



**Análisis comparativo del desempeño de algoritmos seguidores del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos**

Cuzco Sisa, Richard Xavier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,

Automatización y Control

Dr. Arcos Avilés, Diego Gustavo

06 de julio del 2021



## Document Information

---

<b>Analyzed document</b>	Tesis_Urkund_Cuzco.docx (D110182491)
<b>Submitted</b>	7/6/2021 12:10:00 AM
<b>Submitted by</b>	
<b>Submitter email</b>	dgarcos@espe.edu.ec
<b>Similarity</b>	1%
<b>Analysis address</b>	dgarcos.espe@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

---

<b>W</b>	URL: <a href="https://core.ac.uk/download/pdf/84995853.pdf">https://core.ac.uk/download/pdf/84995853.pdf</a> Fetched: 7/20/2020 11:06:31 PM	 1
<b>SA</b>	<b>8575-Sánchez Zurita, Victor Andrés.pdf</b> Document 8575-Sánchez Zurita, Victor Andrés.pdf (D35163960)	 1
<b>SA</b>	<b>8710-Fuentes Bendezu, Luis Alexander_.pdf</b> Document 8710-Fuentes Bendezu, Luis Alexander_.pdf (D53607114)	 1
<b>SA</b>	<b>MDT_Informe_DiegoRanimanH.PDF</b> Document MDT_Informe_DiegoRanimanH.PDF (D78799716)	 1
<b>SA</b>	<b>IF. JACOB ASTOCONDOR VILLAR - ENERO 2018.docx</b> Document IF. JACOB ASTOCONDOR VILLAR - ENERO 2018.docx (D36178876)	 3
<b>W</b>	URL: <a href="https://1library.co/document/qo5k2jmy-comparacion-de-algoritmos-mppt-aplicados-a-sistemas-fotovoltaicos.html">https://1library.co/document/qo5k2jmy-comparacion-de-algoritmos-mppt-aplicados-a-sistemas-fotovoltaicos.html</a> Fetched: 7/22/2020 11:58:37 PM	 1



Firmado electrónicamente por:  
**DIEGO GUSTAVO  
ARCOS AVILES**



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**Análisis comparativo del desempeño de algoritmos seguidores del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos**” fue realizado por el señor **Cuzco Sisa, Richard Xavier** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de julio de 2021

Firma:



Dr. Arcos Avilés, Diego Gustavo



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo **Cuzco Sisa, Richard Xavier** con cédula de ciudadanía n° 1726853425, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis comparativo del desempeño de algoritmos seguidores del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Sangolquí, 06 de julio de 2021

Firma:

**Cuzco Sisa Richard Xavier**  
CI: 1726853425



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y  
CONTROL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Cuzco Sisa, Richard Xavier** con cédula de ciudadanía n° 1726853425, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis comparativo del desempeño de algoritmos seguidores del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 06 de julio de 2021**

Firma:

**Cuzco Sisa Richard Xavier**  
CI: 1726853425

**Dedicatoria**

*Dedico esta tesis a mis padres Patricia Sisa y Ramiro Cuzco por haberme forjado a lo largo de mi caminar, sin el apoyo incondicional de ellos no hubiese podido llegar a este punto, ofrezco este trabajo como ofrenda por su paciencia, consejos e infinito amor.*

*A mi hermano Jeferson quien ha sido fuente de inspiración en todos los momentos de mi vida, gracias por el apoyo, ejemplo y motivación que influyes en mí.*

*A mis amigos que han sabido ayudarme con sus consejos y enseñanzas, a esos amigos incondicionales que se convierten en familia.*

RICHARD X. CUZCO SISA

## **Agradecimientos**

*Quiero iniciar agradeciendo a mis padres, por ser ejemplo de trabajo, constancia y perseverancia, por ser los promotores de mis sueños y triunfos, por confiar, creer y compartir mis metas y expectativas, gracias a sus enseñanzas han sabido forjar en mí una persona de bien fortaleciendo mi corazón e iluminando mi mente, gracias a mi madre quien me acompañaba en mis largas veladas de estudio, gracias a mi padre por siempre anhelar lo mejor para mí.*

*Gracias a mi hermano quien me supo comprender y apoyar en momentos difíciles, gracias a él pude superar muchas adversidades que la vida universitaria depara, a él debo gran parte de mi esfuerzo y dedicación.*

*A mi enamorada, por brindarme su apoyo incondicional en todos los momentos dentro y fueran de la universidad, gracias a ella que día a día me brindaba palabras de aliento para seguir adelante.*

*Como no agradecer inmensamente a mis amigos, con los cuales vivimos tantas aventuras, compartimos gratos momentos, hubo risas, llantos, peleas, pero al final del día siempre recordábamos la familia "Pililin" que somos.*

*Finalmente quiero agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE – a sus docentes por el conocimiento impartido y especialmente a mi tutor de tesis Diego Arcos por el apoyo brindado durante este proyecto.*

**RICHARD X. CUZCO SISA**

**ÍNDICE****CONTENIDO**

<i>Dedicatoria</i> .....	6
<i>Agradecimientos</i> .....	7
Resumen.....	15
Abstract.....	16
Capítulo I. Introducción.....	17
Antecedentes.....	17
Justificación.....	18
Alcance.....	20
Objetivos.....	21
General .....	21
Específicos .....	22
Capítulo II. Marco teórico .....	23
Sistemas fotovoltaicos .....	23
Paneles solares .....	24
Principio de funcionamiento y estructuras básicas.....	24
Aproximaciones y modelos de paneles solares.....	25
Curvas características y MPP .....	28
Convertidores .....	29

Convertidor elevador .....	30
Seguidores del punto de máxima potencia .....	33
Algoritmo de perturbación & observación (P&O) .....	33
Algoritmo de conductancia incremental (INC) .....	34
Control por lógica difusa (FLC) .....	36
Algoritmo basado en redes neuronales (NN) .....	38
Control por modos deslizantes (SMC) .....	41
Capítulo III. Diseño .....	46
Diseño del sistema fotovoltaico .....	46
Modelado y diseño del panel solar .....	46
Diseño del convertidor elevador .....	54
Diseño de los algoritmos de control MPPT .....	58
Perturbación y Observación (P&O) .....	58
Conductancia incremental (INC) .....	61
Controlador lógico difuso (FLC) .....	65
Controlador basado en redes neuronales (NN) .....	73
Control por modos deslizantes (SMC) .....	80
Capítulo IV. Simulaciones y Comparaciones .....	84
Esquemas de simulación .....	84
Escenario 1: Condiciones climáticas estándar .....	87

Escenario 2: Temperatura Variable – Irradiancia Constante.....	91
Escenario 3: Temperatura Constante – Irradiancia Variable.....	95
Escenario 4: Condiciones Climáticas Reales .....	101
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones .....	111
Conclusiones .....	111
Recomendaciones.....	113
Referencias Bibliográficas .....	115
Anexos.....	121

**Índice de tablas**

<i>Tabla 1. Características técnicas panel solar .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 2. Cambios de potencias algoritmo P&amp;O.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 3. Reglas de funcionamiento .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 4. Resultados – Escenario 1 Condiciones STC .....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 5. Resultados – Escenario 2 .....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 6. Resultados – Escenario 3.....</i>	<i>99</i>

## Índice de figuras

<i>Figura 1. Diagrama de bloques sistema fotovoltaico.....</i>	20
<i>Figura 2. Convertidor elevador.....</i>	21
<i>Figura 3. Sistema clásico de generación fotovoltaico.....</i>	23
<i>Figura 4. Celda, modulo, panel y arreglo solar.....</i>	25
<i>Figura 5. Modelo ideal celda solar.....</i>	26
<i>Figura 6. Circuito equivalente con pérdidas resistivas.....</i>	27
<i>Figura 7. Curvas características celda solar.....</i>	28
<i>Figura 8. Convertidor elevador nomenclatura.....</i>	31
<i>Figura 9. Topologías de conducción continua.....</i>	32
<i>Figura 10. Explicación gráfica del método P&amp;O.....</i>	34
<i>Figura 11. Explicación gráfica del algoritmo INC.....</i>	35
<i>Figura 12. Estructura básica de un controlador difuso.....</i>	36
<i>Figura 13. Funciones de pertenencia.....</i>	37
<i>Figura 14. Estructura de una neurona.....</i>	39
<i>Figura 15. Neurona de múltiples entradas.....</i>	40
<i>Figura 16. Estructura de una red neuronal.....</i>	40
<i>Figura 17. Trayectorias en el plano de un SCVE de segundo orden.....</i>	42
<i>Figura 18. Señal de control en modo deslizante.....</i>	43
<i>Figura 19. Control equivalente.....</i>	44
<i>Figura 20. Esquema corriente foto-generada en Simulink.....</i>	48
<i>Figura 21. Esquema de corriente del diodo en simulink.....</i>	49
<i>Figura 22. Esquema de corriente inversa de saturación en simulink.....</i>	50

<i>Figura 23. Esquema de corriente de la celda en simulink .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24. Esquema de la corriente de la resistencia en paralelo en simulink.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25. Corriente de salida del panel fotovoltaico en simulink .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26. Formas de onda, tensión y corriente del condensador .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 27. Convertidor conectado al panel solar.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 28. Diagrama de flujo - P&amp;O .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 29. Diagrama de flujo – INC .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 30. Diferencias de potencias - FLC.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 31. Función de pertenencia – entrada 1 E.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 32. Función de pertenencia – entrada 2 CE.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33. Función de pertenencia – salida D.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 34. Superficie de control.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 35. Esquema de simulación FLC .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36. Esquema fotovoltaico de simulación - NN.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 37. Estructura red neuronal diseñada.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 38. Ingreso de variables de entrada y salida.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 39. Selección de porcentajes de muestras.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 40. Selección del algoritmo y entrenamiento de la NN.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 41. Esquema red neuronal MPPT .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 42. Diagrama de bloques SMC .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 43. Esquema de simulación – sistema fotovoltaico .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 44. Esquema de simulación SMC.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 45. Esquema de simulación algoritmo P&amp;O.....</i>	<i>85</i>

<i>Figura 46. Esquema de simulación algoritmo INC.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 47. Esquema de simulación algoritmo FLC.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 48. Esquema de simulación algoritmo basado en NN.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 49. Esquema de simulación algoritmo basado en SMC .....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 50. Potencia de salida STC – a) P&amp;O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 51. Tensión y Corriente de salida del sistema - a) P&amp;O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 52. Señal de Temperatura .....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 53. Potencia de salida escenario 2 – a) P&amp;O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC .....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 54. Señal de Irradiancia.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 55. Potencia de salida escenario 3 – a) P&amp;O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC .....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 56. Comparación Algoritmos – Escenario 3 .....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 57. Localización del Sector de Pruebas.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 58. Datos PVGIS.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 59. Señal de Irradiancia Real.....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 60. Señal de Temperatura Real .....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 61. Potencia P&amp;O – Datos Reales.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 62. Comparación del Desempeño de Algoritmos – Escenario 4 .....</i>	<i>108</i>

## Resumen

La producción de energía fotovoltaica ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años, esto se debe a la reducción de costos en la fabricación de paneles solares y a la conciencia de generar nuevas alternativas de producción de energía limpia con un impacto casi nulo al medio ambiente.

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad realizar una comparativa del desempeño de cinco algoritmos seguidores del punto de máxima potencia (MPPT) mediante el diseño y simulación de diferentes estrategias de control aplicado a sistemas fotovoltaicos de manera que precisen una extracción máxima de energía de los paneles solares al considerar condiciones atmosféricas variantes. Además, se realizó el modelado de un del panel solar en base al análisis de su circuito electrónico equivalente y la formulación matemática de cada componente y su respectivo comportamiento.

Los algoritmos convencionales MPPT diseñados son Perturbación y Observación (P&O) y Conductancia Incremental (INC), a su vez se desarrollaron tres controladores más avanzados y robustos mismos que están basados en Control por Lógica Difusa (FLC), Control por Modo Deslizante (SMC) y Redes Neuronales (NN). Para maximizar la extracción de energía de los panes solares se conecta un convertidor elevador el cual variará su ciclo de trabajo por influencia del algoritmo aplicado.

Los diseños y simulaciones tanto del panel solar, convertidor y controladores fueron realizados por medio del software MATLAB / SIMULINK, en las mismas se consideró diferentes escenarios de simulación con el fin de poner a prueba la funcionalidad de cada controlador.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **PANELES SOLARES**
- **SEGUIDOR DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA**
- **CONVERTIDOR ELEVADOR**
- **CONTROL DE POTENCIA**

## **Abstract**

Photovoltaic energy production has shown exponential growth in recent years due to the reduction of costs in the manufacture of solar panels and the awareness of generating new alternatives for clean energy production that leads to a near-zero impact on the environment.

This project aims to compare the performance of five maximum power point tracking (MPPT) algorithms by designing and simulation different control strategies applied to photovoltaic systems to determine the maximum energy extraction from the solar panels considering varying weather conditions. The modeling of a solar panel is carried out based on the analysis of its equivalent electronic circuit and the mathematical formulation of each component and its respective behavior.

The conventional MPPT algorithms designed are Perturbation and Observation (P&O) and Incremental Conductance (INC), and three more advanced and robust controllers are developed, namely Fuzzy Logic Control (FLC), Sliding Mode Control (SMC), and Neural Networks (NN). A boost DC-DC converter is connected to maximize the solar energy extraction, which controls the DC-DC converter, through the different algorithms, by modifying the duty cycle signal.

The designs and simulations of the solar panel, converter, and controllers are carried out using MATLAB / SIMULINK software. Different simulation scenarios are considered for testing the effectiveness of each controller.

### **KEYWORDS:**

- **SOLAR PANELS**
- **MAXIMUM POWER POINT TRACKING**
- **BOOST CONVERTER**
- **POWER ELECTRONICS**

## Capítulo I. Introducción

### Antecedentes

La constante demanda de energía eléctrica a nivel global ha desatado una firme investigación de nuevas fuentes de generación eléctrica. El agotamiento de recursos proveniente de restos fósiles sumado a la clara afectación del planeta por su uso ha derivado en la búsqueda de nuevas fuentes de generación de energías “verdes” que sean amigables con el planeta. Es por ello que la producción de estas energías se ha incrementado en los últimos años. Dentro de este marco el sector que ha marcado un hito en la generación energética es la industria fotovoltaica con un crecimiento exponencial a nivel global, esto debido a la disminución de costos de fabricación y producción de sus celdas solares (Shadmand, Mosa, Balog, & Haitham, 2015). En el 2019 se instalaron 128-GW de energía fotovoltaica a nivel mundial, donde los países con un mayor índice de crecimiento fueron China y Estados Unidos que juntos representan más del 50% de la capacidad instalada de energía fotovoltaica en ese año, mientras que en América Latina se destaca Brasil con una producción instalada de 1.2GW y México con un total de 2.8GW (ANPIER, 2020).

Pese a la reducción de costos en cuanto a la construcción de células fotovoltaicas uno de los obstáculos que limita la producción de energía, dentro de los sistemas fotovoltaicos, está ligado a las condiciones atmosféricas, es decir, factores como la temperatura e irradiación no son constantes y la generación de energía por las celdas solares depende de estas (Shadmand, Mosa, Balog, & Haitham, 2014). Para sobrellevar las fluctuaciones de las condiciones climáticas y garantizar que la energía solar irradiada sea aprovechada al máximo es necesario aplicar estrategias que realicen un seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), es por ello que la importancia de aplicar técnicas MPPT radica en la eficiencia que tendrán los sistemas de extraer la máxima cantidad de energía de los paneles solares (Kasper, Bortis, & Kolar, 2014).

Actualmente se han establecido diferentes algoritmos de control MPPT tanto convencionales como más avanzados o inteligentes que van desde algoritmos comúnmente utilizados como Perturbación y Observación (P&O) hasta la utilización de algoritmos genéticos (GA) (Esrám & Chapman, 2007). Los diferentes algoritmos diseñados varían en diversos aspectos propios acorde a la metodología de cada uno. Es tal la diversificación de los métodos MPPT diseñados que resulta difícil determinar uno de ellos que se considere el más apropiado para un sistema fotovoltaico y con un aplicativo específico (Belaidi, Bendib, Ghribi, Bouzidi, & Mghezzi, 2019).

En este contexto, existen dos métodos convencionales utilizados en el mercado P&O y Conductancia Incremental (INC). Estos algoritmos presentan una respuesta adecuada siempre que las condiciones atmosféricas sean constantes o uniformes, bajo estas condiciones son capaces de rastrear el punto de máxima potencia (MPP) con una respuesta aceptable, aunque se debe considerar que en lugar de rastrear el punto MPP oscilan alrededor del mismo y esto genera pérdidas considerables de potencia. Para brindar una solución a los problemas de los métodos convencionales se han diseñado algoritmos basados en informática avanzada como lógica difusa, redes neuronales, algoritmos genéticos, algoritmos de evolución diferencial, entre otros pese a las ventajas que presentan, generalmente son más complejos y a su vez incrementan el costo computacional de manera que en algunos casos su implementación es posible únicamente con controladores con características específicas y de un elevado valor económico (Rezk & Eltamaly, 2015).

## **Justificación**

Actualmente la mayor producción de energía a nivel mundial proviene de la quema de combustibles fósiles y su uso desmesurado ha generado grandes afecciones al planeta. El hecho es que la electricidad es una necesidad que aumenta a la par del crecimiento poblacional es por ello que la producción de energías renovables es la mejor alternativa para frenar la contaminación originada por combustibles fósiles. La cantidad de energía que proviene del sol es tan abundante que en solo una hora puede proporcionar suficiente energía para abastecer al mundo durante un año.

La conversión de energía solar a energía eléctrica es muy limitada debido a que el punto en que operan los paneles solares no siempre coincide con el MPP. Las metodologías elaboradas para realizar un MPPT son muy variadas, por tal razón, es necesario la realización de un estudio comparativo que permita medir la funcionalidad y desempeño entre estas metodologías. La comparación de la respuesta de los sistemas fotovoltaicos frente a diferentes métodos de MPPT y bajo condiciones climáticas variantes se vuelve prioritaria para establecer metodologías que permitan evidenciar el mejor desempeño en cuanto a oscilaciones, costo computacional, robustez frente a perturbaciones, respuesta frente a cambios climáticos, entre otros.

En contexto con la información presentada, el aporte que brinda el presente proyecto de investigación radica en la generación de algoritmos específicos de MPPT para paneles solares, analizar el desempeño de los algoritmos diseñados, realizar una comparativa de desempeño y en base a este estudio poder extrapolar los algoritmos hacia diferentes tipos de sistemas fotovoltaicos.

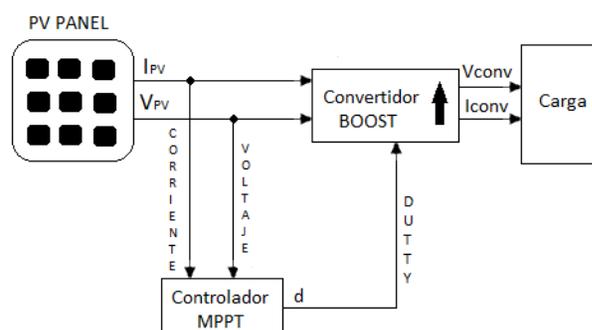
El trabajo de investigación presentado es parte de los proyectos 2019-PIC-003-CTE y VLIR-UOS Nro. EC2020SIN322A101 (2020-EXT-007) que se desarrollan en el Grupo de Investigación en Propagación, Control Electrónico y Networking (PROCONET) de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

## Alcance

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad realizar una comparación del desempeño de cinco diferentes métodos MPPT aplicados a un panel solar comercial mediante el diseño de distintas estrategias de control y escenarios de simulación para poder evaluar el comportamiento de los controladores. Para realizar la comparación se considerarán indicadores específicos como mediciones de corriente y voltaje generado, cantidad de potencia extraída, presencia de oscilaciones y porcentaje de eficiencia. La comparativa de los diferentes tipos de controladores se realizará entre dos métodos comúnmente utilizados P&O e INC y tres métodos basados en informática moderna mismos que son: controlador por Lógica difusa (FLC), Redes Neuronales (NN) y Control por Modos Deslizante (SMC). Para poder efectuar la comparación de los métodos diseñados se realizarán simulaciones bajo diferentes escenarios con variaciones de parámetros como temperatura e irradiación para visualizar la extracción de potencia de salida del sistema de generación fotovoltaica. Para efecto de diseños del sistema fotovoltaico, controladores y simulaciones de los mismos se utilizará el software Matlab/Simulink.

**Figura 1.**

### ***Diagrama de bloques sistema fotovoltaico***



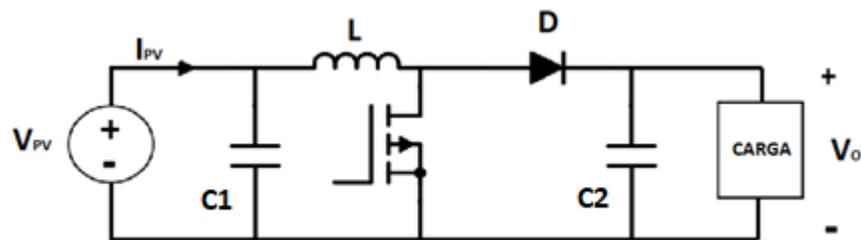
*Nota.* Fuente del Autor

En la Figura 1 se presenta el diagrama de bloques generalizado del sistema fotovoltaico a ser utilizado para el desarrollo de las diferentes simulaciones. A su vez el diagrama esquemático presentado como tal estará sujeto a variaciones según demande la configuración y características específicas de cada algoritmo y controlador.

El convertidor seleccionado para este trabajo de investigación es un convertidor elevador DC-DC tradicional, como se puede observar en la Figura 2, el ciclo de trabajo dependerá de la señal de salida del controlador MPPT (algoritmos diseñados).

**Figura 2.**

***Convertidor elevador***



*Nota.* Fuente del Autor

El principal propósito de analizar el desempeño de los controladores que realizan el MPPT es identificar factores de criterio para realizar una comparativa y determinar que método presenta una mejor respuesta, a la par del costo computacional demandado y costo monetario.

**Objetivos**

***General***

Realizar la comparación de diferentes algoritmos seguidores del punto de máxima potencia aplicados a un sistema fotovoltaico, mediante la simulación en Matlab/Simulink para determinar el desempeño de los mismos frente a condiciones climáticas variantes.

### ***Específicos***

- Establecer el modelo matemático del sistema de generación fotovoltaica con la utilización de herramientas informáticas para comparar el comportamiento de los diferentes controladores.
- Diseñar el sistema de generación fotovoltaico mediante la utilización de convertidores, paneles solares, cargas, con el fin de emplearlo como diseño base para la simulación de los algoritmos de MPPT.
- Construir algoritmos convencionales P&O e INC que permitan realizar el seguimiento del punto de máxima potencia mediante la implementación en un modelo base de un sistema fotovoltaico.
- Diseñar algoritmos modernos basados en lógica difusa, redes neuronales y control por modo deslizante con el fin de estimar su desempeño dentro de controladores que realicen el seguimiento del punto de máxima potencia en un modelo base de un sistema fotovoltaico.
- Evaluar el desempeño de los controladores diseñados mediante diferentes escenarios de simulación para comparar su funcionamiento y establecer su grado de aplicabilidad.

