



**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE CUENCA**  
COMUNIDAD EDUCATIVA AL SERVICIO DEL PUEBLO

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad al servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍAS, INDUSTRIAS Y CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Control del punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico utilizando Lógica  
Difusa**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**AUTORES:** Christian Ramiro Marcatoma Guillermo  
John Esteban Parapi Plaza

**DIRECTOR:** Ing. Javier Bernardo Cabrera Mejía Msc

**MATRIZ CUENCA**

**2018**

## **DECLARACIÓN**

Yo, Christian Ramiro Marcatoma Guillermo con cedula de identidad N° 0105840847, declaro que el trabajo “Control del punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico utilizando Lógica Difusa” es de mi responsabilidad y autoría, eximo a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes de posibles acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca queda facultada para ejercer sus derechos correspondientes a este trabajo según lo establece la Ley de Propiedad Intelectual por su reglamento y norma institucional vigente.

---

**Christian Ramiro Marcatoma Guillermo**

**CI: 0105840847**

## **DECLARACIÓN**

Yo, John Esteban Parapi Plaza con cedula de identidad N° 0106854706, declaro que el trabajo “Control del punto de máxima potencia de un panel fotovoltaico utilizando Lógica Difusa” es de mi responsabilidad y autoría, eximo a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes de posibles acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca queda facultada para ejercer sus derechos correspondientes a este trabajo según lo establece la Ley de Propiedad Intelectual por su reglamento y norma institucional vigente.

---

**John Esteban Parapi Plaza**

**CI: 0106854706**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo de titulación fue desarrollado por los estudiantes Christian Ramiro Marcatoma Guillermo y John Esteban Parapi Plaza bajo mi supervisión.

---

**Ing. Javier Bernardo Cabrera Mejía MSc.**

**DIRECTOR**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme brindado la vida y la oportunidad de haber concluido mi carrera como profesional y todos los proyectos de vida que he incursionado al largo de este tiempo.

A mis padres por haber sido un apoyo incondicional durante toda mi vida y ser un gran ejemplo para mí, tanto en lo profesional como en lo espiritual con sus consejos su tiempo para conversar, escuchar mis problemas y metas que deseo alcanzar, gracias por haber confiado en mí.

A Elizabeth Zhumi, por todo el amor que me ha entregado fruto de ese amor mi hijo Joseph Alejandro por ellos lucho día a día, la paciencia y apoyo incondicional que me ha brindado mi esposa ha sido muy importante para mí durante todo este tiempo que compartimos juntos.

A mi tutor de tesis Msc. Ing. Javier Cabrera que me ha prestado todo su tiempo y paciencia necesaria para concluir con este trabajo por haber puesto un granito de confianza en mí.

Finalmente, a cada una de mis amistades que de una u otra manera han aportado para que este servidor pueda demostrarle al mundo que nada es imposible cuando se propone una meta y se lucha de corazón.

**Gracias**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a Dios por brindarme salud y sabiduría durante el transcurso de todos los años de estudio y por permitirme culminar con mi carrera con bien, también agradezco a mis queridos Padres, hermanas y esposa por ese apoyo incondicional durante todo este proceso.

Agradezco también a la Universidad Católica de Cuenca y a la Facultad de Ingeniería eléctrica quien me brindo conocimientos durante cinco años de la carrera.

Y de manera muy especial quiero agradecer a mi director de Tesis Msc. Ing. Javier Cabrera, quien con su humildad y tiempo supo guiarme para la conclusión de esta tesis.

**Gracias**

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres Miguel Marcatoma y Clara Guillermo, a mi esposa Elizabeth Zhumi y mi hijo Alejandro Marcatoma.

## DEDICATORIA

A mis queridos padres Ramón y Carmen ya que gracias a su apoyo incondicional que me brindaron durante todo el transcurso de estos años de estudio académico he podido culminar con gran satisfacción.

También dedico a mi querida esposa e hijos quienes fueron un pilar fundamental en este proceso quienes supieron comprenderme y esperarme por el esfuerzo realizado.

## RESUMEN

El panel fotovoltaico es un dispositivo con la capacidad de transformar energía solar en energía eléctrica; dicha transformación dependerá de dos factores importantes que influyen en la superficie del panel como la radiación y la temperatura, considerando que a mayor radiación y menor temperatura la eficiencia de la conversión de energía será mejor.

En el presente trabajo de investigación se realiza el diseño y modelado de un panel solar fotovoltaico utilizando como instrumento el software MATLAB del cual se obtienen los valores de corriente, voltaje y potencia en función de la variación de la radiación y la temperatura que influyen en la superficie del panel solar. Adicionalmente se realizan comparaciones de los valores reales medidos por parte del Grupo de Investigación de Redes Eléctricas Inteligentes de la UCACUE vs los valores simulados; con la finalidad de encontrar una relación entre las variables de radiación, temperatura y rendimiento del panel.

Con los datos obtenidos en el desarrollo de la investigación, se puede saber a ciencia cierta cuál sería el comportamiento de los paneles solares en diferentes zonas geográficas del Ecuador, así como, determinar la función de utilidad necesaria dentro del sistema de control, para alcanzar el punto de máxima potencia mediante la lógica difusa.

Mediante la lógica difusa obtendremos la máxima estabilidad de la potencia alcanzada en condiciones variables de temperatura e irradiación por el panel, el mismo que proporcionara una mejora en rendimiento y eficacia.

**Palabras claves:** PANEL SOLAR, PUNTO DE MAXIMA POTENCIA, LOGICA DIFUSA, SISTEMA DE CONTROL.

## **ABSTRACT**

The photovoltaic panel is a device with the ability to transform solar energy into electrical energy; this transformation will depend on two important factors that influence the surface of the panel, such as radiation and temperature, considering that the higher the radiation and the lower the temperature, the better the efficiency of the energy conversion will be.

In the present research work, the design and modeling of a photovoltaic solar panel is carried out using as an instrument the MATLAB software from which the values of current, voltage and power are obtained as a function of the variation of the radiation and the temperature that influence the surface of the solar panel. Additionally, comparisons are made of the real values measured by the Research Group of Intelligent Electrical Networks of the UCACUE vs the simulated values; in order to find a relationship between the variables of radiation, temperature and performance of the panel.

With the data obtained in the development of the research, we can know with certainty what would be the behavior of the solar panels in different geographical zones of Ecuador, as well as, determine the useful function necessary within the control system, to reach the point of maximum power through fuzzy logic.

By means of diffuse logic we will obtain the maximum stability of the power reached under variable conditions of irradiation and temperature by the panel, which will provide and improvement in performance and efficiency.

**Keywords:** SOLAR PANEL, MAXIMUM POWER POINT, DIFFUSE LOGIC, CONTROL SYSTEM.

Cuenca, 07 de febrero de 2018

**EL CENTRO DE IDIOMAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, CERTIFICA QUE EL DOCUMENTO QUE ANTECEDE FUE TRADUCIDO POR PERSONAL DEL CENTRO PARA LO CUAL DOY FE Y SUSCRIBO.**

**ING. EDGAR VINTIMILLA V.**

**DIRECTOR**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN .....	2
DECLARACIÓN .....	3
CERTIFICACIÓN .....	4
AGRADECIMIENTOS .....	5
AGRADECIMIENTOS .....	6
DEDICATORIA .....	7
DEDICATORIA .....	8
<b>1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>19</b>
1.1 Introducción .....	19
1.2 Técnicas de seguimiento .....	20
1.3 MPPT con sombreado parcial .....	21
1.4 Trabajos reportados .....	22
1.4.1 Modificación algoritmo perturbar y observar .....	22
1.4.2 MPPT individual para cada panel solar .....	22
1.4.3 Control por inversores Flyback .....	23
1.5 Control de seguimiento extremo (ESC) secuencial basado en MPPT Global .....	24
1.6 Control por Lógica Difusa .....	24
<b>2 CAPÍTULO: PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>26</b>
2.1 Introducción .....	26
2.2 Modelo Matemático del panel fotovoltaico .....	26
2.2.1 Presentación y modelado de un módulo PV .....	28
2.2.2 Determinación del $I_{ph}$ .....	30
2.2.3 Determinación de $I_o$ .....	32
2.3 Simulación del panel fotovoltaico .....	35
2.3.1 Simulaciones para irradiación y temperatura constante .....	36
2.3.2 Simulaciones para irradiación variable .....	38
2.3.3 Simulaciones para temperatura variable .....	61
2.4 Diseño del convertidor DC-DC BUCK .....	73
2.4.1 Diseño del inductor .....	73
2.4.2 Diseño del capacitor .....	75
2.5 Simulación del convertidor DC-DC BUCK .....	75
2.6 Diseño del controlador Difuso .....	82
2.6.1 Universo de Discurso .....	84
2.6.2 Reglas difusas .....	85

2.6.3	Procesos de fuzzificación.....	87
2.6.4	Funciones de membresía y variables lingüísticas .....	88
2.7	Simulación del controlador difuso.....	91
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>93</b>
3.1	Simulación del Controlador Difuso.....	93
3.1.1	Resultado de corriente vs voltaje y potencia vs voltaje sin Controlador Difuso .	94
3.1.2	Resultado de corriente vs voltaje y potencia vs voltaje con Controlador Difuso	95
3.2	Resultados de lazo cerrado.....	96
3.2.1	Resultados para condiciones de prueba estándar para contrastar valores teóricos y prácticos. ....	98
3.2.2	Resultados para cambios en la irradiación para contrastar valores teóricos y prácticos.....	99
3.2.3	Resultados para cambios en la temperatura para contrastar valores teóricos y prácticos.....	99
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>101</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>101</b>
	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>102</b>
	<b>Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>105</b>
	Anexo 1: <b>Diseño de panel fotovoltaico 230w.</b> ....	105
	Anexo 2: <b>Diseño de Convertidor dc-dc Buck.</b> .....	106
	Anexo 3: <b>Diseño de Controlador Difuso.....</b>	107
	Anexo 4: <b>Diseño general de sistema de control del punto de máxima potencia con Lógica Difusa .....</b>	<b>108</b>

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Diagrama de un Controlador por inversor Flyback.....	24
Ilustración 2: Representación eléctrica de una celda solar .....	32
Ilustración 3: Relación corriente – voltaje para una irradiación y temperatura constante. .	37
Ilustración 4: Relación potencia – voltaje con irradiación y temperatura constante.....	37
Ilustración 5: Esquema de un convertidor DC-DC tipo BUCK.....	73
Ilustración 6: Circuito de regulador reductor (Buck) .....	75
Ilustración 7: Circuito equivalente en modo de operación 1 .....	76
Ilustración 8: Circuito equivalente en modo de operación 2.....	77
Ilustración 9: Diseño del convertidor DC-DC buck en Simulink.....	78
Ilustración 10: Subsistema del PWM. ....	79
Ilustración 11: Subsistema de bloque del convertidor Buck .....	81
Ilustración 14:Esquema del Control de Lógica Difusa.....	83
Ilustración 15: Control Difuso .....	92
Ilustración 16: Tabla característica de panel fotovoltaico para el ingreso de datos para la simulación de curvas I-V .....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Factor de Idealidad (A) .....	34
Tabla 2: Parámetros eléctricos del panel fotovoltaico .....	35
Tabla 3: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de agosto.....	38
Tabla 4: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de septiembre.....	44
Tabla 5: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Octubre.....	49
Tabla 6: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Noviembre .....	54
Tabla 7: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Diciembre .....	59
Tabla 8: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Agosto .	61
Tabla 9: Datos de Temperatura variable e irradiación constante para el mes de Septiembre.....	64
Tabla 10: Datos de temperatura variable e irradiación constante para el mes de Octubre	68
Tabla 11: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Noviembre.....	70
Tabla 12: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Diciembre.....	71
Tabla 13: Reglas Difusas de acuerdo a la temperatura variable.....	86
Tabla 14: Reglas Difusas ingresadas a Ruler editor de MATLAB .....	86
Tabla 15: Tipos de Variables Lingüísticas .....	89

## LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1: Curva de Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1521 W/m <sup>2</sup> y 1420 W/m <sup>2</sup> del mes de agosto.....	39
Gráfica 2: Curva de Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1517 W/m <sup>2</sup> y 1467 W/m <sup>2</sup> del mes de agosto.....	40
Gráfica 3: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1509 W/m <sup>2</sup> del mes de agosto .....	41
Gráfica 4: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1521W/m <sup>2</sup> y 1420 W/m <sup>2</sup> mes de agosto. ....	42
Gráfica 5: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1517 W/m <sup>2</sup> y 1467 W/m <sup>2</sup> del mes de agosto. ....	43
Gráfica 6: Curva Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1509 W/m <sup>2</sup> y del mes de agosto. ....	44
<i>Gráfica 7: Curva Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1509 W/m<sup>2</sup>, 1382 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.....</i>	<i>45</i>
<i>Gráfica 8: Curva Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1589 W/m<sup>2</sup>, 1540 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.....</i>	<i>46</i>
<i>Gráfica 9: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1509 W/m<sup>2</sup> y 1382 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.....</i>	<i>47</i>
<i>Gráfica 10: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1589 W/m<sup>2</sup> y 1540 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.....</i>	<i>48</i>
Gráfica 11: Curva de corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1608 W/m <sup>2</sup> y 1551 W/m <sup>2</sup> del mes de octubre. ....	50
Gráfica 12: Curva de corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1643 W/m <sup>2</sup> y 1586 W/m <sup>2</sup> del mes de octubre. ....	51
<i>Gráfica 13: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1643 W/m<sup>2</sup> y 1586 W/m<sup>2</sup> del mes de Octubre.....</i>	<i>52</i>
Gráfica 14: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1608 W/m <sup>2</sup> y 1551 W/m <sup>2</sup> del mes de Octubre.....	53
<i>Gráfica 15: Curva de Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1639 W/m<sup>2</sup> y 1546 W/m<sup>2</sup> del mes de Noviembre .....</i>	<i>55</i>
<i>Gráfica 16: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1592 W/m<sup>2</sup> del mes de Noviembre.....</i>	<i>55</i>
Gráfica 17: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1569 W/m <sup>2</sup> del mes de Noviembre.....	56
Gráfica 18: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1577 W/m <sup>2</sup> del mes de Noviembre.....	56
<i>Gráfica 19: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1639 W/m<sup>2</sup> y 1546 W/m<sup>2</sup> del mes de Noviembre. ....</i>	<i>57</i>
<i>Gráfica 20: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1569 W/m<sup>2</sup> del mes de Noviembre.....</i>	<i>58</i>

Gráfica 21: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1592 W/m <sup>2</sup> del mes de Noviembre.....	58
<i>Gráfica 22: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1577 W/m<sup>2</sup> del mes de Noviembre.....</i>	<i>59</i>
Gráfica 23: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1639 W/m <sup>2</sup> del mes de Diciembre.....	60
Gráfica 24: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1639 W/m <sup>2</sup> del mes de Diciembre.....	60
Gráfica 25: Curva de Corriente vs Tensión para una temperatura variable de 20°C mes de Agosto.....	62
Gráfica 26: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 20°C mes de Agosto.....	62
Gráfica 27: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de Agosto.....	63
Gráfica 28: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de Agosto.....	63
Gráfica 29: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de Septiembre.....	64
<i>Gráfica 30: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de Septiembre.....</i>	<i>65</i>
Gráfica 31: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 23°C mes de Septiembre.....	65
Gráfica 32: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 23°C mes de Septiembre.....	66
Gráfica 33: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 24°C mes de Septiembre.....	66
Gráfica 34: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 24°C mes de Septiembre.....	67
Gráfica 35: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de Septiembre.....	67
Gráfica 36: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de Septiembre.....	68
Gráfica 37: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de Octubre.....	69
Gráfica 38: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de Octubre.....	69
Gráfica 39: Curva de Corriente vs Tensión para temperatura variable mes de Noviembre.....	70
Gráfica 40: Curva de Potencia vs Tensión para temperatura variable mes de Noviembre.....	71
Gráfica 41: Curva de Corriente vs Tensión para temperatura variable mes de Diciembre.....	72

Gráfica 42: Curva de Potencia vs Tensión para temperatura variable mes de Diciembre.	72
Gráfica 43: Formas de onda PWM .....	80
Gráfica 44: Curva de respuesta del convertidor Buck.....	82
Gráfica 45: Funciones de Membresía para el Error .....	89
Gráfica 46: Funciones de membresía para el C error. ....	90
Gráfica 47: Funciones de membresia para la salida $\Delta D$ .....	90
Gráfica 48: Diseño de controlador difuso con controlador Mamdani.....	91
Gráfica 49: Resultado I-V sin control. ....	94
Gráfica 50: Resultado P-V sin control.....	94
Gráfica 51: Resultados I-V con control. ....	95
Gráfica 52: Resultados P-V con control.....	96
Gráfica 53: Resultados a Lazo Cerrado a Temperatura e Irradiación constante.....	98
Gráfica 54: Resultados a Lazo Cerrado para Irradiación variable.....	99
Gráfica 55: Resultados a Lazo Cerrado para Temperatura variable. ....	100

## ABREVIATURAS

<b>A:</b>	Factor de idealidad
<b>AC:</b>	Corriente alterna
<b>C:</b>	Capacitor
<b>CE:</b>	Cambio de error
<b>D:</b>	Ciclo de trabajo
<b>DC:</b>	Corriente continúa
<b>DC-DC:</b>	Corriente continua a corriente continua
<b>E:</b>	Error
<b>ESC:</b>	Control de seguimiento extremo
<b>I:</b>	Corriente
<b>k:</b>	Constante de Boltzmann
<b>L:</b>	Inductor
<b>MPP:</b>	Punto de máxima potencia
<b>MPPT:</b>	Seguimiento del punto de máxima potencia
<b>P:</b>	Potencia
<b>PMW:</b>	Modulación de ancho de pulso
<b>PV:</b>	Panel fotovoltaico
<b>Q:</b>	Transistor
<b>R:</b>	Resistencia
<b>RCC:</b>	Control de correlación de la ondulación
<b>V:</b>	Voltaje

# 1 CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

## 1.1 Introducción

Este proyecto de investigación dará a conocer el estudio y modelado de un sistema fotovoltaico, mediante el uso de la lógica difusa nos permitirá realizar el control del punto de máxima potencia, maximizando así la energía lumínica captada por el panel solar mejorando su eficacia.

Mediante la lógica difusa podemos obtener la linealidad de la máxima potencia alcanzada por los paneles para poder brindar el mejor rendimiento del mismo una vez demostrado este punto se procederá a realizar las debidas comparaciones de los datos obtenidos en la práctica con los datos modelados en la teoría demostrando así la eficiencia del panel.

La razón del proyecto se tomó debido al cambio de la matriz energética que está revolucionando a nivel mundial, las energías renovables que están en su auge consideradas como una fuente importante, las mismas que ofrecen alternativas económicas y ambientales factibles. La energía solar fotovoltaica toma una gran importancia debido a que se la considera una fuente limpia y relativamente inagotable en el planeta, la desventaja de la misma se debe a su alto costo de instalación. La implementación de energías fotovoltaicas nos brindara una solución alterna para ayudar al crecimiento de la generación eléctrica en el país, alcanzando así una mayor cobertura en zonas donde se delimite este recurso tan necesario para el desarrollo.

Ecuador se encuentra en una ubicación privilegiada en cuanto a radiación solar, debido a que la línea ecuatorial que divide al planeta en dos hemisferios lo atraviesa, siendo casi perpendicular la radiación que recibe. Además, esta no varía durante el año y se tiene un ángulo de incidencia constante, características que dan a la energía solar fotovoltaica un gran potencial de aprovechamiento.

El desarrollo del proyecto se realizará en la Unidad Académica de Ingenierías, Industrias y Construcción en la ciudad de Cuenca entre las Av. De las Américas y Tarqui, donde se instalará el sistema fotovoltaico que facilitará para realizar todas las pruebas necesarias para realizar el proyecto, este contará con tres bloques funcionales en el cual el panel fotovoltaico PV actuará como un dispositivo de

entrada al controlador y el gobernador, todos los datos obtenidos de las pruebas ingresaran a un software para la recopilación de información.

## 1.2 Técnicas de seguimiento

Las técnicas de seguimiento en un panel solar se utilizan para maximizar la energía entregada por los sistemas fotovoltaicos, el seguimiento se realiza utilizando un conversor continuo (DC-DC) por sus siglas en inglés Direct Current / Direct Current el mismo que es controlada mediante una señal modulada en ancho de pulso PWM, de tal manera que se logre modificar la corriente extraída por el panel y por consiguiente su potencia obtenida.

La variación de energía obtenida por el panel se da debido a la no linealidad de la relación entre los parámetros de salida de las células fotovoltaicas, estas variaciones son causadas debido a los cambios climáticos que se dieran en el entorno como por ejemplo la radiación solar y la temperatura. Las técnicas de extracción de potencia (MPPT) son debidamente necesarias para maximizar la producción de electricidad en los paneles fotovoltaicos y de esta manera aumentar la eficiencia energética de todo el sistema.

En un módulo fotovoltaico la tensión y la corriente son altamente dependientes de la radiación solar diaria y la temperatura ambiente por lo tanto debido a estos cambios el comportamiento de un panel fotovoltaico es no lineal por lo que es necesario aplicar técnicas de control capaces de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia. (Mejía, Torres Chávez, & Díaz, 2014).

Los algoritmos de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) son debidamente utilizados en sistemas fotovoltaicos ya que los mismos nos ayudan a maximizar la energía entregada por los paneles, para alcanzar dicho seguimiento es necesario realizar la variación en el ciclo de vida útil de un convertidor de potencia.

Según Zúñiga Ventura, (2014) existen numerosas técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia las cuales se mencionan a continuación:

- Perturbar y observar
- Hill-Climbing

- Lógica Difusa
- Control de la correlación de la ondulación (RCC, por sus siglas en ingles)
- Conductancia incremental
- Control de seguimiento extremo (ESC, por sus siglas en ingles)

Los aspectos más principales que se deben tener en cuenta al momento de la elección de alguna de estas técnicas estarían basados en su complejidad, su velocidad de convergencia al punto de máxima potencia, los sensores utilizados, su costo y su efectividad.

De acuerdo a dichas técnicas el algoritmo perturbar y observar es el más utilizado en los sistemas debido a su simplicidad de funcionamiento el cual consiste en modificar el ciclo útil de un convertidor de potencia, con el cambio del ciclo útil se modifica la corriente extraída del arreglo fotovoltaico por lo cual posteriormente la potencia obtenidas se modifica en relación a la modificación del ciclo de vida útil de la señal de disparo del convertidor de potencia.

### **1.3 MPPT con sombreado parcial**

El método con sombreado parcial funciona de manera adecuada ya sea con un solo panel solar, los cuales habitualmente son utilizados para el abastecimiento en casa o varios paneles conectados en serie o paralelo para el uso industrial debido a que la potencia demanda es mucho mayor que en una residencial.

Los MPPT conocidos como Seguidor de punto de máxima potencia son dispositivos mediante los cuales se consigue regular la carga acumulada en las baterías a la vez controla el punto en el que se produce la mayor cantidad de energía que se encuentra en los paneles fotovoltaicos.

El objetivo de los controladores es buscar el balance entre el voltaje y la corriente alcanzando así su máxima potencia en los paneles solares.

Al tratarse de MPPT con sombreado parcial existirán diferentes puntos de potencia máxima en la curva de voltaje de potencia sin obtener el óptimo. (Zúñiga Ventura, 2014).

## **1.4 Trabajos reportados**

En el presente proyecto de investigación se muestran alternativas para solucionar el problema de sombreado parcial en paneles solares, basándose en la modificación del algoritmo perturbar y observar.

### **1.4.1 Modificación algoritmo perturbar y observar**

Según Abd El Motaled, (2010) perturbar significa modificar la tensión continua a la entrada del inversor y observar la potencia máxima a la salida del mismo, el aumento y decremento de la tensión modificara la potencia de salida de tal manera que si la potencia de entrada aumentara la perturbación deberá seguir actuando hasta conseguir la liberalización.

La potencia que se entrega mediante los paneles fotovoltaicos necesariamente dependerá de la irradiación y la temperatura que se tenga en el mismo. Unas de las desventajas de este método son las desviaciones ocasionales del punto de máxima potencia en caso de cambios rápidos e inesperados en el clima, como puede ser nubosidad inesperada.

El algoritmo perturbar y observar se basa en el siguiente concepto: si el voltaje de operación de un arreglo fotovoltaico se perturba en una dirección, y la potencia extraída del mismo aumenta, nos indica que el punto de operación se ha movido hacia el MPP, por lo tanto, el voltaje de operación debería perturbarse en la misma dirección. De otra manera si la potencia obtenida del arreglo fotovoltaico disminuye, el punto de operación se ha movido en dirección opuesta de la ubicación del MPP, por lo tanto, el voltaje de operación deberá ser perturbado en dirección contraria a la que se tenía.

Al momento que se ha logrado conseguir el punto de máxima potencia el algoritmo perturba y observar hará que el punto de operación del panel oscile en torno a él.

### **1.4.2 MPPT individual para cada panel solar**

Para obtener el punto de máxima potencia y extraer todo el MPP cada módulo puede ser asociado a un convertidor DC/DC.

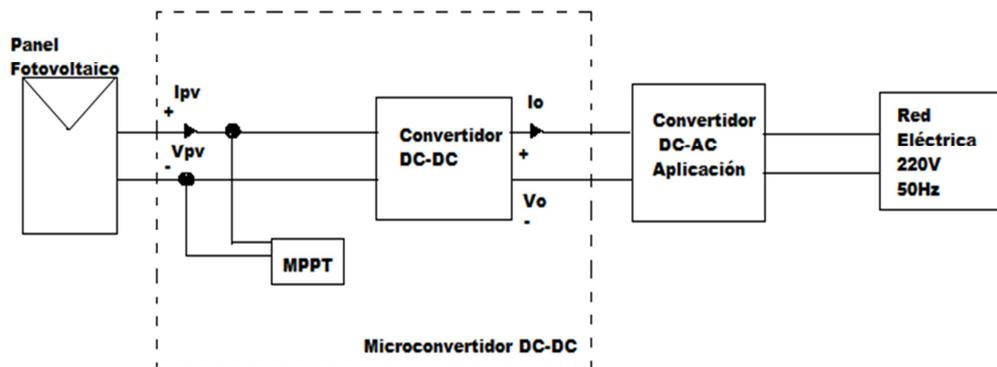
Esta técnica busca el control de forma individual del rendimiento de cada panel. Aprovechando la radiación solar disponible al máximo. Con este sencillo dispositivo cada panel solar puede estar trabajando en un punto de la curva I-V diferente. Así, si un panel recibe una sombra, sólo se modificará su punto de funcionamiento y el resto de los paneles seguirán produciendo en su punto óptimo. (Femia, Lisi, & Petrone, 2008).

### **1.4.3 Control por inversores Flyback**

Un Flyback es un convertidor DC/DC, es decir se trata de un convertidor tipo reductor-elevador, cuya entrada se encuentra aislada galvánicamente de la salida, este convertidor nos permite aumentar o disminuir la tensión de salida con respecto a su entrada.

El convertidor tipo Flyback y las topologías derivadas de este, están caracterizados por ser muy utilizados en el ámbito industrial para aplicaciones de baja potencia. Cuando en un panel fotovoltaico se obtiene una tensión baja de entrada y se desea suministrar una tensión de salida alta este tipo de convertidor es una de las opciones más óptimas a utilizar debido a su bajo costo.

El principio de funcionamiento de la topología microinversor se menciona a continuación: captando la energía de un panel de 230W a una baja tensión (24V-40V), elevando esta tensión a través del convertido tipo DC/DC aislado (encargado de gestionar el algoritmo del MPPT) hasta obtener 400V los cuales son transformados a una señal AC a través de un inversor mediante el cual se entregará la energía captada a la red eléctrica. (Giménez Pérez, 2016)



*Ilustración 1: Diagrama de un Controlador por inversor Flyback*

**Fuente:** Los autores a partir de Reyes Pacheco, 2014

### 1.5 Control de seguimiento extremo (ESC) secuencial basado en MPPT Global

Esta técnica de seguimiento tiene la finalidad de hacer frente a las varias características del campo fotovoltaico con sombreado variable, entonces este estudio propone una estrategia de control global MPPT basada en la ESC secuencial de Femia, Lisi, & Petrone, 2008, esta técnica se basa en un modelo aproximado y análisis de características bajo circunstancias de sombreado variable. Para los varios puntos de máxima potencia de la curva característica, nos dice que el límite de variación de la tensión se encuentra y se basa en que la tensión inicial para la búsqueda segmentaria pueda ajustarse, por lo tanto, la tensión inicial se puede ajustar con precisión y a la vez puede reducir significativamente el intervalo de búsqueda es decir el tiempo que se posiciona en el punto de máxima potencia.

### 1.6 Control por Lógica Difusa

El control difuso es una técnica muy indispensable para derivar leyes de control, cuando la información generada del control se describe en términos lingüísticos.

La lógica difusa puede ser definida como un sistema interpretativo en los cuales los objetos o elementos son muy relacionados con conjuntos de fronteras no tan claramente definidas, otorgándole un grado de pertinencia relativa o graduada, a lo

contrario que se acostumbraba en la lógica tradicional. (Lógica Difusa y Sistemas de Control, 2017)

Las interpretaciones de estas variables pueden ser fácilmente relacionadas mediante operadores lógicos tradicionales con cierta medida de acción, en otras palabras, podríamos decir que se puede diseñar un controlador que interprete en forma intuitiva el estado de ciertas variables y de acuerdo a ese cambio deduzca en forma lógica una posible actuación del sistema que nos llevaría a obtener el estado deseado. (Lógica Difusa y Sistemas de Control, 2017)

El control mediante lógica difusa puede ser expresado en forma más clara y concisa como un control, a través de palabras claves o sentencias que interpreten el sentido común, en lugar de números o ecuaciones. Sin embargo, las variables de los procesos no pueden ser mediadas en sentido común sino en números. Por lo que resulta necesario realizar una adaptación previa antes de introducir el estado de la variable al controlador, esta etapa se la conoce como fuzzificación.

