (en español)*. [En línea] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/311375862> [Último acceso: 28 diciembre 2024].

Grupo Iberdrola, 2024. *Células fotovoltaicas: conoce su evolución, sus diferentes tipos y las últimas innovaciones*. [En línea] Available at: <https://www.iberdrola.com/innovacion/celulas-fotovoltaicas-fotoelectronica/> [Último acceso: 29 diciembre 2024].

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P., 1997. *Metodología de la Investigación*. Naucalpan(Estado de México): Mc Graw-Hill.

Hwu, K. I. & Peng, T. J., 2012. A Novel Buck–Boost Converter Combining KY and Buck Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(5), pp. 2236-2241.

INESDI Business Techschool, 2024. *Aplicaciones de la lógica difusa en la inteligencia artificial*. [En línea] Available at: <https://www.inesdi.com/blog/logica-difusa/> [Último acceso: 13 diciembre 2024].

Juan, S., 2020. *¿Qué es la irradiancia solar?*. [En línea] Available at: <https://keeui.com/2020/08/03/que-es-la-irradiancia-solar/> [Último acceso: 28 diciembre 2025].

Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. & Voulgaris, N. C., 2001. Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 16(1), pp. 46-54.

Krim, S. A., Krim, F., Afghoul, H. & Abdelmalek, F., 2024. An Enhanced Perturb and Observe MPPT for Photovoltaic Systems Based on Fuzzy Step. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 57(2), pp. 363-372.

Lara Ruiz, J., 2022. MPPT. ¿Qué es un Maximum power point tracker?. [En línea] Available at: <https://keeui.com/2022/05/23/mppt-que-es-un-maximum-power-point-tracker/> [Último acceso: 29 diciembre 2024].

Lázaro, A. R., 2020. *Control and simulations of a power supply for nanosatellites*. Madrid: Tesis de Ingeniería en Tecnologías Industriales, Universidad Pontificia Comillas.

Lemmassi, A. y otros, 2024. Low-cost MPPT for triple-junction solar cells used in nanosatellites: A comparative study between P&O and INC algorithms. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, Volumen 7, p. 100426.

Livinti, P., Culea, G., Banu, I. V. & Vernica, S. G., 2024. Comparative Study of a Buck DC-DC Converter Controlled by the MPPT (P&O) Algorithm without or with Fuzzy Logic Controller. *Applied Sciences*, 14(7628), p. 17.

Li, X., Wen, H., Hu, Y. & Jiang, L., 2019. A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. *Renewable Energy*, Volumen 130, pp. 416-427.

Li, Z., Dewantoro, G., Xiao, T. & Swain, A., 2025. A Comparative Analysis of Fuzzy Logic Control and Model Predictive Control in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking. *Electronics*, 14(1009).

López Seguel, J., Seleme, J. S. & Moráis, L. M., 2021. Comparison of the performance of MPPT methods applied in converters Buck and Buck-Boost for autonomous photovoltaic systems. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 29(2), pp. 229-244.

Mahmod Mohammad, A. N. y otros, 2020. An Enhanced Adaptive Perturb and Observe Technique for Efficient Maximum Power Point Tracking Under Partial Shading Conditions. *Applied Sciences*, 10(11), p. 29.

MAPFRE Global Risks, 2021. *Nanosatélites: el futuro de la comunicación espacial*. [En línea]

Available at: https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/nanosatelites-el-futuro-de-la-comunicacion-espacial/?utm_source=chatgpt.com
[Último acceso: 20 enero 2025].

Noman, A., Addoweesh, K. & Mashaly, H., 2012. *A Fuzzy Logic Control Method for MPPT of PV*. s.l., s.n.

Panda, S., 2020. Modified MPPT Algorithms for Step Size and Switching Frequency Using Matlab/Simulink. p. 10.

Pandey, A. & Srivastava, S., 2019. Perturb & Observe MPPT Technique used for PV System Under different Environmental Conditions. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(4), pp. 2829-2835.

PAT Systems, 2017. *Nanosatelites CubeSat: Desde el diseño hasta la puesta en órbita*. [En línea]
Available at: <https://patsystems.us/wp-content/uploads/2020/08/004-Nanosat%C3%A9lites-20200817.pdf>
[Último acceso: 23 diciembre 2024].

Patel, M. R. & Beik, O., 2021. *Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation*. 3 ed. India: CRC Press Taylor & Francis Group.

Peña, L., 2021. *MPPT Seguidor del Punto de Máxima Potencia*. [En línea]
Available at: <https://ilumin.online/mppt-seguidor-del-punto-de-maxima-potencia/>
[Último acceso: 30 Diciembre 2024].