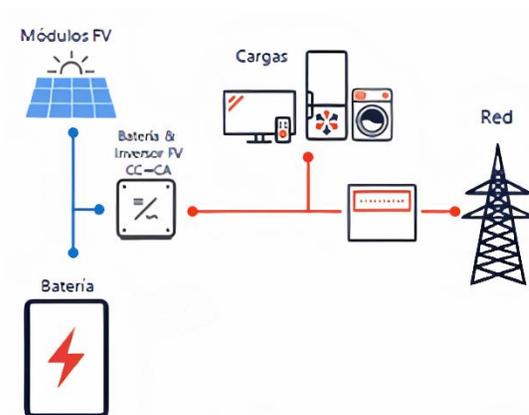
## Capítulo II. Marco teórico

### Sistemas fotovoltaicos

Se define como sistema fotovoltaico al conjunto de dispositivos involucrados en la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar. La transformación energética se produce por medio de celdas fotovoltaicas conectadas en serie o paralelo. Un sistema fotovoltaico básicamente está compuesto por módulos fotovoltaicos (Paneles solares), convertidores, cargas, inversores y baterías de almacenamiento en caso de ser necesario (Rezk & Eltamaly, 2015). En el capítulo tres de este documento se analiza el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos, del mismo modo se realizará para el convertidor elevador a utilizar.

**Figura 3.**

#### ***Sistema clásico de generación fotovoltaico***



*Nota.* Tomado de SolarEdge 2020

## Paneles solares

Un panel solar también llamado panel fotovoltaico es el elemento propiamente encargado de la generación de energía eléctrica mediante la utilización de la energía solar, básicamente está constituido por la conexión en serie y/o paralelo de múltiples celdas o células solares.

### *Principio de funcionamiento y estructuras básicas*

Una celda solar es un elemento semiconductor que utiliza el principio físico denominado efecto fotovoltaico que se basa en la incidencia de un flujo luminoso sobre su superficie para producir una fuerza electromotriz. Su principal composición química la forma el silicio, mismo que al ser expuesto a la radiación solar absorbe suficiente cantidad de fotones para producir un “salto de electrones” con carga negativa (n) lo que genera un surgimiento de “huecos” con carga positiva (p). La incidencia de la radiación solar sobre la superficie de la celda fotovoltaica genera un campo eléctrico y forma dos zonas completamente definidas, la primera donde se encuentran los electrones y otra donde se agrupan los huecos, al conectar eléctricamente ambas zonas se origina un diferencial de potencia (Fuerza electromotriz) misma que genera una corriente eléctrica (Ramos J. A., 2017).

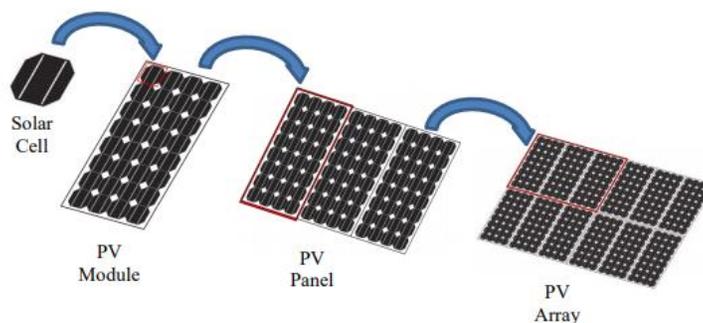
La generación de potencia eléctrica depende de la pureza del material y tecnología aplicada al momento de fabricar las celdas fotovoltaicas. Algunas celdas pueden llegar a producir entre 4-7 W, actualmente en el mercado se encuentran módulos de 200W hasta 600W con una configuración de 60 y 72 celdas. En función de la asociación de las celdas y de las escalas de generación eléctrica se establecen varias terminologías.

- **Celda fotovoltaica:** Es la unidad mínima para producir potencia eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, constituye el elemento más pequeño para ensamblar módulos fotovoltaicos.

- **Módulo fotovoltaico:** Se forma al ensamblar varias celdas fotovoltaicas en serie, esta configuración es utilizada para incrementar el voltaje de salida debido a que este será la suma de todas las celdas conectadas, el módulo fotovoltaico es la unidad más pequeña para ensamblar paneles fotovoltaicos.
- **Panel fotovoltaico:** Es la unión o conexión en paralelo de varios módulos fotovoltaicos, esta configuración incrementa la corriente debido a que la corriente resultante será la suma de las corrientes de cada módulo.
- **Arreglo fotovoltaico (planta fotovoltaica):** Son diseñados en base al aplicativo y sus necesidades de voltaje y corriente, se forman a partir de la conexión en serie o paralelo de varios paneles fotovoltaicos (Hernández, 2020).

**Figura 4.**

***Celda, modulo, panel y arreglo solar***



*Nota.* Tomado de (Arcos D. G., 2016)

***Aproximaciones y modelos de paneles solares***

Dentro de la literatura se postulan diferentes esquemas para modelar el funcionamiento de los paneles solares donde los principales modelos parten de sus ecuaciones características. Métodos no tan convencionales parten de datos reales de paneles fotovoltaicos comerciales y utilizan aproximaciones

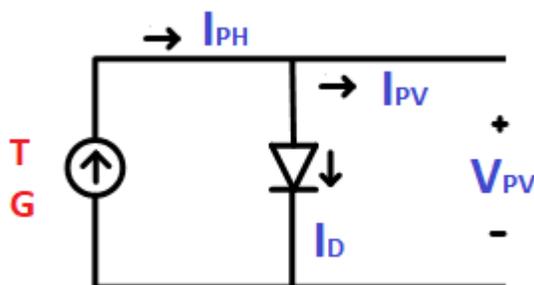
polinómicas o redes neuronales para simular su funcionamiento (Elkin, y otros, 2016). En este contexto, dentro de la presente investigación se partirá de las ecuaciones características de una celda solar y posteriormente se extrapolará los resultados para modelar un panel solar.

### *Modelo Ideal*

La estructura básica de un generador fotovoltaico es una celda solar, el funcionamiento de la misma se la puede representar como un diodo en paralelo a un fuente generadora de corriente, el modelo o circuito equivalente está dado por una fuente de corriente como se presenta en la figura 5 (Habbati, Ramdani, & Moulay, 2014) (Alarcón, 2015).

**Figura 5.**

### *Modelo ideal celda solar*



*Nota.* Fuente del Autor

La fuente de corriente representa la corriente foto generada  $I_{PH}$  y varía según la temperatura ( $T$ ) e irradiancia ( $G$ ) que incidan sobre la superficie del panel. A su vez el modelo consta de un diodo clásico de unión p-n donde la corriente que atraviesa por el mismo se denomina corriente del diodo ( $I_D$ ),  $I_{PV}$  y  $V_{PV}$  representan la corriente y voltaje de salida del panel, respectivamente. En este modelo no se consideran las pérdidas internas de corriente y su formulación matemática se la presenta en la ecuación (1).

$$I_{PV} = I_{PH} - I_D \quad (1)$$

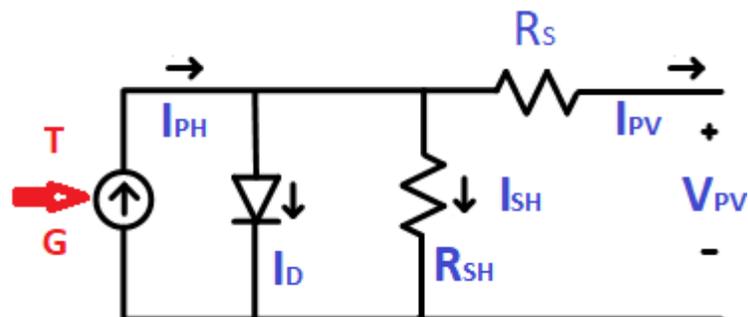
### *Modelo de un diodo con pérdidas resistivas*

Un modelo de aproximación que asemeje su comportamiento a una celda solar debe considerar las pérdidas producidas, por lo que al circuito equivalente “*Modelo Ideal*” se debe valorar las pérdidas por conducción. Para simular estas pérdidas se añaden dos resistencias, una en serie y otra en paralelo. La resistencia en serie ( $R_S$ ) se agrega debido a las diferentes oposiciones de corriente ya sea del emisor, de los electrodos de la celda, entre otros y la resistencia en paralelo o shunt ( $R_{SH}$ ) se produce al considerar imperfecciones de la unión p-n. (Elkin, y otros, 2016)

El circuito equivalente con las resistencias de pérdidas se puede visualizar en la Figura 6.

**Figura 6.**

#### *Circuito equivalente con pérdidas resistivas*



*Nota.* Fuente del Autor

Dentro de este trabajo de investigación se utilizará el modelo de un diodo con pérdidas resistivas para obtener resultados más reales y precisos, cabe mencionar que el diseño del mismo se lo realizará a partir de su formulación matemática. El software MATLAB/SIMULINK cuenta con un modelo de panel solar, pero se plantea el diseño de un modelo de panel solar con el fin de analizar el comportamiento de las

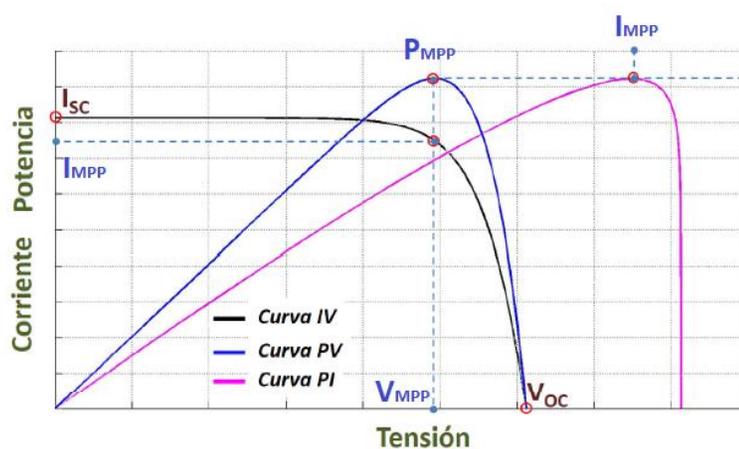
variables que involucran su diseño. En el capítulo tres se detalla su análisis matemático y el proceso llevado a cabo para la realización de su diseño.

### **Curvas características y MPP**

Las curvas características de los paneles solares son figuras basadas en datos, mediciones y tabulaciones que describen el funcionamiento y comportamiento del mismo. Las curvas características pueden realizarse a nivel de células o a nivel de paneles solares. En una representación a nivel de paneles su corriente y voltaje se incrementan, puesto que es la unión de varias células. Dentro de un panel solar se pueden encontrar diferentes tipos de curvas, las tres más importantes están dadas por la relación corriente – voltaje (I-V), potencia – voltaje (P-V) y potencia – corriente (P-I). En la Figura 7 se puede visualizar las tres curvas más representativas de un panel solar.

**Figura 7.**

#### **Curvas características celda solar**



Nota. Tomado de (Ramos J. A., 2017)

En la gráfica 7 se pueden encontrar diferentes variables que toman gran relevancia dentro de las celdas solares:

- $I_{SC}$ : Corresponde a la corriente en cortocircuito de una celda fotovoltaica y se produce en el caso que los bornes del circuito de salida o resistencia del mismo sea cercana a cero, representa la intensidad máxima producida y su valor esta dado en amperios.
- $I_{MPP}$ : Corresponde al valor de corriente en donde se produce el punto de máxima potencia. Su valor esta dado en amperios.
- $V_{OC}$ : Corresponde a voltaje máximo de la celda sin conectar ninguna carga, es decir la tensión en circuito abierto, su valor esta dado en voltios.
- $V_{MPP}$ : Corresponde al nivel de tensión en donde se produce el MPP y su valor esta dado en voltios.

Para evaluar la generación de energía de los paneles solares se han establecido condiciones de pruebas estándar (STC). Las condiciones STC por sus siglas en ingles "Standard Test Conditions" representan un estándar dentro de la industria fotovoltaica. De este modo se mide el rendimiento de un panel fotovoltaico entre diferentes marcas del mercado. Las condiciones STC implican  $T = 25^{\circ}C$ ,  $G = 1000 W/m^2$  y espectro de masa de aire de 1.5 (AIM1.5). Generalmente dentro de las hojas técnicas de los fabricantes se incluye el valor de la corriente de corto circuito ( $I_{SC}$ ), Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{MPP}$ ), Voltaje en circuito abierto ( $V_{OC}$ ) y Voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{MPP}$ ). Estos valores son medidos bajo condiciones STC.

## Convertidores

Dentro del contexto de las energías renovables ya sean estas eólicas o fotovoltaicas un convertidor asume un papel sumamente importante debido al hecho que es el dispositivo encargado de adecuar la tensión producida por los paneles solares reduciéndola o elevándola según requieran las cargas o la etapa inversora CA a la cual va a ser conectada.

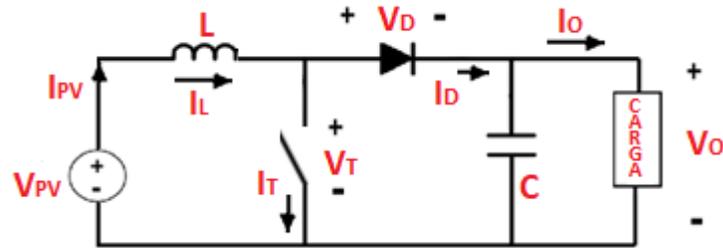
El principio de funcionamiento de los convertidores consiste en la conmutación entre dos estados diferentes mediante un interruptor. El elemento encargado de realizar la conmutación es un transistor. El convertidor es encargado de realizar el seguimiento del punto de máxima potencia mediante la variación de su ciclo de trabajo.

Existen diferentes topologías de convertidores en base a la relación entre la salida y la entrada de voltaje del mismo y en base a esto se pueden establecer tres configuraciones básicas: conversor elevador (el voltaje de salida es superior al de entrada), conversor reductor (el voltaje de salida es inferior al de entrada) y conversor reductor-elevador (el voltaje de salida puede ser superior, inferior o igual al voltaje de entrada). Para la realización de este trabajo de investigación se ha seleccionado un convertidor elevador.

### ***Convertidor elevador***

La estructura básica de un convertidor elevador se la puede visualizar en la Figura 8 El convertidor elevador es un circuito no lineal y para asemejar un comportamiento lineal se debe obtener su modelo promediado. Para la obtención del modelo promediado se debe analizar el circuito como si se tratara de dos subcircuitos. Los dos subcircuitos se producen según el estado en que se encuentre el interruptor (cerrado o abierto) se producen dos modos de funcionamiento: Modo de Conducción Continua (MCC) y Modo de Conducción Discontinua (MCD). (López, 2019)

Figura 8.

**Convertidor elevador nomenclatura**

Nota. Fuente del Autor

En la figura 8 se puede ver el diagrama electrónico de un convertidor elevador. Las variables de la fuente generadora del convertidor ( $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$ ) proviene del panel solar.  $L$  corresponde a la bobina mientras que  $I_L$  representa la corriente que la atraviesa por ella.  $V_T$  e  $I_T$  representan el voltaje y corriente del transistor respectivamente, del mismo modo que  $V_D$  e  $I_D$  representan el voltaje y corriente del diodo. La variable  $C$  representa el capacitor y finalmente  $V_O$  e  $I_O$  son el voltaje y corriente de salida del convertidor elevador.

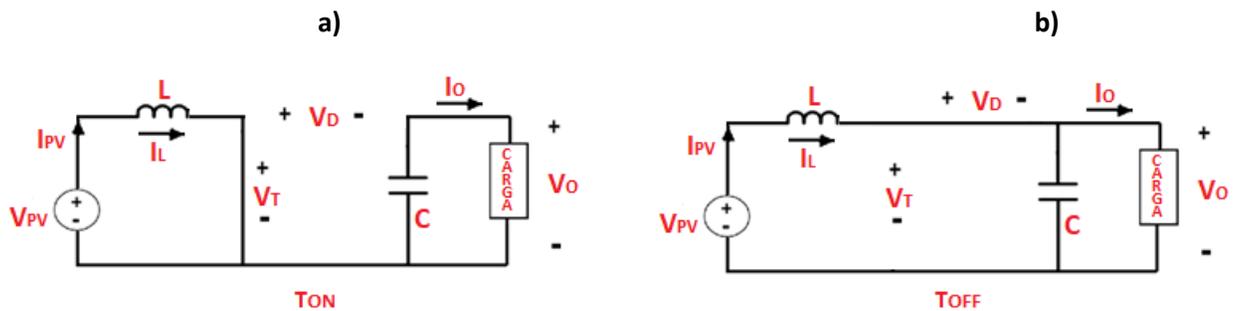
**Modo de conducción continua (MCC)**

Existen dos tiempos de funcionamiento para un conmutador (transistor). Si el conmutador se encuentra cerrado se dice que está en estado de “conducción” ( $T_{ON}$ ), ver figura 9a y si el conmutador se encuentra abierto el sistema está en estado “sin conducción” ( $T_{OFF}$ ), ver figura 9b. La suma de estos tiempos parciales de conmutación ( $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ ) representa el periodo o tiempo de conmutación del convertidor ( $T_s$ ).

Se dice que el sistema está en MCC si la corriente que circula por la bobina oscila en un rango de valores mínimos y máximos, pero dicha corriente nunca llega a anularse. La posición del conmutador origina dos topologías en base al circuito del convertidor elevador estas topologías se las puede visualizar en la Figura 9.

Figura 9.

**Topologías de conducción continua**



Nota. Fuente del Autor

- El esquema de la figura 9a representa el circuito equivalente del convertidor con el interruptor encerrado ( $0 < t < T_{ON}$ ), es decir que el sistema está en el tiempo  $T_{ON}$ . En este intervalo la tensión de la bobina ( $V_L$ ) es igual a la tensión del panel fotovoltaico ( $V_{PV}$ ) mientras que la corriente en la bobina ( $I_L$ ) crecerá de manera lineal. El voltaje y corriente proveniente de la fuente generadora únicamente circulará hasta la bobina dado que el diodo ( $D$ ) se polariza inversamente. El voltaje de salida del convertidor será igual al voltaje del capacitor ( $C$ ).
- El esquema de la figura 9b representa el circuito equivalente del convertidor con el interruptor abierto ( $T_{ON} < t < T_{OFF}$ ), es decir que el sistema se encuentra en operación dentro del tiempo  $T_{OFF}$ . Dentro de este periodo el diodo ( $D$ ) se polariza de manera directa y permite la circulación de corriente de la fuente generadora y de la bobina hacia la carga. En

este caso el voltaje de salida ( $V_O$ ) está dado por la diferencia entre el voltaje de fuente generadora y el voltaje de la bobina. (López, 2019)

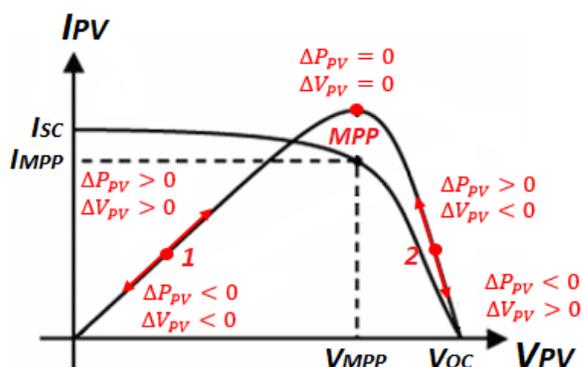
### **Seguidores del punto de máxima potencia**

Se define como punto de máxima potencia al lugar en donde el producto de la corriente con el voltaje es el máximo, gráficamente se lo puede visualizar en la Figura 7. El objetivo de los algoritmos MPPT es identificar el MPP mediante la determinación de  $V_{MPP}$  y  $I_{MPP}$  bajo diversas condiciones climáticas y forzar a que el punto de operación del sistema fotovoltaico sea igual al MPP (Abril, Arias, Guerrero, & González, 2014).

### ***Algoritmo de perturbación & observación (P&O)***

El algoritmo P&O es un controlador MPPT comúnmente usado debido a su simplicidad. Como su nombre lo indica, este algoritmo se basa en la continua observación y perturbación del punto de máxima potencia hasta llegar a un punto de convergencia aproximado al MPP. El algoritmo de este método realiza mediciones de voltaje y corriente del panel, de este modo calcula constantemente la potencia de salida del panel fotovoltaico y la variación de la misma en los instantes (k) y (k-1) los compara y calcula un valor de variación de potencia. Al conocer el valor de esta variación de potencia el seguidor aumenta o disminuye perturbaciones en el voltaje del panel, de manera que varíe la potencia de salida y esta se aproxime lo máximo posible al MPP. Al producirse una perturbación, si el cambio de voltaje incrementa la potencia de salida del panel solar entonces, la siguiente perturbación que se produzca será en la misma dirección que la anterior. Caso contrario si el cambio de voltaje disminuye la potencia de salida del panel solar, entonces la próxima perturbación que se produzca será en dirección opuesta. En la Figura 10 se puede visualizar la explicación gráfica del algoritmo (Ramakrishna, Srikanth, Naga, & Vijay, 2019).

Figura 10.

**Explicación gráfica del método P&O**

Nota. Fuente del Autor

El sistema trabaja en una constante oscilación en torno al MPP. Reducir el tamaño de paso de las perturbaciones puede disminuir las oscilaciones, sin embargo, un tamaño de paso muy pequeño ralentiza el seguimiento del punto de máxima potencia y el sistema en general debido al aumento del cálculo computacional (Shazly & Montaser, 2019).

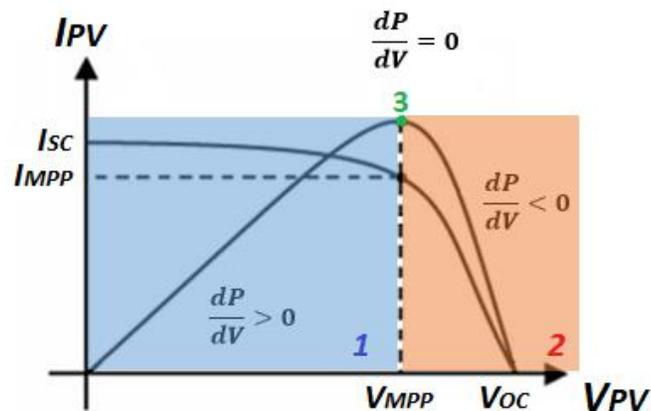
**Algoritmo de conductancia incremental (INC)**

El algoritmo utilizado en este método MPPT se basa en la medición de los cambios incrementales de voltaje y corriente del panel solar. En la Figura 11 se puede visualizar las curvas características de un panel solar y a su vez se observa tres regiones existentes en las cuales opera el sistema fotovoltaico. La región 1 se ubica a la izquierda del MPP, color azul, la región 2 se ubica a la derecha del MPP, color naranja, por último la región 3, color verde, hace referencia al punto exacto de máxima potencia. Si el sistema se encuentra en operación dentro de la región 1 se debe aumentar el voltaje para alcanzar al MPP, caso

contrario si el sistema se encuentra en operación dentro de la región 2 se debe disminuir el voltaje para ubicarse en el MPP (Andrianantenaina, Rajonirina, & Razafinjaka, 2019).