El empleo del control por lógica difusa nos brinda una gran ventaja ya que estos sistemas pueden funcionar con entradas imprecisas sin la necesidad de un modelo matemático preciso. Este tipo de control por lo general está formado de las siguientes etapas:

- Fuzzificación
- Tabla de base
- Defusificación

En la etapa de fuzzificación las variables numéricas de entrada se convierten en una variable lingüística.

En la etapa tabla de base de reglas se toma todos los valores de entradas y en base a sus valores se obtiene la salida en la variable lingüística. Mediante la defusificación si el valor del error en un momento es positivo grande y el cambio en el error es cero, entonces el resultado debe ser positivo grande y así sucesivamente de acuerdo a los valores de las dos entradas al valor de las acciones será determinado a través de la tabla base de reglas, la salida lógica del controlador difuso se convertirá de un variable lingüística a una variable numérica. (Sánchez Gómez, 2009)

## 2 CAPÍTULO: PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS

### 2.1 Introducción

Para lograr obtener la mayor energía posible de una celda solar es cuando se consigue extraer de ella la mayor potencia posible cuando el panel se encuentra expuesta a la irradiación solar, para conseguir tal efecto es necesario encontrar las condiciones de carga ideales así el punto de operación se colocará en el voltaje y corriente óptimos. La aplicación de la lógica difusa estabiliza el comportamiento del punto de máxima potencia de un panel alcanzando así su máxima eficiencia. (Brunton & Clarence, 2010).

### 2.2 Modelo Matemático del panel fotovoltaico

Según Gil, (2006) para el modelo matemático del panel fotovoltaico se debe únicamente hallar el parámetro de ajuste de la curva que puede ser obtenido a través de la ecuación 1.

Ecuación 1: Relación de I-V del panel fotovoltaico

$$I(V) = \frac{I_x}{1 - e\left(\frac{-1}{b}\right)} \left[ 1 - e\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right]$$

$$P(V) = V \cdot I$$

$$P(V) = \frac{V \cdot I_x}{1 - e\left(\frac{-1}{b}\right)} \left[ 1 - e\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right]$$

Dónde:

**I(V):** relación de corriente-voltaje.

**P (V):** relación de potencia-voltaje.

**V:** Voltaje del panel

**b:** es la constante característica del panel y es el único parámetro a ser calculado según el modelo de Ortiz.

**Vx:** Voltaje de circuito abierto

**I<sub>x</sub>**: Corriente de corto circuito para valores de irradiación y temperaturas dinámicos que están definidos por:

Ecuación 2: Voltaje de Circuito Abierto.

$$V_x = S \frac{E_i}{E_{iN}} TC_v(T - T_N) + SV_{max} - S(V_{max} - V_{min})e^{\left(\frac{E_i}{E_{iN}} \ln\left(\frac{V_{max}-V_{oc}}{V_{max}-V_{min}}\right)\right)}$$

Dónde:

**S**: Número de paneles en serie

**E<sub>i</sub>**: Irradiación efectiva a la que opera el panel

**E<sub>iN</sub>**: Constante de irradiación de 1000 W/m<sup>2</sup>

**T**: Temperatura de operación a la que opera el panel

**T<sub>N</sub>**: Constante de temperatura de 25°C

**V<sub>oc</sub>**: Voltaje del circuito abierto

**V<sub>max</sub> - V<sub>min</sub>**: Valores de voltaje de circuito abierto para niveles de irradiación menores a 200 W/m<sup>2</sup> y mayores a 1200 W/m<sup>2</sup> con una temperatura de operación de 25°C

- 85% de V<sub>oc</sub> para V<sub>min</sub>.
- 103% de V<sub>oc</sub> para V<sub>max</sub>.

**TC<sub>v</sub>**: Coeficiente de voltaje panel.

Ecuación 3: Corriente de Cortocircuito

$$I_x = p \frac{E_i}{E_{iN}} [I_{sc} + TC_i(T - T_N)]$$

Dónde:

**I<sub>x</sub>**: Corriente de cortocircuito.

**p**: Número de paneles en paralelo.

$E_i$ : Irradiación efectiva a la que opera el panel

$E_{iN}$ : Constante de irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$

$T$ : Temperatura de operación a la que opera el panel

$T_N$ : Constante de temperatura de  $25^\circ\text{C}$

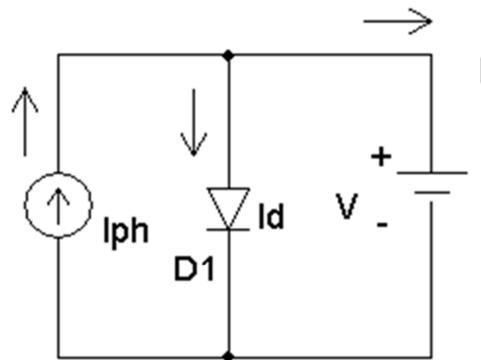
$I_{sc}$ : Corriente de cortocircuito del panel

$TC_i$ : Coeficiente de corriente del panel

De acuerdo con otros autores se debe determinar dos o tres parámetros más los cuales vendrían a ser; la fotocorriente ( $I_{ph}$ ), la corriente de saturación ( $I_o$ ), y el factor de idealidad ( $A$ ).

### 2.2.1 Presentación y modelado de un módulo PV

En la ilustración 2 se puede observar que el modelo no tiene en cuenta las pérdidas internas de la corriente. En este modelo un diodo está conectado en anti paralelo con la fuente generada por la luz, entonces la corriente a la salida de este medio será obtenida por la ley de Kirchhoff la cual se indica a continuación:



*Ilustración 2: Modelo de diodo ideal*

**Fuente y Elaboración:** Los autores

$$I = I_{ph} - I_d \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

**I:** Corriente de salida.

**I<sub>ph</sub>:** Fotocorriente.

**I<sub>d</sub>:** Corriente de diodo que es proporcional a la corriente de saturación y está representada por la siguiente ecuación.

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{A \cdot N_s \cdot V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 5}$$

**I<sub>0</sub>:** Corriente de fuga o de saturación inversa del diodo (A)

**V:** Tensión impuesta al diodo

**A:** Factor de idealidad, la cual depende de la tecnología de la célula fotovoltaica y se puede elegir en la Tabla 1

**N<sub>s</sub>:** Número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie

**V<sub>T</sub>:** Voltaje térmico, está definida por la siguiente fórmula

$$V_T = \frac{K \cdot T_c}{q} \quad \text{Ecuación 6}$$

**T<sub>c</sub>:** Es la temperatura real de la celda (K).

**K:** constante de Boltzmann  $1.381 \cdot 10^{-23}$  J/K (Julio por Kelvin)

**q:** Carga del electrón  $1.602 \cdot 10^{-19}$ .

Según Chouder et al. (2012) "a" es el factor de idealidad modificado, considerando que es un parámetro para determinar el cual está en función del factor de idealidad del diodo "A", ver ecuación 7.

$$a = \frac{N_s \cdot A \cdot K \cdot T_c}{q} = N_s \cdot A \cdot V_T \quad \text{Ecuación 7}$$

**Ns:** Número de celdas fotovoltaicas conectadas en serie

**A:** Factor de idealidad, la cual depende de la tecnología de la célula fotovoltaica y se puede elegir en la Tabla 1

**VT:** Voltaje térmico, está definida por la siguiente fórmula

**a:** Factor de idealidad modificado

### 2.2.2 Determinación del $I_{ph}$

En la ilustración 3 la corriente de salida para las condiciones de prueba estándar (STC) es la siguiente:

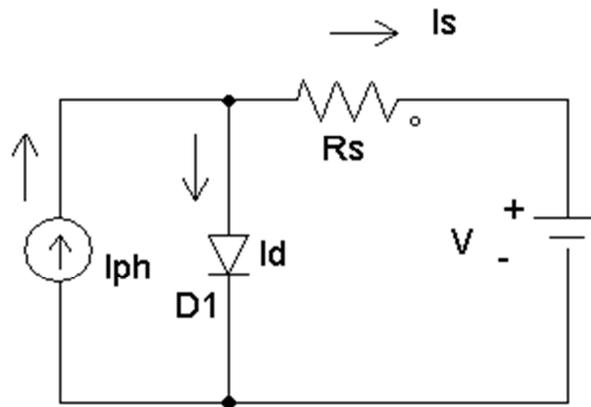


Ilustración 3: Modelo practico en función de  $R_s$

**Fuente y Elaboración:** Los autores

$$I = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[ \exp\left(\frac{V}{a_{,ref}}\right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

**$I_{ph,ref}$ :** Fotocorriente de (A) en STC

**$I_{o,ref}$ :** Corriente de fuga o saturación en STC

**$a_{,ref}$ :** Factor de idealidad modificado en STC

**V:** Voltaje de la celda

**I:** Corriente se salida en condiciones STC

La ecuación 9 nos permite cuantificar la  $I_{ph, ref}$ . la misma que no se puede determinar de alguna otra manera. Cuando la celda está en cortocircuito:

$$I_{sc, ref} = I_{ph, ref} - I_{o, ref} \left[ \exp \left( \frac{0}{a_{,ref}} \right) - 1 \right] = I_{ph, ref} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

**$I_{sc, ref}$ :** Corriente de Cortocircuito en STC

**$I_{ph, ref}$ :** Fotocorriente de (A) en STC

**$I_{o,ref}$  :** Corriente de fuga o saturación en STC

**$a,ref$  :** Factor de idealidad modificado en STC

La ecuación mencionada con anterioridad solamente será válida cuando el análisis se la realice en el caso ideal. De tal manera que la igualdad no es correcta y la ecuación debe escribirse como.

$$I_{ph, ref} = I_{sc, ref} \quad \text{Ecuación 10}$$

Para el cálculo de la fotocorriente se debe tener en cuenta que va a depender tanto de la irradiación como de la temperatura por lo tanto la ecuación se define de la siguiente manera:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} (I_{ph, ref} + \mu_{sc} * \Delta T) \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

**$G$ :** Irradiación  $\left( \frac{W}{m^2} \right)$

**$G_{, ref.}$ :** Irradiación a STC=  $\left( 1000 \frac{W}{m^2} \right)$

**$\Delta T$** =  $T_c - T_{c, ref}$  (Kelvin)

**$T_{c, ref.}$ :** Temperatura de la celda en STC=  $25^\circ\text{C} + 273 = 298\text{K}$

$\mu_{sc}$ : Temperatura del coeficiente de corriente de cortocircuito,  $\left(\frac{A}{K}\right)$  Proporcionada por el fabricante

$I_{ph,ref}$ : Fotocorriente de (A) en STC

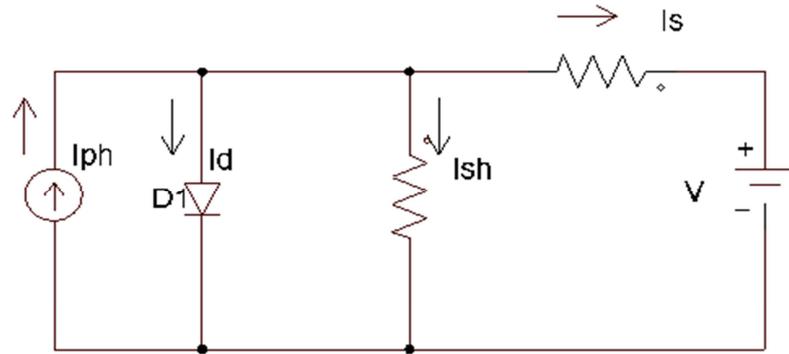


Ilustración 4: Representación eléctrica de una celda solar

Fuente y Elaboración: Los autores

### 2.2.3 Determinación de $I_o$

Para realizar el cálculo de la corriente  $I_o$  en condiciones de pruebas estándar en circuito abierto, cortocircuito y el voltaje se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

Circuito abierto:

- $I = 0$
- $V = V_{oc,ref}$

Obteniendo la siguiente ecuación 12 a partir de la ecuación 8:

$$0 = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[ \exp\left(\frac{V_{oc}}{a_{ref}}\right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

$I_{ph,ref}$ : Fotocorriente de (A) en STC

$I_{o,ref}$ : Corriente de fuga o saturación en STC

$a_{ref}$ : Factor de idealidad modificado en STC

Cortocircuito:

Condiciones

- $V = 0$
- $I = I_{sc,ref}$
- $a =$  Es el factor de Idealidad modificado

$$I_{sc,ref} = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[ \exp \left( \frac{I_{sc,ref} R_s}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

**$I_{sc,ref}$**  : Corriente de Cortocircuito en STC

**$I_{ph,ref}$** : Fotocorriente de (A) en STC

**$I_{o,ref}$**  : Corriente de fuga o saturación en STC

**$a,ref$**  : Factor de idealidad modificado en STC

**$R_s$** : Resistencia en serie del panel

Voltaje:

*Condiciones a la máxima potencia*

- $V_{mp,ref}$ : Voltaje de referencia en potencia máxima
- $I_{mp,ref}$ : Corriente de referencia en potencia máxima.

$$I_{pm,ref} = I_{ph,ref} - I_{o,ref} \left[ \exp \left( \frac{V_{pm,ref} + I_{pm,ref} R_s}{a_{ref}} \right) - 1 \right] \quad \text{Ecuación 14}$$

Por lo que para calcular él  $I_{o,ref}$  se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$I_{o,ref} = I_{sc,ref} \exp \left( \frac{-V_{oc,ref}}{a} \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

Para el cálculo de la corriente de saturación inversa nos basamos en la siguiente formula:

$$I_0 = DT_C^3 \exp\left(\frac{-q\varepsilon_G}{A*k}\right) \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

**I<sub>0</sub>**: Corriente de Saturación

**D**: Factor de difusión del diodo

**T<sub>C</sub>**: Temperatura de la celda

**A**: Factor de idealidad modificado en STC

**q**: Carga del electrón

**ε<sub>G</sub>**: Energía de la banda del material

**k**: constante de Boltzmann  $1.381 * 10^{-23}$  J/K (julio por kelvin).

*Tabla 1: Factor de Idealidad (A).*

<b>Tecnología</b>	<b>Factor de Idealidad</b>
Si-mon	1.2
Si-poly	1.3
a-Si-H	1.8
A-Si-H tandem	3.3
A-Si-H triple	5
CdTe	1.5
CTs	1.5
AsGa	1.3

**Fuente:** Huan-Liang et al., 2008.

### 2.3 Simulación del panel fotovoltaico

Para la simulación se basa en el programa Simulink en donde se utiliza un panel fotovoltaico policristalino de 230W cuyas características eléctricas son las siguientes:

Tabla 2: Parámetros eléctricos del panel fotovoltaico

PARÁMETRO	VALOR	
Potencia Máxima nominal.	230	W
Tolerancia.	0±3%	
Voltaje en Pmax (Vmp).	29,5	V
Corriente en Pmax (Imp).	7,8	A
Voltaje de circuito abierto (Voc).	36,6	V
Corriente de cortocircuito (Isc).	8,42	A
Operación normal de celda temp. (NOCT).	47±2	°C
Voltaje máximo del sistema.	1000	V DC
Máxima serie de fusibles.	15	A
Funcionamiento de temperatura.	-40°C to +85°C	

Fuente: Los autores

Además de los parámetros eléctricos se debe calcular el parámetro de ajuste "b", según Gil (2008) el valor de b se encuentra en el rango de 0,01 a 0,18.

Por lo tanto, se establece la siguiente condición:

$$1 - e\left(\frac{-1}{b}\right) \approx 1$$

Dónde:

**b**= parámetro de ajuste de la curva

Por lo tanto:

$$I(V) = \frac{I_x}{1 - e\left(\frac{-1}{b}\right)} \left[ 1 - e\left(\frac{V}{bV_x} - \frac{1}{b}\right) \right]$$

Dónde:

$$V_x = 36,6V \quad I_x = 8,42A$$

$$I = 7,8A \quad V = 29,5V$$

$$7,8 = \frac{8,42}{1} \left[ 1 - e\left(\frac{29,5}{b \cdot 36,6} - \frac{1}{b}\right) \right]$$

$$\mathbf{b=0,0744}$$

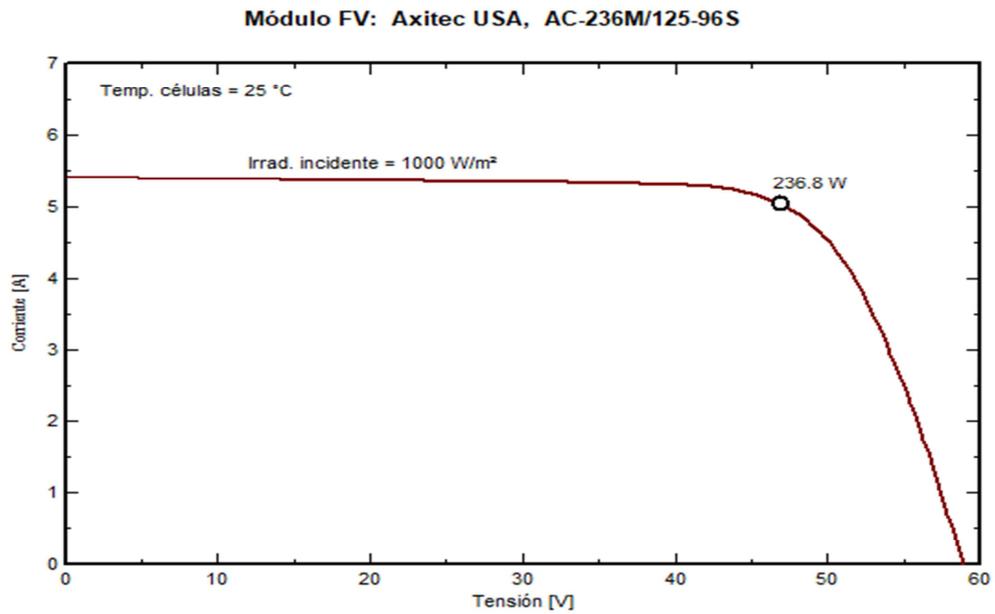
Parámetro de ajuste de la curva "b" se encuentra dentro del rango establecido

### 2.3.1 Simulaciones para irradiación y temperatura constante

Para la simulación de las funciones de irradiación y temperatura, se realiza un subsistema llamado panel solar en el programa de Simulink (Matlab), diseñado mediante bloques de programación.

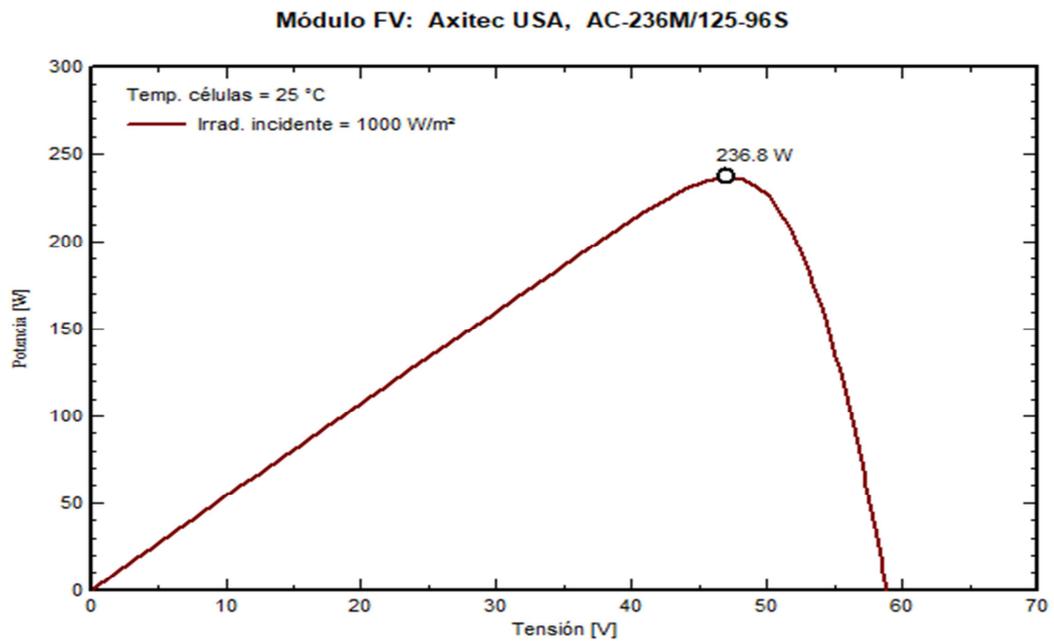
Las ecuaciones necesarias para el cálculo de la corriente y voltaje que simulara el panel se basan en los siguientes parámetros:  $I_{ph}$ ,  $I_0$ , y el factor de idealidad (A).

Con el modelo matemático de (Habbati , Ramdani, & Moulay, 2014) se procede a realizar las simulaciones del modelo en condiciones estándares, con valores de irradiación  $E_i = 1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura  $T=25^\circ\text{C}$ , de acuerdo a estos valores se presentan las curvas características de I-V y P-V las cuales se presentan en la ilustración 5.



*Ilustración 5: Relación corriente – voltaje para una irradiación y temperatura constante.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab



*Ilustración 6: Relación potencia – voltaje con irradiación y temperatura constante.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab

### 2.3.2 Simulaciones para irradiación variable

#### Irradiación variable – Temperatura constante por meses

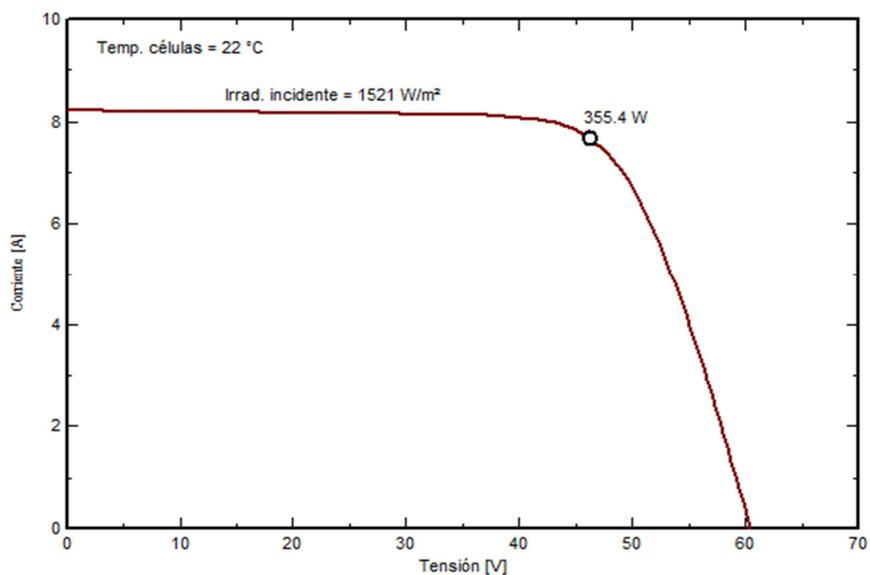
Tabla 3: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de agosto

	SEMANAS	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
AGOSTO	1	1420	20,4
	2	1521	22,1
	3	1467	22,1
	4	1509	22,1
	5	1517	22,3
TOTAL		1521	22,3

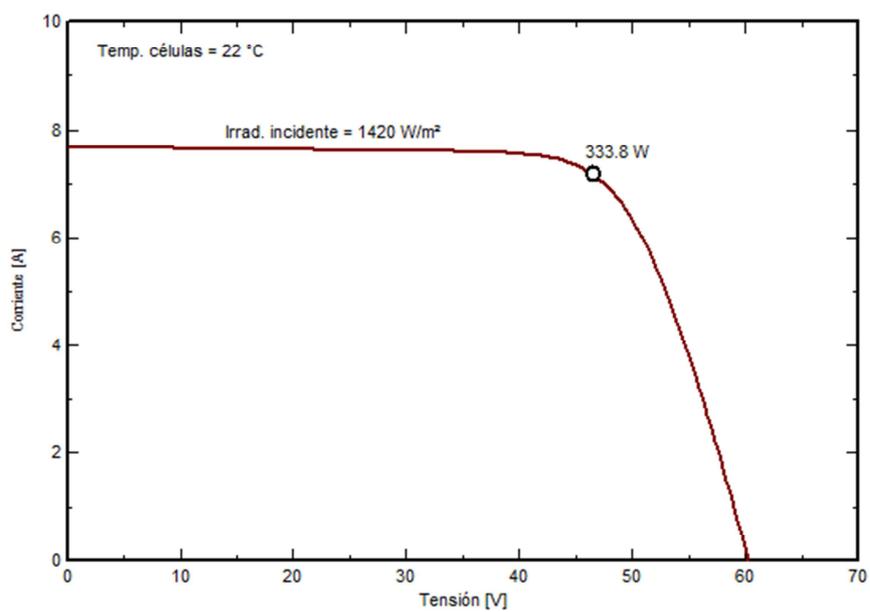
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

En función de la tabla N°3 se grafica las curvas de corriente vs tensión y de la potencia con los valores de irradiación por semanas con una temperatura total de 22,3°C quedándonos con potencias de 333,8W - 343,9W - 355,4W - 352,9W - 354,6W. Como se observa en las gráficas:

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



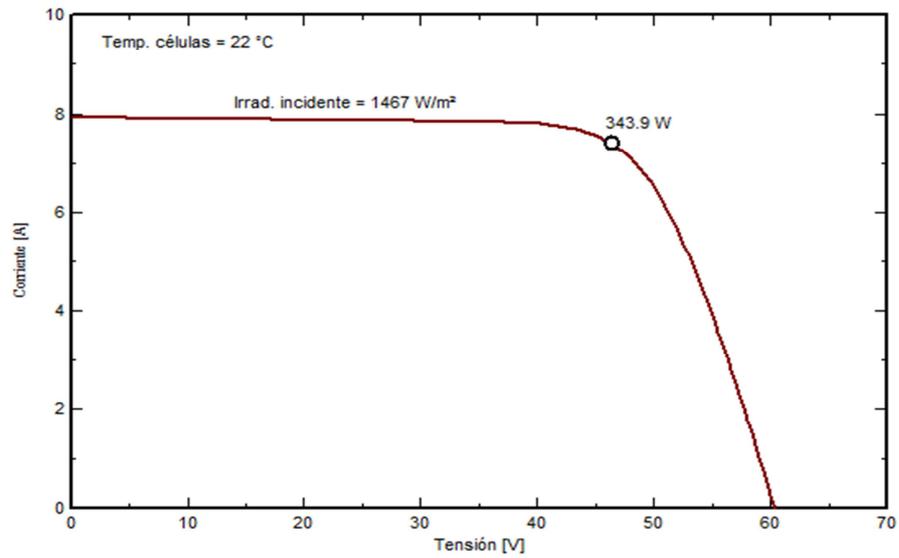
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



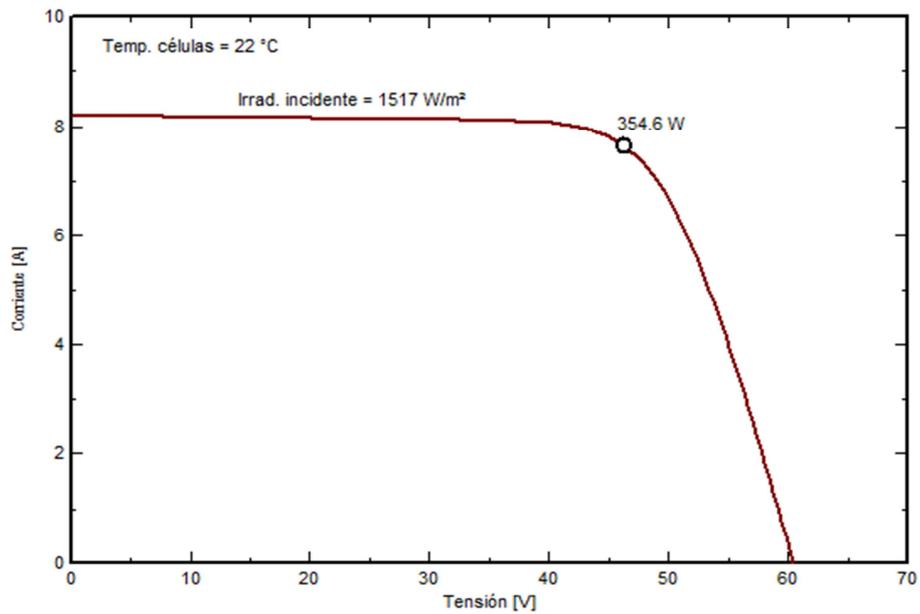
Gráfica 1: Curva de Corriente vs Tensión para irradiancias variables de 1521 W/m<sup>2</sup> y 1420 W/m<sup>2</sup> del mes de agosto.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S

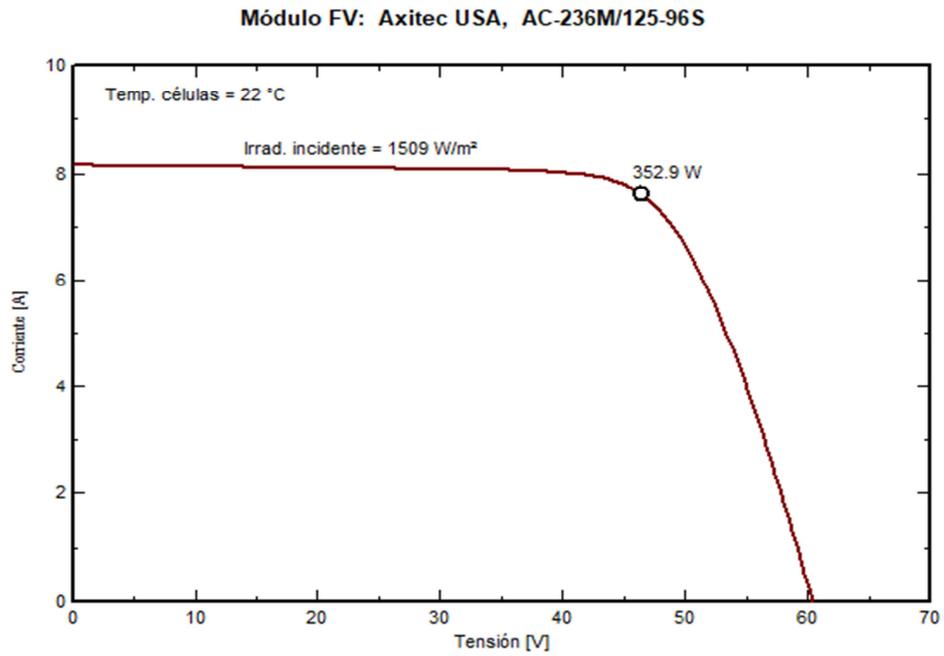


Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Gráfica 2: Curva de Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1517 W/m<sup>2</sup> y 1467 W/m<sup>2</sup> del mes de agosto.