Pérez, N. A. & Ávila, J., 2021. *Ley de Ohm*. [En línea]
Available at: <https://portalacademico.cch.unam.mx/cibernetica1/implementacion-de-circuitos-logicos/ley-de-ohm>
[Último acceso: 16 febrero 2025].

Rajesh, R. & Mabel, M. C., 2014. Efficiency analysis of a multi-fuzzy logic controller for the determination of operating points in a PV system. *SOLAR ENERGY*, 99(99), pp. 77-87.

Ratnakar Babu, B., Suresh, M. & Praveen Kumar, B., 2021. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: A review. *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, 7(1), p. 25.

Reisi, A. R., Moradi, M. H. & Jamasb, S., 2013. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17(1), pp. 433-443.

Reisi, A. R., Moradi, M. H. & Jamasb, S., 2013. Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 19, pp. 433-443.

REPSOL Global, 2025. *Aprovechando al máximo la energía dui*. [En línea] Available at: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/energia-solar/index.cshtml> [Último acceso: 24 enero 2025].

Ríos, J., Enrique, J. M., Barragán, A. J. & Andújar, J. M., 2020. Comparative Analysis of Robustness and Tracking Efficiency of Maximum Power Point in Photovoltaic Generators, Using Estimation of the Maximum Power Point Resistance by Irradiance Measurement Processing. *Sensors*, 17 Diciembre.

Robles Algarín, C., Taborda Giraldo, J. & Rodríguez Álvarez, O., 2017. Fuzzy Logic Based MPPT Controller for a PV System. *Energies*, 10(2036), p. 18.

Robles, C. & Villa, G., 2011. Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa. *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 10(2).

Rodríguez-Meza, M. A. & Cervantes-Cota, J. L., 2006. El efecto fotoeléctrico. *CIENCIA ergo-sum Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(3), pp. 303-311.

Ruiz Dagua, R., 2016. *El efecto fotoeléctrico: un estudio desde el punto de vista semi-clásico que permite su explicación sin hacer uso del concepto de cuanto de energía*. Bogotá: Trabajo de grado de Licenciatura en Física, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Saavedra Montes, A. J., Ramos Paja, C. A. & Trejos Grisales, L. A., 2013. Adaptive maximum power point tracking algorithm for multi-variable applications in photovoltaic arrays. *Revista EIA*, diciembre, 10(20), pp. 193-206.

Sadollah, A., 2018. Introductory Chapter: Which Membership Function is Appropriate in Fuzzy System. *Fuzzy Logic Based in Optimization Methods and Control Systems and its Applications*.

Satapathy, L. M. y otros, 2018. Comparative analysis of boost and buck-boost converter in photovoltaic power system under varying irradiance using MPPT. *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, pp. 1828-1833.

Saudi Samosir, A. & Gusmed, H., 2018. Modeling and Simulation of Fuzzy Logic based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for PV Application. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, X(X), p. 9.

Sera, D. y otros, 2013. On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3(3), pp. 1070-1078.

Shayeghi, H., Pourjafar, S. & Sedaghati, F., 2021. A Buck-Boost Converter; Design, Analysis and Implementation Suggested for Renewable Energy Systems. *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 17(2), pp. 1-14.

SolarBrother, 2024. *SolarBrother*. [En línea] Available at: <https://www.solarbrother.com/es/blog/suntaste-receta-solar-coccion-de-huevos/> [Último acceso: 24 diciembre 2024].

Turgeon, A., Morse, E., Crooks, M. & Evers, J., 2024. Solar Energy. *National Geographic Society*, 3 Abril.

UPC Universitat Politecnica de Catalunya, 2024. *Simulink*. [En línea] Available at: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/192916/tema_5_simulink-5156.pdf?sequence=7&isAllowed=y#:~:text=SIMULINK%20es%20una%20toolbox%20especial,h%C3%ADbridos%20de%20todos%20los%20anteriores. [Último acceso: 13 diciembre 2024].

Yahiaoui, F. y otros, 2023. An Experimental Testing of Optimized Fuzzy Logic-Based. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2023(4176997), p. 12.

Yaqoob, M. y otros, 2022. A Comprehensive Review on Small Satellite Microgrids. *Aalborg Universitet*, 37(10), pp. 12741-12762.

You, J. y otros, 2019. Disturbance Rejection Control Method of Double-Switch Buck-Boost Converter Using Combined Control Strategy. *Energies*, 12(278), pp. 1-15.

Youssfi, A., Alioui, A. & Ait El Kadi, Y., 2024. Study, simulation and realization of a fuzzy logic-based MPPT controller in an isolated DC microgrid. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 34(3), pp. 1420-1433.