**Figura 11.**

**Explicación gráfica del algoritmo INC**



Nota. Fuente del Autor

La principal tarea del algoritmo utilizado en los controladores INC radica en buscar el voltaje en el que la conductancia sea igual a la conductancia incremental. Se debe tener presente que el algoritmo INC utiliza la diferenciación de la potencia de salida del módulo fotovoltaico. Las relaciones derivadas para determinar en qué lado de la curva se encuentra el algoritmo se definen mediante la relación entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea y se resumen en las siguientes ecuaciones:

$$MPP \rightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \quad (2)$$

$$Región 1 \rightarrow \frac{dP}{dV} > 0 \quad (3)$$

$$Región 2 \rightarrow \frac{dP}{dV} < 0 \quad (4)$$

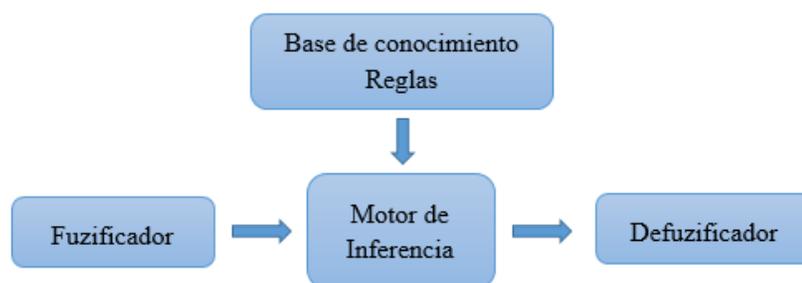
Las ecuaciones de la (2) a la (4) son las que gobiernan el funcionamiento del algoritmo INC, en base a ellas el paso del voltaje será positivo o negativo según lo requiera en función de las condiciones climáticas en que se encuentre (Shazly & Montaser, 2019).

### ***Control por lógica difusa (FLC)***

Un método MPPT más avanzado que los anteriores se basa en la utilización de controladores difusos. Los sistemas difusos utilizan un tipo de control no lineal que intenta aplicar el conocimiento experto de un usuario y para ello utiliza reglas de control. Para el diseño de un controlador basado en lógica difusa se debe tener presente la definición de variables, tanto de entrada como de salida. El controlador difuso basado en P&O utiliza las variaciones de potencia y voltaje de salida del panel solar como entradas difusas al controlador mientras que el controlador difuso basado en INC utiliza variaciones de potencia y corriente. La estructura de un sistema difuso se la puede visualizar en la Figura 12. Está integrado por cuatro componentes principales: Fuzificador, Motor de inferencia, reglas o base de conocimiento y Defuzificador. Para el diseño de la inferencia lógica difusa se ha tomado como referencia el enfoque Mamdani. (Astocondor, 2017).

**Figura 12.**

#### ***Estructura básica de un controlador difuso***



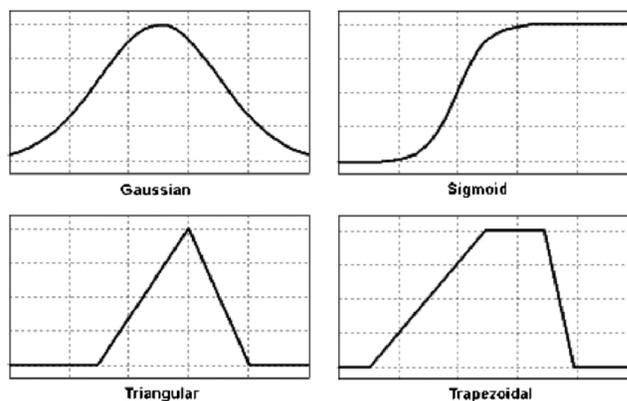
*Nota.* Fuente del Autor

### *Conjuntos Difusos y Funciones de Pertenencia*

El planteamiento de la lógica difusa establece que un grupo de datos no tiene una frontera clara para pertenecer o no a un conjunto definido (conjunto difuso), para ello se establecen funciones de transición (función de pertenencia), mismas que definirán el grado de pertenencia al conjunto y para efecto de esto se asignan valores entre un rango de 0 a 1, donde 0 corresponde a una pertenencia completamente nula y 1 corresponde a una pertenencia absoluta. A diferencia de la lógica clásica de control que solo contempla la posibilidad de pertenecer o no a cierto conjunto, la lógica difusa contempla cierto grado de pertenencia al conjunto establecido. Las funciones de pertenencia son utilizadas para definir las fronteras de los conjuntos. Entre las más utilizadas están: gaussiana, sigmoideal, triangular, trapezoidal entre otras y se las presenta en la Figura 13.

**Figura 13.**

#### ***Funciones de pertenencia***



El número de funciones de pertenencia a utilizar por cada variable depende del criterio de experto, se debe considerar que a más número de funciones se tendrá una mejor resolución, pero su costo computacional incrementará.

### *Reglas difusas y métodos de defuzificación*

Un control difuso tiene reglas que gobiernan el comportamiento del mismo, las reglas difusas se conforman por un grupo de proposiciones “if-then” por ejemplo:

*Si la TEMPERATURA es ALTA, entonces el VOLUMEN es PEQUEÑO.*

El bloque defuzificador tiene como función calcular un valor específico de la variable de salida en función de los conjuntos difusos y reglas establecidas, para obtener este valor se aplican técnicas matemáticas como método del máximo (mom), mínimo (som), centroide entre otros.

### ***Algoritmo basado en redes neuronales (NN)***

Las redes neuronales se han convertido en un método de control comúnmente utilizado a nivel industrial debido a la evolución de sus algoritmos y tecnología. Existen múltiples aplicaciones dentro de distintos campos por citar algunos industrial, medicinal, ocupacional, domótica, entre otros. Algunos avances importantes se han producido en reconocimiento de caracteres, de imágenes, conducción autónoma, pronóstico de enfermedades, problemas de clasificación, identificación de plantas entre muchas otras. Las redes neuronales son conjuntos de neuronas (algoritmos avanzados) mediante los cuales se puede modelar el comportamiento de un sistema. (Agha, Koreshi, & Khan, 2017)

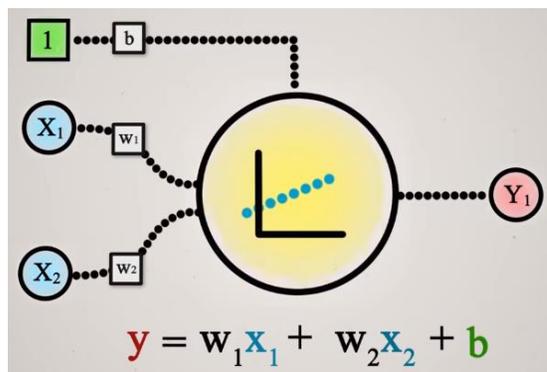
### *Modelo de una neurona*

Una neurona es la unidad básica de cómputo dentro de una red neuronal, y es denominada así por su similitud con una neuronal biológica, cuenta con conexiones de entradas por donde recibirá estímulos externos y salidas ( $Y$ ) en función de las entradas. La neurona tiene como finalidad realizar una suma ponderada de las variables de entradas ( $x$ ) donde la ponderación indica con que intensidad cada variable

de entrada afecta a la neurona. Las ponderaciones se denominan pesos sinápticos ( $w$ ), la neurona también incorpora otra entrada denominada bias, cuyo valor de entrada es 1 y su utilidad radica en cambiar o disparar a la función de activación de acuerdo a los pesos sinápticos para garantizar un aprendizaje exitoso. La estructura básica de una neurona se la puede visualizar en la Figura 14 (Messalti, Harrag, & Elhamid, 2015).

**Figura 14.**

***Estructura de una neurona***



Las entradas de la figura 14 son: dos estímulos ( $X_1, X_2$ ), un bias ( $b$ ). Los pesos sinápticos están representados por ( $W_1$  y  $W_2$ ) para  $X_1, X_2$  respectivamente. La función  $y$  presenta la suma ponderada, mientras que  $Y_1$  es la salida de la neurona aplicado la función de activación.

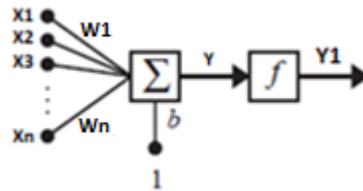
El funcionamiento de una neurona se asimila a un problema de regresión lineal, la diferencia radica en que a la neurona tiene un componente denominado función de activación misma que altera el valor de salida mediante deformaciones no lineales. Existen varias funciones de activación y su uso depende de la aplicación y necesidad requerida, algunas de las más utilizadas son, sigmoide, tanh, relu entre otras.

$$y_1 = f(wx + b) \quad (5)$$

La salida de la neurona se calcula como se muestra en la ecuación (5). El peso sináptico se multiplica por las entradas ( $wx$ ), el bias se multiplica por uno ( $b$ ). Los términos anteriores entran en un sumador y el resultado pasa por una función de transferencia ( $f$ ). Generalmente una neurona tiene múltiples entradas. La figura 15 muestra el esquema de una neurona con  $X_n$  entradas.

**Figura 15.**

***Neurona de múltiples entradas***



*Nota.* Tomado de (Hagan, Demuth, & De Jesús, 2002), editado por el Autor

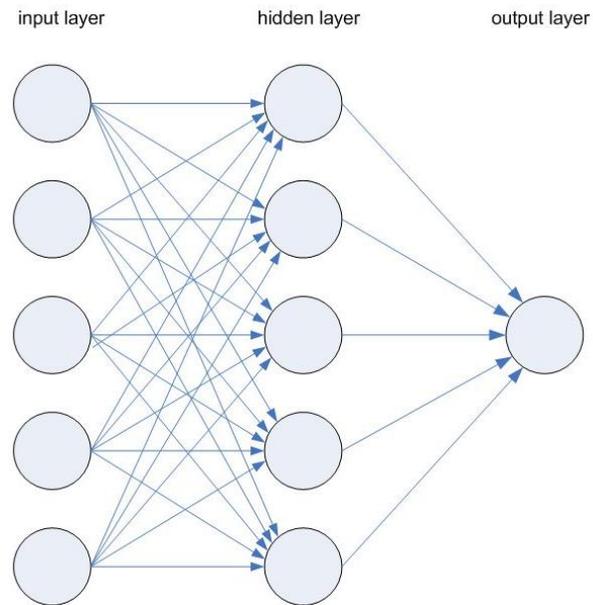
En la figura 15 se presenta una neurona con múltiples entradas. Las entradas van desde  $x_1$  hasta  $x_n$ , para cada entrada se atribuye un peso sináptico que en concordancia van desde  $w_1$  hasta  $w_n$ . Para neurona existe un único bias que se multiplica por uno.

***Red neuronal***

Una neurona perceptron incluso con múltiples entradas no es suficiente para resolver cualquier problema o aplicativo. Para solventar este inconveniente se necesita agrupar varias neuronas en paralelo y que trabajen en conjunto. A este tipo de agrupación se lo conoce como capa y la unión de varias capas puede solucionar problemas más complejos, un ejemplo de una red neuronal se presenta en la figura 16.

**Figura 16.**

***Estructura de una red neuronal***



*Nota.* Tomado de (IBM Corporation, s.f.)

Las redes neuronales se caracterizan por tener un aprendizaje automático en función de los datos suministrados. El algoritmo que utilizan para realizar el aprendizaje se denomina propagación en reversa (Back-propagation).

### ***Control por modos deslizantes (SMC)***

El control por modos deslizantes es una generalización de los sistemas de estructura variable (SCEV). Presenta una característica de control robusto debido a que las dinámicas del sistema son atraídas hacia un estado estable conocido como superficie deslizante o superficie de conmutación. Por lo general la superficie deslizante se encuentra expresada en espacios de estados manteniéndolo en operación dentro del mismo sin importar las perturbaciones externas que puedan alterar su comportamiento.

La superficie deslizante o superficie de control es aquella función  $s(x)$ , tal que  $s(x) = 0$  defina una superficie en espacio de estados y a su vez haga cero el error de seguimiento en régimen permanente, entonces se considera que:

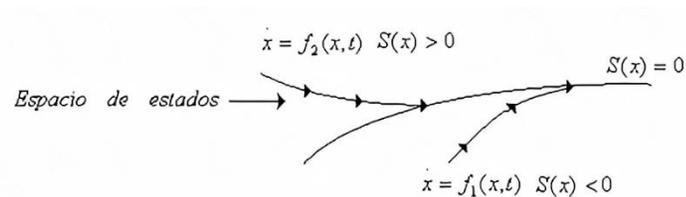
$$s(x) \cong x_1 - k = 0 \quad (6)$$

Donde  $k$  es una constante real y  $x_1$  es una variable en espacio de estados. Una de las propiedades de los sistemas de estructura variable indica que: “Si la trayectoria del sistema alcanza los límites de la superficie deslizante, el movimiento ya no se alejará de la superficie excepto posiblemente en las fronteras de la misma”.

En la Figura 17 se puede visualizar dos dinámicas de comportamiento, la primera se produce si el sistema se encuentra sobre la superficie de deslizamiento ( $s(x) > 0$ ) definida por  $f_2(x, t)$ . La segunda dinámica de comportamiento se produce si el sistema se encuentra bajo la superficie deslizante, definida por  $f_1(x, t)$ , se puede afirmar que el sistema se encuentra en modo deslizante si las trayectorias se evolucionan sobre la superficie de control. (Martínez, 2015)

**Figura 17.**

***Traectorias en el plano de un SCVE de segundo orden***



*Nota.* Tomado de (Martínez, 2015)

Los sistemas de estructura variable pueden definirse mediante:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u \quad (7)$$

Donde  $f(x, t)$  y  $g(x, t)$  son campos vectoriales y  $u$  es la acción de control.

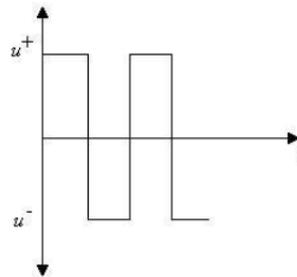
La ley de control se plantea con bases en que la acción de control  $u$  puede tomar dos posibles valores en función del signo de la superficie deslizando  $s(x)$ , entonces la lógica de conmutación o ley de control se puede definir mediante:

$$u(t) = \begin{cases} u = u^+ & \text{si } s(x) > 0 \\ u = u^- & \text{si } s(x) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

De la ecuación (8) se puede afirmar que si las dinámicas se encuentran por debajo de la superficie de deslizamiento la ley de control conmutará al valor  $u^-$  caso contrario, si las dinámicas del sistema se encuentran sobre la superficie deslizando la ley de control conmutará su valor hacia  $u^+$ . La evolución de la señal de control se puede visualizar en la siguiente figura. (Ramos, Lopez, Ekaitz, & Barambones, 2017)

**Figura 18.**

***Señal de control en modo deslizando***



*Nota.* Tomado de (Martínez, 2015)

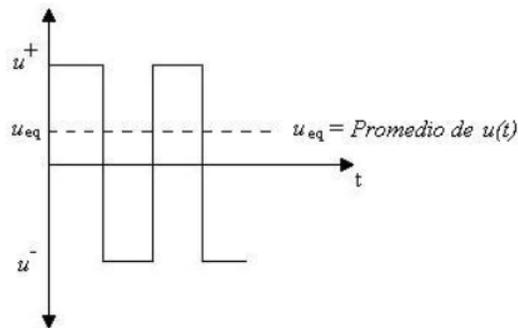
***Control equivalente***

La conmutación producida por un sistema que se encuentra en operación dentro de la superficie deslizando es cercana a infinita en otras palabras, su comportamiento es discontinuo para todo instante de tiempo. Para obtener la dinámica de comportamiento del modo deslizando se plantea encontrar un sistema equivalente continuo que puede ser generado a partir del valor promedio. Entonces Se define control

equivalente a la ley de control que permite el deslizamiento sobre la superficie en forma ideal mediante el uso de un sistema continuo.

**Figura 19.**

**Control equivalente**



Donde  $u_{eq}$  es el control equivalente necesario para que el sistema opere dentro de la superficie de deslizamiento, por lo tanto se debe cumplir que:

$$f_a(t, x, u_{eq}) = \dot{x} = f(x, t) + g(x, t)u_{eq} \quad (9)$$

*Punto de Equilibrio y Estabilidad Asintótica por Lyapunov.*

Para que exista un modo de deslizamiento ideal se debe cumplir condiciones de invariancia. De este modo si la trayectoria del sistema alcanza la superficie deslizante  $s(x)$  se mantendrá en ella. (Martínez, 2015):

$$\begin{cases} s(x) = 0 \\ \dot{s}(x) = \dot{f}(x, t) + \dot{g}(x, t)u_{eq} \end{cases} \quad (10)$$

Para que exista un punto de equilibrio en régimen permanente las derivadas de las variables de estado deben ser nulas  $\dot{x} = x^*$ . La existencia de un punto de equilibrio no implica la estabilidad del sistema, para analizar la estabilidad dinámica se utiliza el método de Lyapunov (Garelli, 2007).

El método directo de Lyapunov introduce una función candidata  $V$  y se dice que es una función candidata de Lyapunov para el equilibrio de  $x = 0$  de la función  $\dot{s}(x)$  si cumple que:

- $x = 0$  es un punto de equilibrio del sistema  $\dot{x} = f(x)$
- $V: D \rightarrow \mathfrak{R}$  es un campo escalar diferenciable en un dominio que contiene al origen

Entonces:

- Si  $V(x)$  es definida positivamente y  $\dot{V}(x)$  es semidefinida negativamente, el origen es un punto de equilibrio estable.
- Si  $V(x)$  es definida positivamente y  $\dot{V}(x)$  es definida negativamente, el origen es un punto de equilibrio asintóticamente estable (Martínez, 2015).

## Capítulo III. Diseño

### Diseño del sistema fotovoltaico

En este capítulo se explicará el procedimiento llevado a cabo para realizar del diseño del sistema fotovoltaico mismo que está compuesto por: un panel solar, convertidor elevador y controlador MPPT. Dentro de las partes del diseño establecido se detalla su formulación matemática, metodología utilizada, señales de control, pseudocódigo entre otros parámetros, todo este procedimiento se ha realizado dentro del entorno Matlab/Simulink. Las pruebas de funcionamiento se presentarán en un capítulo posterior.

#### *Modelado y diseño del panel solar*

La Figura 6 muestra el circuito equivalente de un panel solar y es el circuito seleccionado para ser modelado y utilizado dentro de este proyecto de investigación. El modelado de un circuito equivalente a un panel solar toma gran importancia debido a que se requiere analizar el comportamiento de cada etapa que la compone. Con el modelo y la formulación matemática se puede diseñar un esquema que sirva para las pruebas a realizar con los controladores diseñados.

Para el diseño y simulación del panel solar recreado se utiliza información de fabricación de un panel solar comercial específico. El panel seleccionado para efectos de simulación y pruebas es el PV Module 1Soltech STH-215-P, los datos de fabricante del panel se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Características técnicas panel solar*

Especificaciones del Panel Solar	
Modelo	1Soltech STH-215-P
Condiciones de prueba Estándar (STC)	1000 W/m <sup>2</sup> , 25°C

Potencia en STC (W)	213.15
Bifacial	No
Vmp: Voltaje en MPP (V)	29.0
Imp: Corriente en MPP (A)	7.35
Voc: Voltaje en circuito abierto (V)	36.3
Isc: Corriente de corto circuito (A)	7.84
Eficiencia del panel	13.7%
Tolerancia de Potencia	-3.00% ~ 3.00%
Tipo de celda	Celda Policristalino
Numero de celdas	60
Factor de idealidad del diodo	0.98117
Resistencia en serie ( $\Omega$ )	0.39383
Resistencia de derivación ( $\Omega$ )	313.3991

*Nota.* Tomado de (SolarHub, s.f.)

Al aplicar la ley de Kirchhoff al circuito equivalente de la figura 6, se obtiene la ecuación correspondiente a la corriente de salida del panel, misma que viene dada por la ecuación (11) (Habbati, Ramdani, & Moulay, 2014).

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (11)$$

De la ecuación (11) se tiene:

- $I_{ph}$  = Representa la corriente foto generada
- $I_D$  = Corriente del diodo.

- $I_{sh}$  = Corriente de las resistencias de perdida.

Según (Xuan & Minh, 2015) la corriente foto generada puede expresarse como:

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i(T - T_r)] * G/G_r \quad (12)$$

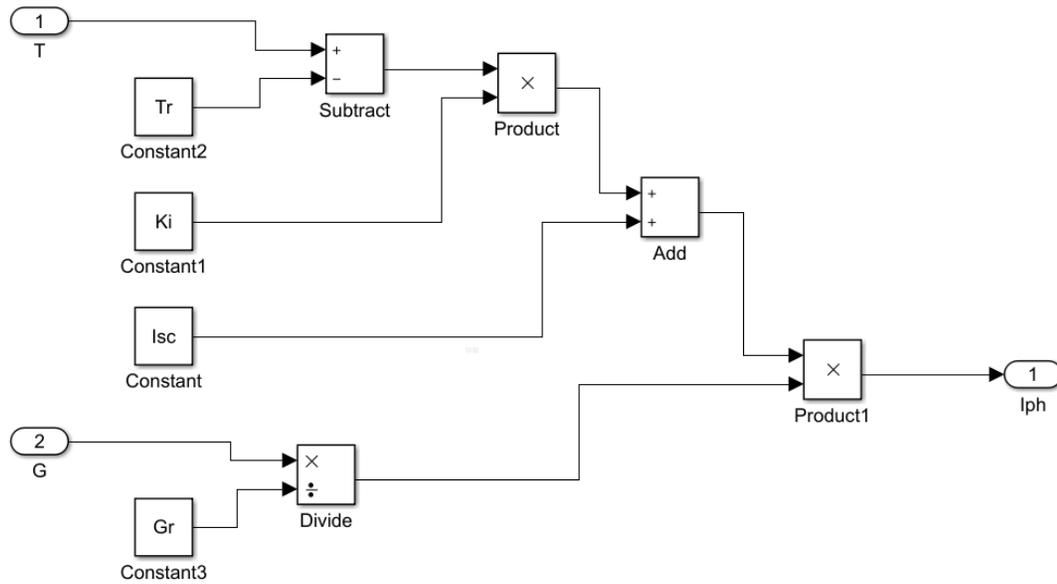
Donde:

- $I_{SC}$  = Corriente en corto circuito (A)
- $K_i$  = Coeficiente de la celda a 25°C y 1000 ( $w/m^2$ )
- $T$  = Temperatura de operación o funcionamiento (°C)
- $T_r$  = Temperatura bajo condiciones STC (°C)
- $G$  = Irradiación solar ( $w/m^2$ )
- $G_r$  = Irradiación solar bajo condiciones STC ( $w/m^2$ )

El esquema realizado en Simulink de la corriente foto generada se presenta en la figura 20.

**Figura 20.**

***Esquema corriente foto-generada en Simulink***



Nota. Fuente del Autor

A su vez la corriente del diodo  $I_D$  puede expresarse como:

$$I_D = I_0 * \left[ e^{\left[ \frac{q(I_{PV} * R_s + V_{PV})}{n * K * T * N_s} \right]} - 1 \right] \quad (13)$$

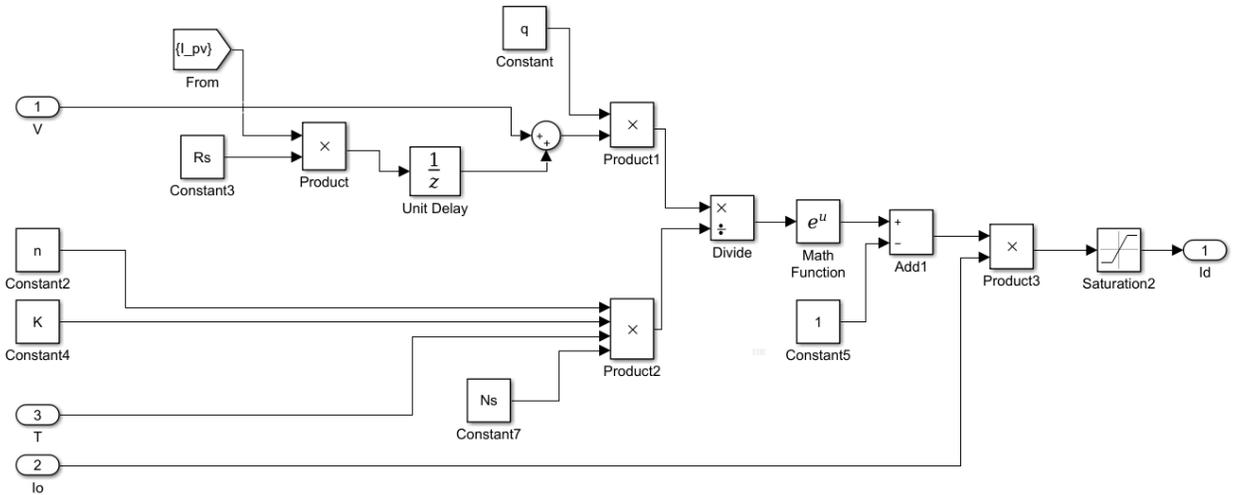
Donde:

- $I_0$  = Corriente inversa de saturación (A)
- $q$  = Carga del electrón ( $1.6 * 10^{-19} C$ )
- $n$  = Factor de idealidad del diodo.
- $N_s$  = Número de celdas conectadas en serie.
- $k$  = Contante de Boltzman ( $1.3805 * 10^{-23} J/K$ )

El esquema de la corriente del diodo se lo presenta en la figura 21.