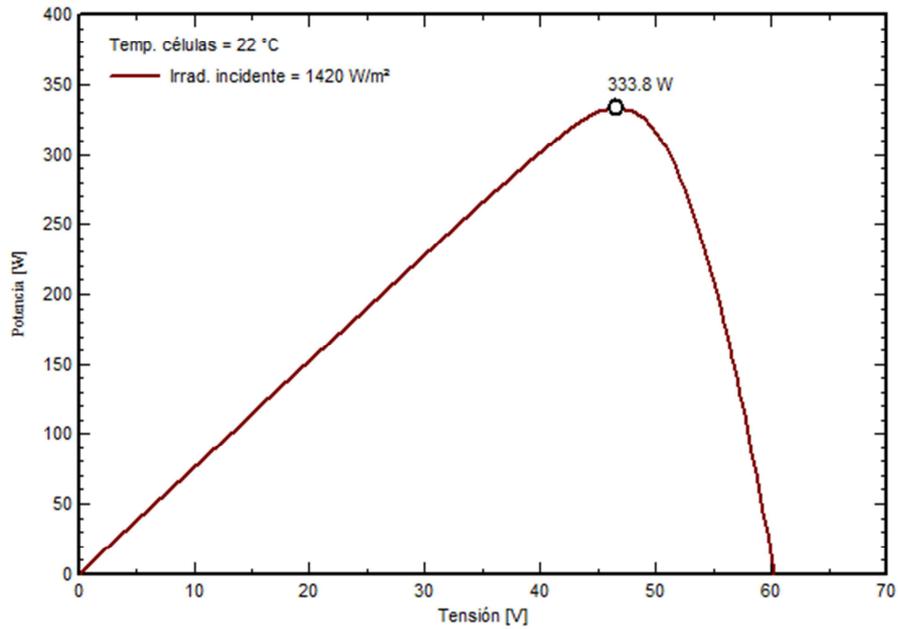
Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



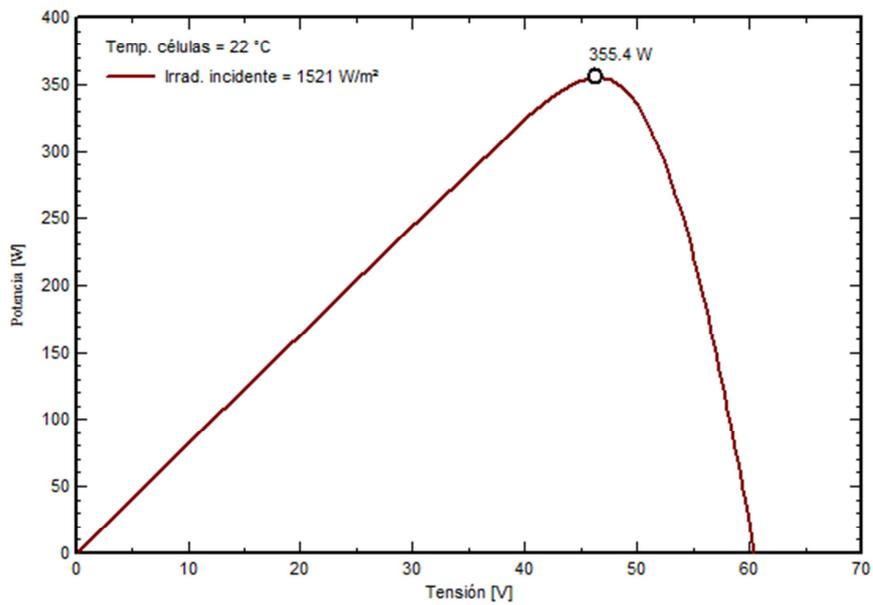
Gráfica 3: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1509 W/m<sup>2</sup> del mes de agosto.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



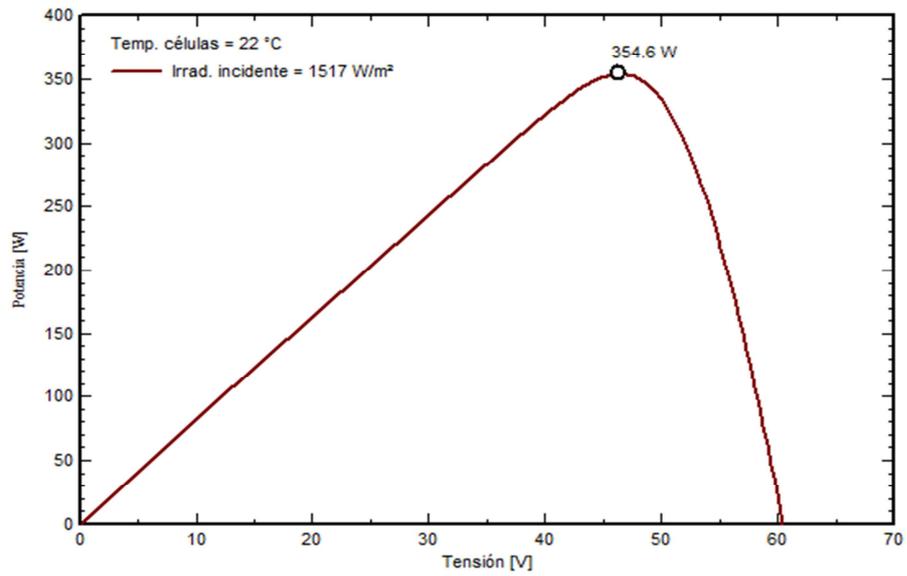
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



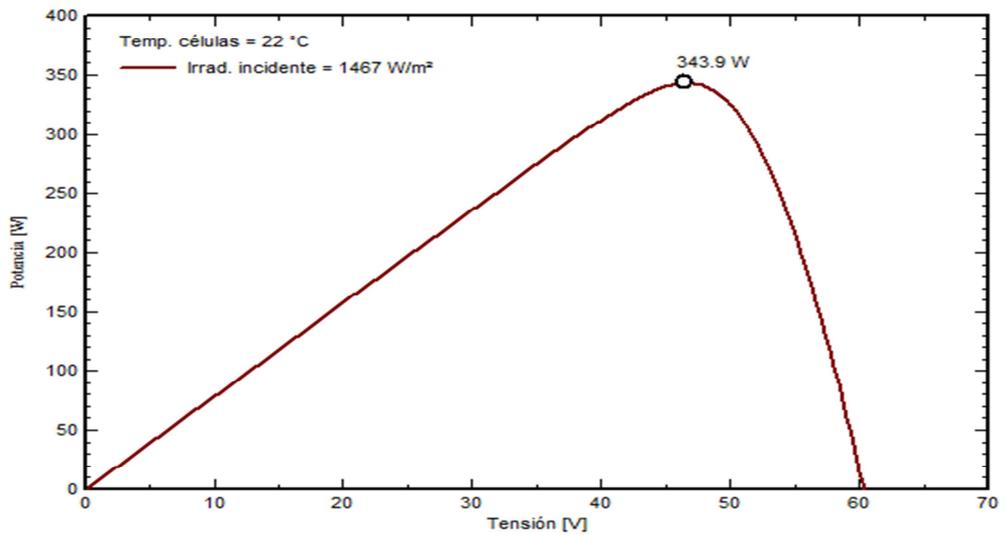
Gráfica 4: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1420W/m<sup>2</sup> y 1521 W/m<sup>2</sup> mes de agosto.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S

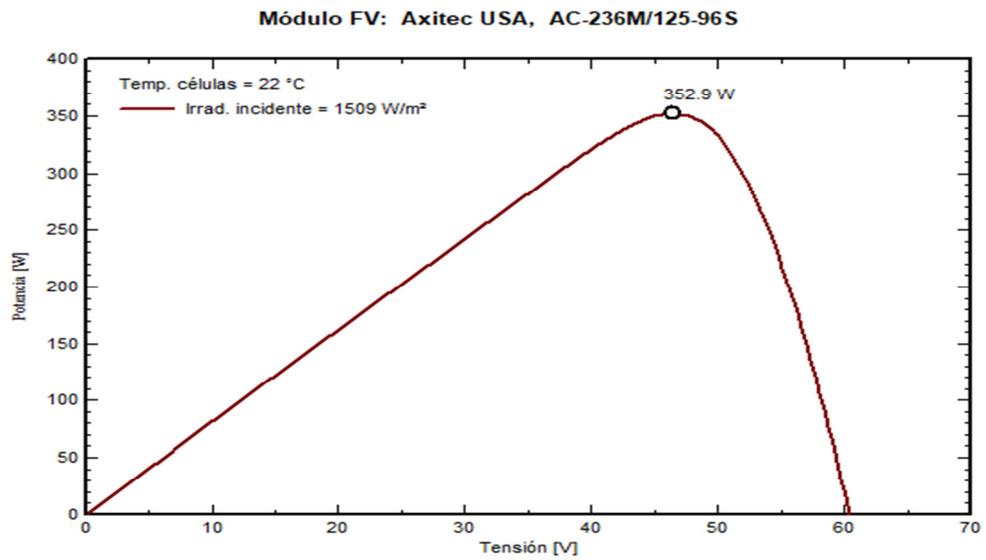


Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Gráfica 5: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1517 W/m<sup>2</sup> y 1467 W/m<sup>2</sup> del mes de agosto.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 6: Curva Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1509 W/m<sup>2</sup> y del mes de agosto.

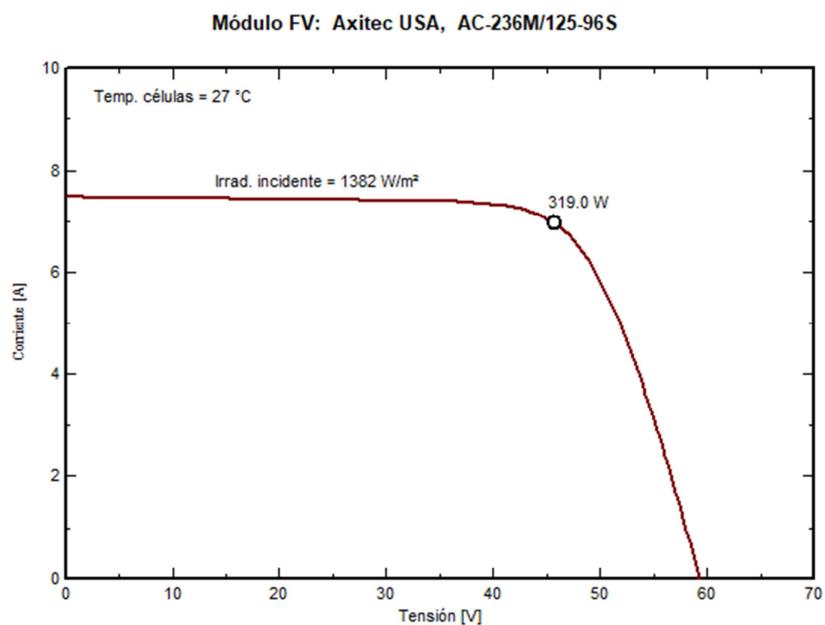
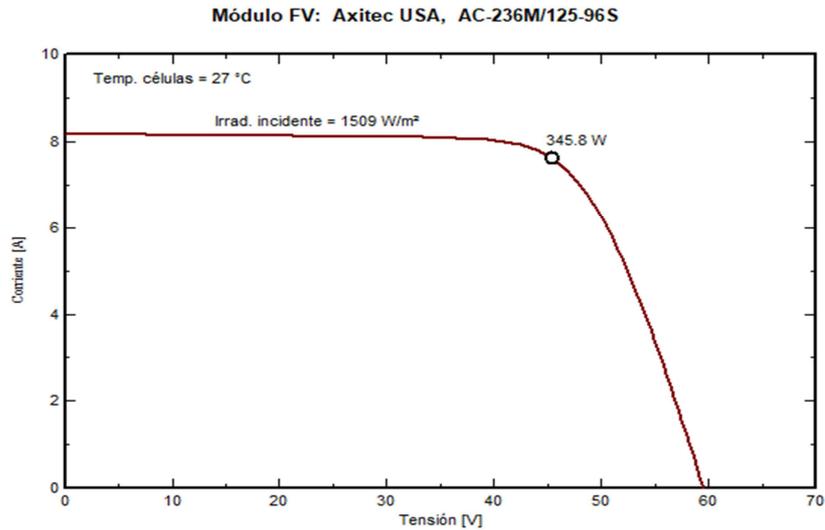
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Tabla 4: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de septiembre

	SEMANAS	RADIACIÓN SOLAR	TEMPERATURA
		GLOBAL (W/m <sup>2</sup> )	(°C)
SEPTIEMBRE	1	1540	22,3
	2	1382	23,3
	3	1589	23,7
	4	1509	26,5
<b>TOTAL</b>		<b>1589</b>	<b>26,5</b>

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

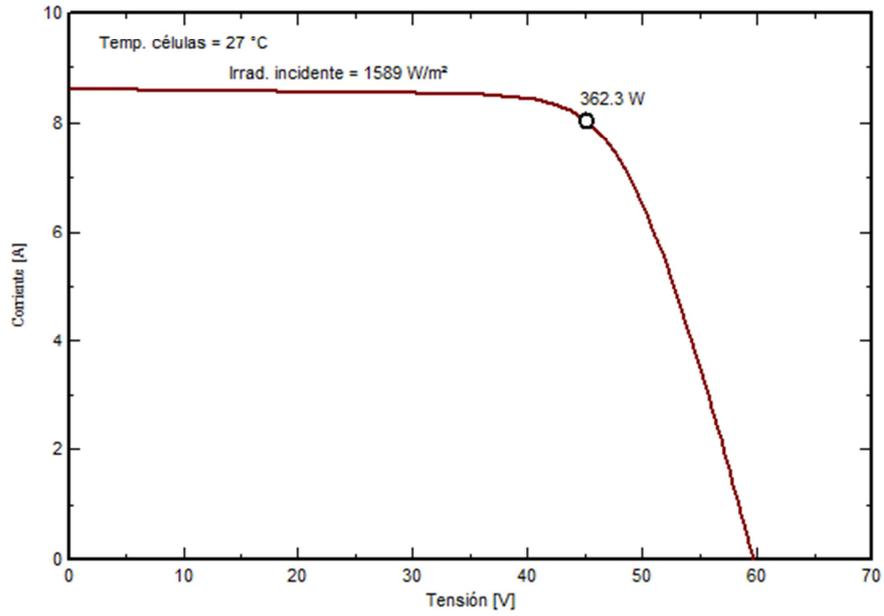
En función de la tabla N<sup>4</sup>, se gráfica las curvas de corriente vs tensión y de la potencia con los valores de irradiación por semanas con una temperatura total de  $26,5^{\circ}\text{C} \approx 27^{\circ}\text{C}$  quedándonos con potencias de 320,3W - 347,2W - 353,7W - 363,8W. Cómo se observa en las gráficas:



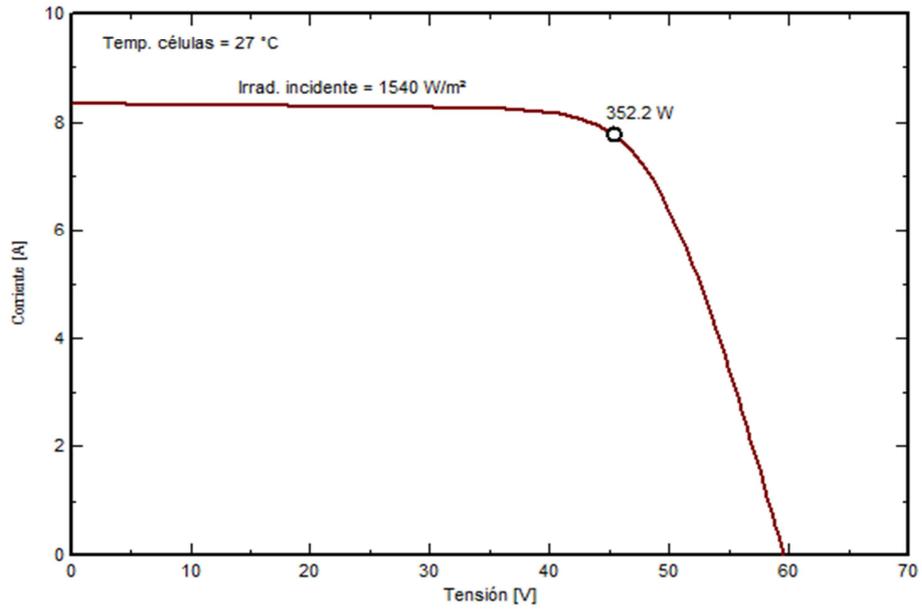
Gráfica 7: Curva Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de  $1509\text{ W/m}^2$ ,  $1382\text{ W/m}^2$  del mes de septiembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



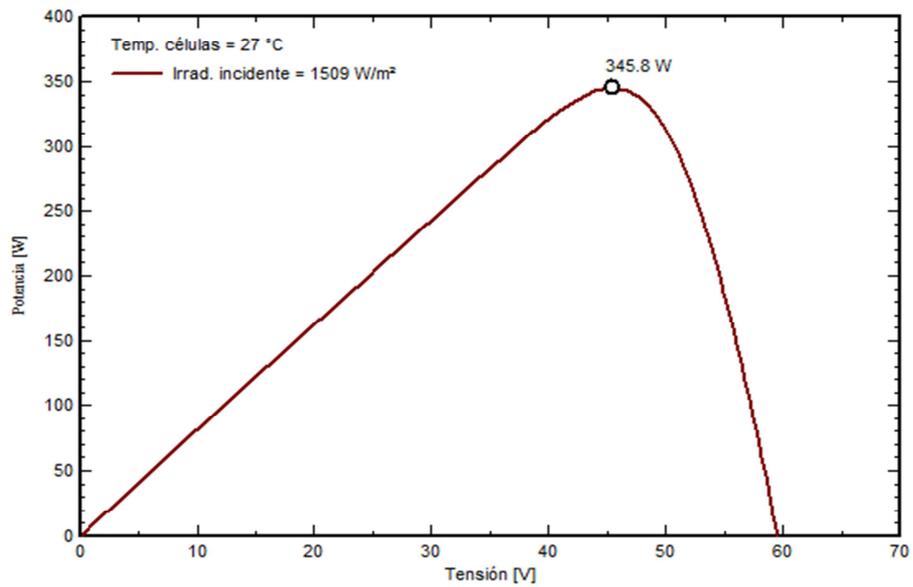
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



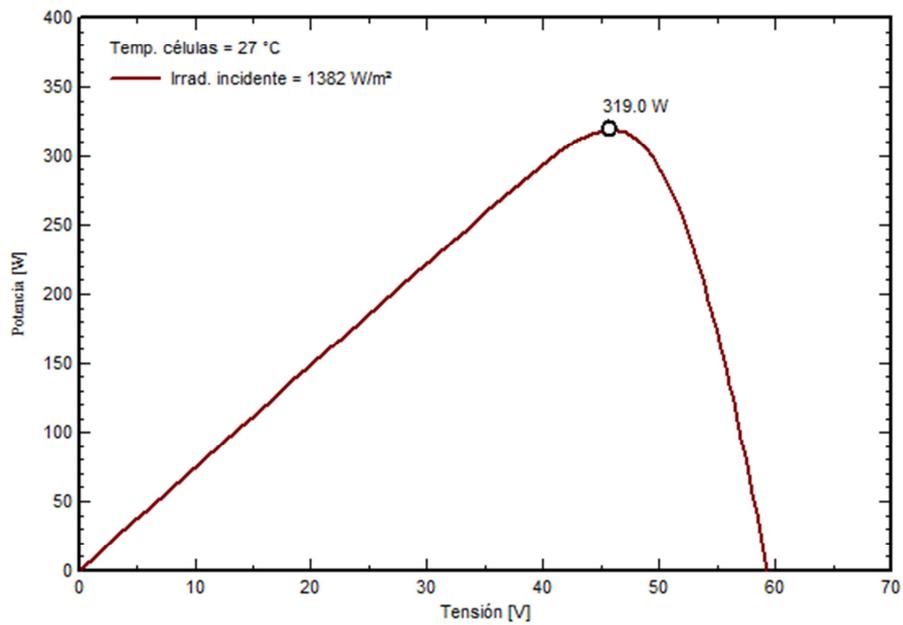
Gráfica 8: Curva Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1589 W/m<sup>2</sup> y 1540 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



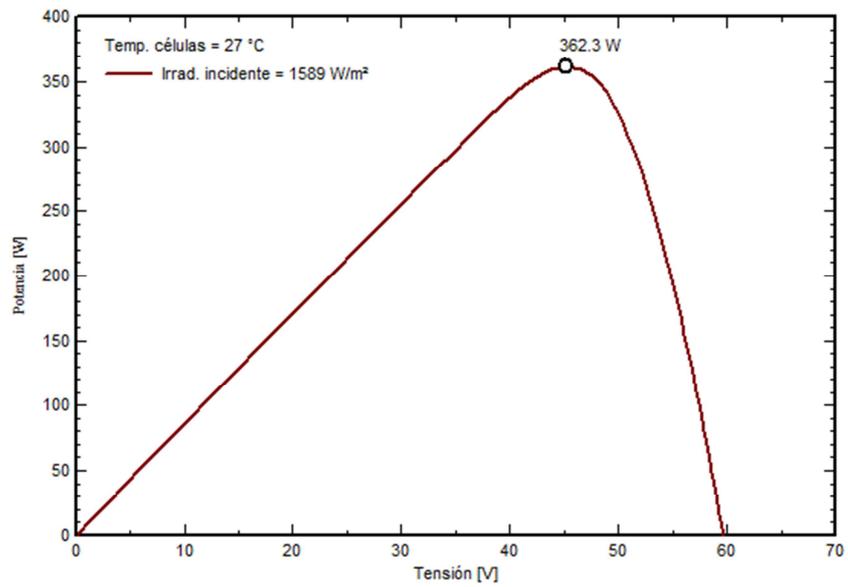
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



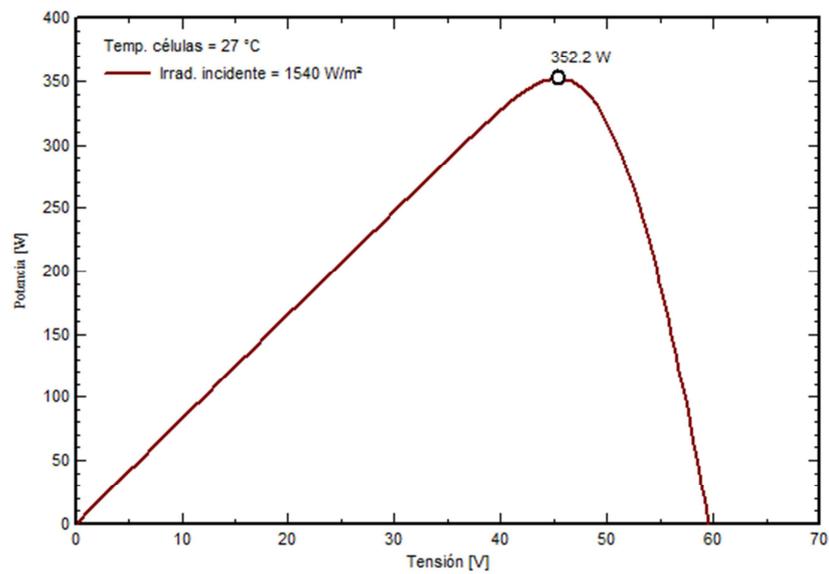
Gráfica 9: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1509 W/m<sup>2</sup> y 1382 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Gráfica 10: Curva Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1589 W/m<sup>2</sup> y 1540 W/m<sup>2</sup> del mes de septiembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

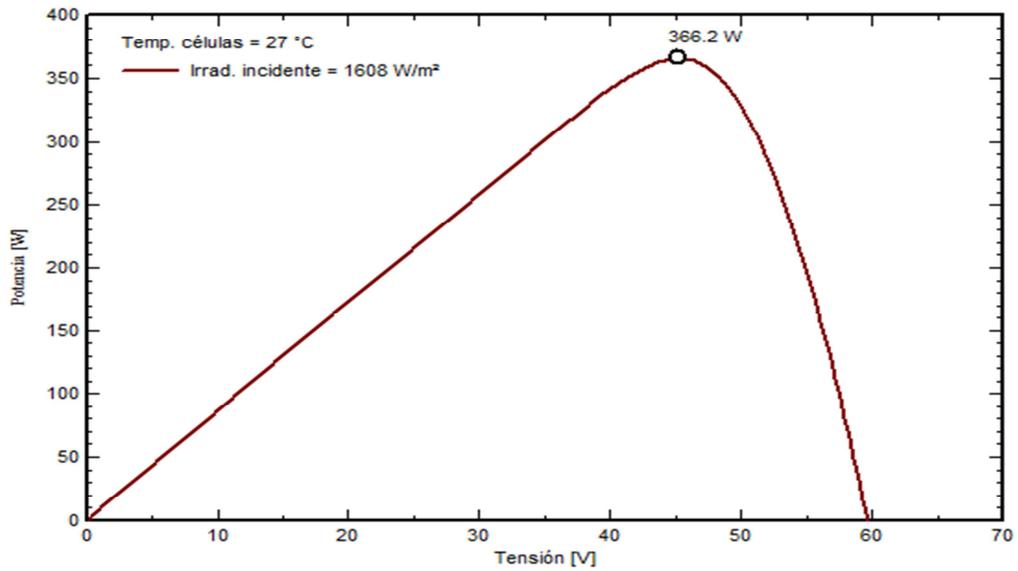
Tabla 5: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Octubre

	SEMANAS	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
OCTUBRE	1	1608	26,5
	2	1586	26,5
	3	1551	26,5
	4	1643	26,5
TOTAL		1643	26,5

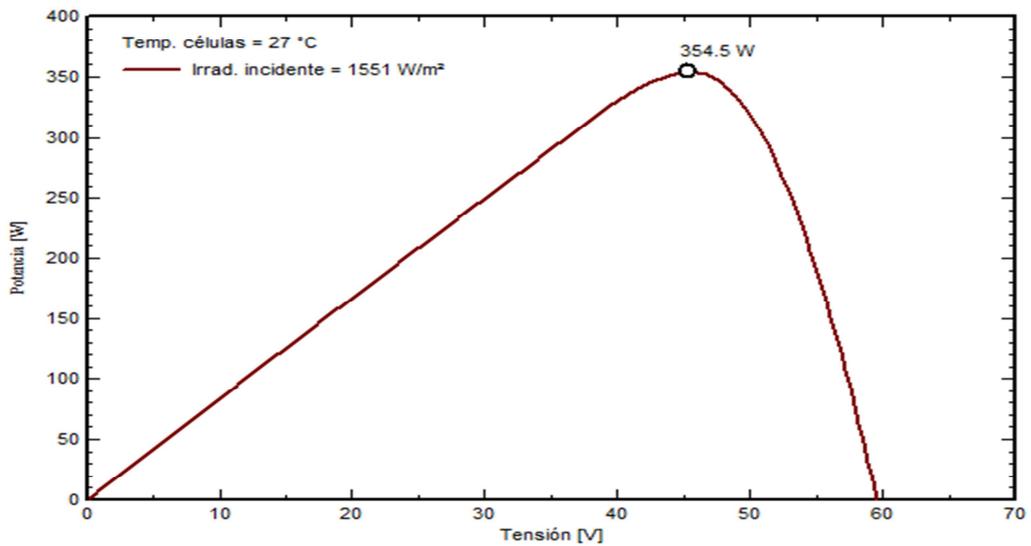
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIIC

En función de la tabla N<sup>5</sup>, se gráfica las curvas de Corriente vs Tensión y de la potencia con los valores de irradiación por semanas con una temperatura total de 26,5°C ≈ 27°C quedándonos con potencias de 364,5W – 361,7W – 366,2W – 373,3W - como se observa en las gráficas:

**Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S**



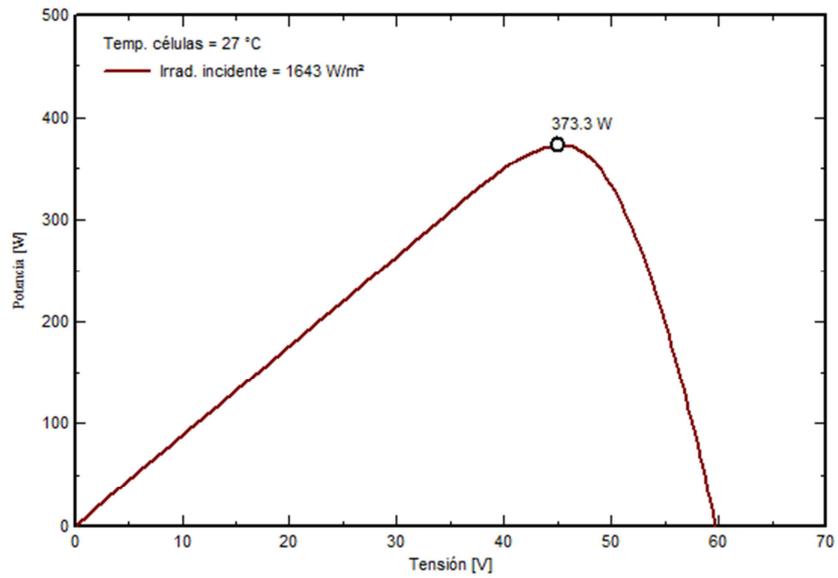
**Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S**



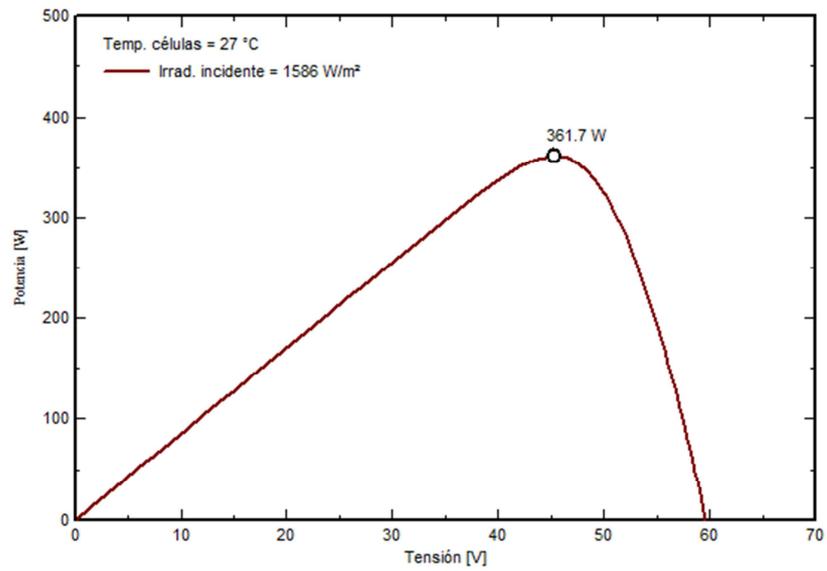
Gráfica 11: Curva de corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1608 W/m<sup>2</sup> y 1551 W/m<sup>2</sup> del mes de octubre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



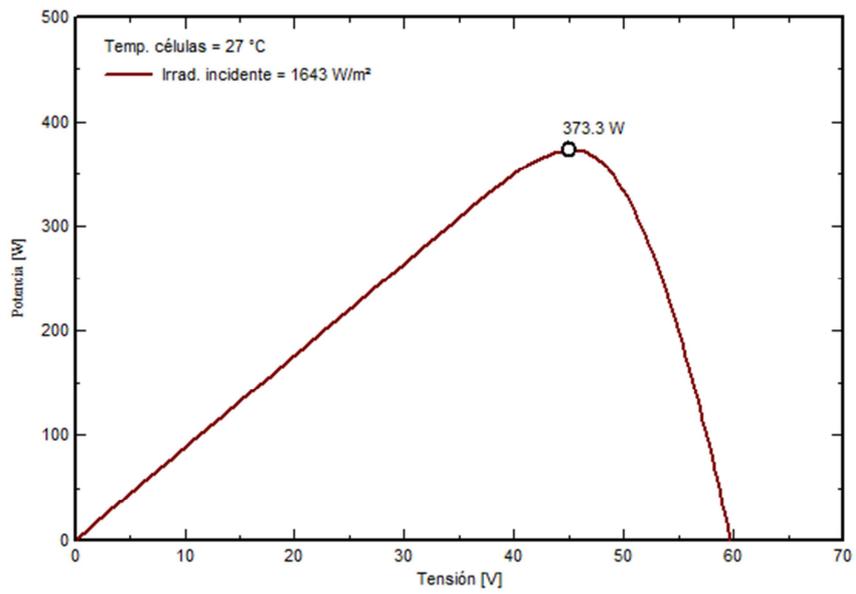
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



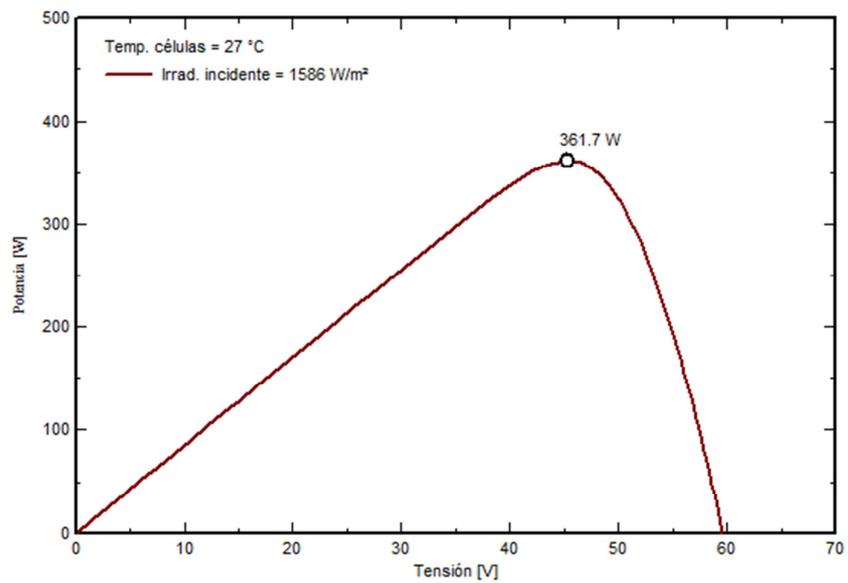
Gráfica 12: Curva de corriente vs Tensión para irradiaciones variables de 1643 W/m<sup>2</sup> y 1586 W/m<sup>2</sup> del mes de octubre.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



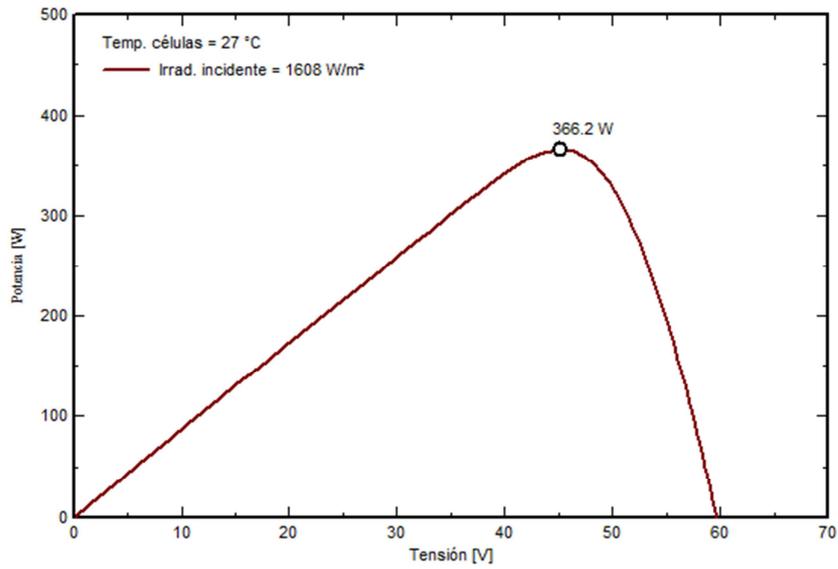
Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



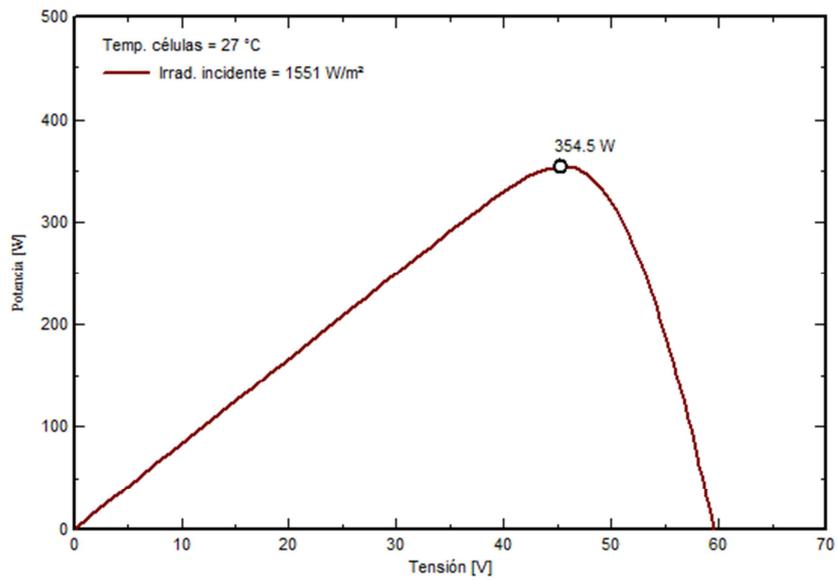
Gráfica 13: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1643 W/m<sup>2</sup> y 1586 W/m<sup>2</sup> del mes de octubre.

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Gráfica 14: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de 1608 W/m<sup>2</sup> y 1551 W/m<sup>2</sup> del mes de octubre.

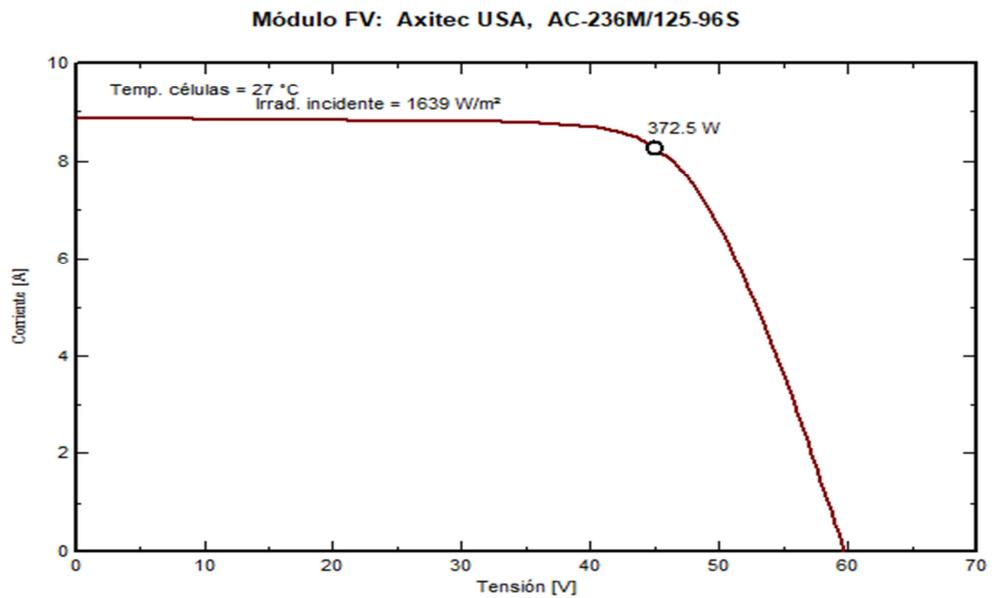
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIIC

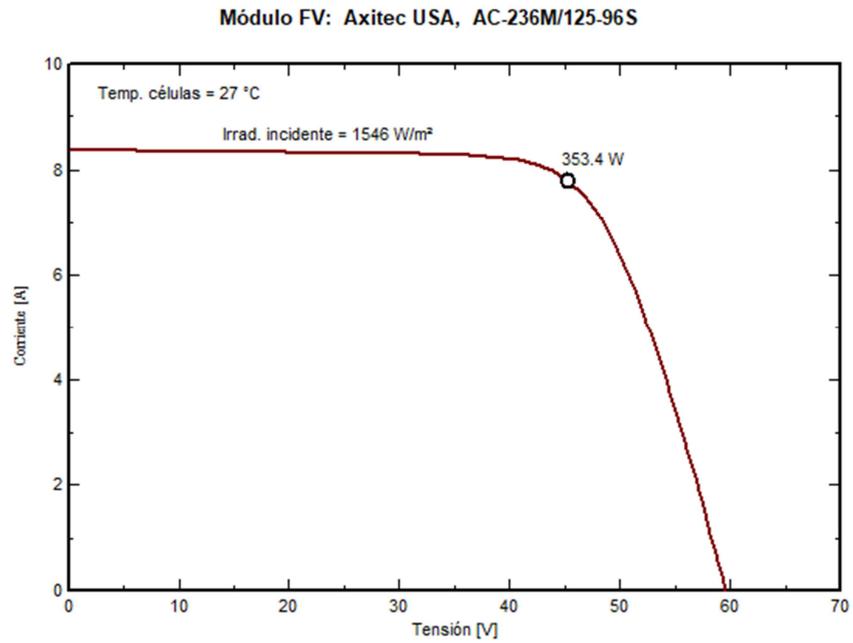
Tabla 6: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Noviembre

	SEMANAS	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
NOVIEMBRE	1	1569	26,5
	2	1592	26,5
	3	1546	26,5
	4	1577	27,4
	5	1639	27,4
TOTAL		1639	27,4

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

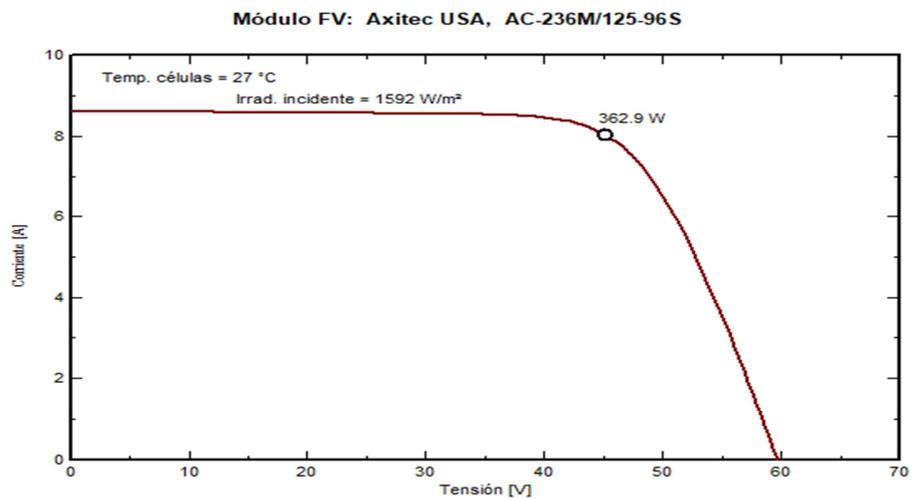
En función de la tabla N° se gráfica las curvas de corriente vs tensión y de la potencia con los valores de irradiación por semanas con una temperatura total de 27°C quedándonos con potencias de 358,2W – 362,9W – 353,4W – 359,8W – 372,5W como se observa en las gráficas:





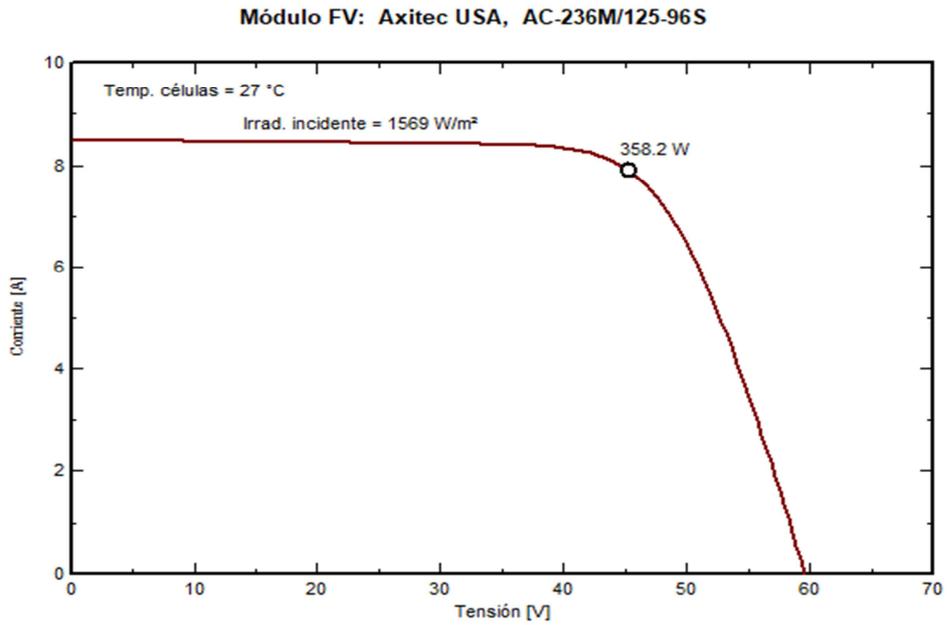
Gráfica 15: Curva de Corriente vs Tensión para irradiaciones variables de  $1639 \text{ W/m}^2$  y  $1546 \text{ W/m}^2$  del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



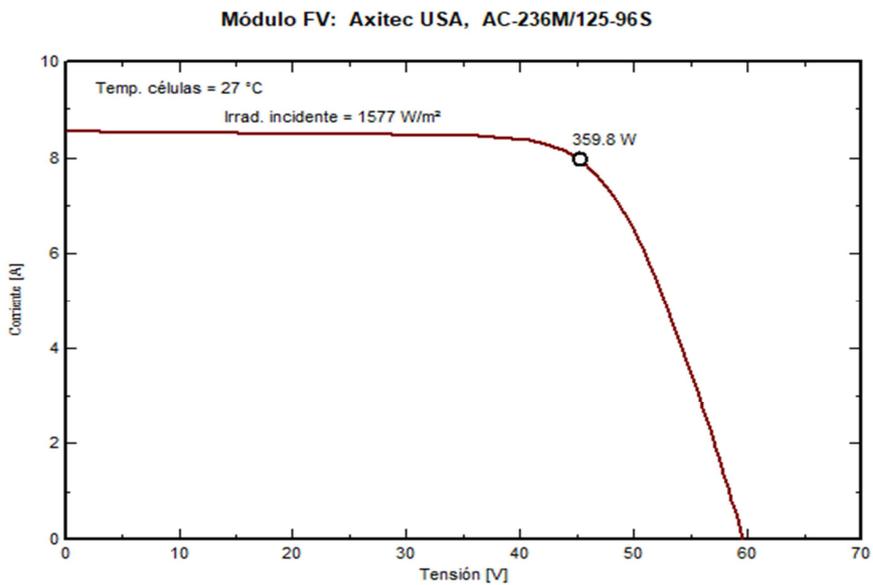
Gráfica 16: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de  $1592 \text{ W/m}^2$  del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 17: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de  $1569 \text{ W/m}^2$  del mes de noviembre.

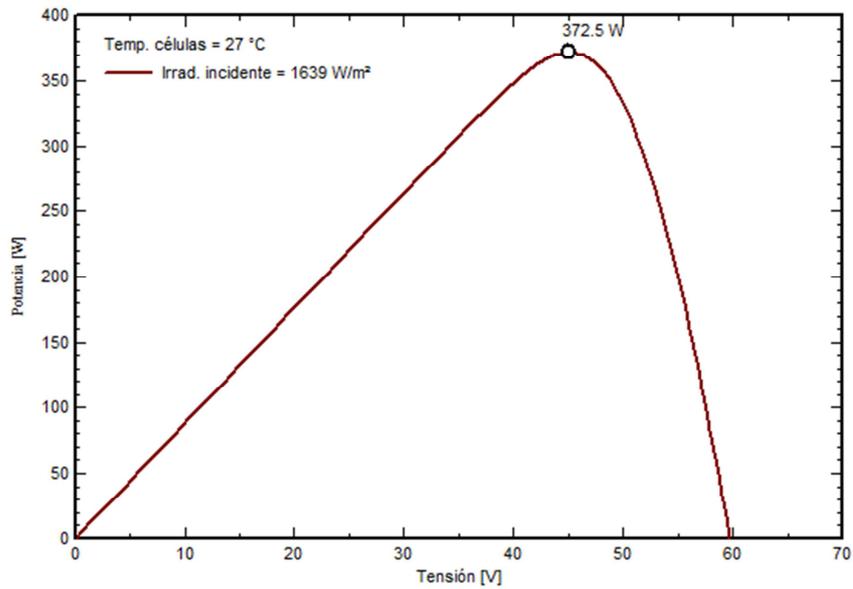
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



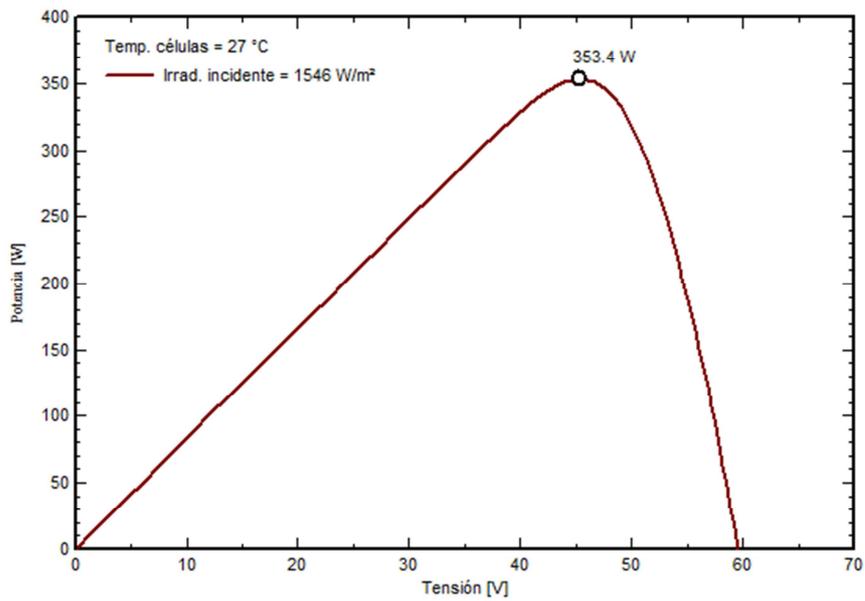
Gráfica 18: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de  $1577 \text{ W/m}^2$  del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S

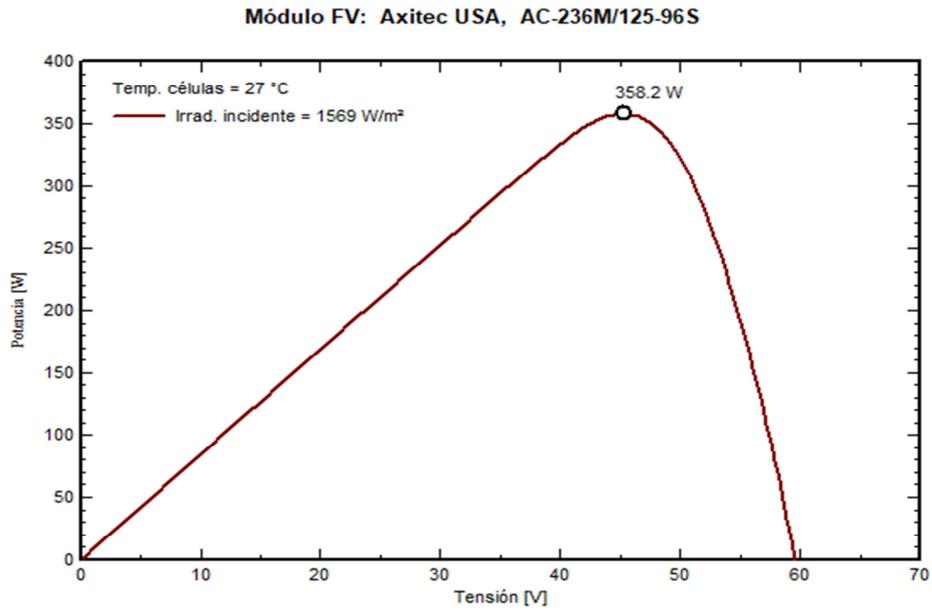


Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



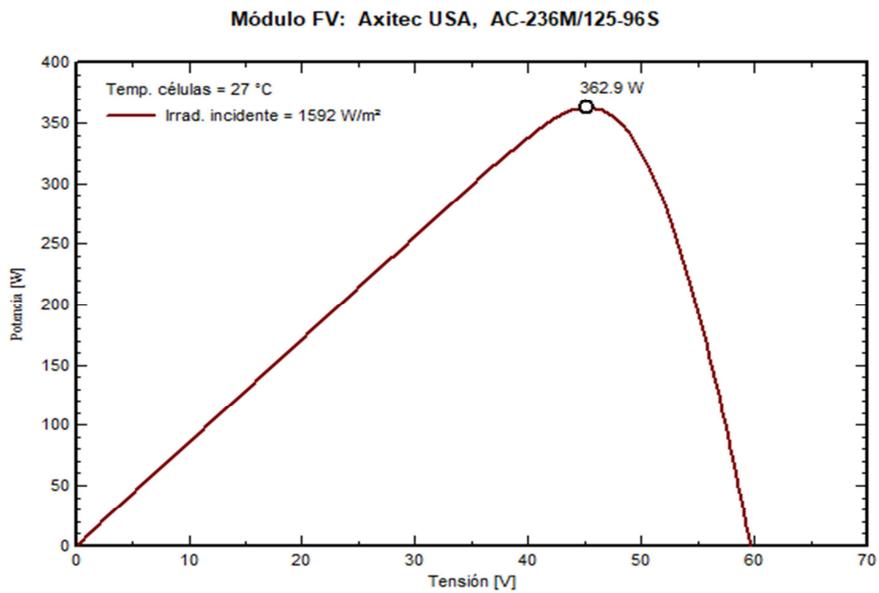
Gráfica 19: Curva de Potencia vs Tensión para irradiaciones variables de  $1639 \text{ W/m}^2$  y  $1546 \text{ W/m}^2$  del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



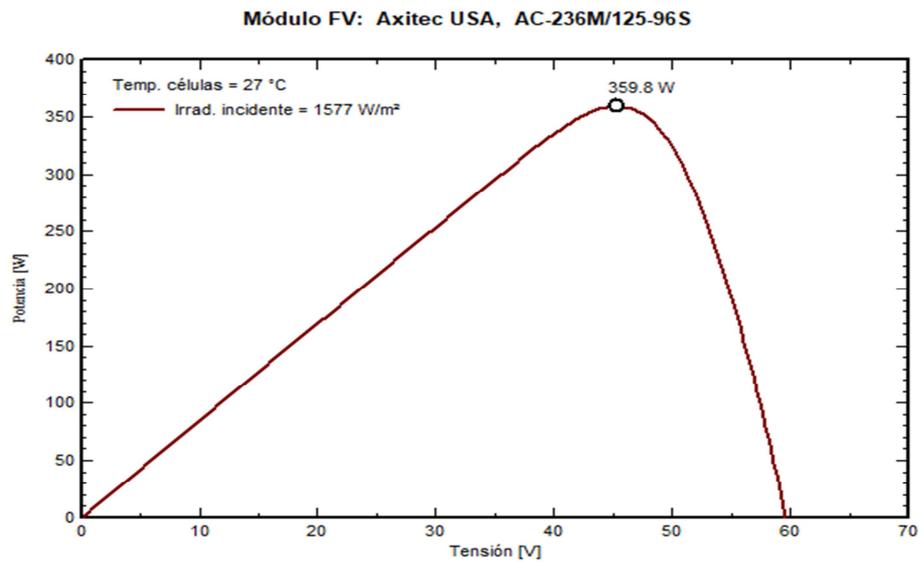
Gráfica 20: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1569 W/m<sup>2</sup> del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 21: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1592 W/m<sup>2</sup> del mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 22: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1577 W/m<sup>2</sup> del mes de noviembre.