**Figura 21.**

**Esquema de corriente del diodo en simulink**



Nota. Fuente del Autor

La corriente inversa de saturación está dada por la siguiente expresión matemática:

$$I_0 = I_{rs} * \left(\frac{T}{T_r}\right) * e^{\left[\frac{q * E_g}{n * K} * \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right]} \quad (14)$$

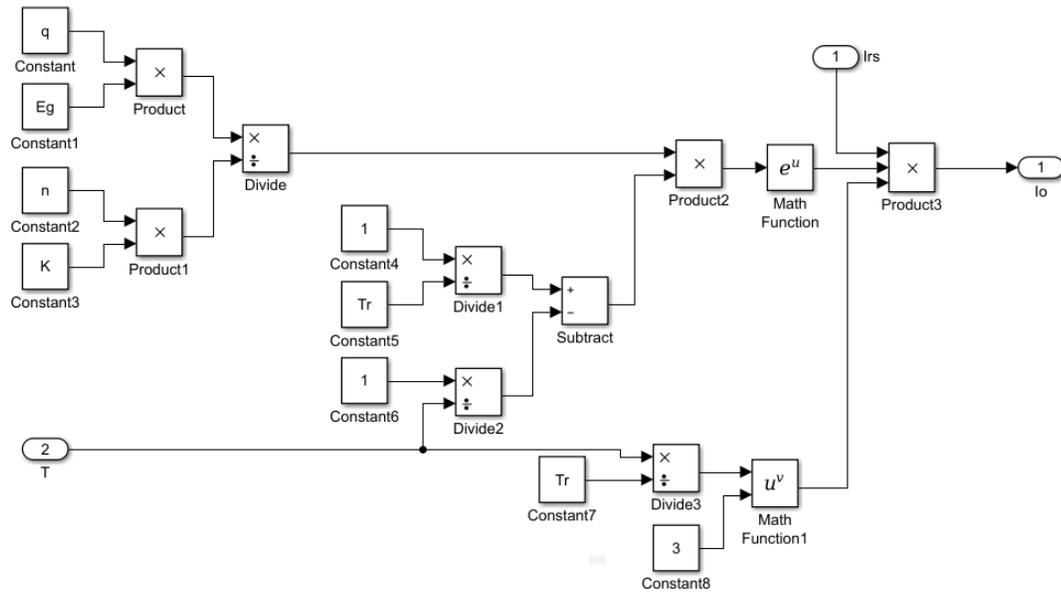
Donde:

- $I_{rs}$  = Corriente de la celda (A)
- $E_g$  = Energía de la banda prohibida del semiconductor

El esquema de la corriente inversa de saturación se presenta en la figura 22.

**Figura 22.**

**Esquema de corriente inversa de saturación en simulink**



Nota. Fuente del Autor

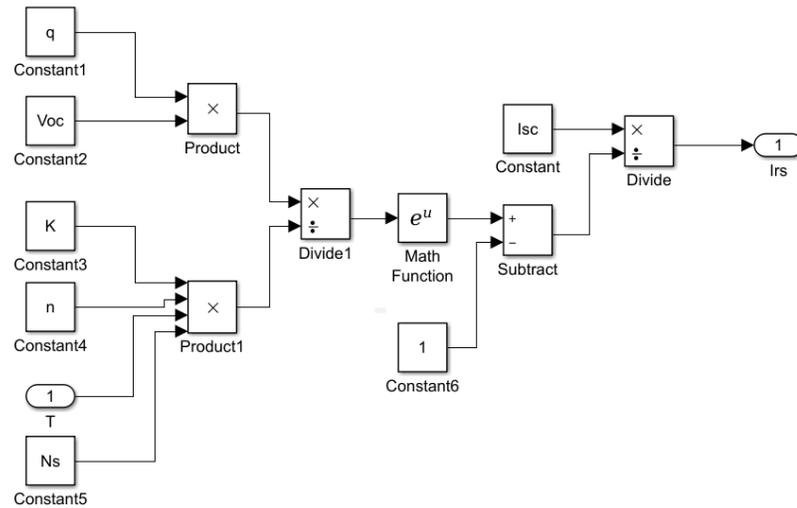
La corriente de la celda según (Peñas, 2018) y (Xuan & Minh, 2015) se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{K \cdot n \cdot T \cdot N_s}\right)} - 1} \quad (15)$$

La figura 23 presenta el esquema de la corriente de la celda realizado en simulink.

**Figura 23.**

***Esquema de corriente de la celda en simulink***



Nota. Fuente del Autor

La última expresión matemática para poder recrear el modelo del panel solar está dada por la corriente de las resistencias de pérdidas:

$$I_{sh} = \frac{I_{PV} * R_s + V_{PV} * \frac{N_p}{N_s}}{R_{sh}} \quad (16)$$

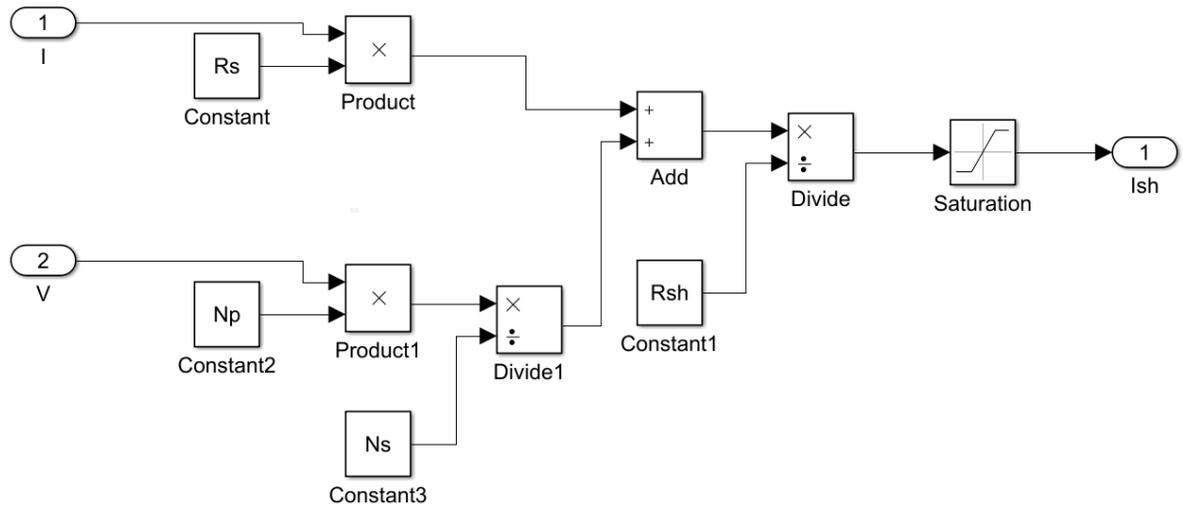
Donde:

- $R_s$  = Resistencia en serie ( $\Omega$ )
- $R_{sh}$  = Resistencia en paralelo ( $\Omega$ )
- $N_p$  = Número de celdas en paralelo

La figura 24 presenta el esquema realizado en simulink de la ecuación (16)

**Figura 24.**

***Esquema de la corriente de la resistencia en paralelo en simulink***



Nota. Fuente del Autor

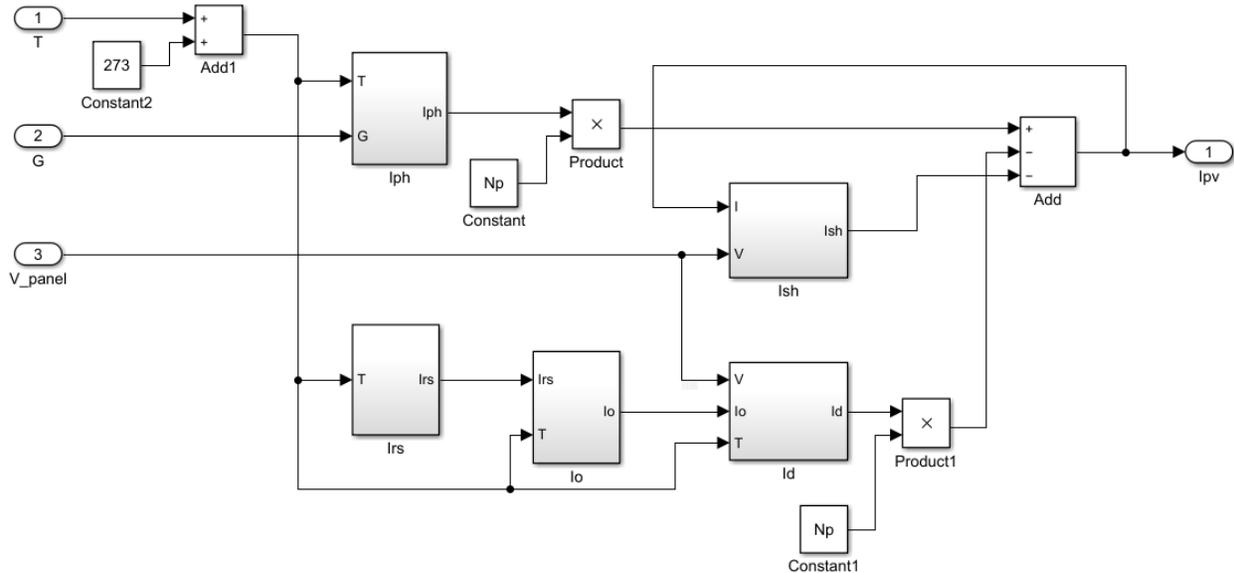
Finalmente, la ecuación característica de la corriente de una celda solar se la puede extrapolar hacia un panel solar donde la ecuación (11) toma la siguiente forma.

$$I_{PV} = I_{ph} * N_p - I_D * N_p - I_{sh} \quad (17)$$

En base a los esquemas de las figuras 20 a la 24 se puede generar un modelo equivalente de un panel solar, mismo que se presenta en la figura 25.

**Figura 25.**

***Corriente de salida del panel fotovoltaico en simulink***



*Nota.* Fuente del Autor

Una vez diseñado todos los bloques correspondientes a las variables existentes dentro de la formulación matemática del modelo equivalente de un panel solar, se inicializa los valores de las constantes acorde a las especificaciones de la tabla 1.

### ***Diseño del convertidor elevador***

Como se mencionó en el capítulo 2, un convertidor toma gran relevancia dentro de un sistema fotovoltaico. De este modo el convertidor seleccionado para utilizar en el desarrollo de este trabajo de investigación corresponde al convertidor elevador debido a las características que brinda. Su configuración tradicional se lo presenta en la Figura 2. Para realizar el cálculo de sus componentes se asumirá los siguientes puntos:

- Se asume que el convertidor trabaja en MCC.
- El periodo de conmutación total se divide en dos partes. La primera surge mientras el interruptor se encuentra cerrado por un periodo de tiempo  $DT$ . La segunda se produce

mientras el interruptor permanece abierto por el tiempo sobrante  $(1 - D)T$ , a los tiempos donde el interruptor se encuentra cerrado y abierto los denominaremos  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ , respectivamente.

- Para garantizar que el convertidor trabaje en MCC se debe cumplir la siguiente ecuación:

$$\langle i_L \rangle \geq \frac{\Delta i_L}{2} \quad (18)$$

Donde:

- $\langle i_L \rangle$  = Representa el valor medio de la corriente de la bobina.
- $\Delta i_L$  = Representa la variación de la corriente de la bobina.

Para el análisis matemático se considerará los intervalos en donde el interruptor se encuentra cerrado ( $T_{OFF}$ ) y abierto ( $T_{ON}$ ).

#### *Interruptor cerrado*

La representación gráfica del circuito con el interruptor cerrado se lo puede visualizar en la Figura9a, en este estado el voltaje del inductor está dado por:

$$V_{pv} = V_L = L \frac{di}{dt} \quad (19)$$

Al integrar la ecuación (19) entre los límites  $[0 - T_{ON}]$ , al mismo tiempo se debe considerar una  $I_{MIN}$  y  $I_{MAX}$  se tiene:

$$\Delta I = I_{L(MAX)} - I_{L(MIN)} = \frac{V_{pv}}{L} T_{ON} \quad (20)$$

#### *Interruptor abierto*

La Figura 9b muestra el circuito equivalente para el momento en que el interruptor se abre, de esta manera la tensión de carga está dada por:

$$V_O = V_{pv} + V_L = V_{pv} + L \frac{di}{dt} \quad (21)$$

En base a la ecuación (21), se tiene:

$$V_O = V_{pv} + L \frac{\Delta I}{T_{OFF}} = \left(1 + \frac{T_{ON}}{T_{OFF}}\right) \quad (22)$$

Una de las relaciones a cumplir por el convertidor para asegurar que su operación se encuentre dentro del régimen estacionario está dada por  $\langle V_L \rangle = 0$ , al aplicar esta relación se obtiene:

$$V_O = V_{pv} \frac{1}{1 - D} \quad (23)$$

Donde

- $V_{pv}$  = Representa el voltaje de salida del panel, que a su vez es el voltaje de entrada al convertidor.
- $V_O$  = Representa el voltaje de salida del convertidor.
- $D$  = Representa el ciclo de trabajo del convertidor.

De la expresión (23) se puede deducir algunas afirmaciones: El voltaje mínimo se produce con un ciclo de trabajo casi nulo ( $D \approx 0$ ), las variaciones del ciclo de trabajo pueden variar el voltaje de carga, la máxima tensión de salida se produce si  $D = 1$ .

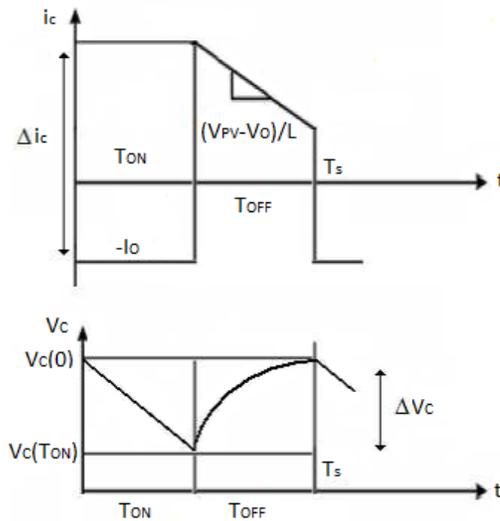
Se puede reescribir la ecuación (20) para calcular el valor del inductor.

$$L = \frac{V_{pv}}{\Delta I} * T_{on} = \frac{V_{pv}}{\Delta I} * D * T \quad (24)$$

Para calcular el valor del condensador se parte del cálculo de voltaje de salida del mismo, cuyas formas de onda se presentan en la figura 26 y se presentan en la ecuación (25).

**Figura 26.**

**Formas de onda, tensión y corriente del condensador**



Nota. Tomado de (Arcos, Urbina, & Sotomayor, 2012) editado por el autor.

$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(\tau) d\tau \quad (25)$$

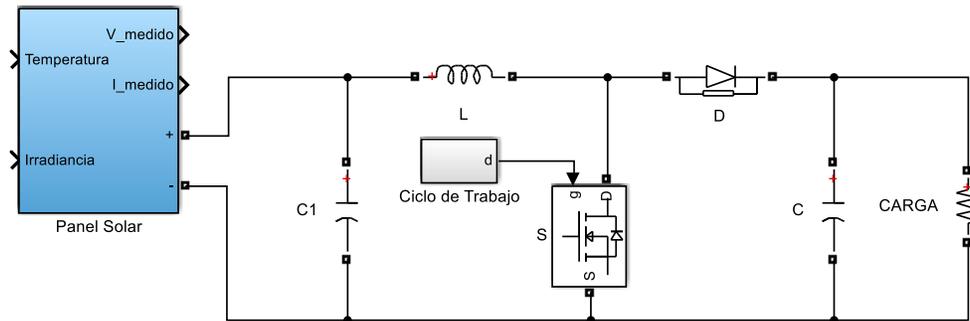
$$V_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^{T_{ON}} (-I_o) d\tau + V_c(0) \quad (26)$$

$$C = \frac{1}{\Delta V_o} I_o * D * T \quad (27)$$

La figura 27 presenta el convertidor elevador conectado al panel solar. Al esquema diseñado del panel solar se agregó terminales de conexión puesto que en la vida real los paneles comerciales vienen de dicha manera. La señal denominada ciclo de trabajo proviene de los controladores MPPT diseñados y se conectará al terminal sin conexión.

**Figura 27.**

**Convertidor conectado al panel solar**



*Nota.* Fuente del Autor

## Diseño de los algoritmos de control MPPT

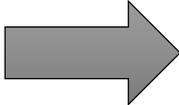
Dentro de esta sección se presenta el procedimiento seguido para el diseño de los cinco algoritmos MPPT. Dichos controladores forman parte del sistema fotovoltaico presentado en el esquema de la figura 27, a su vez, este esquema se utilizó para las simulaciones y pruebas que se presentaran en el capítulo 4.

### ***Perturbación y Observación (P&O)***

El algoritmo perturbación y observación es uno de los más utilizados dentro de la industria fotovoltaica esto se debe a su fácil implementación, bajo grado de complejidad en su algoritmo y presenta resultados aceptables en cuanto a seguimiento del punto de máxima potencia. En la Figura 10 se observa de manera gráfica el funcionamiento de este algoritmo. La tabla 2 presenta un resumen del funcionamiento del algoritmo P&O.

**Tabla 2.**

*Cambios de potencias algoritmo P&O*

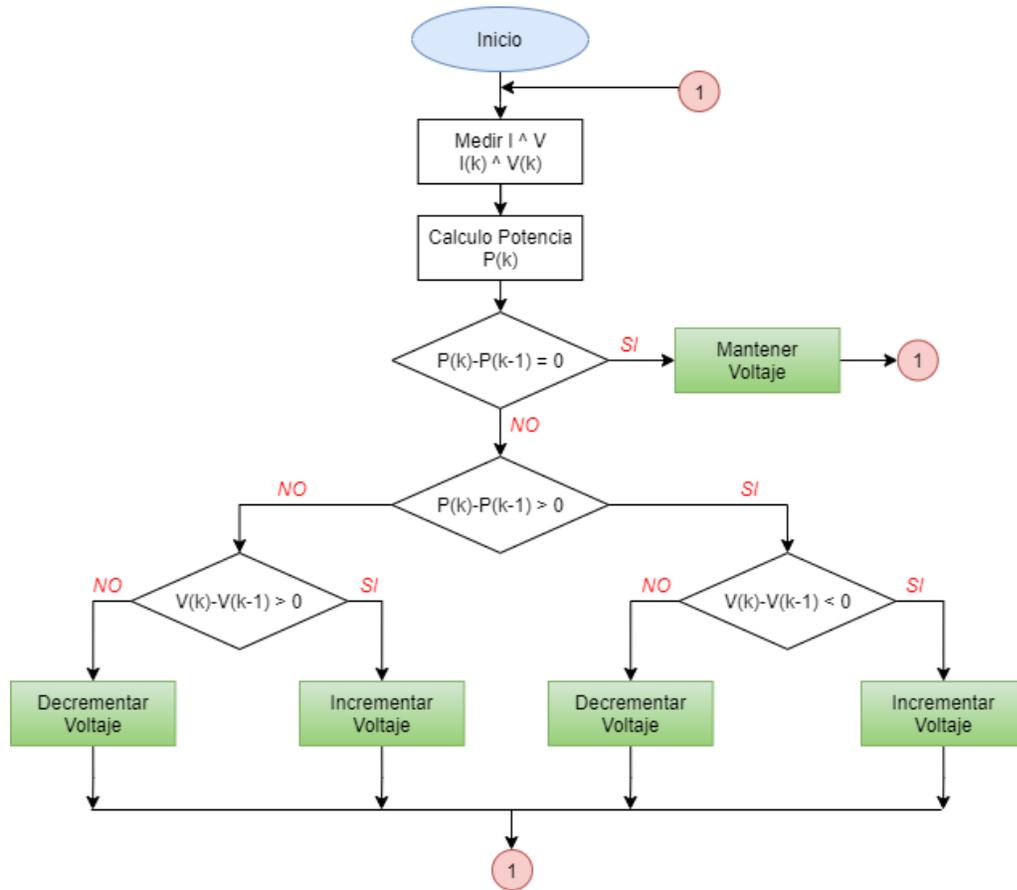
<b>Perturbación previa</b>	<b>Cambio en la Potencia</b>		<b>Siguiente Perturbación</b>
Positiva	Positiva		Positiva
Positiva	Negativa		Negativa
Negativa	Positiva		Negativa
Negativa	Negativa		Positiva

*Nota.* Fuente del Autor

Después de realiza un análisis del funcionamiento del algoritmo y en base a la tabla 2 y Figura 10 se puede elaborar un diagrama de flujo que represente su funcionalidad y modo de operación. El diagrama de flujo se presenta en la Figura 28.

**Figura 28.**

***Diagrama de flujo - P&O***



Nota. Fuente del Autor

La lógica de funcionamiento del algoritmo P&O no presenta mayor complejidad. Básicamente el algoritmo realiza cambios incrementales (perturbaciones) en el voltaje de salida del panel solar y monitorea los cambios de potencia (observación). En una primera instancia el algoritmo mide los valores de voltaje y corriente del panel solar en un tiempo (k), con estos valores calcula la potencia en el instante (k). Posteriormente calcula un valor diferencial entre la potencia en el instante (k) y la potencia anterior (k-1) para compararlo con cero. Si el resultado de la comparación es igual a cero significa que el sistema se encuentra en el MPP, caso contrario calcula si la diferencia de potencia es positiva o negativa y en función de este resultado incrementará o disminuirá las perturbaciones. Si el cambio en el voltaje incrementa la potencia de salida del panel la siguiente perturbación se realizará en el mismo sentido (dirección) de la

anterior. Caso contrario, si la perturbación disminuye la potencia de salida la siguiente perturbación se realizará en sentido opuesto a la perturbación anterior. Para que el algoritmo realice una nueva medición y cálculo del MPP se requiere actualizar la memoria del mismo, es decir el valor de potencia en el instante (k) pasa a ser el valor de potencia en el instante (k-1).

Una vez analizado el funcionamiento y diagrama de flujo para el algoritmo P&O se procede a su implementación en código dentro de Matlab cuyo código se presenta en el anexo 1.

### ***Conductancia incremental (INC)***

El segundo algoritmo diseñado corresponde a Conductancia Incremental, del mismo modo que el algoritmo P&O este es comúnmente utilizado dentro de la industria fotovoltaica en dispositivos optimizadores y seguidores del MPP. A diferencia del algoritmo P&O este método realiza más cálculos computacionales, pero rastrea de mejor manera condiciones atmosféricas cambiantes. La potencia de salida del sistema fotovoltaico presenta oscilaciones constantes esto se debe a los cálculos que realiza el algoritmo INC y al hecho que no localiza exactamente al MPP, sino que oscila alrededor del mismo.

Para rastrear el MPP el algoritmo utiliza la derivada de la potencia con respecto al voltaje, esta operación tiene gran importancia dentro de este método ya que gracias a ella se puede identificar en que región se encuentra en operación el sistema. En la figura 11 se presentan tres regiones existentes en los que puede operar el sistema fotovoltaico. La derivada de la potencia con respecto al voltaje en el MPP es igual a cero, mientras que en la región 1 a la izquierda del MPP la derivada es positiva y finalmente en la región 2 a la derecha del MPP la derivada es negativa.

Es necesario encontrar una relación matemática que involucre al voltaje y corriente del panel con la derivada de la potencia con respecto del voltaje. La conductancia ( $G_i$ ) es la relación entre la corriente y el voltaje. Se la puede determinar fácilmente con medición del voltaje y corriente del panel, matemáticamente se define como:

$$G_i = \frac{I}{V} \quad (28)$$

Al analizar la derivada de la potencia con respecto al voltaje se tiene que:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} \quad (29)$$

Se puede aplicar la regla de la cadena para multiplicaciones en derivadas a la ecuación (29) donde se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = \frac{IdV + VdI}{dV} \quad (30)$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (31)$$

Se puede tomar el término de la derivada de la corriente con respecto del voltaje y equipararlo a la conductancia incremental ( $\Delta G_i$ ) si los pasos son lo suficientemente pequeños, es decir:

$$\frac{dI}{dV} \approx \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (32)$$

Al sustituir la ecuación (32) en la ecuación (31) se obtiene:

$$\frac{dP}{dV} = I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (33)$$

Para obtener un resultado por cero se reemplaza la conductancia incremental con la conductancia instantánea negativa ( $-I/V$ ), con este procedimiento se obtiene la ecuación (34). Entonces se puede usar

la relación entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea para determinar en qué lado de la curva P-V se encuentra en operación el sistema fotovoltaico.

$$I - V \frac{I}{V} = 0 \quad (34)$$

El principio utilizado en el algoritmo INC radica en buscar la componente de voltaje del punto de operación en el que la conductancia sea igual a la conductancia incremental. Las ecuaciones derivadas para determinar en qué lado de la curva se encuentra el algoritmo se definen mediante la relación entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea y se presentan a continuación:

$$MPP \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (35)$$

$$Región 1 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (36)$$

$$Región 2 \rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (37)$$

Claramente la conductancia incremental puede ser mayor, igual o menor que la conductancia instantánea, se analizarán estos tres casos. Considerar que la comparación realizada es entre la conductancia incremental y la conductancia instantánea negativa.

- **Primer caso:** Si la conductancia incremental es mayor que la conductancia instantánea significa que el sistema está en operación en el lado izquierdo del MPP por lo que se debe aumentar el voltaje para acercarnos al MPP.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$$

$$\frac{dP}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} > I - V \frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} > 0$$

- **Segundo caso:** Si la conductancia incremental es igual a la conductancia instantánea negativa, quiere decir que el sistema se encuentra en el MPP.

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$$

$$\frac{dP}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} = I - V \frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} = 0$$

- **Tercer caso:** Si la conductancia incremental es menor que la conductancia instantánea negativa, significa que el sistema opera a la derecha del MPP y es necesario un paso de voltaje negativo para llegar al mismo.

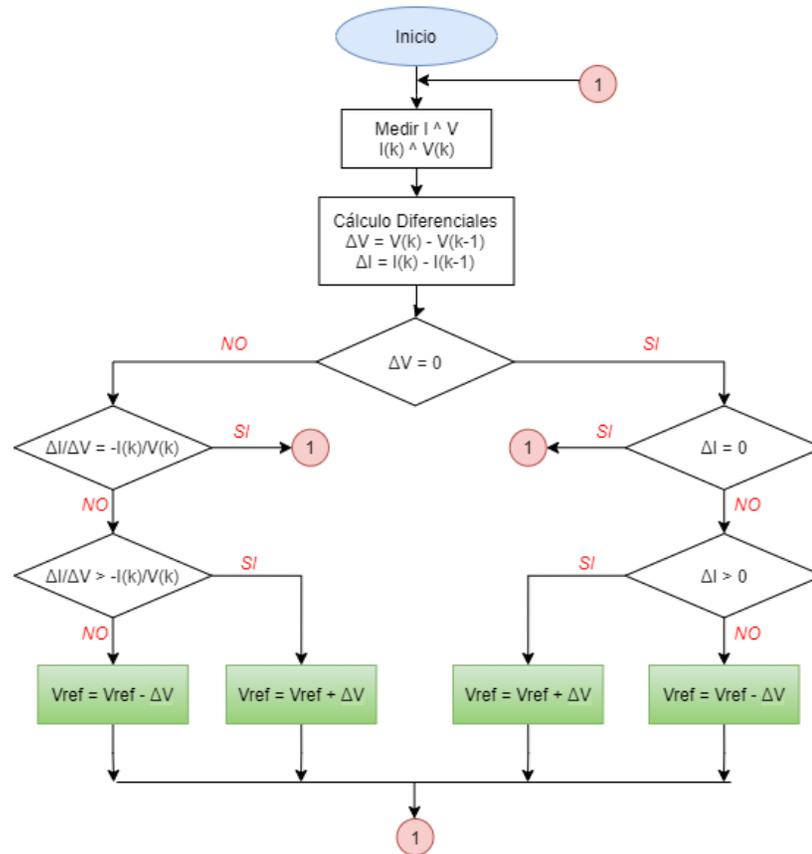
$$\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$$

$$\frac{dP}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} < I - V \frac{I}{V} \Rightarrow \frac{dP}{dV} < 0$$

Después de analizar y comprender la metodología aplicada en el algoritmo INC se procede a diseñar un diagrama de flujo (ver figura 29). Estructurar un diagrama de flujo ayudará la posterior implementación en un programa dentro Matlab/Simulink.

**Figura 29.**

***Diagrama de flujo – INC***



Nota. Fuente del Autor

El código implementado en Matlab se presenta en el anexo 2.

### **Controlador lógico difuso (FLC)**

El tercer algoritmo a desarrollar basa su funcionalidad en la lógica difusa. Dentro del campo industrial las aplicaciones con controladores difusos han mostrado un crecimiento favorable y en el campo de la industria fotovoltaica no ha sido la excepción. Para diseñar un controlador difuso primero se requiere analizar el tipo de entradas y salidas del sistema a controlar. Se debe establecer una definición de variables y en base a ellas plantear su respectivo universo de discurso y funciones de pertenencia, de modo que se ajusten de mejor manera a la aplicación deseada.

*Definición de variables.*

Para el proceso de definición de variables se toma como referencia la curva característica P-V de los paneles solares. Las entradas seleccionadas para el controlador son: el error ( $E$ ) y la variación error ( $CE$ ), su formulación matemática se presenta en las ecuaciones (38) y (39) respectivamente. (Astocondor, 2017), (Ezquibel, 2003):

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k - 1)}{V(k) - V(k - 1)} \quad (38)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \quad (39)$$

De las ecuaciones (38) y (39) se puede afirmar que:

- **Error  $E(k)$ :** Representa la pendiente de la curva en el instante ( $k$ ). Analíticamente también indica si el punto de operación del sistema fotovoltaico se encuentra a la derecha, izquierda o exactamente en el MPP.
- **Variación del error  $CE(k)$ :** La variación del error determina e informa al algoritmo en qué dirección se mueve el punto de operación.
- **Potencia  $P(k)$ :** Representa el valor de la potencia de salida del panel fotovoltaico medido en el instante ( $k$ ).
- **Voltaje  $V(k)$ :** Representa el valor del voltaje de salida del panel fotovoltaico medido en el instante ( $k$ ).

La salida del controlador difuso ( $D$ ) es la señal de control del convertidor y puede sufrir incrementos o decrementos para regular que el sistema trabaje en el MPP. La variable de salida es el incremento del ciclo de trabajo del convertidor y puede tomar valores positivos o negativos en función del punto de

operación en que se encuentre. Para calcular el ciclo de trabajo se requiere un acumulador del valor del ciclo  $\Delta D$ . La ecuación (40) presenta la ecuación utilizada para el acumulador.

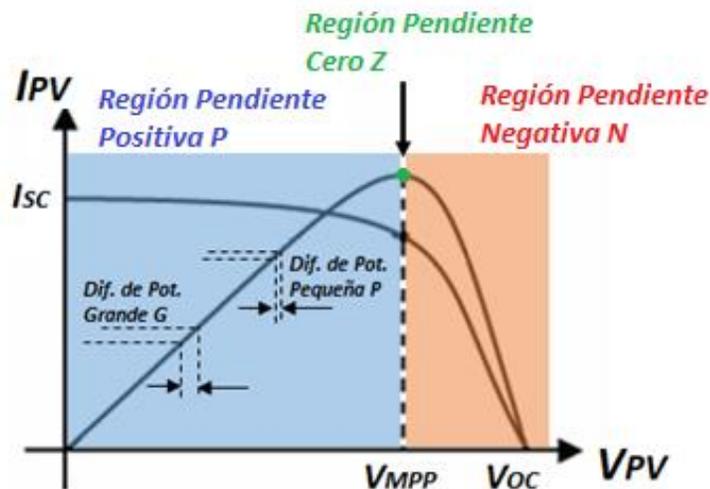
$$D(k) = \Delta D(k) + D(k - 1) \quad (40)$$

#### 4.3.1.2 Variables lingüísticas y universo de discurso

Una vez que se ha definido las variables de entrada y salida a utilizar se establece un universo de discurso y variables lingüísticas para cada una de ellas.

**Figura 30.**

#### *Diferencias de potencias - FLC*



*Nota.* Fuente del Autor

La Figura 30 presenta la lógica de control utilizado en el algoritmo FLC MPPT. En ella se visualizan dos diferenciales de potencial (grande y pequeño) y su vez se clasifican en base a la región de la curva en que se encuentran. A esta clasificación se la denomina como variables lingüísticas y se resumen de la siguiente manera:

Con respecto a la región:

- **P:** Pendiente positiva, lado izquierdo del MPP. Región azul
- **N:** Pendiente negativa, lado derecho del MPP. Región naranja
- **Z:** Pendiente cero, punto exacto de máxima potencia. Punto verde

Con respecto a su diferencia de potencial:

- **G:** Diferencia grande. La diferencia entre dos puntos es considerable. El punto de operación está lejos del MPP.
- **P:** Diferencia pequeña. La diferencia entre dos puntos es pequeña. El punto de operación está cerca del MPP.
- **Z:** Diferencia cero. El punto de operación se encuentra exactamente en el MPP.

En contexto con lo presentado, se crean cinco variables lingüísticas para cada entrada del controlador, mismas que son: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (Z), Positivo Pequeño (PP) y Positivo Grande (PG).

Para establecer el universo de discurso de las entradas  $E$  y  $CE$  se realiza una comparativa de las señales de entrada vs el voltaje de salida del panel fotovoltaico para diferentes niveles de irradiación. Es decir, los rangos establecidos se determinan en función de la curva característica del panel fotovoltaico y se ajustan mediante prueba y error para conseguir un desempeño adecuado del mismo. Los rangos de los universos de discurso son: para la entrada 1  $E$  de  $[-50$  a  $5]$  y la entrada 2  $CE$  de  $[-8$  a  $8]$ . El rango del universo de discurso de la salida del controlador ( $D$ ) a diferencia de las entradas se define independientemente de las curvas características del panel solar, entonces para este caso en particular se delimita en un rango de  $[-0.01$  a  $0.01]$ . Para la variable de salida se seleccionó este rango de universo de discurso para tener un mayor grado de precisión al momento de realizar el seguimiento del MPP. (Guenounou, Dahhou, & Chabour, 2014)

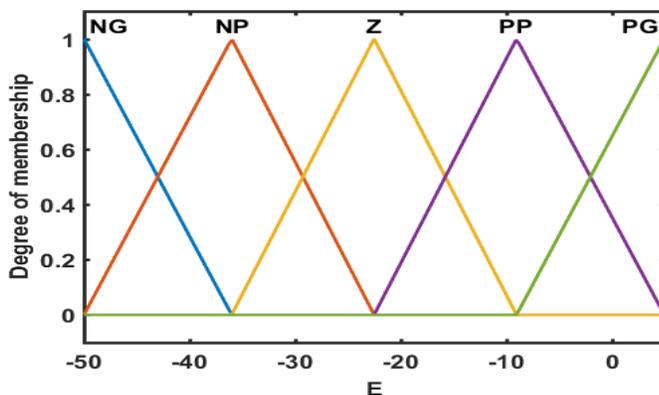
### *Funciones de pertenencia*

Dentro del proceso de fuzificación se establecen funciones de pertenencia a las variables lingüísticas creadas. Las funciones de pertenencia seleccionadas son de tipo triangular debido a que presentan un comportamiento adecuado para este tipo de sistemas y su programación no es tan compleja. A su vez, las funciones triangulares no tienen mayor repercusión en cuanto a costo computacional en comparación a otras funciones como las trapezoidales, sigmoides, gauseanas entre otras.

En concordancia con las variables lingüísticas se generan cinco funciones de pertenencia. Las figuras 31 y 32 presentan las variables de entrada  $E$  y  $CE$  con sus universos de discurso y funciones de pertenencia respectivamente.

**Figura 31.**

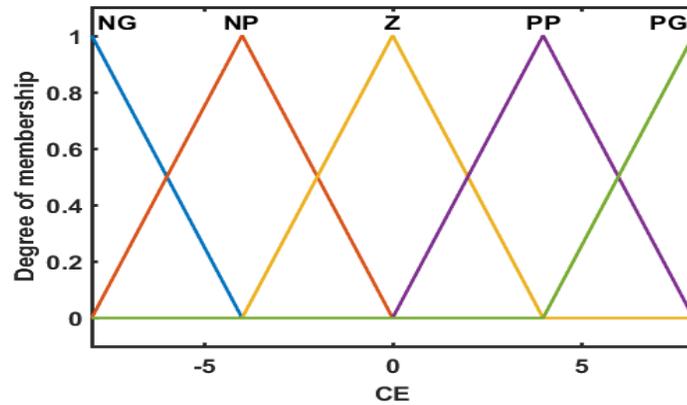
#### ***Función de pertenencia – entrada 1 $E$***



*Nota.* Fuente del Autor

**Figura 32.**

#### ***Función de pertenencia – entrada 2 $CE$***

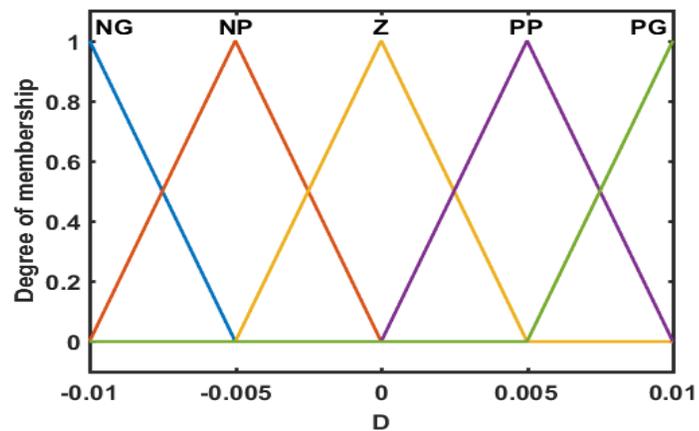


*Nota.* Fuente del Autor

Del mismo modo para la variable de salida del controlador difuso se establecen cinco variables lingüísticas Negativo Grande (NG), Negativo Pequeño (NP), Cero (Z), Positivo Pequeño (PP), Positivo Grande (PG) y acorde a ellas cinco funciones de pertenencia. La Figura 33 presenta la variable de salida.

**Figura 33.**

***Función de pertenencia – salida D***



*Nota.* Fuente del Autor

*Conjunto de reglas difusas*

Una vez ya establecidas las funciones de pertenencia y sus correspondientes universos de discursos se define las reglas difusas. Se establecen 25 reglas de control que van conforme con el número de funciones de pertenencia de entradas y salida. La tabla 3 presenta las reglas utilizadas mismas que tienen un enfoque lingüístico "Si-Entonces".

**Tabla 3.**

*Reglas de funcionamiento*

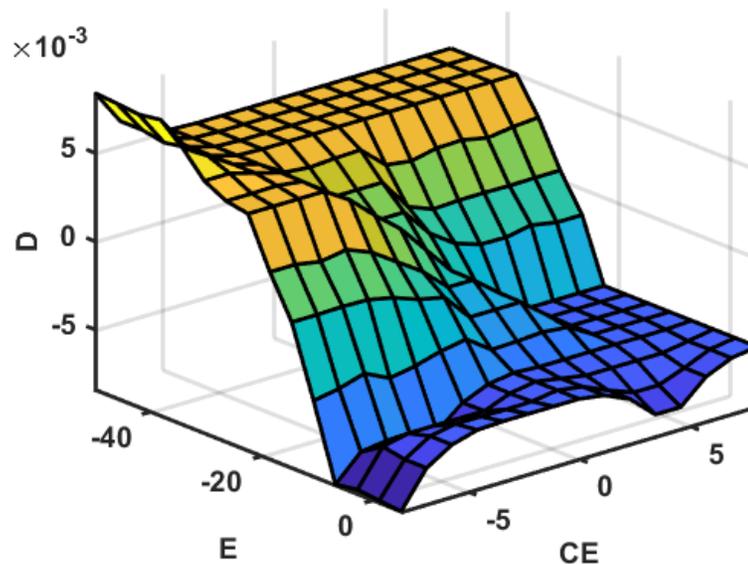
	CE	NG	NP	Z	PP	PG
E	NG	<b>PG</b>	PP	PP	PP	PP
	NP	PG	PP	PP	PP	PP
	Z	PP	PP	Z	NP	NP
	PP	NG	NG	NP	NP	NP
	PG	NG	NP	NP	NG	NG

El proceso de defuzzificación utiliza el método del centroide y la operación lógica "and". Por ejemplo, la regla resaltada en gris puede entenderse como **SI** el error (*E*) es negativo grande (*NG*) (es decir, un error negativo implica que el punto de funcionamiento del panel solar está a la derecha del MPP) Y la variación del error (*EC*) es positiva grande (*PG*) (es decir, una variación del error positiva indica que el error se desplaza en dirección opuesta al MPP) **ENTONCES** la salida del FLC, *D*, es positiva pequeña (*PP*) (es decir, se requiere que la señal de control *D* disminuya).

Con las reglas de funcionamiento se puede generar la superficie de control del sistema diseñado, misma que presenta en la figura 34. La superficie de control indica de manera gráfica el comportamiento del controlador MPPT FLC en función de las dos señales de entrada. De la superficie de control se puede afirmar que la variable  $E$  es la que define si el incremento o decremento del ciclo del trabajo debe ser grande o pequeño, mientras que la variable  $CE$  influye en el ciclo de trabajo cuando es negativo.

**Figura 34.**

***Superficie de control***

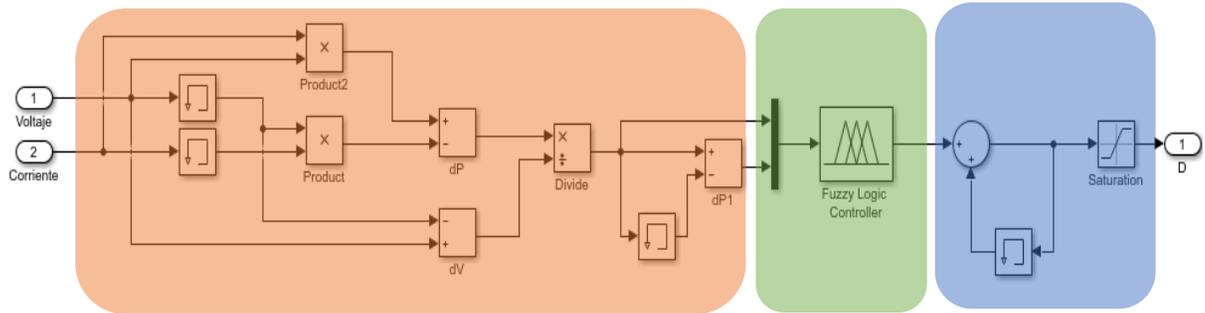


*Nota.* Fuente del Autor

Una vez definidos todos los parámetros de diseño se procede a elaborar el esquema de simulación dentro del entorno Simulink y se lo presenta en la Figura 35.

**Figura 35.**

***Esquema de simulación FLC***



*Nota.* Fuente del Autor

La figura 35 presenta tres regiones diferentes. Dentro de la región de color naranja se presenta la construcción de las variables de entrada  $E$  y  $CE$  presentadas en las ecuaciones (38) y (39) respectivamente. La región en verde presenta el bloque que contiene la lógica difusa. Finalmente, la región en azul presenta el acumulador del ciclo de trabajo.

### ***Controlador basado en redes neuronales (NN)***

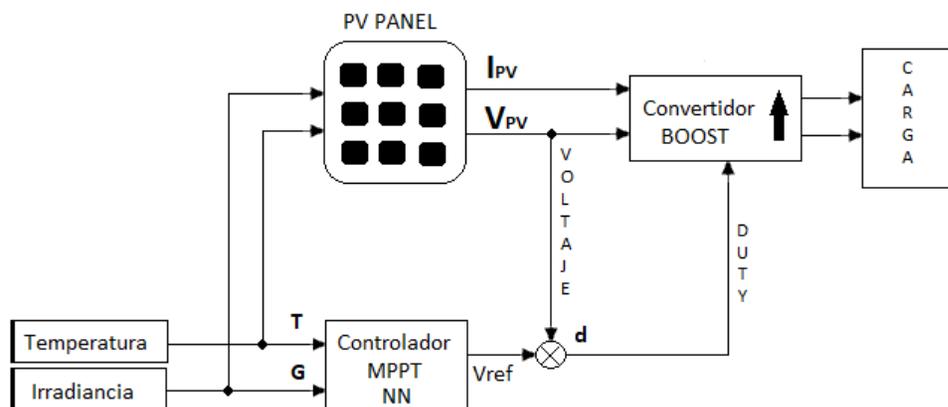
La estructura y funcionamiento de las redes neuronales artificiales se asemeja al funcionamiento y estructura de las redes neuronales biológicas. La funcionalidad de esta técnica se basa en que las neuronas aprenden y minimizan los errores de manera progresiva mediante datos y distintos escenarios.

Dentro de la literatura se han establecido diferentes modelos de MPPT basados en redes neuronales. Básicamente las diferencias radican en el número y tipo de entradas, así como de sus salidas. Para el diseño de la red neuronal utilizada en este documento se define como entradas la temperatura e irradiancia, mientras que la salida corresponde a un voltaje MPP referencial. Para entrenar las neuronas se genera un rango de datos aleatorios de temperatura e irradiancia y se calcula su MPP para cada uno de estos valores. A diferencia del modelo de simulación utilizado en P&O, INC, FLC, el entorno en donde se va a implementar

la red neuronal difiere dadas las características especiales de la misma (entradas), entonces el entorno de simulación del sistema fotovoltaico se lo presenta en la Figura 36. Para la creación y diseño de la red neuronal se utiliza la herramienta de Matlab “nnstart”.

**Figura 36.**

***Esquema fotovoltaico de simulación - NN***



*Nota.* Fuente del Autor

El diseño del controlador MPPT NN se estructura de tres partes principales: Selección de variables, arquitectura de la red y entrenamiento de la red.