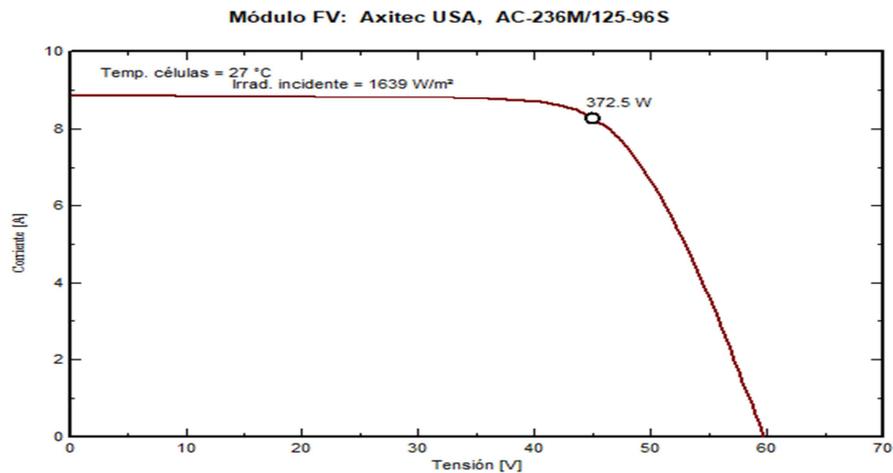
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

Tabla 7: Datos de Irradiación variable y temperatura para el mes de Diciembre

	SEMANAS	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL (W/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
<b>DICIEMBRE</b>	1	1639	27,4
	2	1639	27,4
	3	1639	27,4
	4	1639	27,4
	5	1639	27,4
<b>TOTAL</b>		1639	27,4

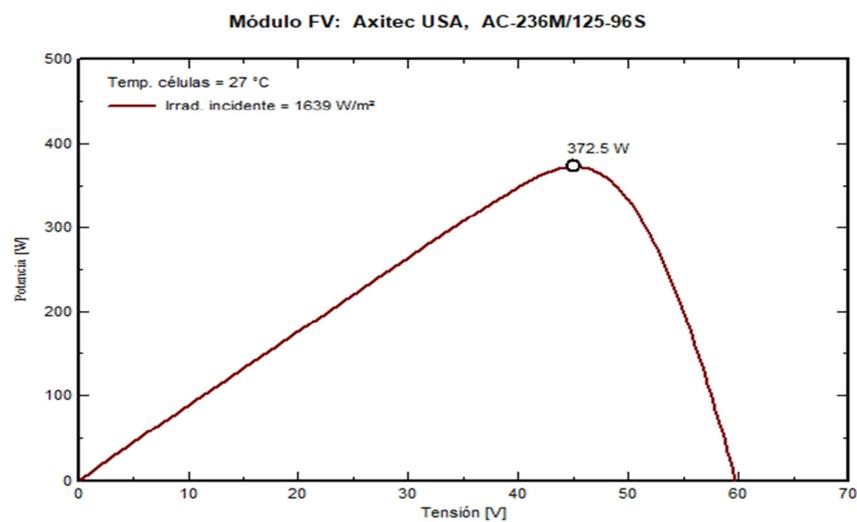
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

En función de la tabla N7 se gráfica las curvas de Corriente vs Tensión y de la Potencia con los valores de irradiación por semanas con una temperatura total de 27°C quedándonos con potencias de 372,5W ya que según la irradiación global es la misma en toda la semana, como se ve en las siguientes graficas:



Gráfica 23: Curva de Corriente vs Tensión para irradiación variable de 1639 W/m<sup>2</sup> del mes de diciembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 24: Curva de Potencia vs Tensión para irradiación variable de 1639 W/m<sup>2</sup> del mes de diciembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

### 2.3.3 Simulaciones para temperatura variable

#### Temperatura variable – Irradiación constante por meses

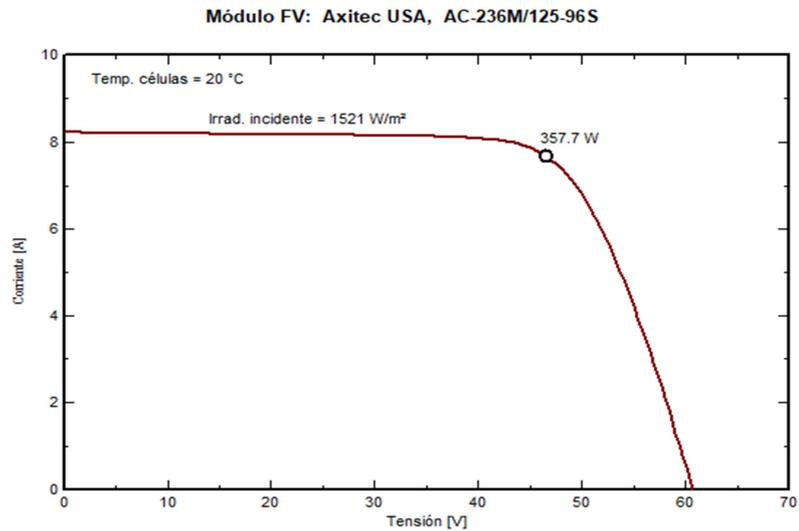
Tabla 8: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Agosto.

Irradiación Global cte= 1521 (W/m<sup>2</sup>)

TEMPERATURA (°C)
20,4
22,1
22,1
22,1
22,3

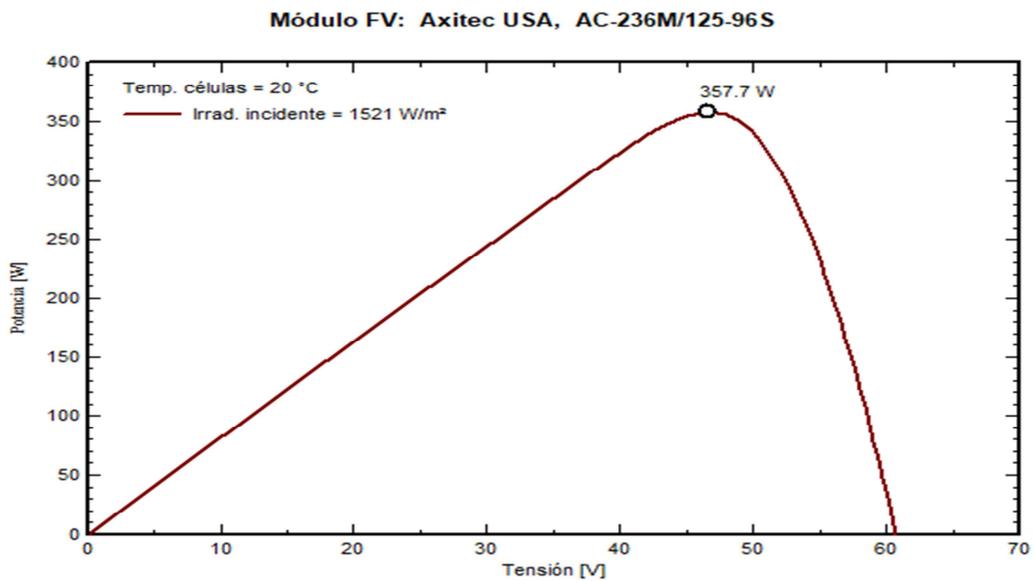
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.

**Curvas de Irradiación constante  $1521 \text{ W/m}^2$  a una temperatura de  $20,4^\circ\text{C} \approx 20^\circ\text{C}$  en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 25: Curva de Corriente vs Tensión para una temperatura variable de  $20^\circ\text{C}$  mes de agosto.

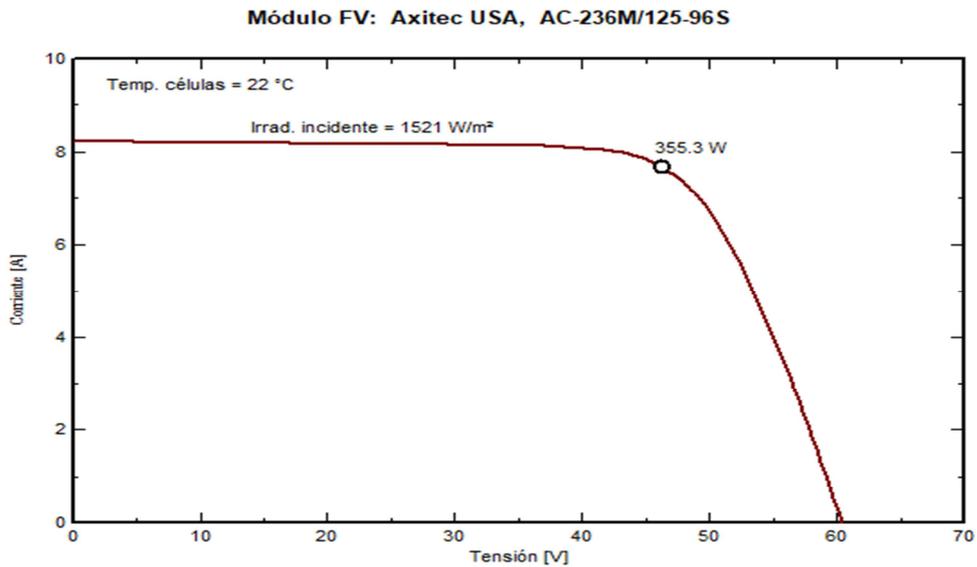
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.



Gráfica 26: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de  $20^\circ\text{C}$  mes de agosto.

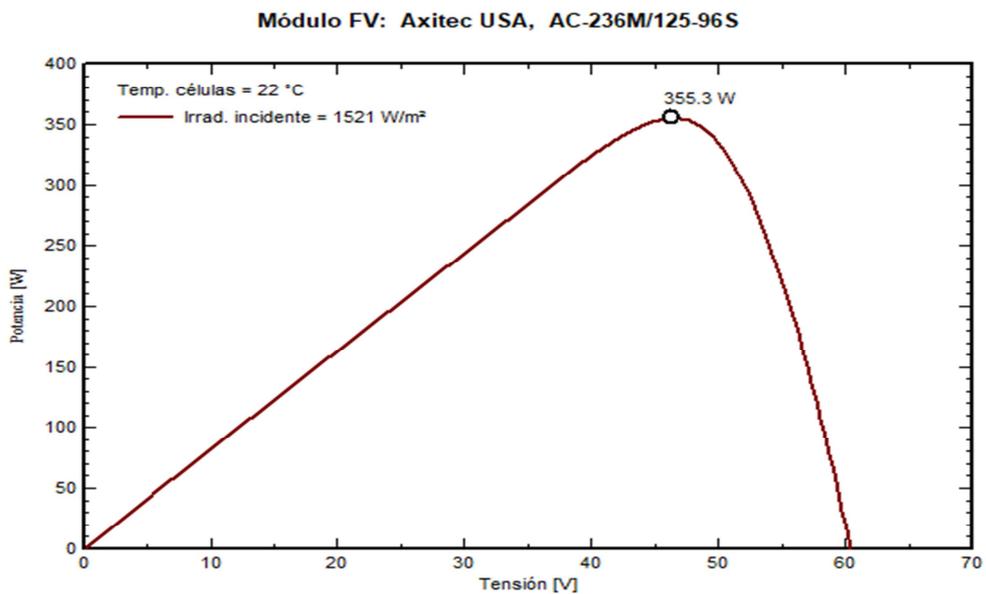
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.

**Curvas de Irradiación constante  $1521 \text{ W/m}^2$  a una temperatura de  $22,1^\circ\text{C} \approx 22^\circ\text{C}$  en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 27: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de  $22^\circ\text{C}$  mes de agosto.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.



Gráfica 28: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de  $22^\circ\text{C}$  mes de agosto.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.

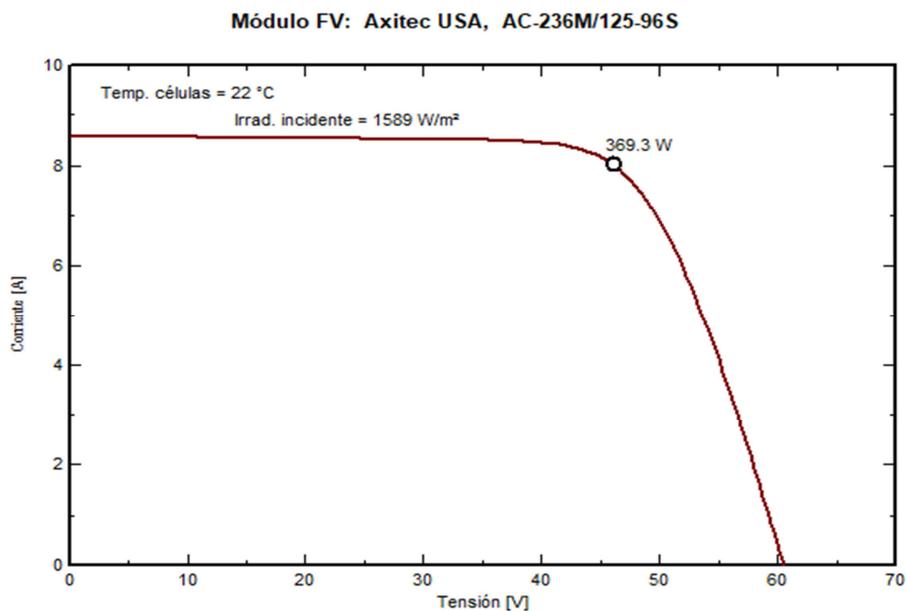
Tabla 9: Datos de Temperatura variable e irradiación constante para el mes de Septiembre.

Irradiación Global cte= 1589 (W/m<sup>2</sup>)

TEMPERATURA (°C)
22,3
23,3
23,7
26,5

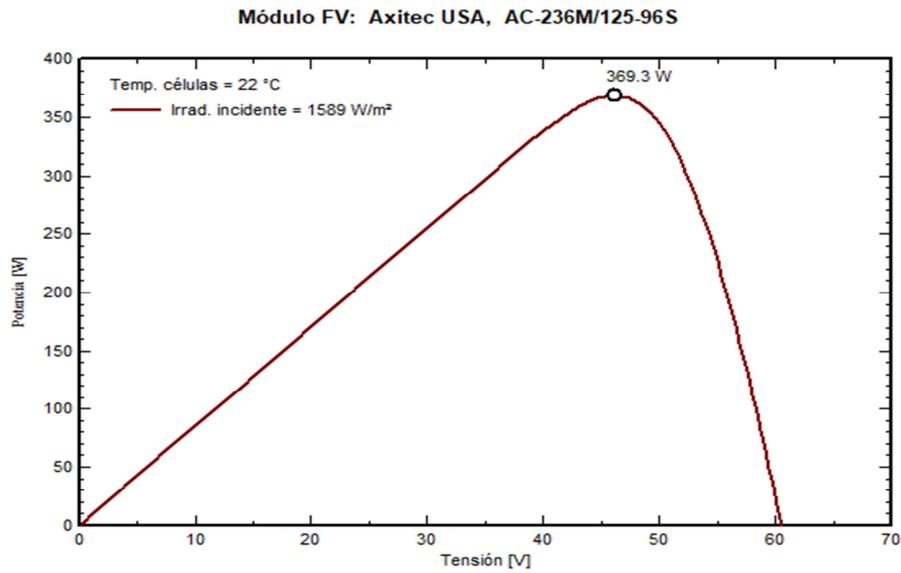
Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.

Curvas de Irradiación constante de 1589 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 22,3°C ≈ 22°C en función de la Corriente y Potencia



Gráfica 29: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de septiembre.

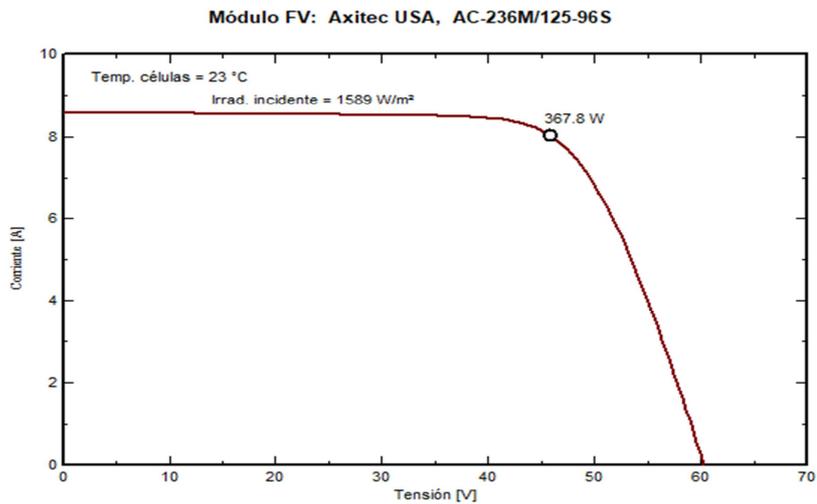
Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.



Gráfica 30: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 22°C mes de septiembre.

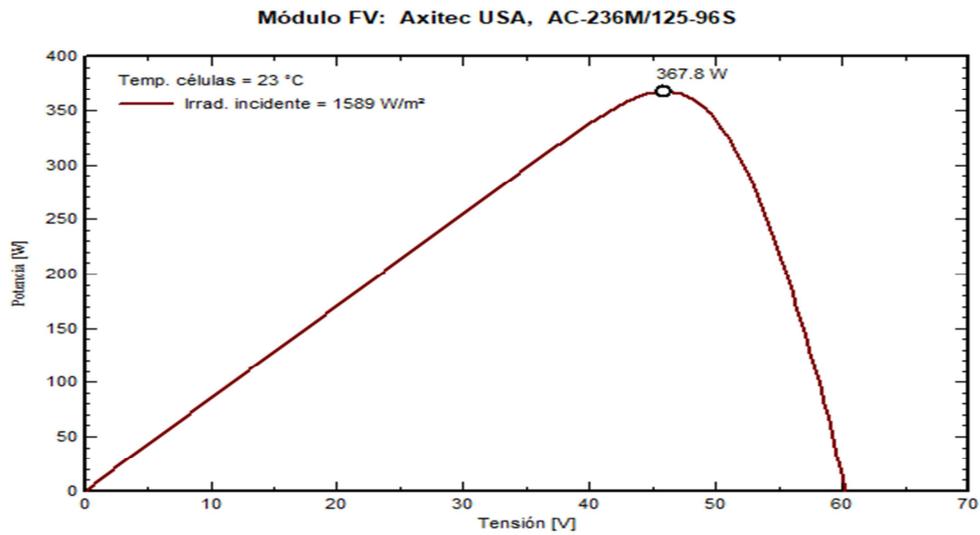
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.

**Curvas de Irradiación constante de 1589 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 23,3°C ≈ 23°C en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 31: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 23°C mes de septiembre.

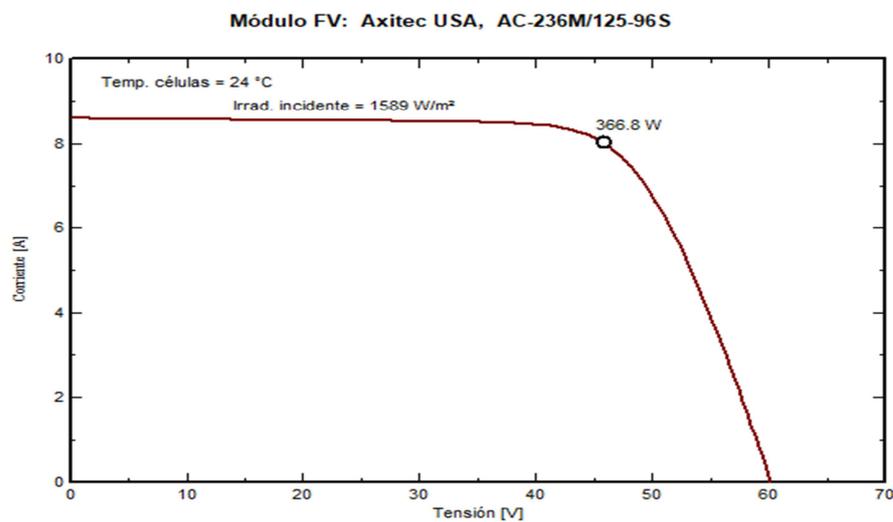
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC.



Gráfica 32: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 23°C mes de septiembre.

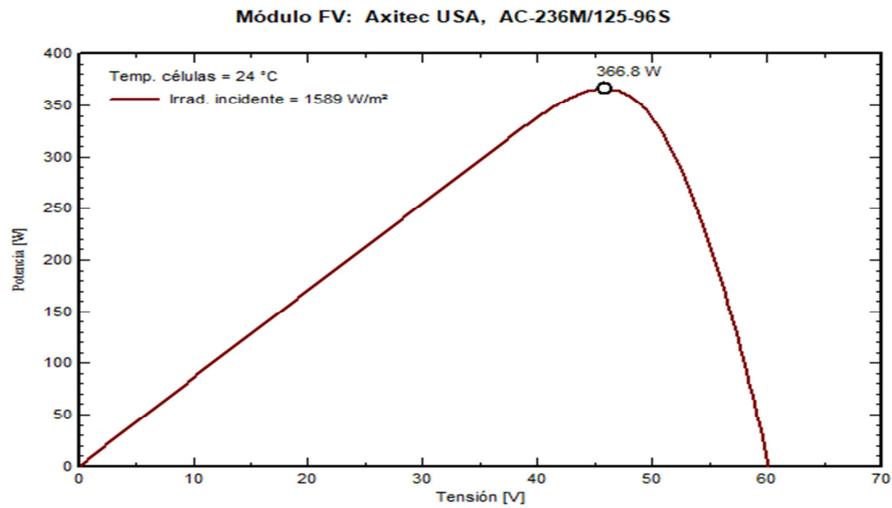
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

**Curvas de Irradiación constante de 1589 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 23,7°C≈24°C 24°C en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 33: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 24°C mes de septiembre.

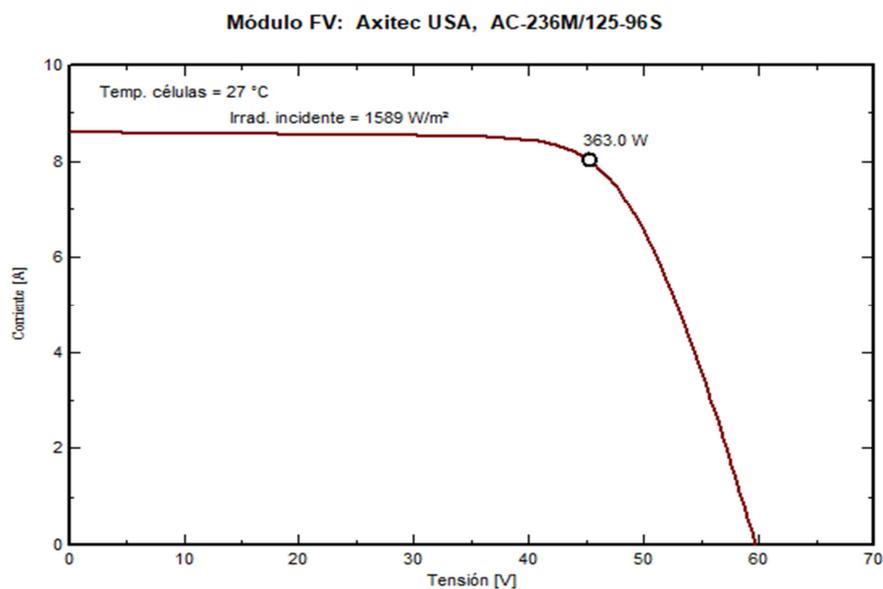
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



*Gráfica 34: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 24°C mes de septiembre.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIC

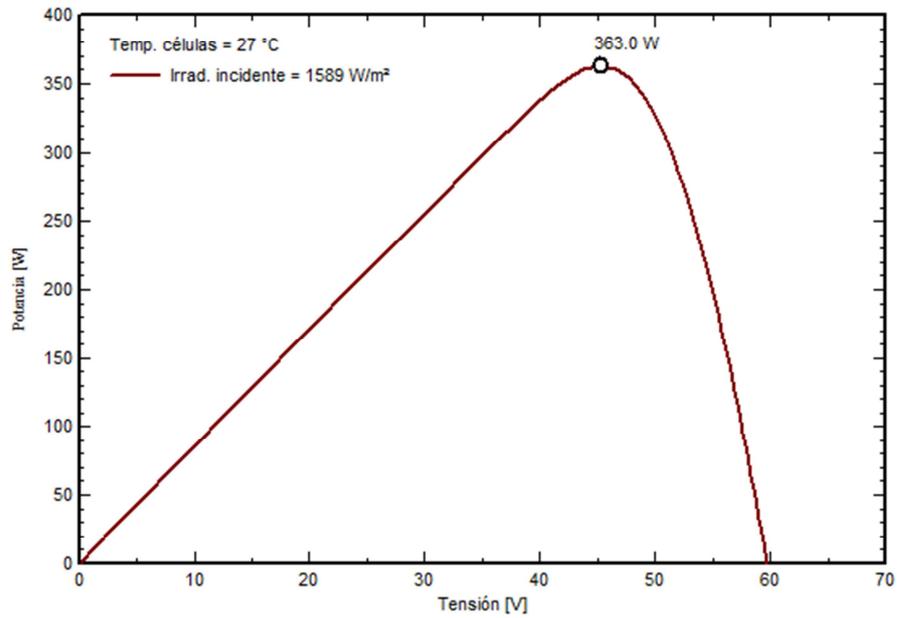
**Curvas de Irradiación constante de 1589 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 26,5°C ≈ 27°C en función de la Corriente y Potencia**



*Gráfica 35: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de septiembre.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIIC

Módulo FV: Axitec USA, AC-236M/125-96S



Gráfica 36: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de 27°C mes de septiembre

Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

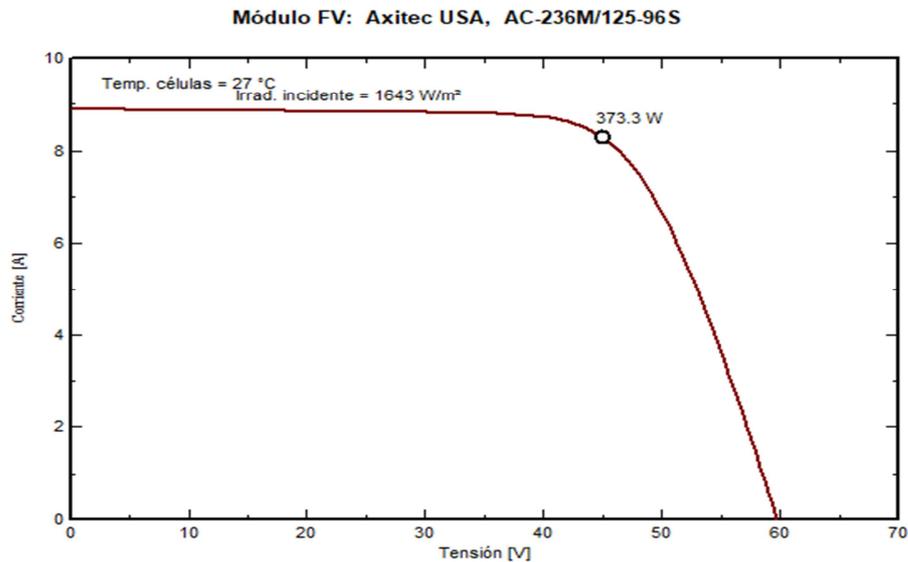
Tabla 10: Datos de temperatura variable e irradiación constante para el mes de Octubre

Irradiación Global cte= 1643 (W/m<sup>2</sup>)

TEMPERATURA (°C)
26,5
26,5
26,5
26,5

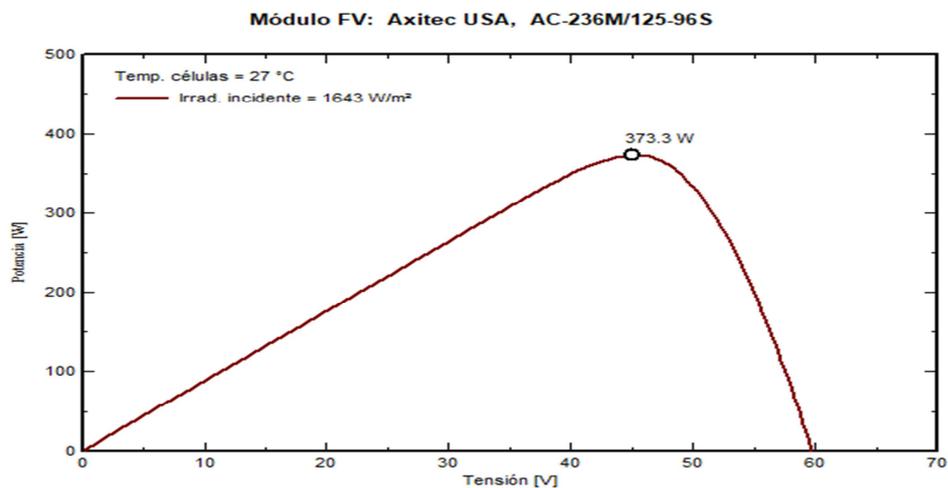
Fuente y Elaboración: Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

**Curvas de Irradiación constante de  $1643 \text{ W/m}^2$  a una temperatura de  $26,5^\circ\text{C} \approx 27^\circ\text{C}$  en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 37: Curva Corriente vs Tensión para temperatura variable de  $27^\circ\text{C}$  mes de octubre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 38: Curva Potencia vs Tensión para temperatura variable de  $27^\circ\text{C}$  mes de octubre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

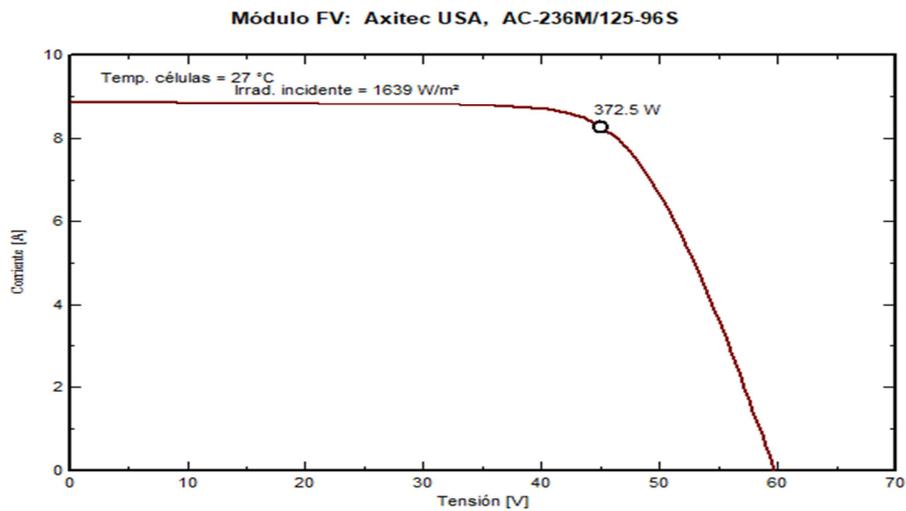
Tabla 11: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Noviembre