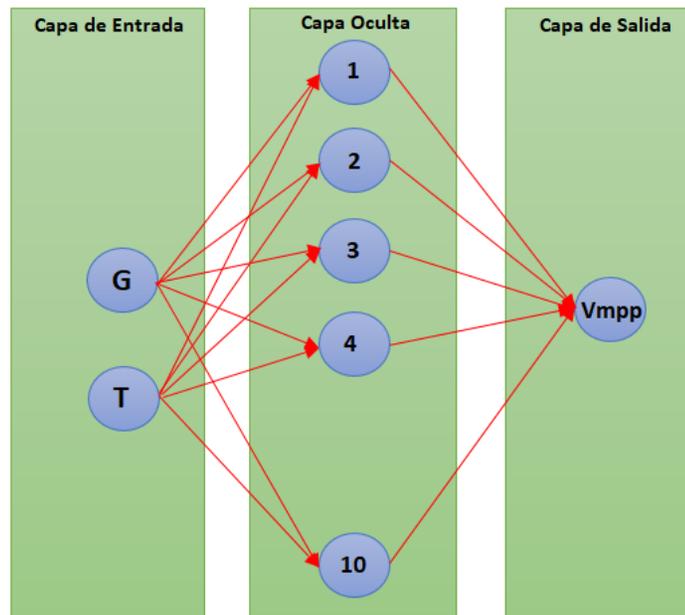
- **Selección de las variables de entrada y salida:** Como ya se mencionó anteriormente las entradas del controlador serán la temperatura ( $T$ ) e irradiancia ( $G$ ), es decir, el controlador constará de dos neuronas en la primera capa o capa de entrada. Cada neurona representa los valores medidos de temperatura e irradiancia, mientras que la capa de salida está dada por el Voltaje referencial  $V_{ref}$ .
- **Arquitectura de la red:** La arquitectura establecida para la red neuronal cuenta de tres capas. La capa de entrada presenta dos neuronas, cada una corresponde a cada variable

de entrada. La segunda capa o capa oculta cuenta con diez neuronas, se selecciona 10 neuronas manteniendo la configuración por defecto y recomendación de la herramienta. La tercera capa o capa de salida cuenta con una neurona que se asigna al voltaje referencial. Las funciones de activación utilizadas para la capa oculta y la capa de salida son tang y purelin respectivamente. La arquitectura de la red se presenta en la figura 37.

- **Entrenamiento de la red:** Este procedimiento presenta gran relevancia en cuanto a su diseño, puesto que el entrenamiento de la red presentará una adecuada respuesta y adaptación a la aplicación designada. Los datos de entrenamiento han sido generados aleatoriamente en base a sus entradas previamente establecidas. Se elaboró un conjunto de entrenamiento de 1000 muestras a diferentes niveles de irradiancia en un rango de 0 a 1000 W/m<sup>2</sup> y de temperatura en un rango de 10 a 30°C. El entrenamiento se lo realizó dentro del entorno MATLAB mediante la herramienta “nnstart” mismo que utiliza el algoritmo Levenberg-Marquardt (LM). De la totalidad del conjunto de datos generados el 75% de los mismos se utilizó para la creación de la red neuronal mientras que el 25% restante se utilizó para pruebas y validación del modelo.

**Figura 37.**

***Estructura red neuronal diseñada***



*Nota.* Fuente del Autor

### *Generación de datos experimentales*

Se requiere de una base de datos para realizar el entrenamiento de la NN. Como primer paso se genera un conjunto de datos aleatorios en función de las variables de entrada establecidas. Con los datos generados se calcula un valor de voltaje referencial y en base a esta información la red neuronal realiza el entrenamiento. La base de datos que se generó fue de mil muestras y estas fueron elaboradas en el software Matlab mediante el código presentado en anexos 3.

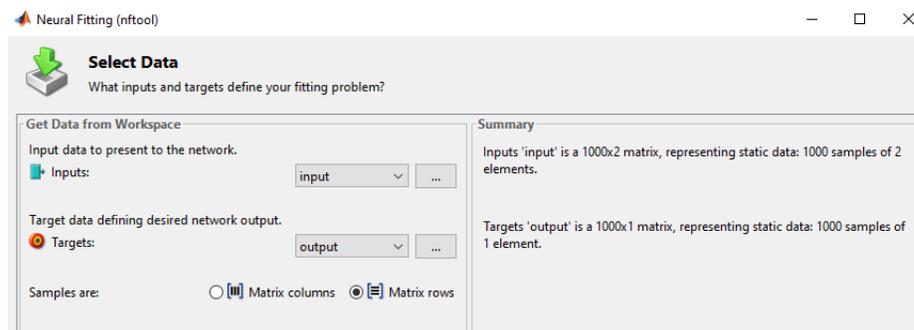
### *Creación y entrenamiento de la red neuronal*

El entorno de Matlab cuenta con una herramienta denominada enfocada en el diseño y elaboración de redes neuronales, denominada "Neural Net Fitting" la misma pone en ejecución mediante el comando "nnstart" o seleccionándola de la pestaña de aplicaciones. Dentro de la herramienta se diseña las tres partes mencionadas anteriormente de la red neuronal (selección de variables, arquitectura de la red y

entrenamiento de la red). La herramienta permite seleccionar y modificar diferentes parámetros como variables de entrada/salida, tipo de arquitectura, algoritmo de entrenamiento. A su vez permite la evaluación del rendimiento de la red neuronal mediante un análisis de regresión y visualización del error cuadrático medio. En la figura 38 se presenta la ventana de configuración de la herramienta “nnstart”. Dentro de esta ventana se ingresan los datos de las variables de entrada y salida, denominados Inputs y Targets, respectivamente. Una vez ingresados los datos, en la parte derecha de la ventana de configuración se muestra un resumen de la información proporcionada.

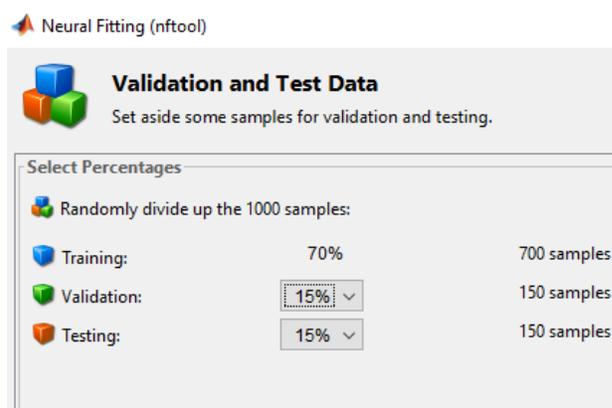
**Figura 38.**

### ***Ingreso de variables de entrada y salida***



Para la creación de la NN los datos ingresados deben agruparse en tres categorías diferentes, entrenamiento, validación y pruebas. Generalmente el 70% de los datos son utilizados para el entrenamiento mientras que el sobrante es utilizado para pruebas y validación del modelo. Esta misma distribución de datos se utilizó para este proyecto de investigación. La herramienta “Neural Net Fitting” también permite la configuración del porcentaje de datos a usar para cada grupo. La Figura 39 muestra la ventana de configuración de este procedimiento.

Figura 39.

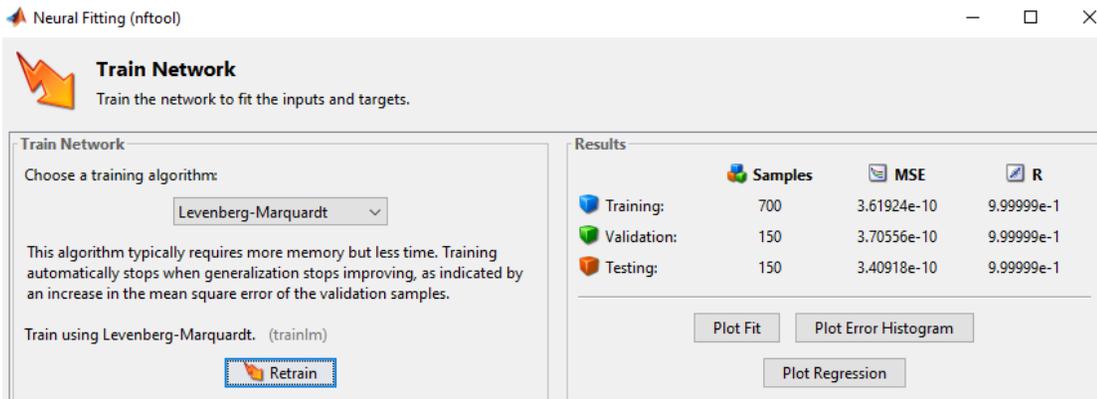
**Selección de porcentajes de muestras**

Una vez asignado el porcentaje de uso de datos se procede a configurar la arquitectura de la red (ver figura 40). Por defecto al introducir los datos de entrada se genera una neurona para cada entrada. “Neural Net Fitting” permite seleccionar el número de neuronas que se desea aplicar dentro de la capa oculta. Si la respuesta obtenida de la NN después del entrenamiento no presenta un adecuado comportamiento se puede modificar el número de neuronas de la capa oculta hasta obtener resultados que precisen una respuesta deseada. Finalmente se selecciona el algoritmo de entrenamiento a utilizar.

Dentro de la arquitectura diseñada para la NN MPPT se plantea el uso de diez neuronas en la capa oculta, puesto que es la configuración por defecto y recomendada de la herramienta. De igual manera se selecciona el algoritmo de entrenamiento. Para este trabajo de investigación se utilizará el algoritmo de retropropagación Levenberg-Marquardt, debido a que requiere menor tiempo de entrenamiento (Mathworks, 2017a). La herramienta detendrá automáticamente el entrenamiento de la NN si la respuesta deja de mostrar mejoría. Para validar la funcionalidad de la red, la herramienta utiliza el error cuadrático medio (MSE). En la Figura 40 se presenta la ventana de configuración para la arquitectura de la red. Después del entrenamiento se despliega los resultados en la misma ventana de configuración.

Figura 40.

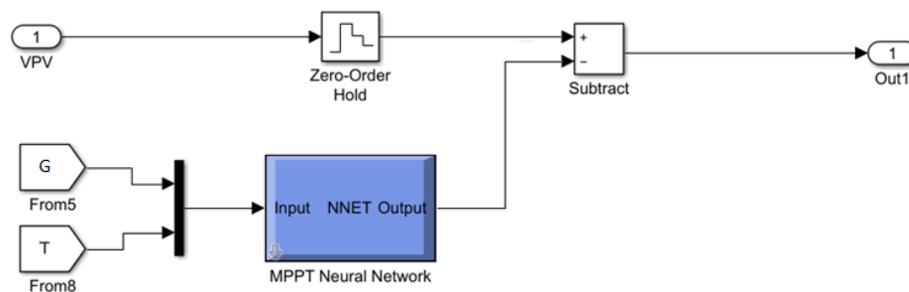
### Selección del algoritmo y entrenamiento de la NN



Tras el entrenamiento realizado se consigue una red neuronal con un MSE de  $3.70556 \times 10^{-10}$  y con un valor de correlación  $R = 0.9999$ . La red neuronal creada se exporta a un diagrama en Simulink y posteriormente se genera el esquema del controlador MPPT basado en redes neuronales tal como se ilustra en la figura 41.

Figura 41.

### Esquema red neuronal MPPT



Nota. Fuente del Autor

### ***Control por modos deslizantes (SMC)***

Un controlador por modos deslizantes es comúnmente utilizado en plantas donde su comportamiento es no lineal esto debido a que el controlador presenta características de robustez frente a perturbaciones externas. Los controladores basados en el principio de SMC solventan a la problemática del seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar con respecto a la climatología, puesto que son insensibles frente a perturbaciones externas.

Existen diversas metodologías para realizar un control SMC MPPT. Con el fin de generar la superficie deslizante algunas de ellas utilizan una base de datos con mediciones de corriente y tensión del panel frente a diversas condiciones atmosféricas (Ramos J. A., 2017), otras metodologías utilizan datos de simulaciones previas (Farhat, Barambones, Ramos, Duran, & Andujar, 2015). Cualquiera de los diseños citados anteriormente utiliza datos de un panel solar en específico para generar la superficie de deslizamiento y esto presenta limitaciones si se desea replicar el algoritmo para otro panel. Para realizar un cambio de panel se debería llevar a cabo nuevas mediciones o simulaciones con el nuevo panel.

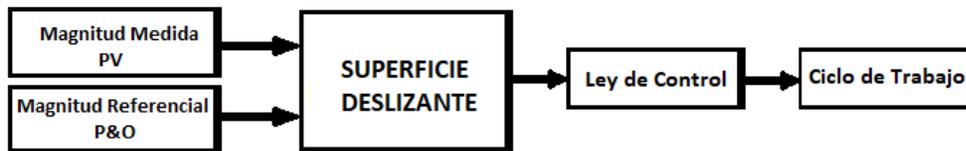
El método propuesto en este proyecto de investigación plantea la incorporación de una variante del algoritmo P&O con el fin de generar la superficie deslizante. De esta manera no se limita al algoritmo SMC a trabajar con un panel en específico. Al ser la variante del algoritmo P&O el encargado de la generación de datos referenciales no se necesita realizar nuevas mediciones si se cambia de panel solar.

El SMC compara el parámetro tensión de salida del panel solar ( $V_{PV}$ ) con el voltaje referencial ( $V_{ref}$ ) calculado por el algoritmo P&O y de esta manera se calcula un error de seguimiento ( $e$ ). Para generar la superficie deslizante se utiliza el error y la derivada del error. Mediante la ley de control se producirá un ciclo de trabajo que forzará al convertidor a trabajar en el punto de máxima potencia. La figura 42 presenta

un diagrama de bloques del funcionamiento del algoritmo SMC, mientras que en la figura 43 se presenta su esquema de simulación.

**Figura 42.**

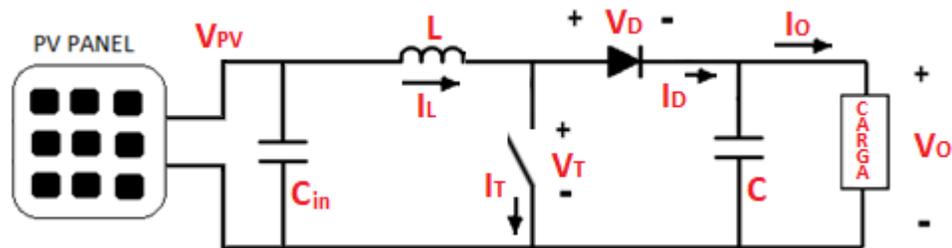
**Diagrama de bloques SMC**



*Nota.* Fuente del Autor

**Figura 43.**

**Esquema de simulación – sistema fotovoltaico**



*Nota.* Fuente del Autor

Para el diseño del controlador se requiere que el convertidor elevador se encuentre expresado como un modelo en espacio de estados. El modelo promediado del controlador elevador de la Figura 8 está dado por: (Gohar, Vilanova, Herrera, Tobón, & Peláez, 2020).

$$i_{Cin} = C_{in} \frac{dV_{PV}}{dt} = i_{PV} - i_L \quad (41)$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{PV} - V_o(1 - u) \quad (42)$$

De las ecuaciones (41) y (42) podemos expresarlas en espacios de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PV} \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{C_{in}} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{i_{PV}}{C_{in}} & 0 \\ \frac{-V_o}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_o}{L} \end{bmatrix} u \quad (43)$$

### *Diseño del convertidor*

Se tiene que:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{PV} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (44)$$

Donde  $x_1$  representa el voltaje de salida del panel fotovoltaico y  $x_2$  representa la corriente del inductor. La señal de referencia dada por el algoritmo P&O se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$X_d = \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ref} \\ \dot{V}_{ref} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Donde  $x_d$  representa el voltaje de referencia calculado por el algoritmo P&O, mientras que  $\dot{x}_d$  representa su derivada. El error de seguimiento está dado por:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - x_d \\ e_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (46)$$

Donde la superficie deslizante está dada por:

$$s = k_1 e_1 + e_2 \quad (47)$$

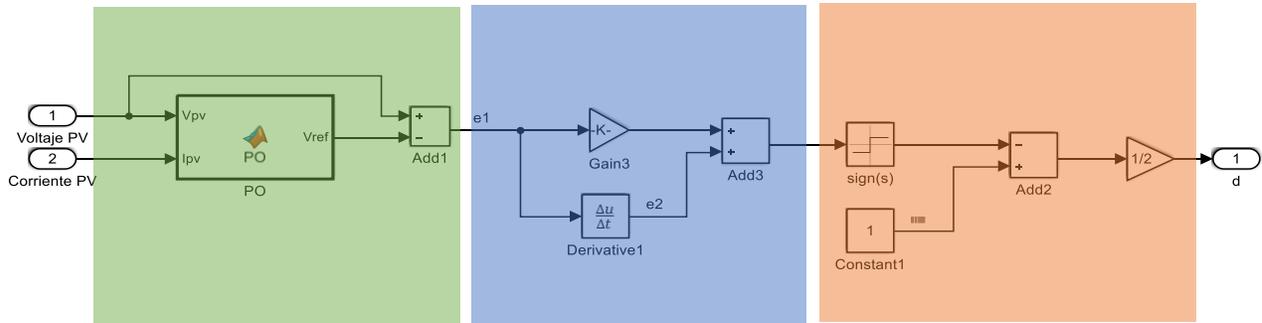
La ley de control está dada por (Arcos, Urbina, & Sotomayor, 2012):

$$u = \frac{1}{2} [1 - \text{sign}(S)] \quad (48)$$

Establecido el diseño del esquema de simulación, superficie deslizante y ley de control se procede a ensamblar el diseño en Matlab. La figura 44 presenta el esquema de control SMC, en el mismo se visualiza de color verde la sección encargada de generar la señal de referencia, la sección en color azul es la encargada de generar la superficie deslizante, mientras que la superficie en color naranja implementa la ley de control. La señal de salida del controlador genera un ciclo de trabajo y esta se envía al convertidor para forzarlo a trabajar en el punto de máxima potencia.

**Figura 44.**

**Esquema de simulación SMC**



*Nota.* Fuente del Autor

## Capítulo IV. Simulaciones y Comparaciones

Las condiciones climáticas no son lineales y la totalidad del tiempo se encuentran en constante variación en función de la hora del día, estación del año y demás. Por estas condiciones resulta indispensable el uso de controladores MPPT en instalaciones fotovoltaicas. Dentro de este capítulo se evalúan los algoritmos diseñados mediante simulaciones en Matlab/Simulink. Los diferentes escenarios de prueba difieren entre ellos en variaciones de temperatura e irradiancia. De esta manera se logra estimar su funcionalidad frente a distintas condiciones y perturbaciones externas. Para un escenario de prueba se seleccionó datos de condiciones climáticas reales de un sector específico. En todos los escenarios de simulación planteados se utilizan cargas netamente DC. Por otro lado, se realiza una comparación de la respuesta del sistema fotovoltaico de los cinco métodos diseñados, al realizar este contraste entre los algoritmos MPPT se establecen métricas que permiten la evaluación de su desempeño. Otra parte importante se enfoca en el análisis de los resultados y el grado de aplicabilidad a diferentes escalas de producción.

En contexto con el párrafo anterior, en un primer escenario de simulación los algoritmos probaran su desempeño frente a condiciones STC (Condiciones de laboratorio), en el segundo escenario se variará el parámetro de temperatura, el tercer escenario variará la irradiancia, mientras que en el escenario final se realizaran pruebas con datos reales de una localidad de Ecuador.

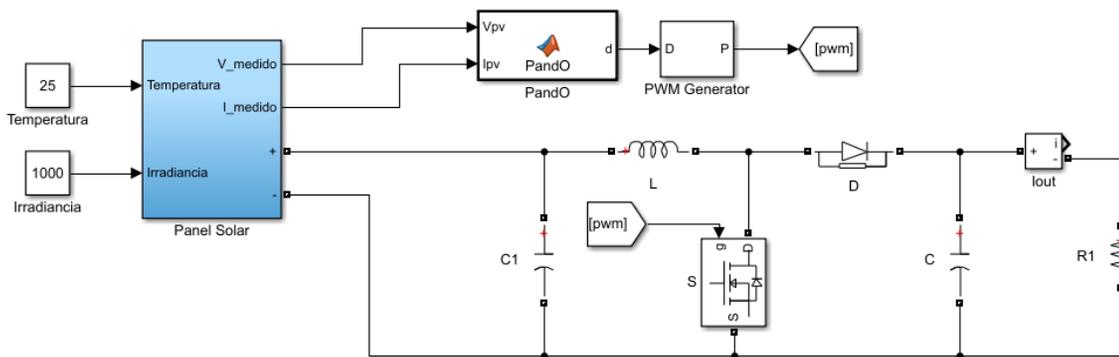
### Esquemas de simulación

El diagrama de bloques presentado en la figura 1 se establece como esquema de simulación para los algoritmos MPPT diseñados. El esquema se mantiene para todos los algoritmos a excepción del algoritmo basado en redes neuronales, esto se debe a las características propias del algoritmo. Para el sistema

controlador por redes neuronales se establece es esquema presentado en la figura 36 se puede visualizar que al bloque NN únicamente ingresa la componente de voltaje del panel. Por otra parte, las variables de temperatura e irradiancia utilizan “tags” para enviar el valor de las mismas hacia la red neuronal. En las figuras 45 a 49 se presentan los algoritmos diseñados en Matlab/Simulink cabe mencionar que estos esquemas son fijos para todos los escenarios de simulación y los únicos cambios entre escenario serán las señales de temperatura e irradiancia.

**Figura 45.**

***Esquema de simulación algoritmo P&O***



**Figura 46.**

***Esquema de simulación algoritmo INC***

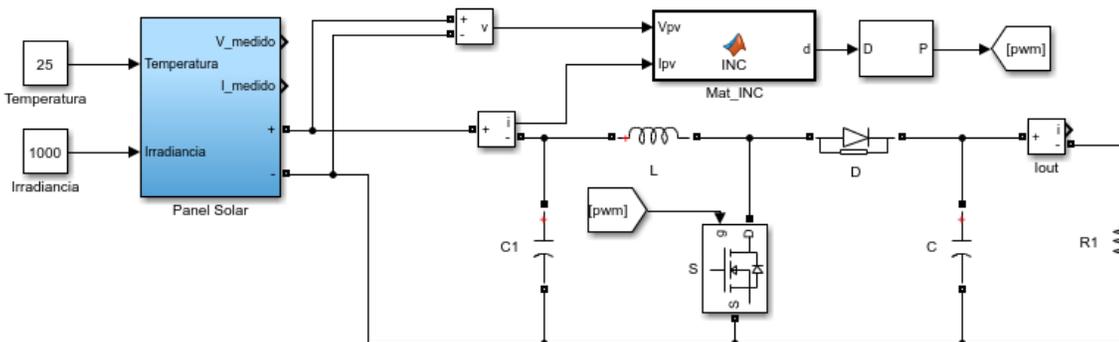


Figura 47.

Esquema de simulación algoritmo FLC

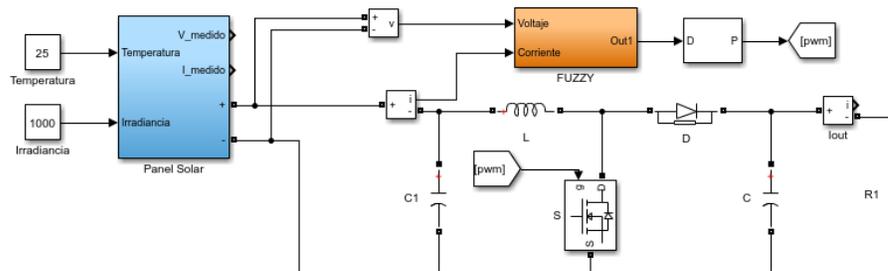


Figura 48.

Esquema de simulación algoritmo basado en NN

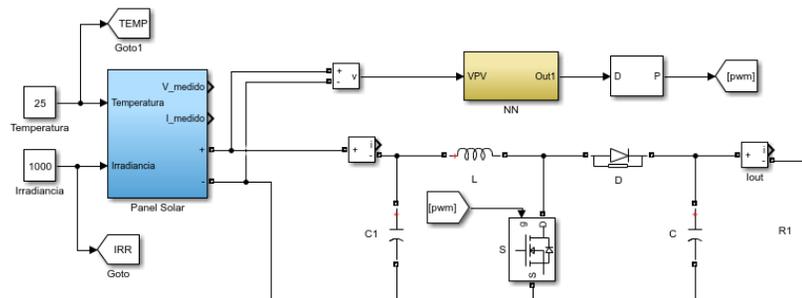
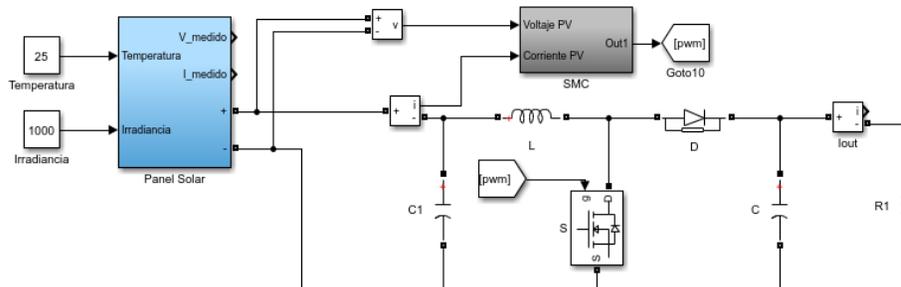


Figura 49.

Esquema de simulación algoritmo basado en SMC



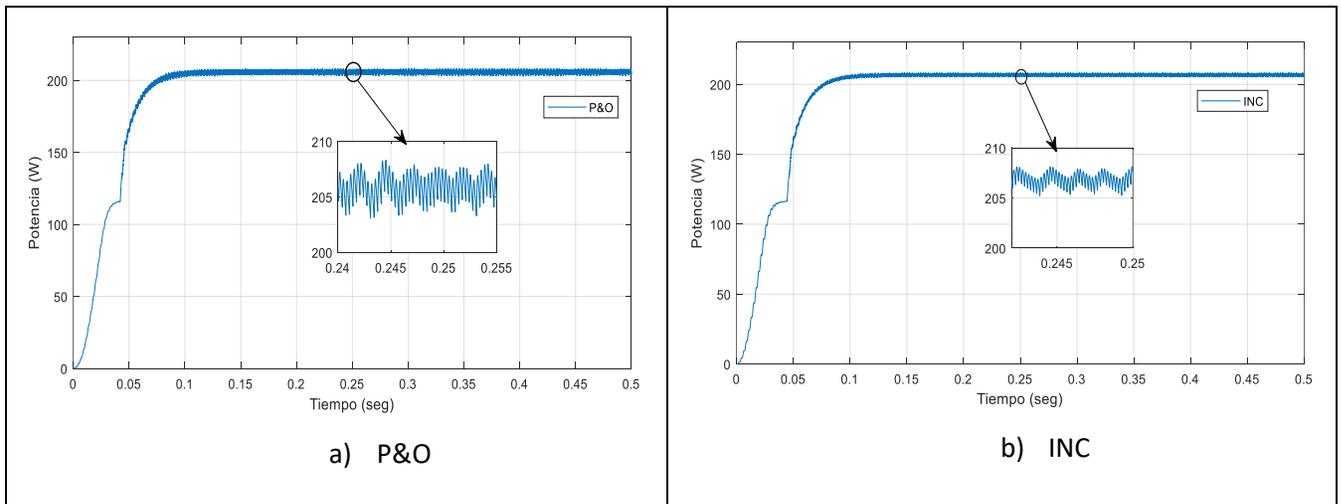
### Escenario 1: Condiciones climáticas estándar

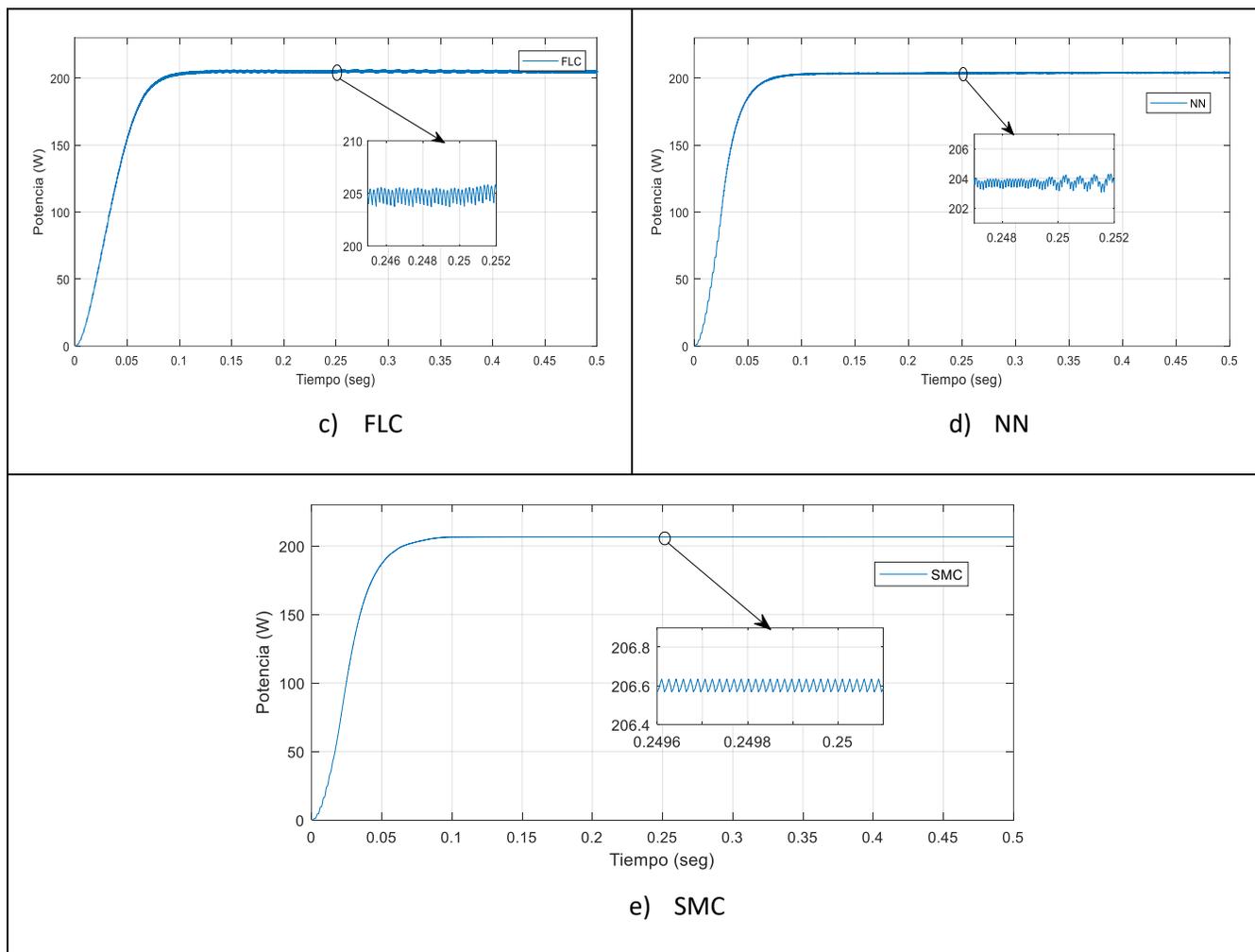
Como se mencionó en capítulo 2, las condiciones STC representan un estándar dentro de la industria fotovoltaica. Son utilizadas para testear la producción de energía y compararlos entre diferentes fabricantes de paneles. Cabe mencionar que las condiciones STC no se encuentran fácilmente en ninguna parte del mundo. Las condiciones ambientales que se presentan generalmente repercuten en una baja producción de potencia. Dado que las condiciones STC son utilizadas a nivel mundial se tomó en consideración para el primer escenario de simulación y las mismas implican una temperatura ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), Irradiancia ( $I_{rr} = 1000 \text{ W/m}^2$ ) y espectro de masa de aire de 1.5 (AM1.5).

La figura 50 presenta la señal de potencia de salida del sistema fotovoltaico. Dentro de la figura se aprecia diferentes gráficas y cada una de ellas lleva consigo una sigla identificativa. Las siglas a), b), c), d) y e) representan a los algoritmos P&O, INC, FLC, NN, SMC respectivamente.

**Figura 50.**

**Potencia de salida STC – a) P&O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC**



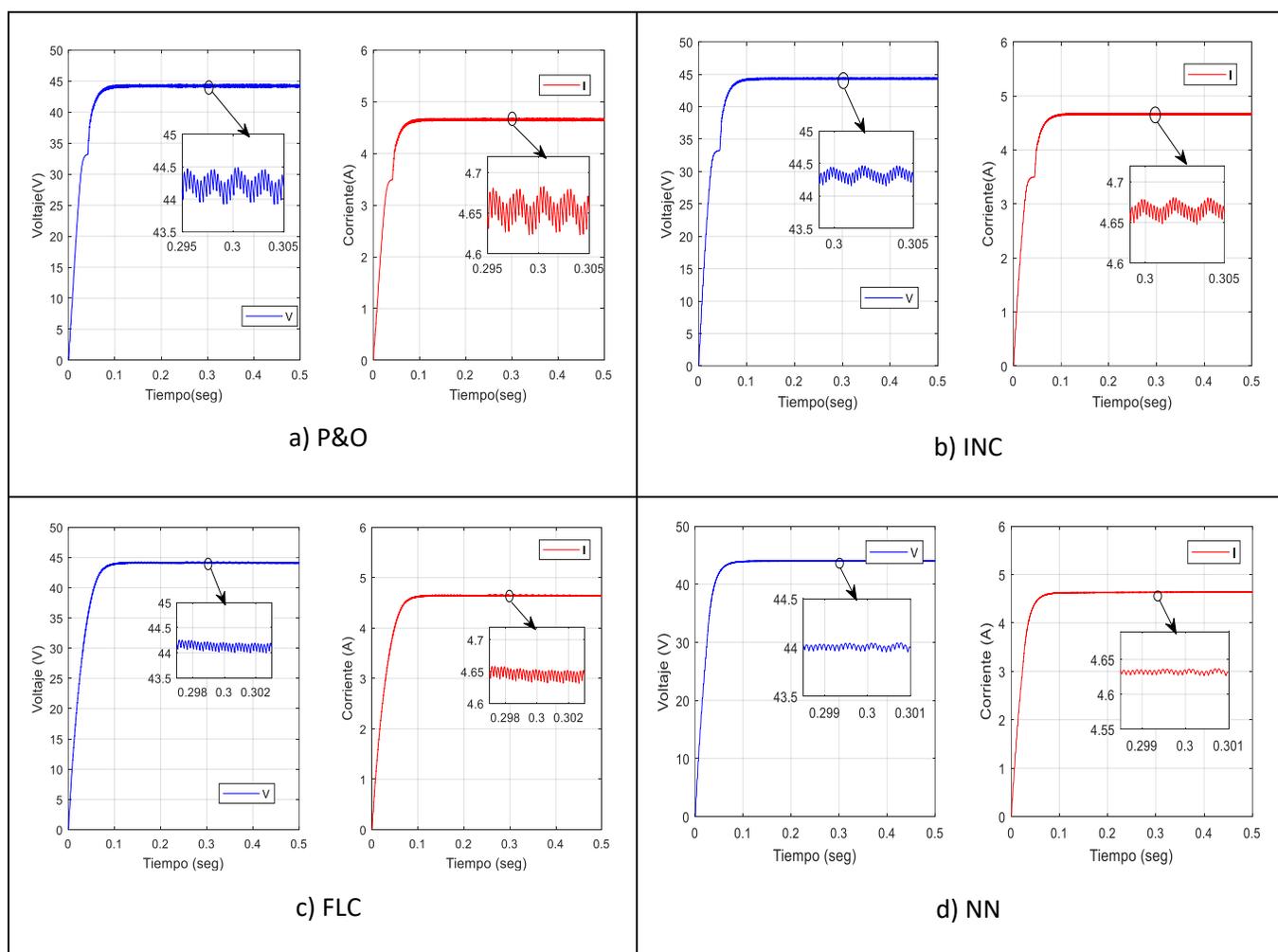


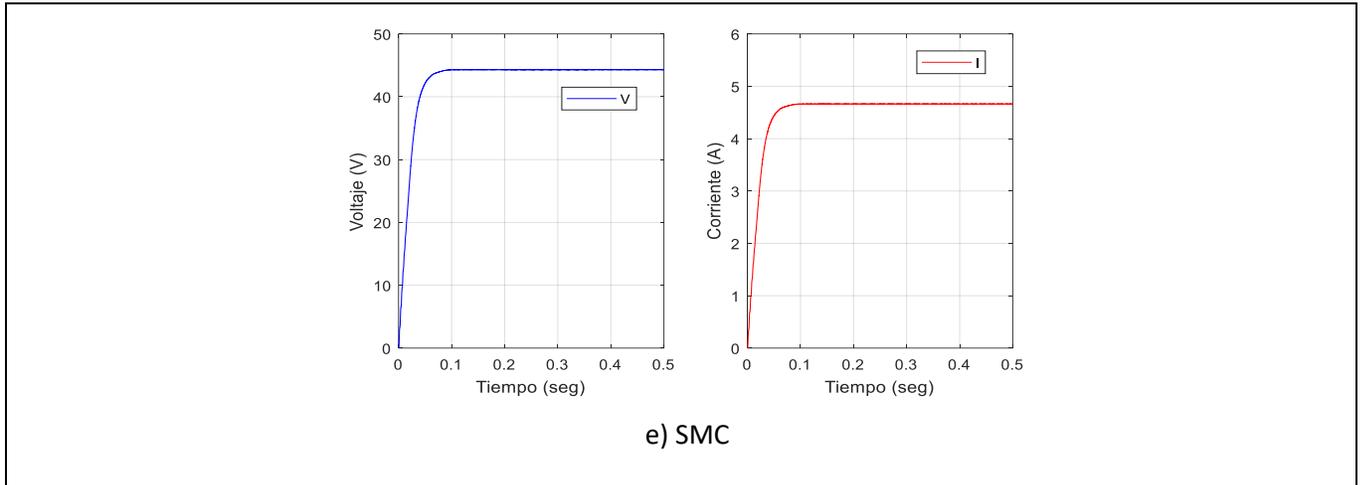
Cabe aclarar que el primer escenario de simulación no presenta cambios en sus condiciones ambientales, es decir, los valores se mantienen constantes en toda la simulación. De la gráfica 50 se puede afirmar que: Los algoritmos P&O y INC (figura 50a y 50b respectivamente) presentan una oscilación considerable constante. El algoritmo FLC (figura 50c) reduce las oscilaciones en la señal de salida y los algoritmos NN y SMC prácticamente eliminan las oscilaciones. Todos los algoritmos diseñados presentan un adecuado seguimiento del punto de máxima potencia y su extracción de potencia es comparable entre todos.

La potencia de salida del sistema fotovoltaico es uno de los parámetros más relevantes a la hora de evidenciar el desempeño de los algoritmos seguidores del punto de máxima potencia. Es necesario constatar el comportamiento de las componentes de tensión y corriente de salida del sistema, de esta manera se analiza la evolución de las señales e identificar cuál de ellas produce mayor oscilación. En la figura 51 se presenta las componentes mencionadas de los algoritmos diseñados, cabe mencionar que la imagen mantiene la misma distribución de la figura 50.

**Figura 51.**

**Tensión y Corriente de salida del sistema - a) P&O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC**





En base a la información suministrada por las figuras 50 y 51 se elabora una tabla comparativa del desempeño de los cinco algoritmos diseñados (ver tabla 4).

**Tabla 4.**

*Resultados – Escenario 1 Condiciones STC*

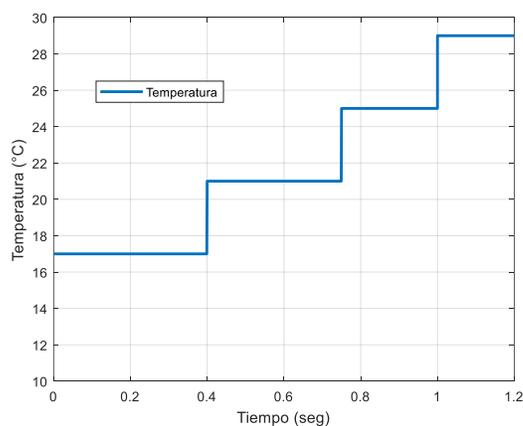
Algoritmo	Potencia Promedio (W)	Error de Oscilación $\Delta P_{PPT}$ (W)	Voltaje Salida $V_O$ (V)	Corriente Salida $I_O$ (A)
P&O	204.6	5.267	44.19	4.657
INC	206.6	2.934	44.43	4.667
FLC	204.0	1.474	44.24	4.634
NN	205.3	1.30	44.17	4.647
SMC	206.6	0.073	44.3	4.663

## Escenario 2: Temperatura Variable – Irradiancia Constante

La temperatura marca un papel importante dentro de generación de energía fotovoltaica, puesto que en función de la misma las plantas solares aumentarán o disminuirán su capacidad de producción. Es por ello que para el segundo escenario de pruebas se ha planteado una variación escalonada ascendente de este parámetro, mientras que la irradiancia mantendrá su valor en  $1000 \text{ W/m}^2$ . Mediante el segundo escenario se mide la afectación que tiene la variable temperatura sobre los paneles solares en contraste con la utilización de los controladores MPPT diseñados. La señal de temperatura utilizada para la simulación de este escenario se la describe en la figura 57.

**Figura 52.**

### ***Señal de Temperatura***

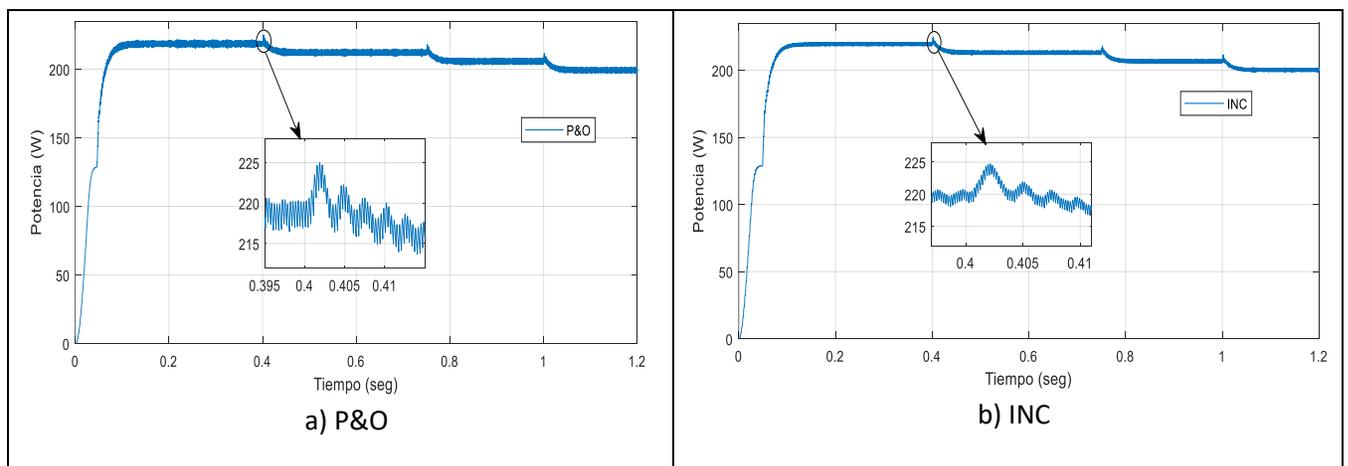


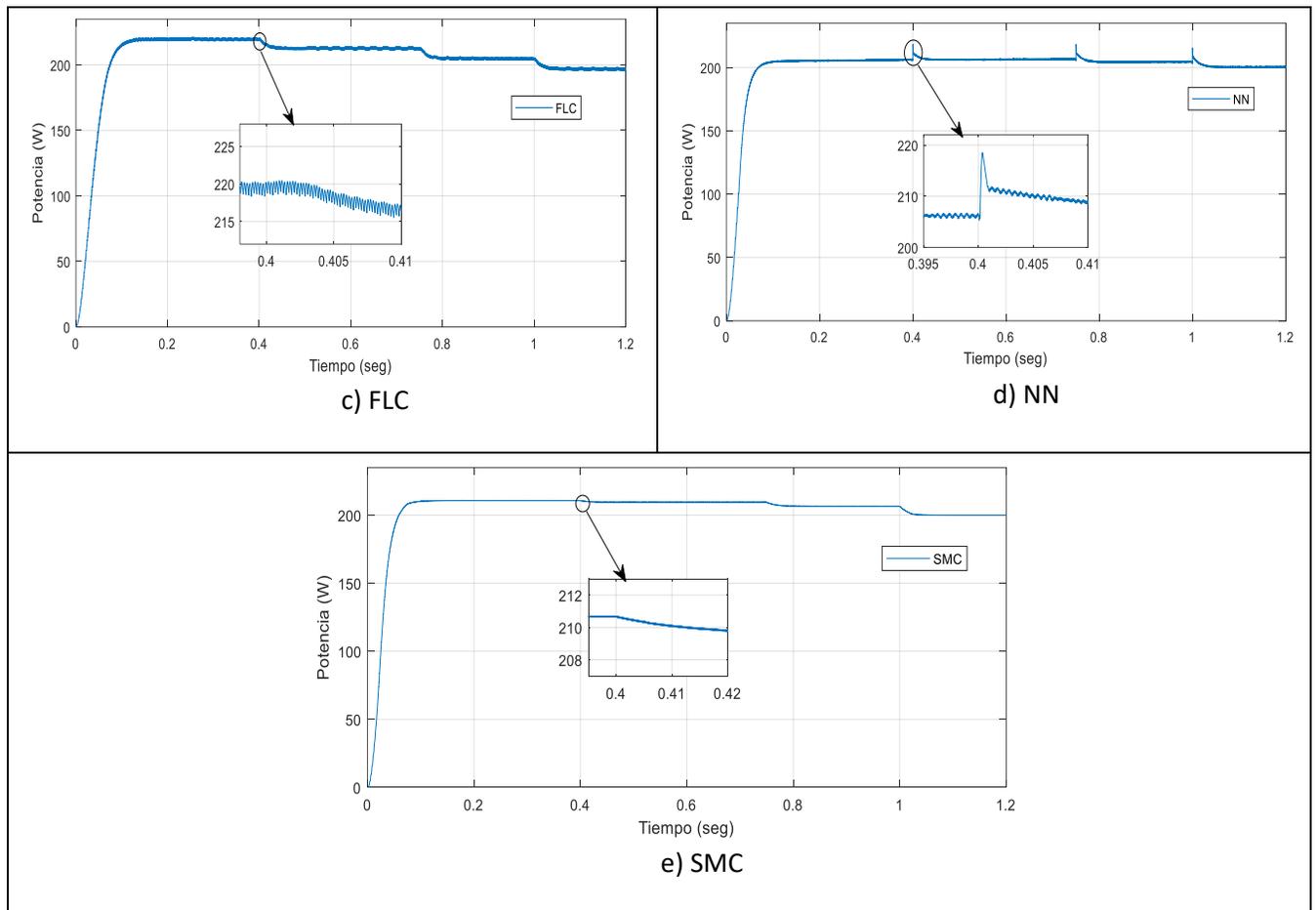
El efecto de la temperatura dentro de los paneles solares tiene una repercusión importante en la generación de energía eléctrica. La relación que mantiene con la producción de potencia dentro de los paneles fotovoltaicos es inversamente proporcional, es decir, a mayor cantidad de temperatura menor es la producción de potencia esto se debe a una disminución del voltaje producido. Una elevada temperatura produce una considerable reducción en la potencia de los paneles solares con pérdidas porcentuales entre el 20 – 25% de su producción total.