**IRRADIACIÓN GLOBAL CTE= 1639  
(W/m<sup>2</sup>)**

TEMPERATURA (°C)
26,5
26,5
26,5
27,4
27,4

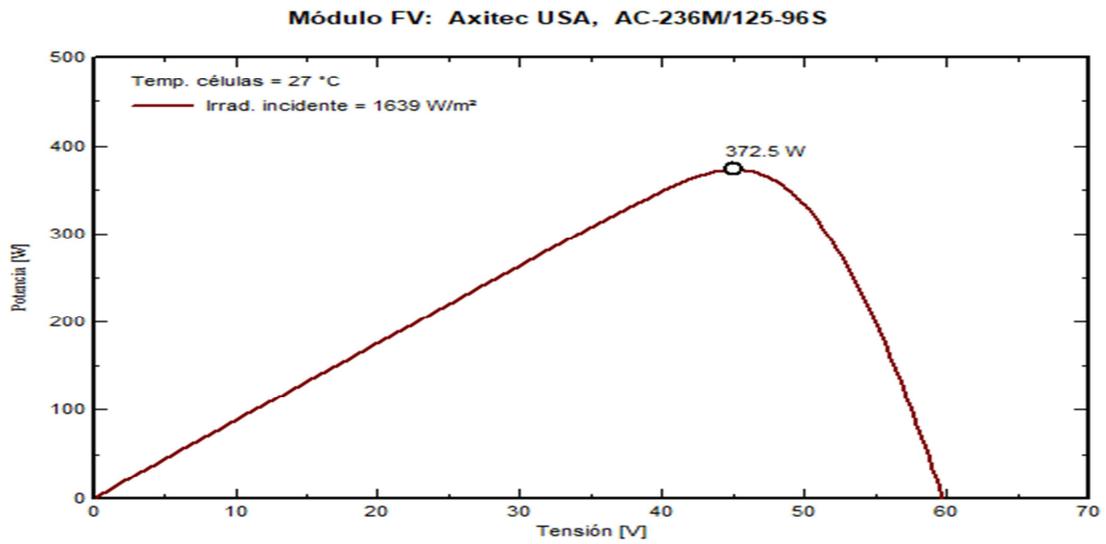
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

**Curvas de Irradiación constante de 1639 W/m<sup>2</sup> a una temperatura de 26,5°C ≈ 27°C en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 39: Curva de Corriente vs Tensión para temperatura variable mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 40: Curva de Potencia vs Tensión para temperatura variable mes de noviembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

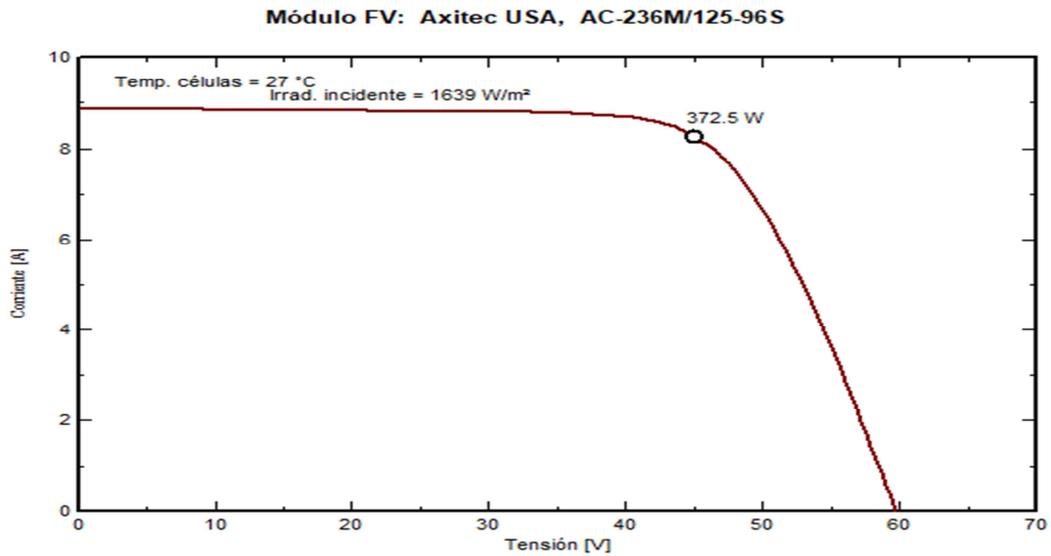
Tabla 12: Datos de Temperatura variable e Irradiación constante para el mes de Diciembre

**Irradiación Global cte= 1639 (W/m<sup>2</sup>)**

TEMPERATURA (°C)
27,4
27,4
27,4
27,4
27,4

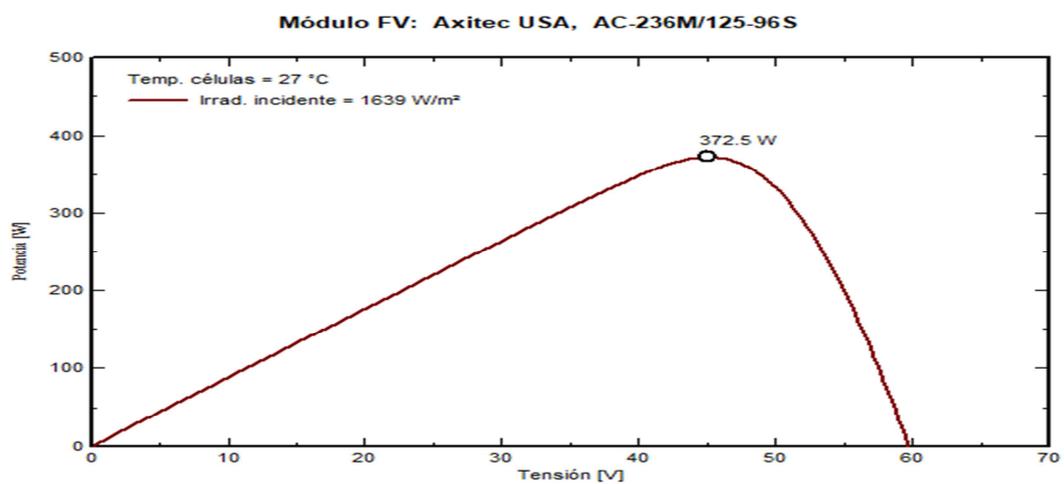
**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

**Curvas de Irradiación constante de  $1639 \text{ W/m}^2$  a una temperatura de  $27,4^\circ\text{C} \approx 27^\circ\text{C}$  en función de la Corriente y Potencia**



Gráfica 41: Curva de Corriente vs Tensión para temperatura variable mes de diciembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC



Gráfica 42: Curva de Potencia vs Tensión para temperatura variable mes de diciembre.

**Fuente y Elaboración:** Los autores a partir de datos prácticos obtenidos en la UAIC

## 2.4 Diseño del convertidor DC-DC BUCK

Los convertidores dc-dc son circuitos que controlan la carga y descarga de elementos pasivos almacenadores de energía estos pueden ser condensadores y bobinas los cuales nos ayudan a convertir una señal continua en otra señal continua, obteniendo a las salidas del circuito un valor regulado, como se sabe la potencia de salida es igual a la potencia de entrada en un circuito, pero esto casi nunca sucede ya que todos los elementos electrónicos tienen un pequeño consumo de energía.

El convertidor Buck o también conocido como reductor es un tipo de convertidor conmutado DC-DC, cuya función principal es la de mantener una tensión de salida menor a la de entrada regula frente a perturbaciones en la tensión de entrada o de la carga.

A continuación, se representa en la figura el esquema de un convertidor Buck o reductor, en el mismo que se ha incluido la resistencia serie del inductor como del capacitor, al contar con elementos pasivos almacenadores de energía el convertidor formaría parte de la familia de convertidores de segundo orden. Se muestra en la figura el circuito en lazo abierto para realizar el estudio de su funcionamiento.

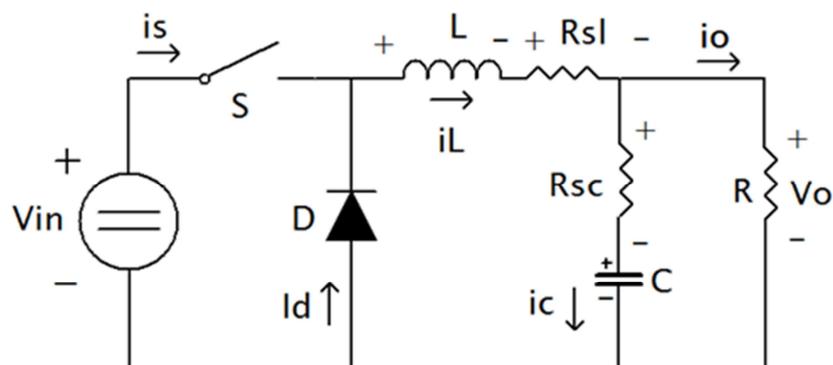


Ilustración 7: Esquema de un convertidor DC-DC tipo BUCK

Fuente y Elaboración: Autores

### 2.4.1 Diseño del inductor

En el diseño de una fuente conmutada la inductancia es importante al momento del análisis, ya que permite limitar la corriente de rizado que está viajando a través

del circuito. En la etapa de potencia la función principal de los inductores es el almacenar energía, así como también mantener su corriente constante.

El objetivo de implementar este convertidor es poder controlar la tensión que obtendremos a la salida mediante los llamados lazos de control

Corriente de salida máxima del 30%

*Diseño del inductor*

$$I_{ONDA} = 0,3I_{CARGA}$$

$I_{ONDA}$ : Corriente de ondulación del inductor

$I_{CARGA}$ : Corriente de carga del inductor

*Calculo del ciclo de trabajo*

$$D = \frac{V_{SALIDA}}{V_{ENTRADA}}$$

$V_{SALIDA}$ : voltaje de salida

$V_{ENTRADA}$ : Voltaje entrada del convertidor Buck

*Cálculo del Voltaje del Inductor*

$$V = L \frac{\Delta I}{\Delta T}$$

$$L = (V_{ENTRADA} - V_{SALIDA}) * \frac{\left(\frac{D}{F_s}\right)}{I_{ONDA}}$$

$V_{SALIDA}$ : Voltaje de salida

$V_{ENTRADA}$ : Voltaje entrada del convertidor Buck

**D**: Ciclo de trabajo

$I_{ONDA}$ : Corriente de ondulación del inductor

**L**: Inductancia

$F_s$ : Frecuencia de conmutación

## 2.4.2 Diseño del capacitor

$$C = \frac{1}{2 * \Delta V_C} \frac{I}{V_{fs}} \left(1 - \frac{V_g}{V}\right)$$

$\Delta V_C$ : Voltaje de salida del capacitor

$V_g$ : Voltaje de entrada

$V$ : Voltaje de salida

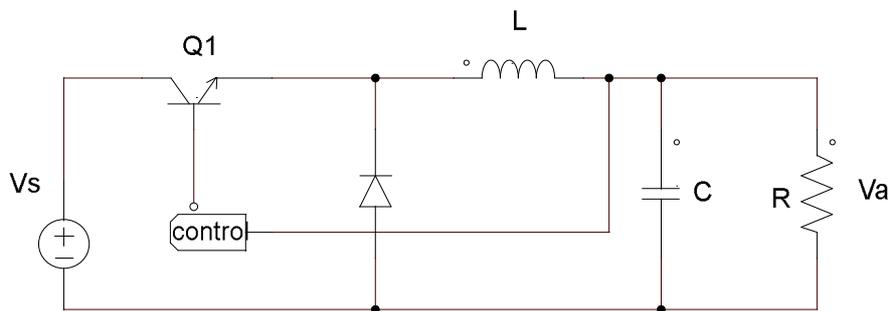
$V_{fs}$ : Voltaje de frecuencia de conmutación

$I$ : Corriente

## 2.5 Simulación del convertidor DC-DC BUCK

Existen varios conversores DC-DC en modo conmutado, estos conversores son unos de los más sencillos de circuitos electrónicos de potencia estos convierten un nivel de tensión eléctrica a otro nivel mediante la conmutación, son muy utilizados gracias a sus amplias aplicaciones para control de dispositivos cada uno de estos conversores tienen propias ventajas e inconvenientes todo depende de su aplicación.

Entonces en este caso vamos a utilizar un convertidor reductor o llamado también convertidor buck, en la ilustración 8 se muestra el diagrama del circuito básico de un regulador reductor (buck):

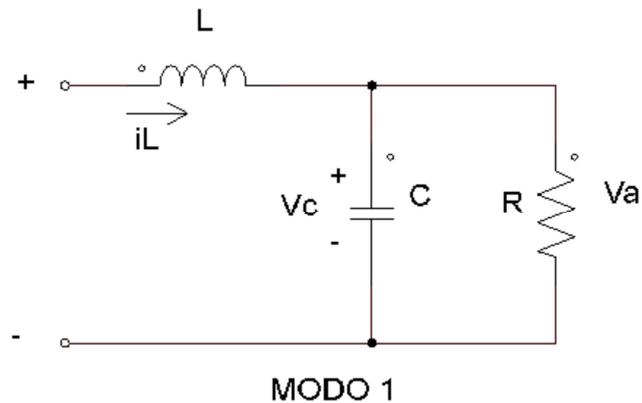


*Ilustración 8: Circuito de regulador reductor (Buck).*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en el programa PSIM

En el regulador reductor, el voltaje promedio de la salida  $V_a$ , es menor que el voltaje de la entrada  $V_s$ , en donde la operación del circuito se divide en dos modos:

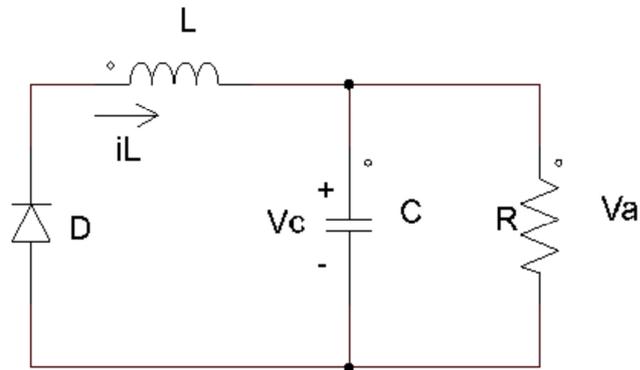
- *Modo 1*: funciona cuando el transistor  $Q_1$  en un tiempo  $t=0$ , la corriente de entrada se eleva y pasa a través del inductor  $L$ , del filtro de capacitor  $C$  y por la resistencia de carga  $R$  como se muestra en la ilustración 9:



*Ilustración 9: Circuito equivalente en modo de operación 1.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en el programa PSIM

- *Modo 2*: empieza cuando deja de funcionar el transistor  $Q_1$  en un tiempo  $t=t_1$ . El diodo de marcha libre  $D$  conduce debido a la energía que tiene el inductor almacenado, mientras la corriente del inductor continúa fluyendo a través del inductor, del capacitor, de la carga y por el diodo. Esta corriente del inductor cambia hasta que el siguiente ciclo del transistor  $Q_1$  se vuelva activar.



MODO 2

*Ilustración 10: Circuito equivalente en modo de operación 2.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en el programa PSIM

El regulador reductor requiere de un solo transistor, la corriente de entrada es discontinua por lo tanto necesita un filtro suavizante que le ayude a reducir el rizado en la corriente de salida.

Existe la relación entre el voltaje de entrada ( $V_s$ ), el voltaje de salida ( $V_a$ ) y el ciclo de trabajo ( $D$ ) viene dado por:

$$V_a = V_s \times D$$

Dónde

$$D = \frac{T_{on} \text{ (tiempo de encendido)}}{T_{on} + T_{off} \text{ (tiempo de apagado)}}$$

Para el ciclo de trabajo de conmutación puede variar en un rango 0-1 por variación del tiempo de ENCENDIDO, por lo tanto, en la salida el voltaje siempre es menor o igual que el voltaje de entrada, la ondulación del voltaje de salida del convertidor DC-DC reductor se minimiza mediante la selección adecuada de inductor y capacitor, que viene dada por:

$$L = \frac{D(V_s - V_a)}{I_{onda} * F_s}$$

$$C = \frac{I_{\text{onda}}}{8 * F_s * \Delta V}$$

Dónde:

$V_s$ : voltaje de entrada del convertidor Buck,

$V_a$ : Voltaje de salida,

$D$ : Ciclo de trabajo,

$F_s$ : Frecuencia de conmutación

**I<sub>onda</sub>**: Corriente de ondulación del inductor, generalmente es el 30% de la corriente de salida máxima.

**$\Delta V$** : es el voltaje de salida ondulación, por lo general es 1% de la tensión de salida.

A continuación, se representa el diseño implementado en Simulink (Matlab), en el cual están implementadas las ecuaciones del inductor y capacitor necesarias para realizar la simulación del convertidor dc-dc Buck, el cual se representa en la ilustración 11.

### MODELADO EN MATLAB-SIMULINK DEL CONVERTIDOR REDUCTOR (BUCK).

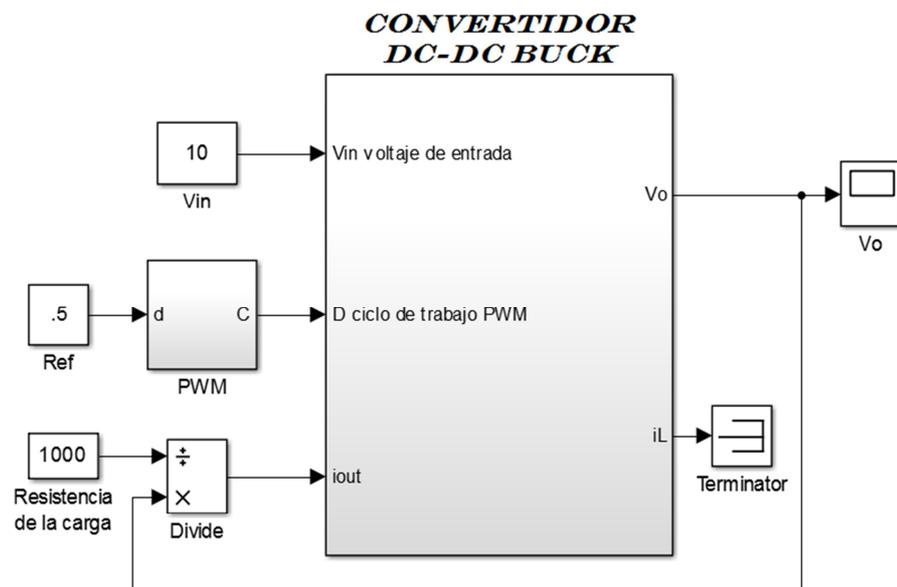
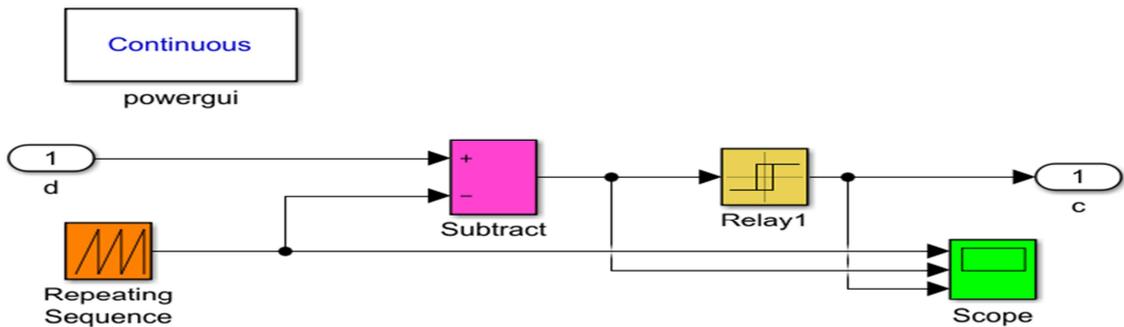


Ilustración 11: Diseño del convertidor DC-DC buck en Simulink.

Fuente y Elaboración: Los autores

En la ilustración 12 se observa el diagrama de bloques realizado en Simulink de Matlab, para realizar el convertidor buck es necesario un bloque del PWM (modulación por ancho de pulso) en la cual se realiza una comparación entre el ciclo de trabajo ( $d$ ) en decimales contra la señal de diente de sierra para obtener una onda cuadrática. (Gowda, Kiran, & Parthasarthy, 2014)

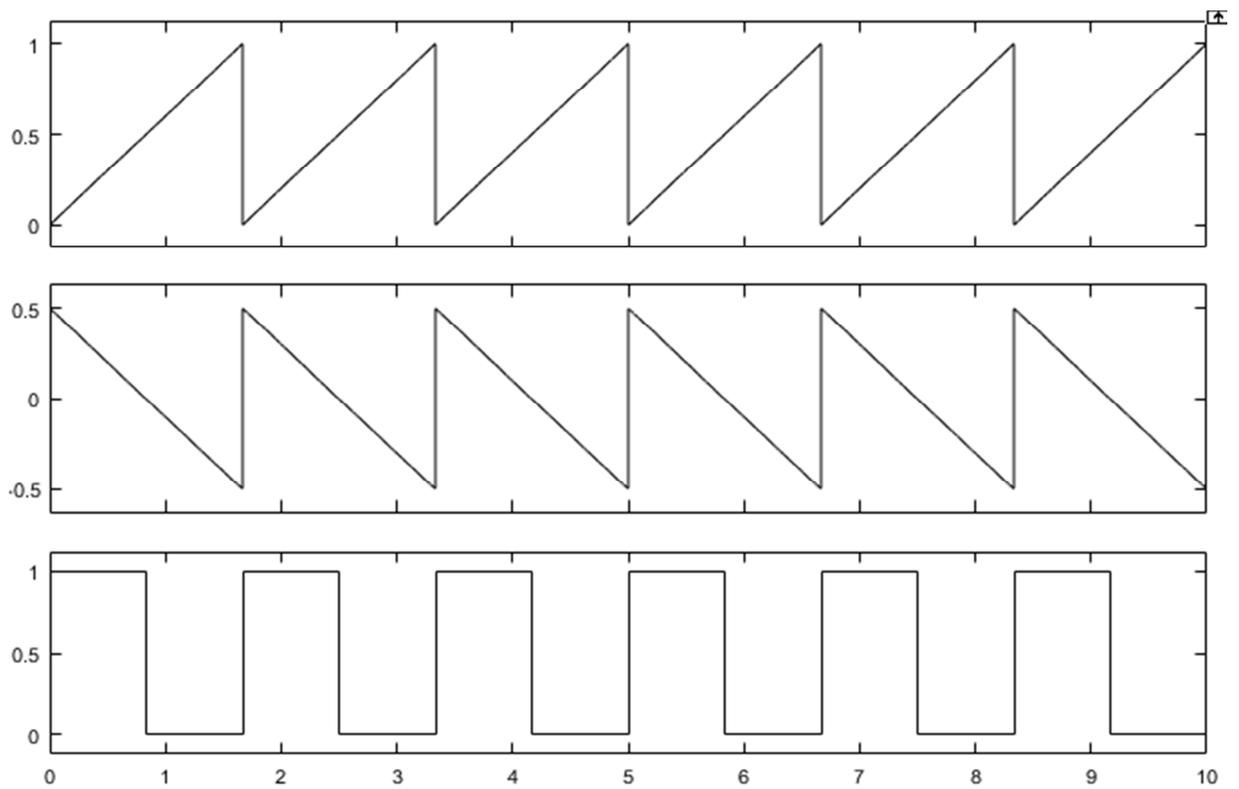


*Ilustración 12: Subsistema del PWM.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores

Para realizar el bloque PWM, este cuenta con dos entradas al subsistema la primera es el ciclo de trabajo del controlador en forma decimal y la segunda es el cambio de frecuencia  $F_s$ .

A continuación se muestra en la gráfica 43, la forma de onda de diente de sierra con valores de tiempo  $(0 \ 1/f_s)$  y un valor de salida de  $(0 \ 1)$ , la magnitud de esta onda se resta del ciclo de trabajo (valor decimal) para así generar un forma de onda de diente de sierra similar, cuya magnitud va de un valor positivo siempre que la señal PWM sea alta y un valor negativo donde el PWM el pulso es bajo, y la última forma de onda se genera a partir del uso de un bloque de relés que se configuro para encender la salida 1 y desactivar la salida 0 durante los cruces por cero como se muestra en la siguiente figura. (Gowda, Kiran, & Parthasarthy, 2014)



*Gráfica 43: Formas de onda PWM.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en MATLAB

En la ilustración 13, se indica el cálculo de la variable D (ciclo de trabajo) el cual es necesario para el cálculo del voltaje de entrada referente al de salida, se detalla el diagrama de bloques necesarios para el cálculo de la corriente en el inductor y voltaje del capacitor el mismo que fue simulado en el programa de Simulink (Matlab).

### Subsistema de bloque del convertidor Buck

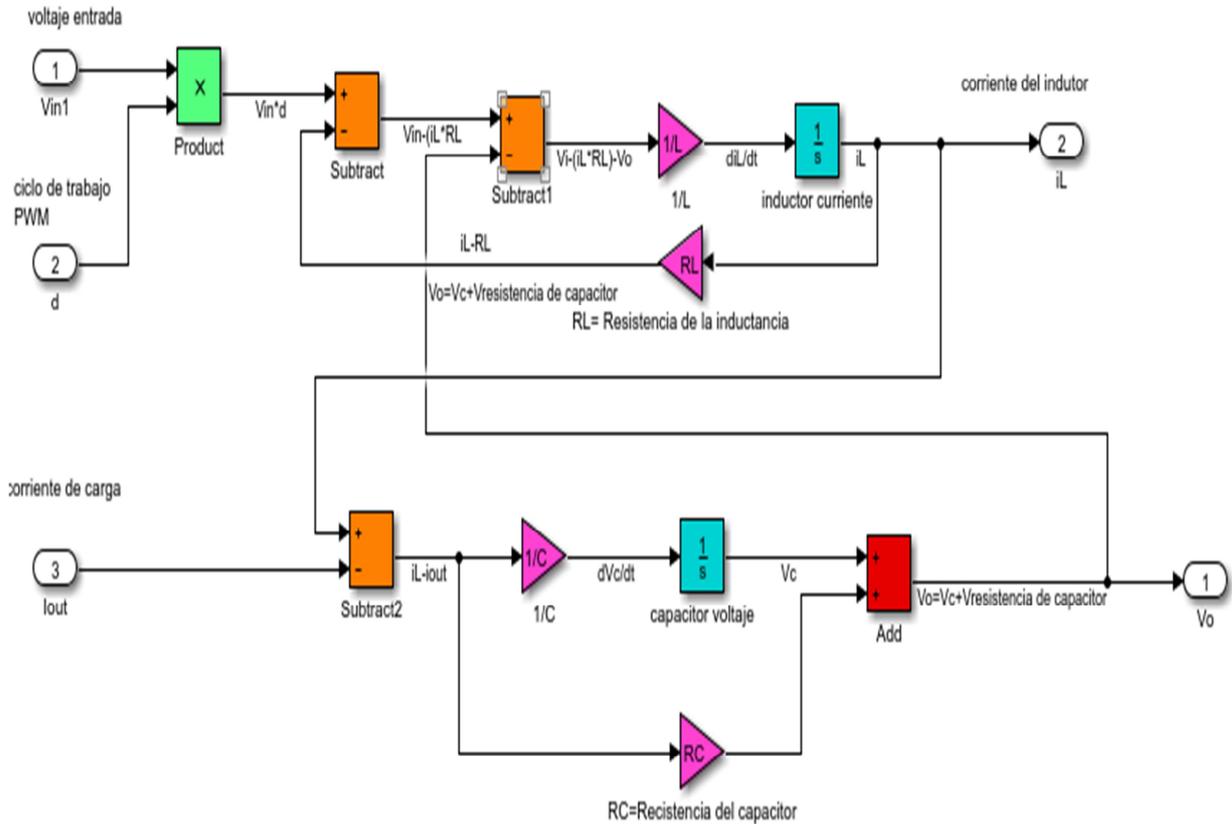


Ilustración 13: Subsistema de bloque del convertidor Buck.

Fuente y Elaboración: Los autores

En el siguiente subsistema se observa todos los cálculos necesarios para producir el voltaje de salida y la corriente de carga, todos los valores necesarios como la inductancia(L), resistencia de la inductancia(RL), capacitancia (C), resistencia de la capacitancia (RC) deben declararse como parámetros según Vargas, PEREZ,V..A, & COTA,R.J.D, 2015 los valores que se utilizan para obtener una respuesta del convertidor reductor fueron:

C=100uf

L=4.62H

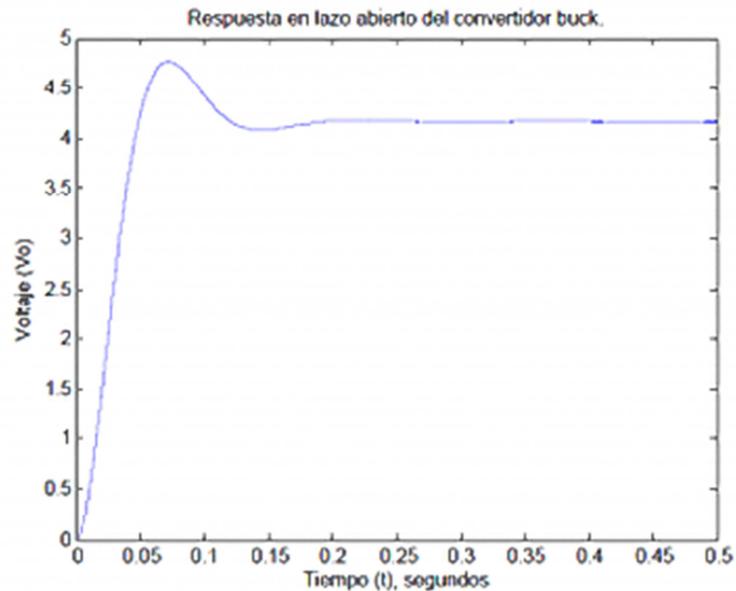
RL=220 ohm

RC=10 ohm

f=15Khz

Ciclo de trabajo=50%

Resistencia de carga= 1000 ohm



Gráfica 44: Curva de respuesta del convertidor Buck.

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab

**Análisis:** Realizada la gráfica se puede observar una curva que se estabiliza en un tiempo de 0,25 segundos llegando a un voltaje 4,2voltios.

## 2.6 Diseño del controlador Difuso

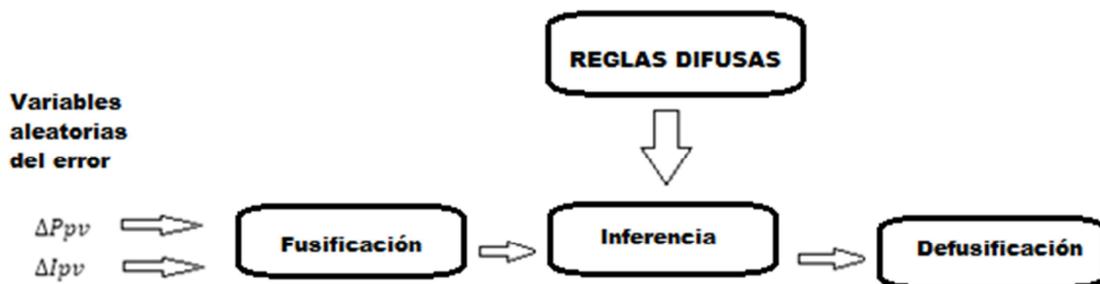
La representación de sistemas mediante modelos matemáticos es de gran utilidad, siendo una ayuda para la simulación y comprobación con valores prácticos y teóricos obteniendo así el error del modelo a simularse.

Un panel solar está caracterizado por la potencia que puede entregar a una carga, la misma que resulta del producto de la corriente obtenida del panel por el voltaje, estos valores también están en función de la irradiación incidente que obtenga el panel.

La lógica difusa está encaminada al control automático de procesos, tratándose de una técnica por lo tanto no se cuenta con el modelo matemático del sistema, esta aplicada en sistemas de control, para esto utiliza expresiones que se pueden interpretar de diferentes formas para poder generar reglas que permitan controlar el sistema.

Estos sistemas de control difuso trabajan muy diferente a un sistema de control normal o convencional. Para el diseño de un controlador difuso consta de tres etapas: (Tejada Muñoz, 2000)

- a) Fusificación.
- b) Reglas difusas.
- c) Defusificación.



*Ilustración 14: Esquema del Control de Lógica Difusa.*

**Fuente:** Los autores

#### **a) Fusificación**

La fusificación se encarga de convertir valores reales en valores difusos, asignando grados de pertenencia a todas las variables de entrada del sistema con relación a los conjuntos difusos previamente definidos utilizando las funciones de pertenencia asociados a un conjunto difuso.

### **b) Base de conocimiento e inferencia**

En la base de conocimientos se encuentra todo lo relacionado al dominio de la aplicación y objetivo del control, en este paso se debe definir las reglas lingüísticas de control para la toma de decisiones para que el sistema sepa cómo actuar.

**Inferencia:** Se encarga de relacionar los conjuntos difusos de entrada y salida para representar las reglas que definirán el sistema, está también utilizando la información de la base de conocimientos para generar las reglas mediante el uso de condiciones.

### **c) Defusificación**

En esta parte la defusificación realiza el proceso de adecuar los valores difusos generados en la inferencia en valores reales, que utilizarán para el proceso de control. En la defusificación utiliza métodos matemáticos simples como: Método de Centroide, Método del Promedio Ponderado y Método de Membresía del Medio Máximo.

## **2.6.1 Universo de Discurso**

Para el controlador difuso que servirá para el control de punto de máxima potencia del panel, está conformado de dos entradas y una salida, las variables de entrada están expresadas por el error (E) y el cambio de error (CE), para tiempos de muestreo  $k$ .

Para la entrada  $E(k)$  es la pendiente de curva P-V esta define si el punto de operación del sistema FV se encuentra a la derecha, a la izquierda o exactamente en el punto de operación está en dirección o no del MPP.

*Error de las variables de entrada:*

$$E_k = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} = \Delta P / \Delta V$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) = \Delta E$$

Dónde:

**E(k)**: Pendiente de la curva P-V

**CE(k)**: Movimiento del punto de operación está en dirección o no del MPP

**(k)**: Tiempo de muestreo

La variable de salida del controlador es el aumento del ciclo útil del convertidor Buck  $\Delta D$  este puede darnos valores negativos o positivos de acuerdo con la ubicación del punto de operación.

Utilizando el valor de  $\Delta D$  se realiza un acumulador con la finalidad de obtener el valor del ciclo útil:

$$D(k)=D(k-1) + \Delta D(k).$$

Entonces para determinar el universo de discurso o los valores que puedan tomar las dos entradas  $E(k)$  y  $CE(k)$  se realiza una representación de las señales de errores versus el voltaje del panel para distintos niveles de irradiación entonces quedándonos como rangos para:

$$E=5 \text{ a } 50$$

$$CE=-8 \text{ a } 8$$

$\Delta D= -0.01$  a  $0.01$  este ayuda a tener un mayor grado de precisión en el seguimiento del punto de máxima potencia del panel.

### **2.6.2 Reglas difusas**

Definidas las funciones de membresía, definimos también las reglas difusas las cuales a continuación se observa en la tabla 13 con las variables lingüísticas dando un total de 25 reglas difusas.

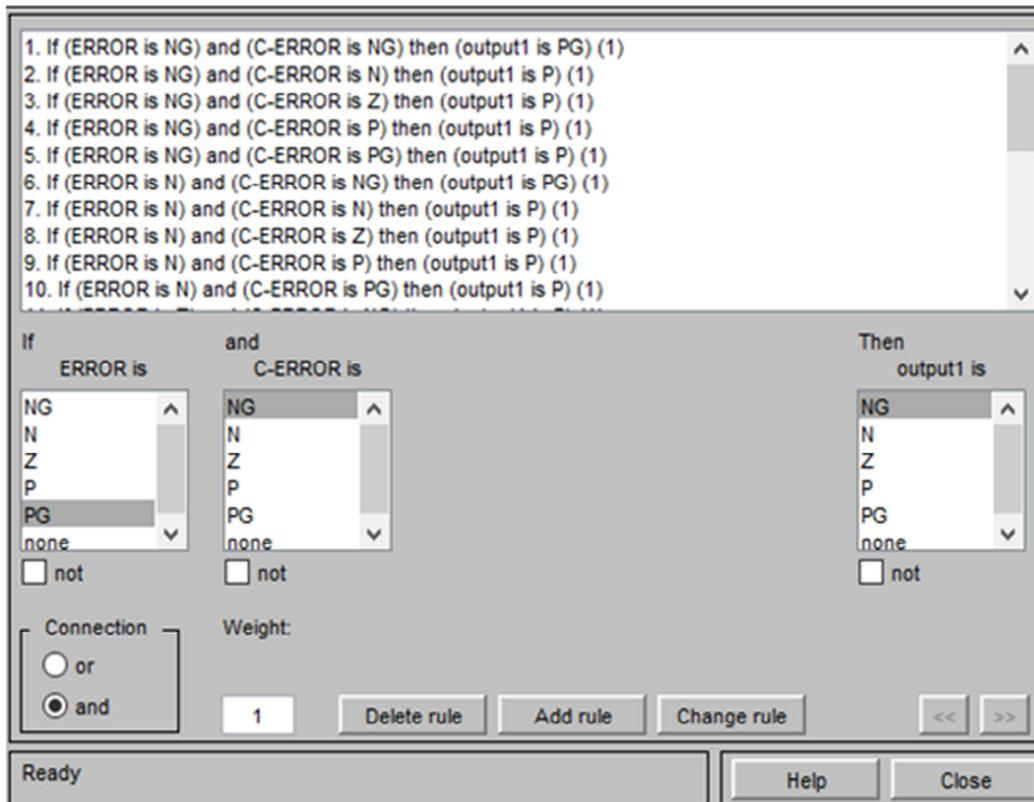
Tabla 13: Reglas Difusas de acuerdo a la temperatura variable

CE/E	NG	N	Z	P	PG
NG	PG	P	P	P	P
N	PG	P	P	P	P
Z	P	P	Z	N	N
P	NG	NG	N	N	N
PG	NG	N	N	NG	NG

Fuente y Elaboración: Los autores

NG Negativo Grande, N Negativo, Z Cero, P Positivo, PG Positivo Grande

Tabla 14: Reglas Difusas ingresadas a Ruler editor de MATLAB



Fuente y Elaboración: Los autores

### 2.6.3 Procesos de fuzzificación

Se trata de la interpretación de datos a la entrada por el sistema de control difuso, es la puerta de entrada al sistema de inferencia difusa, se realiza en todo instante de tiempo, sus componentes principales son: (LOGICA DIFUSA Y SISTEMAS DE CONTROL)

El proceso de defusificación nos permite la agregación de todas las reglas es decir el ciclo de trabajo (D) de cada una de ellas, todas estas 25 reglas deben ser calculadas y combinadas para obtener un valor.

En la siguiente formula se muestra el método de defusificación del centro de área (COA):

$$V_c = \frac{\sum_{j=1}^{25} DJ(w_j) * w_j}{\sum_{j=1}^{25} DJ(w_j)}$$

Dónde:

**V<sub>c</sub>** : método de centro de área.

**DJ** : es el valor del ciclo de trabajo para la regla j-ésima.

**w<sub>j</sub>**: es el factor ponderado de la regla j-ésima. El **w<sub>j</sub>** es más grande, la regla J-ésima afecta más en este momento.

Para el caso donde las entradas de error=0 y la Cerror=3, se tiene los valores para las funciones de membresía: (Passino & Yurkovich, 1997)

- $\mu_{zero} = (error) = 1$
- $\mu_{positivo} = (Cerror) = 0.3394$
- $\mu_{positivo\ grande}(Cerror) = 0.2844$

Los valores de las demás funciones de membresía son cero para este caso y dentro de estas hay dos reglas que se encuentran asociadas como el “error es Zero”, “cambio de error es positivo” y “cambio en error es positivo grande” para lo cual quedaría así:

Si error es Z y C error es P entonces  $\Delta D$  es N.

Si error es Z y C error es PG entonces  $\Delta D$  es N.

Donde aplicando el método de centro de áreas y utilizando el criterio del mínimo nos da el valor de la salida del controlador:

Criterio:

$$\mu_1 = \min(0.33941) = 0.3394$$

$$\mu_2 = \min(0.28441) = 0.2844$$

$\mu_1$  y  $\mu_2$  = Valores mínimos de membresía.

Método Centro de áreas:

$$\mu = \frac{\mu(x)(x) + \mu(x)(x)}{(x) + (x)}$$

Donde:

$\mu$ : Valor de salida del controlador

$\mu(x)$ : Función de pertenencia

$(x)$ : Universo del discurso

Por lo tanto:

$$\mu = \frac{(-0.003)(0.0014) + (-0.003)(0.0012)}{0.0014 + 0.0012}$$

$$\mu = 0.003$$

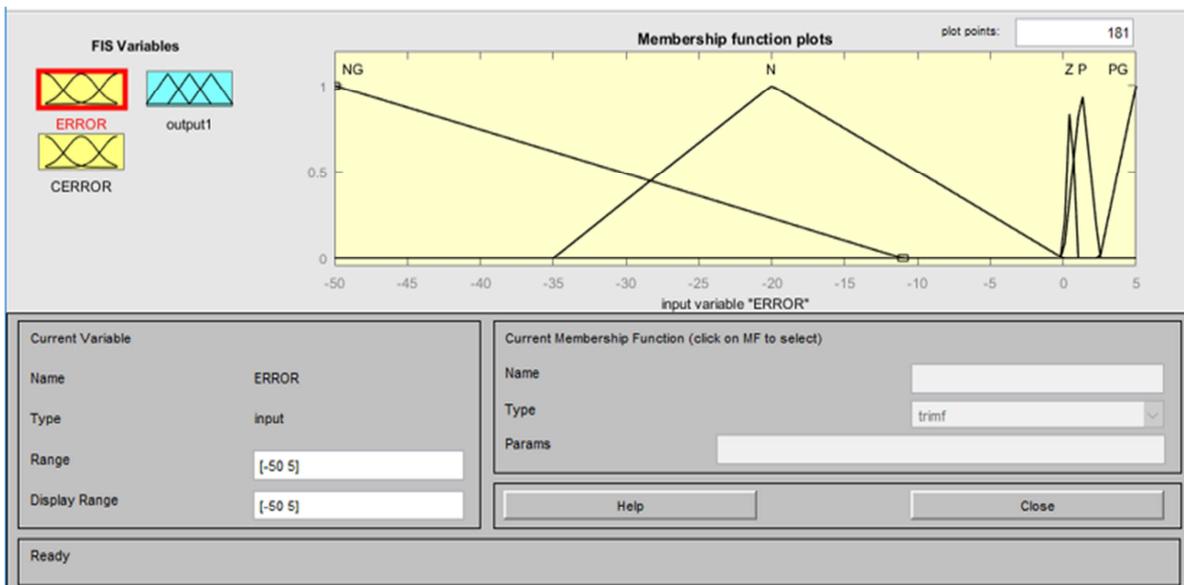
#### 2.6.4 Funciones de membresía y variables lingüísticas

Según (Haw Chang & Yu Chang, 2010) el proceso de fuzificación se selecciona las funciones de membresía triangulares. Donde para las entradas de los errores E y CE y la salida  $\Delta D$  del controlador, se definen cinco funciones de membresía expresadas en términos de las variables lingüísticas como se representan en los siguientes gráficos:

Tabla 15: Tipos de Variables Lingüísticas

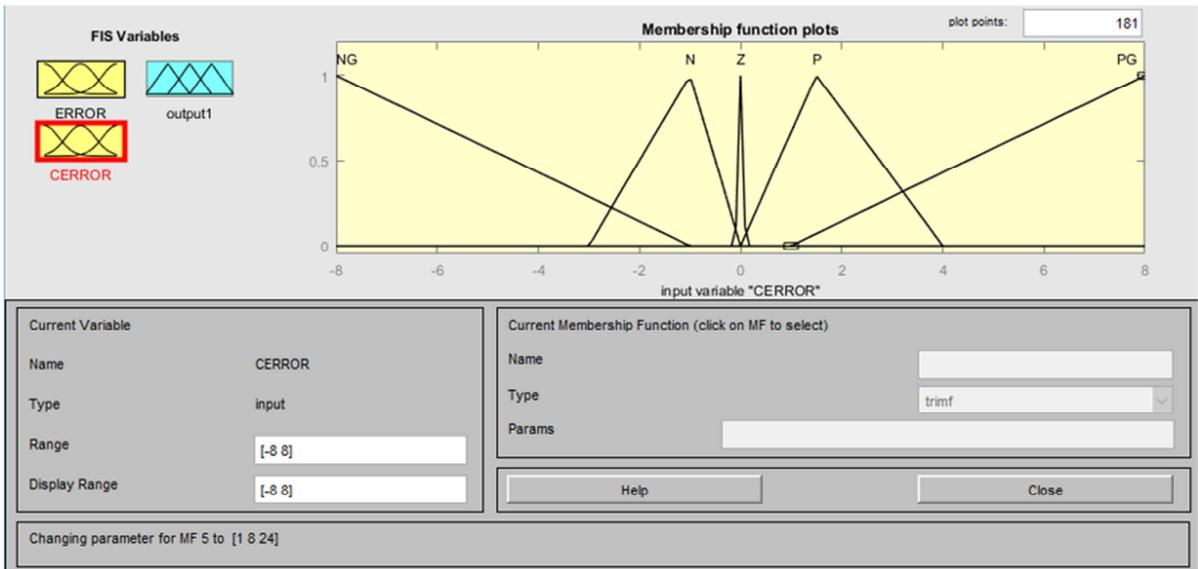
VARIABLE LINGÜÍSTICA	
Negativo Grande	<b>NG</b>
Negativo	<b>N</b>
Cero	<b>Z</b>
Positivo	<b>P</b>
Positivo Grande	<b>PG</b>

Fuente y Elaboración: Los autores



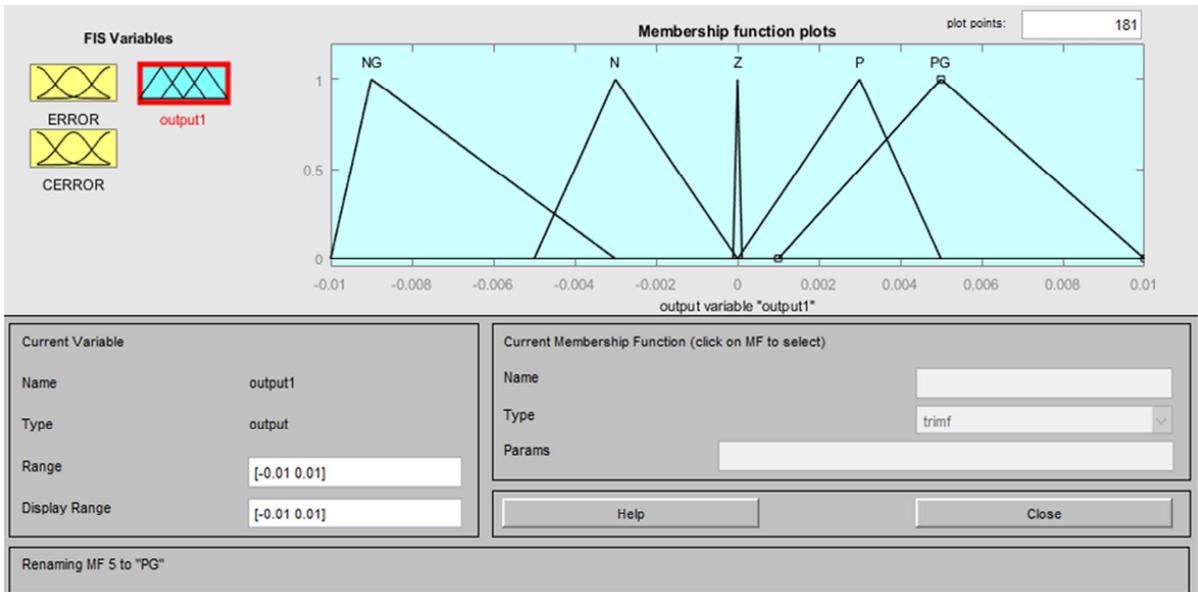
Gráfica 45: Funciones de Membresía para el Error.

Fuente y Elaboración: Los autores



Gráfica 46: Funciones de membresía para el C error.

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab



Gráfica 47: Funciones de membresía para la salida  $\Delta D$ .

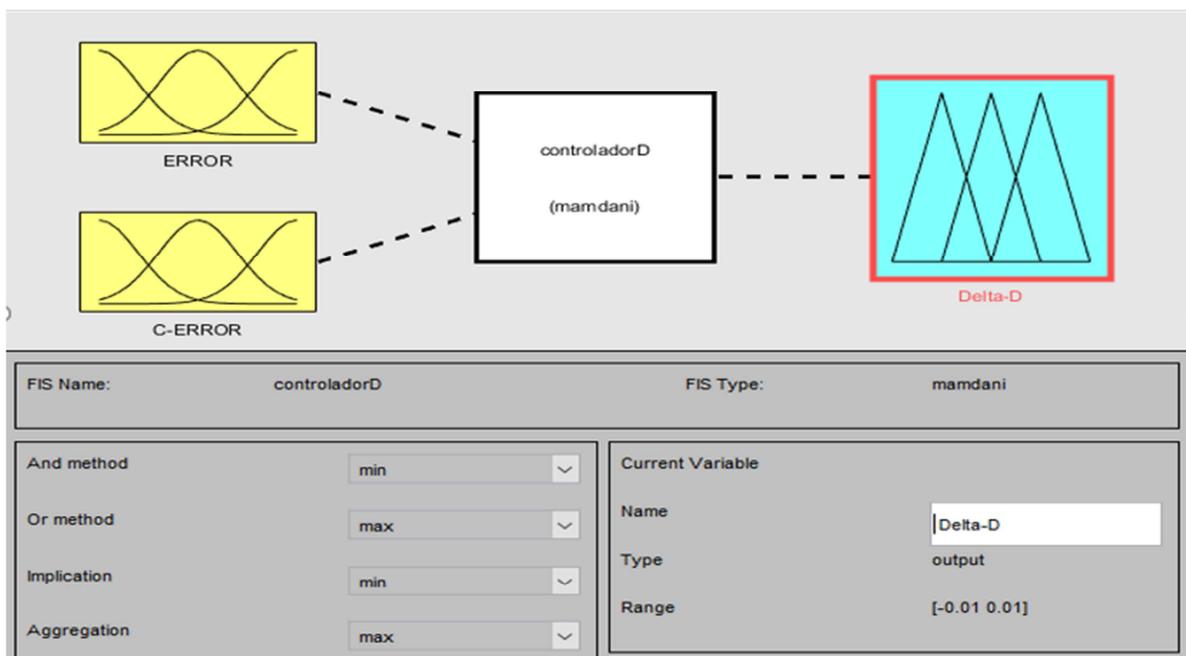
**Fuente y Elaboración:** Los autores en MATLAB

## 2.7 Simulación del controlador difuso

Para la simulación del controlador de lógica difusa se utilizó la herramienta *fuzzy logic toolbox* de Matlab para lo cual seguimos los siguientes pasos:

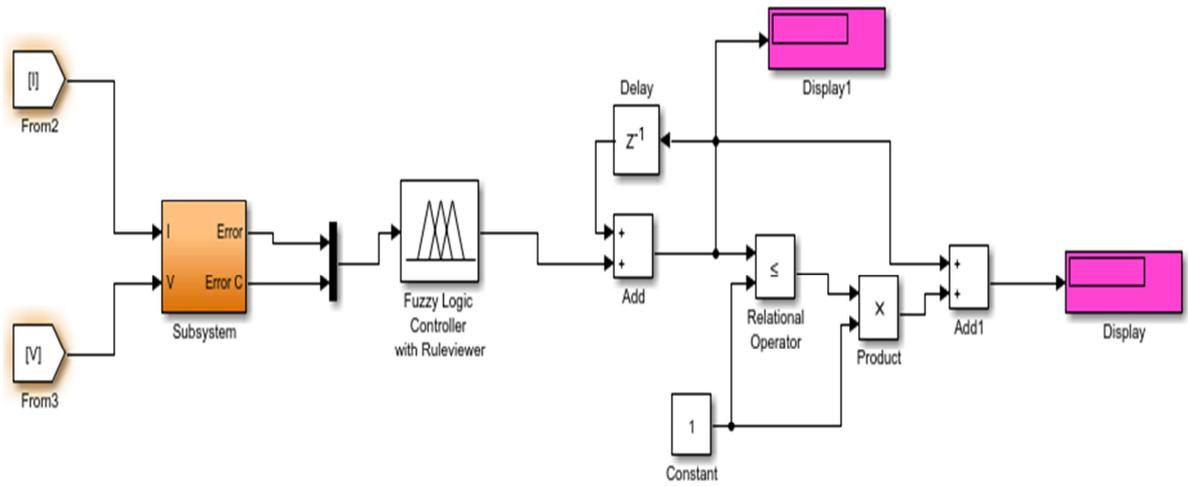
- Definición de entradas y salidas utilizando el controlador de Mamdani y el Método Centroide del área para la Defusificación.
- Ingreso de las variables lingüísticas o funciones de membresía.
- Ingreso de las reglas mediante el editor de reglas difusas de toolbox.

Mediante un visualizador de reglas se evalúa el funcionamiento del sistema de inferencia difusa para estar seguros de que no existan variaciones en las variables de entrada, y así estemos seguros del buen desempeño del controlador.



Gráfica 48: Diseño de controlador difuso con controlador Mamdani.

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab



*Ilustración 15: Control Difuso.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab

### 3 CAPÍTULO: ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Simulación del Controlador Difuso

Para la prueba de I-V. y P-V. utilizamos un bloque de Simulink Matlab de un panel fotovoltaico de 230w ingresando parámetros reales, con el tipo de modulo que en este caso se utilizó BP solar SX3190, ver ilustración 16.

PV array consists of Npar strings of modules connected in parallel, each string consisting of Nser modules connected in series.

The four PV model parameters (photo-generated current Iph, diode saturation current Isat, parallel resistance Rp and series resistance Rs) are adjusted to fit the following four module characteristics measured under standard test conditions (STC : irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, cell temperature=25 deg. C) and assuming a given "diode quality factor" (Qd) for the semiconductor:  
Voc = open circuit voltage  
Isc = short-circuit current  
Vmp,Imp = voltage and current at maximum power point

Select a 'Module type' and then press Apply to see module parameters.  
Note: Module characteristics are extracted from NREL System Advisor Model.

Parameters

Module type: BP Solar SX3190

Number of cells per module  
50

Number of series-connected modules per string  
1

Number of parallel strings  
1

Module specifications under STC [ Voc, Isc, Vmp, Imp ]  
[ 30.6021 8.51029 24.3003 7.82945 ]

Model parameters for 1 module [ Rs, Rp, Isat, Iph, Qd ]  
[ 0.17514 755.51 1.0647e-06 8.5158 1.5 ]

Sample time  
10

Display I-V and P-V characteristics of one module  
 Display I-V and P-V characteristics of array

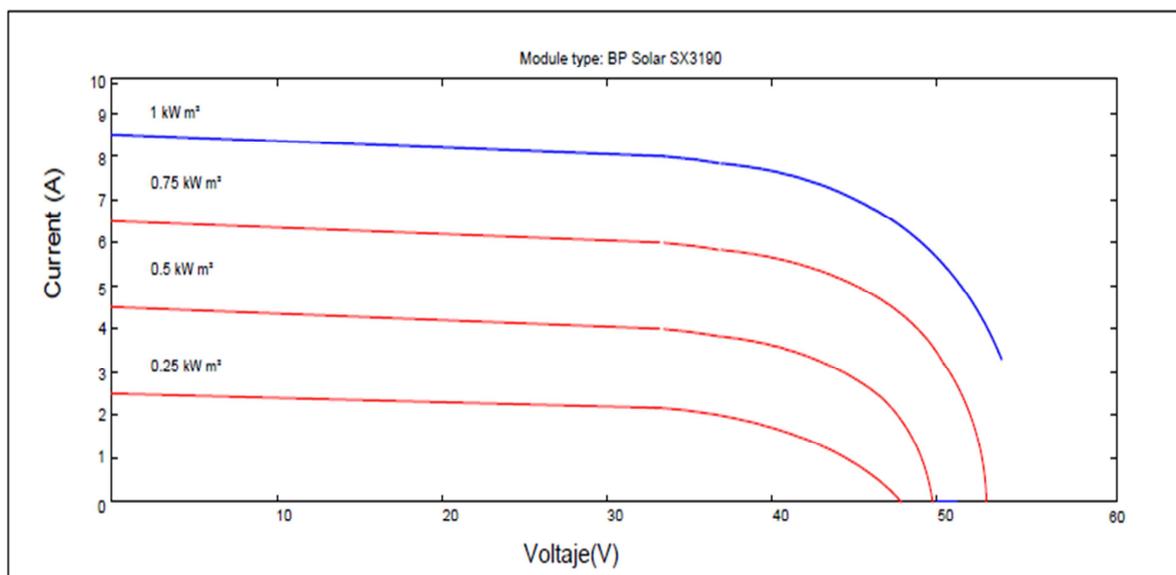
OK Cancel Help Apply

*Ilustración 16: Tabla característica de panel fotovoltaico para el ingreso de datos para la simulación de curvas I-V.*

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab

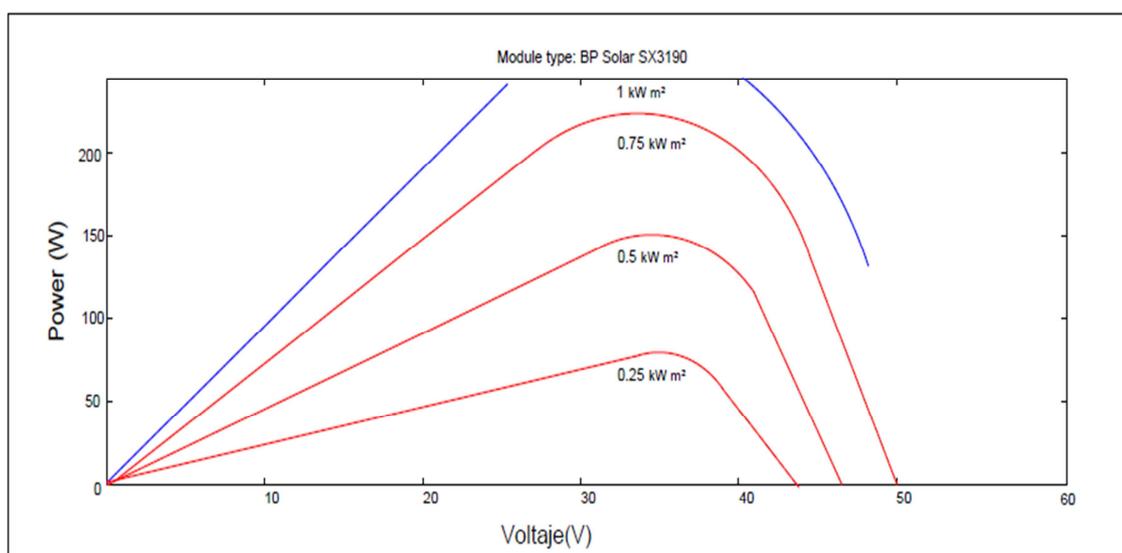
Ingresado los datos en nuestra tabla característica y sin el controlador difuso con valores de temperatura de 25°C y con irradiaciones de 1kW/m<sup>2</sup>, 0.75 kW/m<sup>2</sup>, 0.5 kW/m<sup>2</sup> y 0.25 kW/m<sup>2</sup>, ver gráfica 49 y 50 relación I-V, P-V.

### 3.1.1 Resultado de corriente vs voltaje y potencia vs voltaje sin Controlador Difuso



Gráfica 49: Resultado I-V sin control.

Fuente y Elaboración: Los autores en Matlab



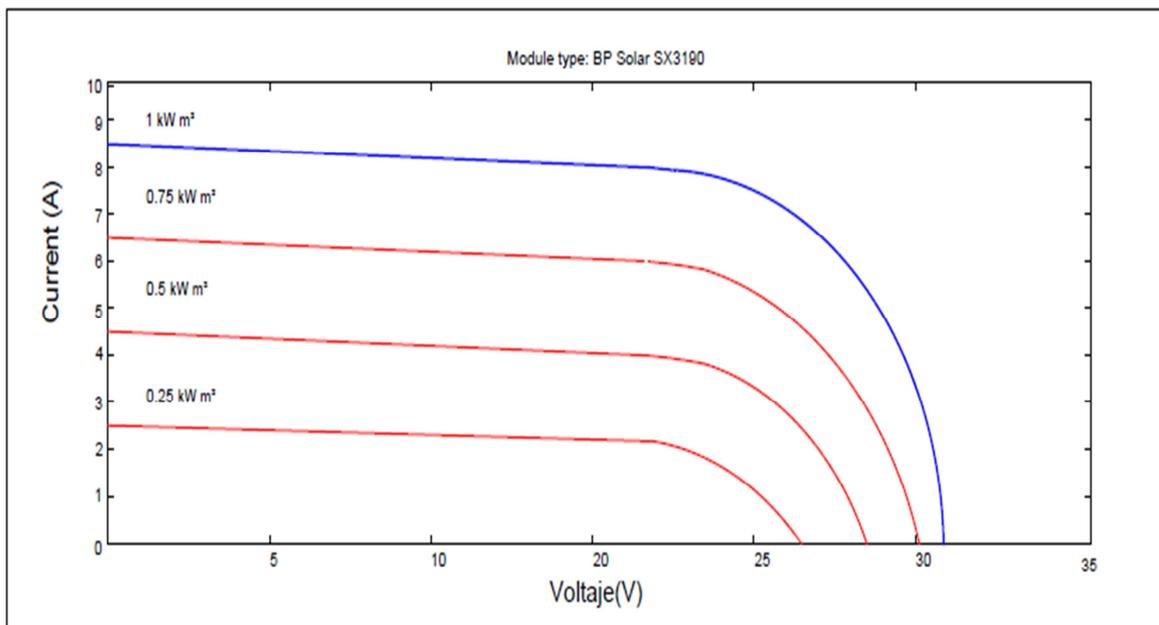
Gráfica 50: Resultado P-V sin control.

Fuente y Elaboración: Los autores en Matlab

En las gráficas podemos observar la variación de voltaje que se obtiene a la salida del panel debido a los cambios bruscos de irradiación y temperatura, en las mismas podemos ver la necesidad de la implementación del control difuso mediante el cual lograremos estabilizar la salida de voltaje y a su vez optimizar la potencia de salida.

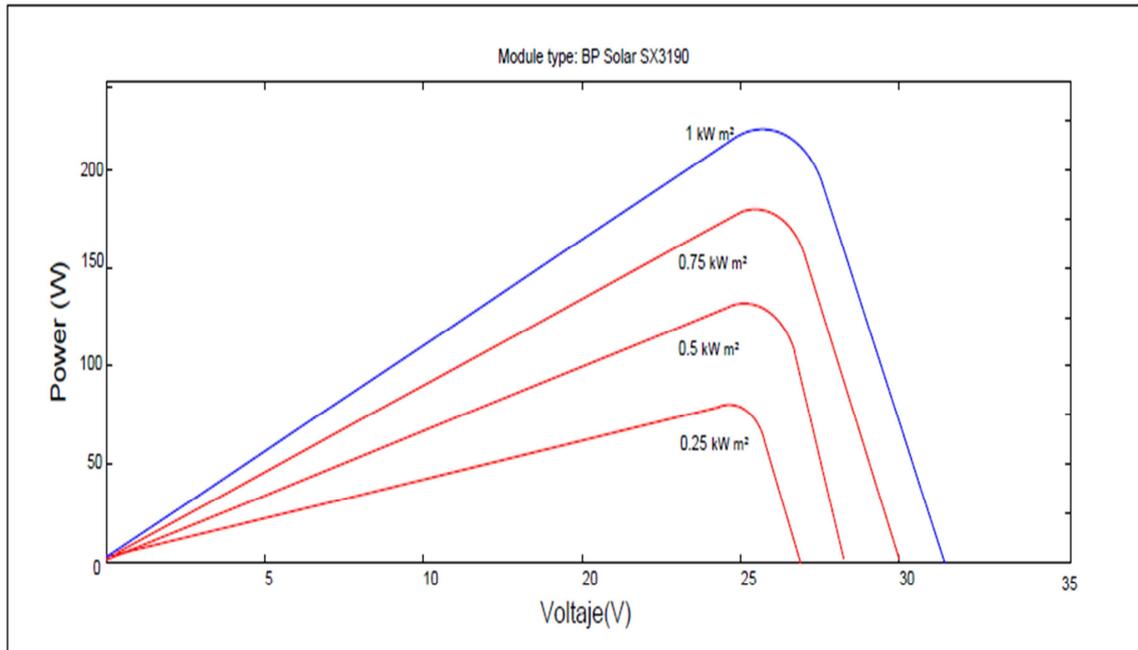
Para los resultados de la prueba de I-V. y P-V con el controlador difuso con los mismos valores de temperatura e irradiación obtenemos las siguientes gráficas.

### 3.1.2 Resultado de corriente vs voltaje y potencia vs voltaje con Controlador Difuso



Gráfica 51: Resultados I-V con control.

Fuente y Elaboración: Los autores en Matlab.



Gráfica 52: Resultados P-V con control.

**Fuente y Elaboración:** Los autores en Matlab

Podemos observar en las gráficas de I-V, P-V sin control que nos da un voltaje de 50V, con las diferentes corrientes dependiendo de la temperatura y las irradiaciones ingresadas, y de igual forma sucede con la potencia.

Ingresando el controlador obtenemos un voltaje de salida de 30V con los mismos valores de temperatura e irradiaciones, mejorando la estabilidad del sistema y optimizando la potencia.

### 3.2 Resultados de lazo cerrado

Para poder observar los resultados de lazo cerrado del sistema de control para el panel fotovoltaico utilizamos los modelos realizados con los bloques del panel FV, convertidor Buck DC-DC y el controlador difuso. Como se muestra a continuación.

## Modelo de un Panel Fotovoltaico a Lazo Cerrado

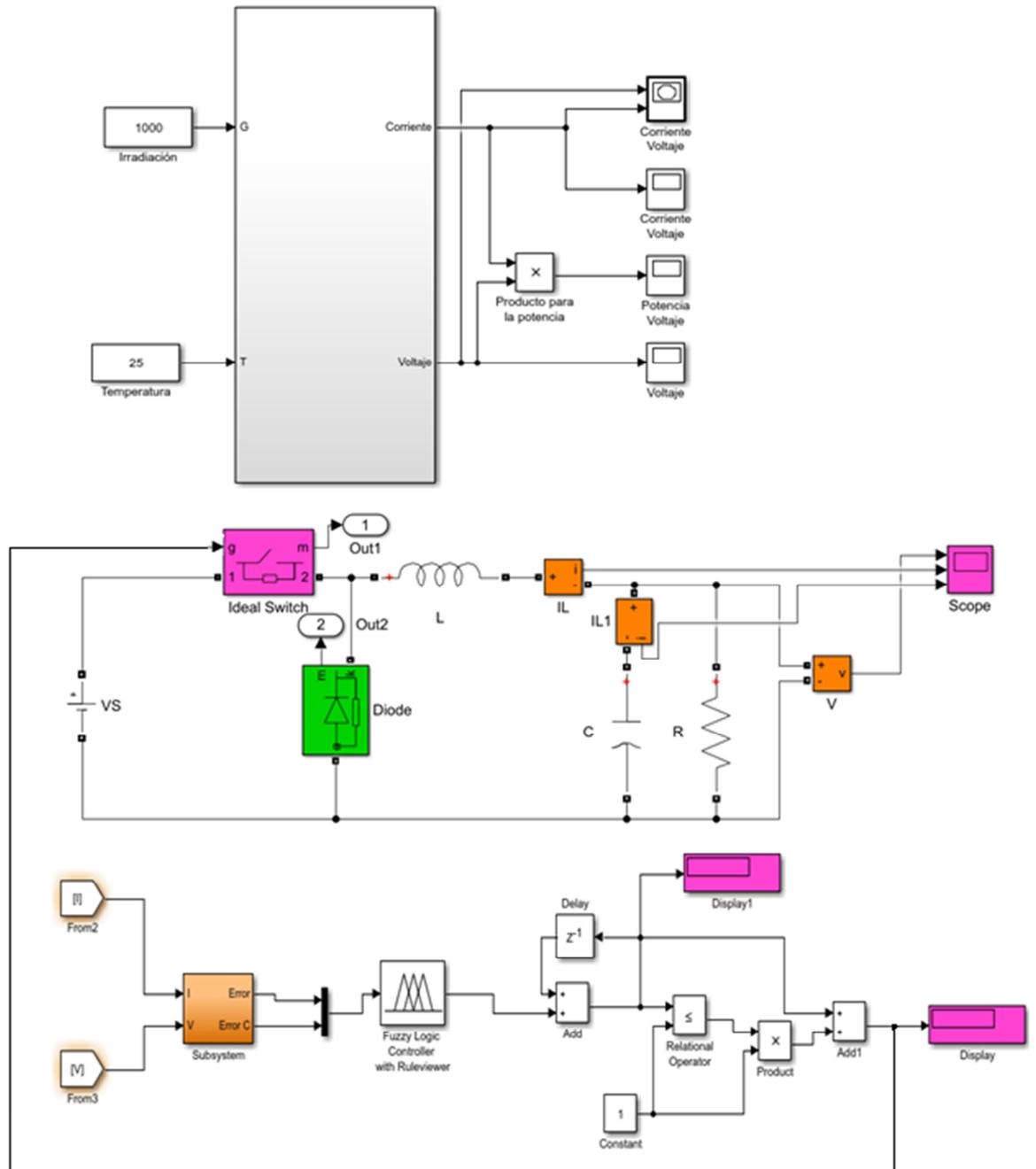


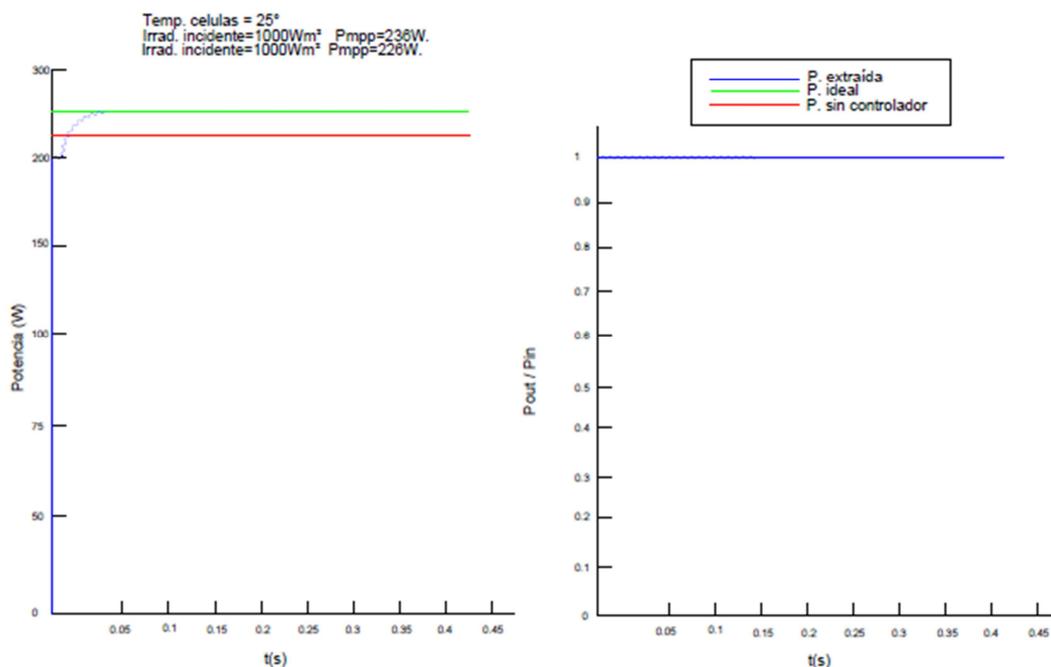
Ilustración 17: Simulación del sistema a Lazo Cerrado.

Fuente y Elaboración: Los autores en Matlab

### 3.2.1 Resultados para condiciones de prueba estándar para contrastar valores teóricos y prácticos.

Para observar el comportamiento del sistema del controlador difuso realizado, se implementa una comparación de la potencia del control difuso y la potencia extraída del panel fotovoltaico.

Entonces se pueda observar que el controlador difuso logra extraer una máxima potencia logrando así su estabilidad en un tiempo determinado como a continuación se presenta la gráfica 53, la misma que está basada del documento de (Robles & Villa, G, 2011) para comparación de valores mediante la cual se demuestra la eficiencia del panel con una temperatura constante de  $T=25^{\circ}\text{C}$  e irradiación constante de  $E=1000\text{ W/m}^2$ .



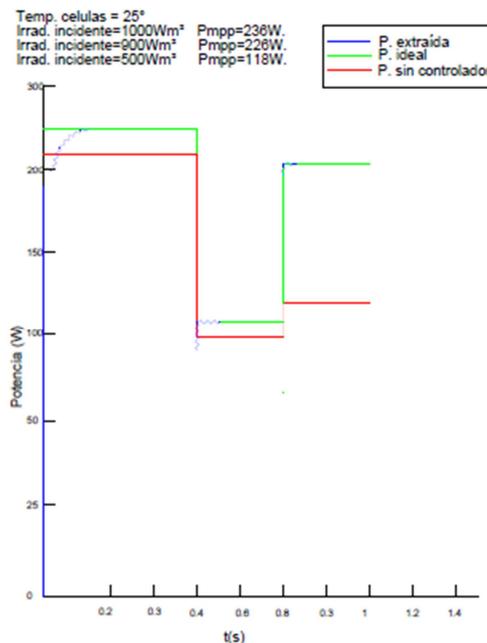
Gráfica 53: Resultados a Lazo Cerrado a Temperatura e Irradiación constante.

Fuente y Elaboración: (Robles & Villa, G, 2011)

En la gráfica se representa las dos potencias obtenidas, la primera sin control con un valor de 45W y la segunda curva con el control difuso nos grafica una potencia ideal de 55W.

### 3.2.2 Resultados para cambios en la irradiación para contrastar valores teóricos y prácticos.

Para los resultados del cambio de irradiación se realiza las pruebas con una temperatura constante de 25°C y con las diferentes irradiaciones de 1000 W/m<sup>2</sup> a 500 W/m<sup>2</sup>, con un tiempo definido de 0.4s y a continuación una irradiación de 500 W/m<sup>2</sup> a 900 W/m<sup>2</sup> con un tiempo de 0.75s, dando como resultado que la potencia se estabilice con el controlador obteniendo así el punto de máxima potencia con las diferentes irradiaciones las mismas que se representan en la gráfica 54, basadas de (Robles & Villa, G, 2011) para la comparación de valores.



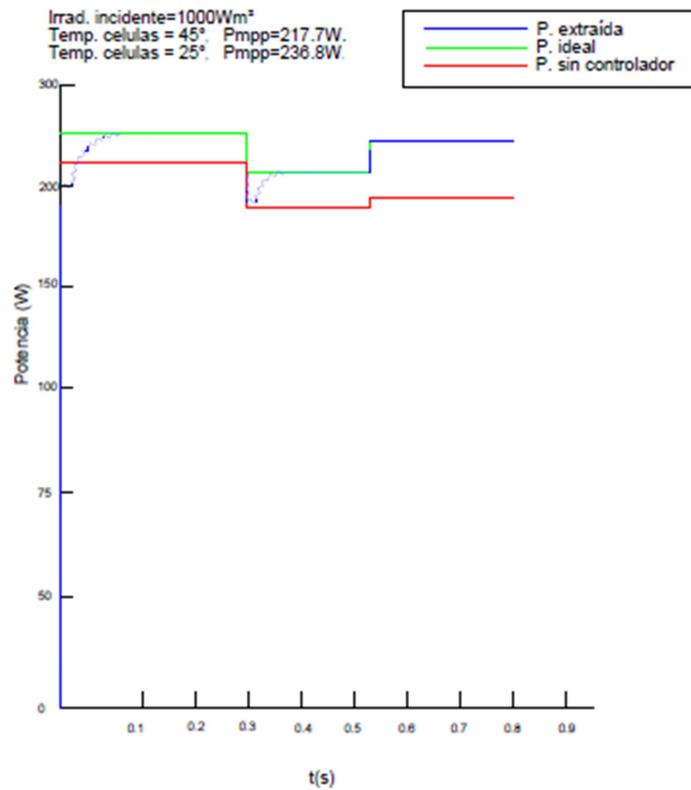
Gráfica 54: Resultados a Lazo Cerrado para Irradiación variable.

Fuente y Elaboración: (Robles & Villa, G, 2011)

### 3.2.3 Resultados para cambios en la temperatura para contrastar valores teóricos y prácticos.

Para los resultados de cambio de la temperatura se realizan las siguientes pruebas, las temperaturas utilizadas son de 25 °C y 45 °C con un tiempo de 0.4s, y luego con una temperatura de 45 °C y 35 °C con un tiempo de 0.4s donde la irradiación es constante de 1000 W/m<sup>2</sup>, en este caso observamos que a diferentes temperaturas la potencia de salida no varía demasiado como sucede con la irradiación que afecta en el rendimiento del panel de igual forma se logra

estabilizar la potencia mediante el control difuso logrando así el punto de máxima potencia las mismas que se representan en la gráfica 55 basadas de (Robles & Villa, G, 2011) para la comparación de valores.



Gráfica 55: Resultados a Lazo Cerrado para Temperatura variable.

Fuente y Elaboración: (Robles & Villa, G, 2011)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones.

En la actualidad una de las alternativas más importantes en la generación de energía eléctrica es la basada mediante el uso de paneles solares debido a que este tipo de energía es limpia, segura y amigable con el medio ambiente, teniendo en cuenta que una de las desventajas de esta tecnología es la de no poder aprovechar al cien por ciento su energía debido a los factores que influyen en el panel como son la irradiación y la temperatura.

Por lo tanto, se ha diseñado varios modelos matemáticos para lograr el control de la eficiencia de un panel solar, basando nuestro trabajo de investigación en los siguientes puntos:

- Se realizó el modelado matemático del comportamiento de un panel solar fotovoltaico en Matlab con el cual se obtuvo las salidas de corriente y voltaje realizando las gráficas de I-V y P-V las mismas que nos permiten evaluar el comportamiento del panel con los datos obtenidos en la práctica y los simulados, ya sea en condiciones de irradiación solar y temperatura variables de operación del panel.
- Las salidas de corriente y voltaje fueron acopladas a un convertidor DC-DC buck el cual nos permite maximizar la corriente de salida mediante el ajuste del ciclo útil (cycle duty), para el ajuste de dicho parámetro en condiciones de lazo cerrado es necesario la implementación del control difuso el cual fue diseñado y basado en el modelo de Mamdani.
- Logrando demostrar que mediante el uso de la lógica difusa podemos estabilizar la corriente y voltaje a la salida del sistema optimizando el punto de máxima potencia del panel ya que se trata de un mecanismo de razonamiento.

El reto del proyecto de investigación es el impulsar el uso de esta tecnología con el máximo de su aprovechamiento en el campo de la generación de energía renovable, y el poder abastecer de energía eléctrica a zonas inaccesibles.

### **Recomendaciones.**

Programar bien los errores, para que tenga mejor resultado el control difuso y así poder obtener los valores más cercanos a los reales.

Es indispensable realizar la programación de los valores obtenidos mediante las tablas introduciendo en Simulink (Matlab), con el objetivo de obtener los valores más exactos los mismo que ingresarían al modelado matemático del panel.

Plantear de manera correcta las variables lingüísticas para que no exista variaciones en las variables de entrada y así estar seguros del desempeño del controlador.

## Bibliografía

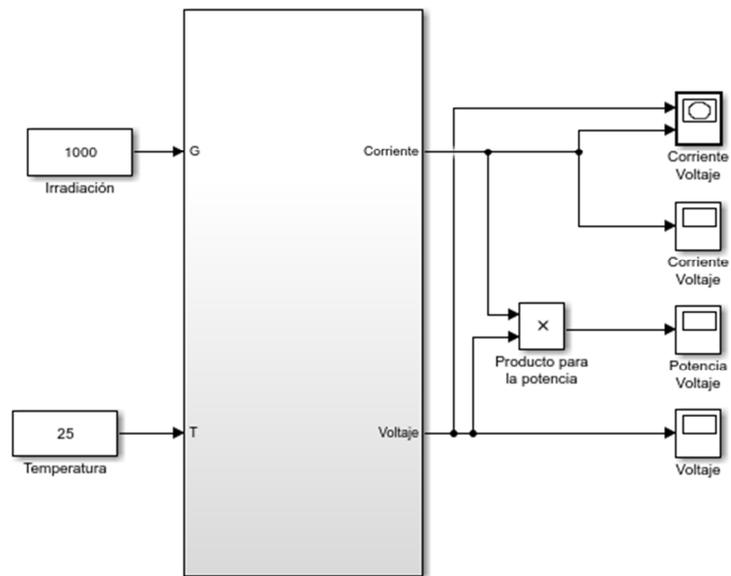
- Abd El Motaled, A. M. (09 de 2010). *Seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaico*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70172/fichero/Resumen.pdf>.
- Brunton, S. L., & Clarence, R. (2010). Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization Using Ripple- Based Extremum Seeking Control. En B. Steven, *IEEE Photovoltaic Specialists* (pág. 20). Nueva Jersey.
- Femia, N., Lisi, G., & Petrone, G. (7 de 07 de 2008). *Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays: Novel Approach and System Analysis*. Italia: IEE Transactions on Industrial Electronics. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/>
- Giménez Pérez, Á. (2016). *Diseño y Simulación de un convertidor FLYBACK para un sistema fotovoltaico*. Obtenido de <https://riunet.upv.es/>.
- Gowda, M., Kiran, Y., & Parthasarthy, S. (07 de 2014). *Modelling of Buck DC-DC converter using simulink*. Obtenido de [https://www.ijirset.com/upload/2014/july/97\\_Modelling.pdf](https://www.ijirset.com/upload/2014/july/97_Modelling.pdf)
- Habbati , B., Ramdani, Y., & Moulay, F. (09 de 04 de 2014). A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics* (2014) 3, 53–61, 53.
- Haw Chang, Y., & Yu Chang, C. (2010). A maximum Power Point Tracking of PV System by Scaling Fuzzy Control. *IMECS*, 5. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.302.884&rep=rep1&type=pdf>
- Lógica Difusa y Sistemas de Control. (2017). 1-26.
- Mejía, D. A., Torres Chávez, I., & Díaz, J. L. (12 de 2014). *Comparación de algoritmos MPPT aplicados en un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos*. Obtenido de <http://ingenieria.uao.edu.co/hombreymaquina/revistas/45-2014-2/articulo%205.pdf>.
- Passino, K. M., & Yurkovich, S. (1997). *Fuzzy Control*. EE.UU: Addison Wesley Longman Inc.
- Peña Aguirre, J. C., & Ramírez Agundis, A. (04 de 2016). Sistema de administración basado de energía basado en Lógica Difusa aplicdo en LAVBIEW. *Pistas Educativas*, 424-440. Obtenido de <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas>

- Pérez Venzor, J. A., & Cota Ruiz, J. D. (01-04 de 2015). *Control de un convertidor CD-CD tipo BUCK por medio del microcontrolador ATMEGA328*. Obtenido de CULCYT/SISTEMAS:  
<https://www.google.com/search?q=Vargas,+M.,+PEREZ,V..A,+%26+COTA,R.J.D.+%282015%29.+Control+de+un+convertidor+CD-CD+tipo+buck+por+medio+del+microcontrolador+ATMEGA328>.
- Reyes Pacheco, M. A. (Octubre de 2014). *Análisis y diseño de microconvertidores DC-DC tipo flyback para un central fotovoltaica conectada al a red*. Obtenido de [http://repositorio.udec.cl/bitstream/handle/11594/1970/Tesis\\_Analisis\\_y\\_Dise%C3%B1o\\_de\\_Microconvertidores.pdf?sequence=1](http://repositorio.udec.cl/bitstream/handle/11594/1970/Tesis_Analisis_y_Dise%C3%B1o_de_Microconvertidores.pdf?sequence=1).
- Sánchez Gómez, R. (08 de 2009). *Inteligencia en Redes de Comunicación*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/mentelibre/logica-difusa-introduccion>.
- Tejada Muñoz, G. (2000). *Lógica Difusa*. Obtenido de <http://sisbib.unmsm.edu.pe/>
- Vargas, M., PEREZ,V..A, & COTA,R.J.D. (2015). *Control de un convertidor CD-CD tipo buck por medio del microcontrolador ATMEGA328*. Obtenido de <http://tesis%20referencias/diseño%20buck.pdf>
- Zúñiga Ventura, Y. A. (10 de 2014). *Control del Punto de Máximo Potencia en Paneles Solares bajo Vibraciones de Radiación y Temperatura*. Obtenido de <http://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/2849/ZunigaVentura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

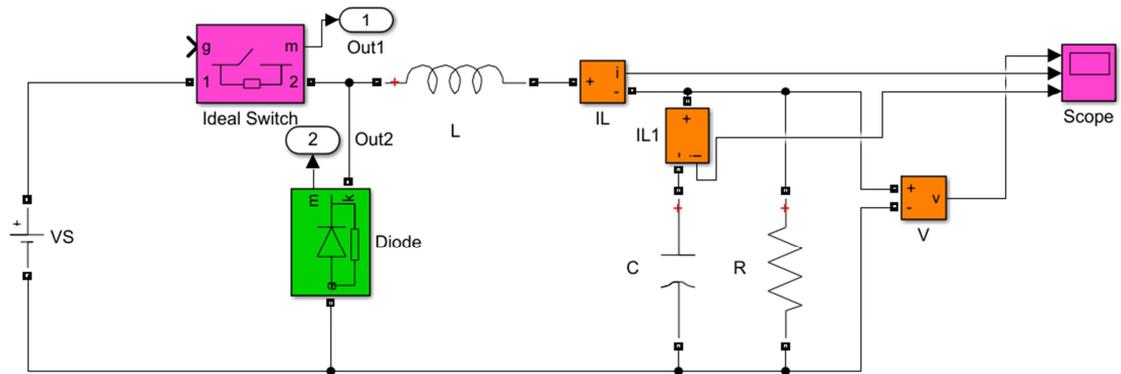
## ANEXOS.

### Anexo 1: Diseño de panel fotovoltaico 230w.

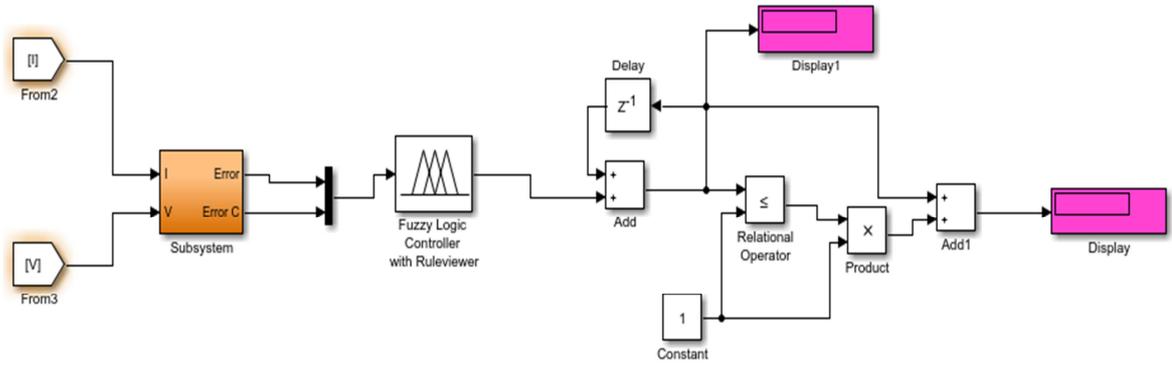
## MODELO MATEMÁTICO DE UN PANEL FOTOVOLTAICO



## Anexo 2: Diseño de Convertidor dc-dc Buck.



### Anexo 3: Diseño de Controlador Difuso.



### Anexo 4: Diseño general de sistema de control del punto de máxima potencia con Lógica Difusa