En la Figura 53 se presenta la señal de potencia de salida del sistema fotovoltaico de los algoritmos diseñados. El algoritmo P&O (figura 53a) se visualiza que al producirse cambios de temperatura se generan picos que posteriormente llegan a estabilizarse a un valor nominal. El algoritmo INC (figura 53b) presenta un comportamiento similar al algoritmo P&O con oscilaciones inferiores. El algoritmo FLC (figura 53c) no presenta picos de potencia si se producen variaciones de temperatura esto indica que su comportamiento es más estable en comparación con los anteriores algoritmos. El algoritmo NN (figura 53d) presenta un pico de potencia considerable, pero una vez se estabiliza la señal de salida las oscilaciones producidas son mínimas. Con respecto al algoritmo SMC (figura 53e) su respuesta no presenta picos frente a cambios de temperatura, a su vez el algoritmo elimina cualquier tipo de oscilación. Los beneficios mostrados del algoritmo se deben a que la operación del sistema se encuentra dentro de la superficie deslizante. El funcionamiento general como algoritmo MPPT es adecuado puesto que rastrea el punto de máxima potencia de manera instantánea.

**Figura 53.**

**Potencia de salida escenario 2 – a) P&O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC**





La información obtenida a partir de la figura 53 se la resume en la tabla 5, en la misma se puede evidenciar de mejor manera la cantidad de potencia extraída y oscilación presentada frente a cada nivel y variación de temperatura.

**Tabla 5.**

*Resultados – Escenario 2*

Irradiancia ( $W/m^2$ )	Algoritmo MPPT	Temperatura ( $^{\circ}C$ )	Potencia Promedio (W)	Error de Oscilación $\Delta P_{PPT}$ (W)
1000	P&O	17	218.8	6.54
		21	212.5	5.81
		25	206.1	5.03
		29	199.5	4.63
1000	INC	17	219.6	2.92
		21	213.3	3.51
		25	206.9	2.94
		29	200.4	3.32
1000	FLC	17	219.8	2.81
		21	212.9	2.67
		25	205.0	2.52
		29	197.1	2.62
1000	NN	17	209.8	1.16
		21	208.6	1.14
		25	205.5	1.04
		29	200.8	0.71
1000	SMC	17	210.7	0.102
		21	209.5	0.094
		25	206.5	0.157
		29	199.9	0.083

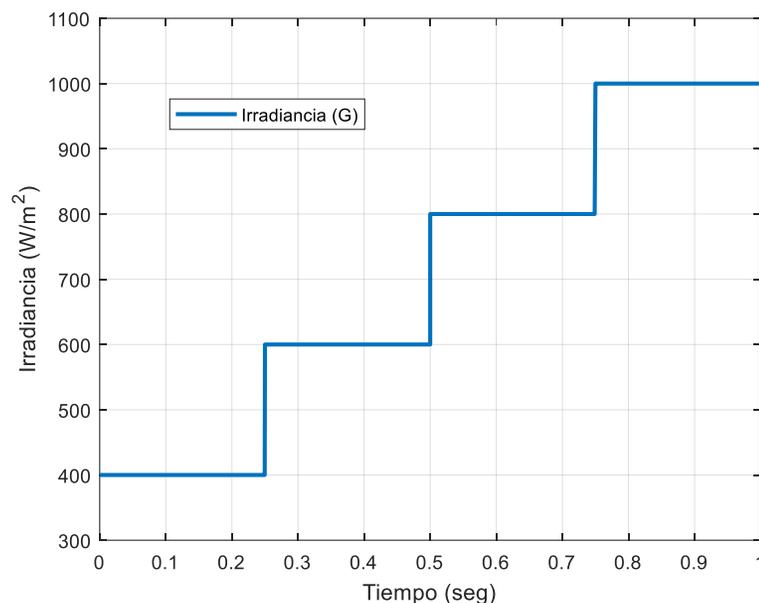
### **Escenario 3: Temperatura Constante – Irradiancia Variable**

Del mismo modo que la temperatura, la irradiancia es otra variable con repercusión directa en la producción de energía dentro de sistemas fotovoltaicos. La pérdida de tensión con respecto a la irradiancia es prácticamente despreciable, mientras que su principal afección se ve marcada en una disminución de la corriente (Adedayo, 2017). Las condiciones STC marcan un nivel de irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$ , pero ni en regiones donde los rayos del sol golpean de manera perpendicular a superficie terrestre no se alcanza este nivel de irradiancia. Es por ello que algunos fabricantes realizan a la par pruebas de funcionamiento bajo condiciones más reales conocidas como condiciones (NTC).

En la Figura 54 se presenta la señal de irradiancia utilizada para el escenario de simulación tres. Se seleccionó una señal escalonada ascendente en el rango de 0 a  $1000 \text{ W/m}^2$  con variaciones bruscas para evaluar el funcionamiento frente a cambios repentinos. La variable temperatura mantendrá un valor constante de  $25^\circ\text{C}$ .

**Figura 54.**

***Señal de Irradiancia***

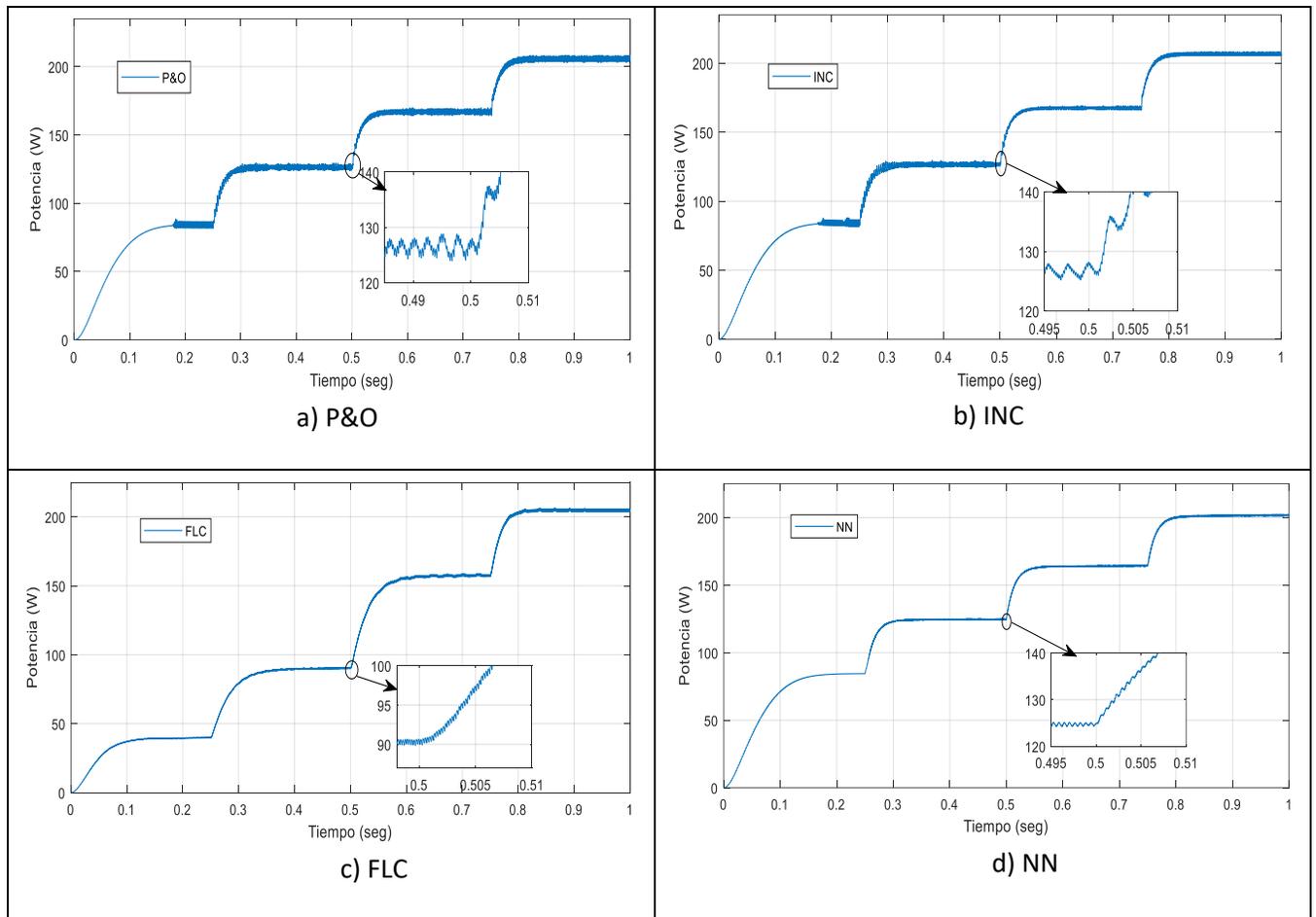


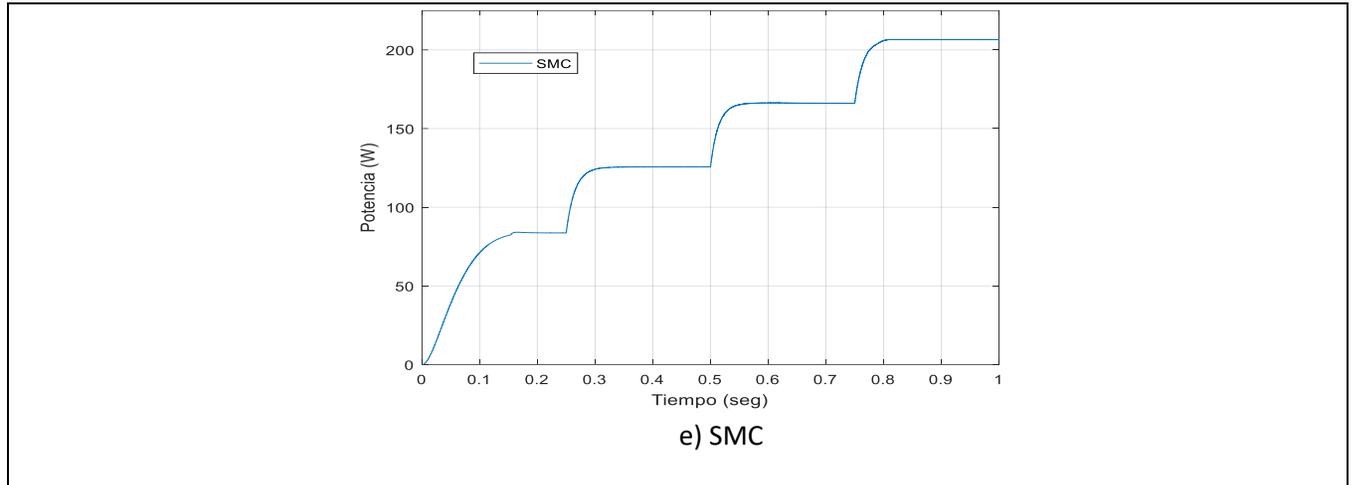
La Figura 55 muestra los niveles de potencia de salida del sistema fotovoltaico a diferente irradiancia. El algoritmo P&O (figura 55a) presenta un adecuado seguimiento del MPP pese a las fluctuaciones de la señal de irradiancia, también presenta oscilaciones mismas que aumentan su amplitud a medida que el nivel de irradiancia incrementa. El comportamiento del algoritmo INC (figura 55b) bajo el tercer escenario presenta un correcto seguimiento del punto de máxima potencia. A medida que el nivel de irradiancia varía (aumenta o disminuye), la cantidad de potencia extraída también varía en función de ella. El algoritmo INC presenta una oscilación inferior con respecto al algoritmo P&O, en la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos. En base a los resultados del algoritmo FLC (figura 55c) se afirma que existe un bajo desempeño en cuanto a extracción de potencia para valores de irradiancia baja del orden de los 300 a 400  $W/m^2$ , pero al incremento del nivel de irradiancia la cantidad de potencia extraída también se incrementa. Los controladores basados en NN tienen gran adaptabilidad a sistemas no lineales como este caso. La figura 55d presenta la respuesta del sistema fotovoltaico mediante este algoritmo, se evidencia que no existen picos de voltaje como en los algoritmos P&O e INC y mantiene una oscilación muy baja (casi nula) con respecto a los métodos anteriores. La respuesta del algoritmo SMC (figura 55e) es adecuada, en el sentido

que no presenta oscilaciones y tiene un correcto seguimiento del punto de máxima potencia. Las oscilaciones constantes y recurrentes de los algoritmos convencionales (P&O y INC) son anuladas casi en su totalidad.

**Figura 55.**

*Potencia de salida escenario 3 – a) P&O, b) INC, c) FLC, d) NN, e) SMC*





En hojas técnicas de los fabricantes de módulos solares se puede encontrar los valores de potencia a diferentes niveles de irradiancia. En este escenario se cotejarán los datos obtenidos por simulación con los datos proporcionados por el fabricante y se calculará la eficiencia de los algoritmos. Cabe aclarar que el cálculo de la eficiencia se lo realiza netamente para el analizar de los controladores diseñados, de esta manera se logra comparar y estimar un porcentaje de fidelidad dentro de los algoritmos MPPT. El cálculo de la eficiencia se lo realiza entre la potencia de salida del convertidor y la información de la hoja técnica del fabricante mediante la ecuación (49).

$$n = \frac{\text{Potencia MPPT}}{\text{Potencia Salida}} * 100 \quad (49)$$

Donde  $n$  representa la eficiencia del algoritmo diseñado. *Potencia MPPT* representa el valor de potencia presentado en la hoja técnica y *Potencia Salida* representa el valor de potencia extraída por el sistema fotovoltaico diseñado.

La tabla 6 presenta un resumen de los valores obtenidos y calculados de cada algoritmo diseñado.

Tabla 6.

Resultados – Escenario 3

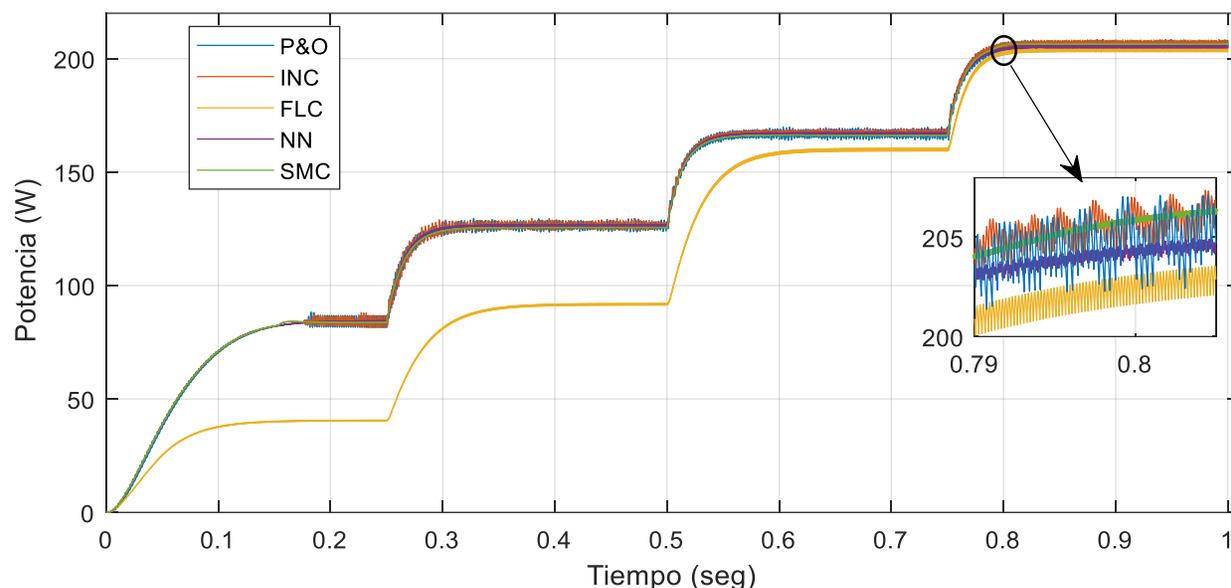
Algoritmo	Irradiancia ( $W/m^2$ )	Corriente out (A)	Voltaje out (V)	Potencia out (W)	Potencia MPPT (W)	Error Oscilación (W)	$\eta$ (%)
P&O	400	2.97	28.24	84.1	85	5.339	98.94
	600	3.64	34.52	125.7	130	6.45	96.69
	800	4.18	39.76	166.4	170	6.07	97.88
	1000	4.657	44.19	204.6	213.15	5.014	95.98
INC	400	2.88	28.29	81.54	85	5.36	95.92
	600	3.69	34.55	127.5	130	4.79	98.07
	800	4.19	39.85	167.2	170	2.999	98.23
	1000	4.667	44.43	206.6	213.15	2.921	96.92
FLC	400	2.08	19.92	41.56	85	0.85	48.89
	600	3.09	29.77	92.07	130	1.4	70.82
	800	4.07	39.14	159.3	170	2.6	93.70
	1000	4.68	44.23	206.8	213.15	2.8	97.02
NN	400	2.98	28.30	84.46	85	0.33	99.36
	600	3.65	34.62	126.4	130	1.03	97.23
	800	4.192	39.83	167.0	170	1.06	98.23
	1000	4.642	44.24	205.4	213.15	1.23	96.36
SMC	400	2.969	28.3	84.03	85	0.88	98.85
	600	3.636	34.54	125.6	130	0.021	96.61
	800	4.182	39.74	166.2	170	0.22	97.76

Algoritmo	Irradiancia ( $W/m^2$ )	Corriente out (A)	Voltaje out (V)	Potencia out (W)	Potencia MPPT (W)	Error Oscilación (W)	$\eta$ (%)
	1000	4.662	44.29	206.5	213.15	0.093	96.88

Es menester visualizar el desempeño de los controladores en contraposición con ellos mismos. La Figura 56 muestra una comparación de la potencia de salida del sistema fotovoltaico de todos los algoritmos diseñados en respuesta al escenario tres. Cabe mencionar que a la señal de potencia de salida con el algoritmo SMC (señal en verde) se aumentó su grosor, esto debido a que al realizar la contraposición de todas las respuestas esta se perdía en la figura. En la figura se puede evidenciar que los cinco algoritmos presentan un seguimiento adecuado del punto de máxima potencia, en cuanto a extracción de potencia el algoritmo FLC presenta bajos niveles de extracción en irradiancias bajas. Los algoritmos INC y P&O son los que más oscilaciones presentan, mientras que los algoritmos NN y SMC eliminan casi en su totalidad las oscilaciones producidas.

**Figura 56.**

***Comparación Algoritmos – Escenario 3***

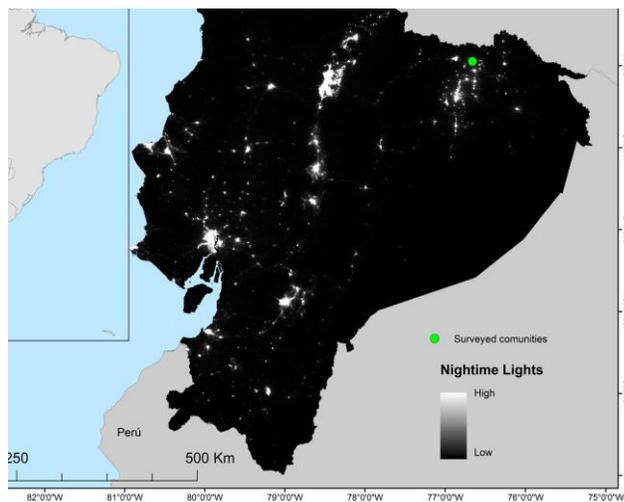


#### Escenario 4: Condiciones Climáticas Reales

Si bien es cierto que los anteriores escenarios de simulación generan una aproximación de la funcionalidad de los controladores MPPT diseñados, en la vida real las condiciones climáticas en cualquier parte del mundo son variables. Es por ello que se requiere un escenario de simulación con señales que se asemejen al comportamiento climático real donde se evalúe a los algoritmos diseñados. Para efecto de este escenario se ha seleccionado un lugar específico, se han tomado sus datos meteorológicos y se simulará los algoritmos bajo estas condiciones atmosféricas.

El lugar seleccionado no cuenta con conexión a la red eléctrica pública o privada debido a las dificultades de acceso a su sector de ubicación. Es por ello que el sitio seleccionado es apto para realizar proyectos de electrificación mediante el uso de energías renovables. La localidad seleccionada consta como territorio rural perteneciente a la región amazónica del Ecuador, dentro de la provincia de Sucumbíos cerca de su capital Nueva Loja. La localidad consta como área protegida, por tal razón no se puede presentar su ubicación exacta, el punto verde en la Figura 57 marca su posición geográfica.

Figura 57.

**Localización del Sector de Pruebas**

Nota. Tomado de se4amazonian

Una vez determinada la ubicación se procede a extraer los datos meteorológicos mediante la página web PVGIS (figura 58). Dentro de la página se permite la descarga de diversa información meteorológica de todo el mundo.

Figura 58.

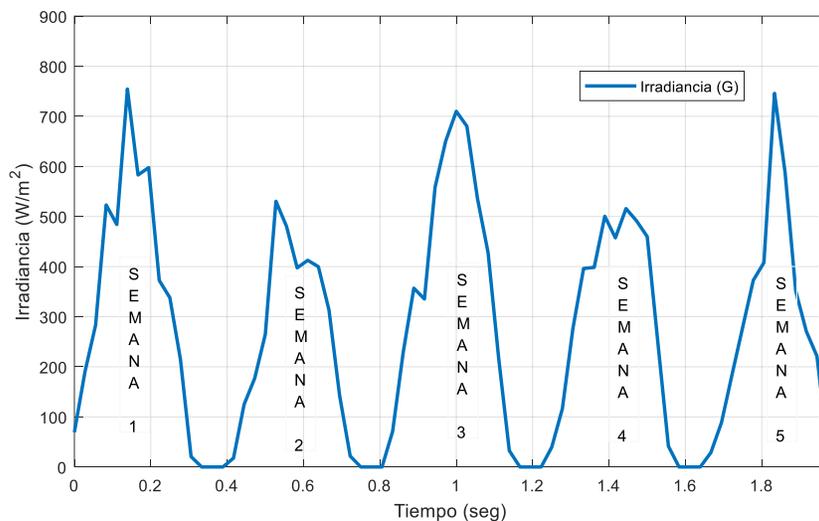
**Datos PVGIS**

Nota. Tomado de PVGIS

Los datos utilizados para el escenario cuatro pertenecen al mes de enero de 2015 y son medidos con una tasa de muestreo de una hora. Los datos extraídos de PVGIS corresponden a temperatura e irradiancia. A todo el conjunto de datos del mes enero se los promedia por semanas. La figura 59 y 60 presenta las señales de irradiancia y temperatura respectivamente con las que se simulará el escenario cuatro.

**Figura 59.**

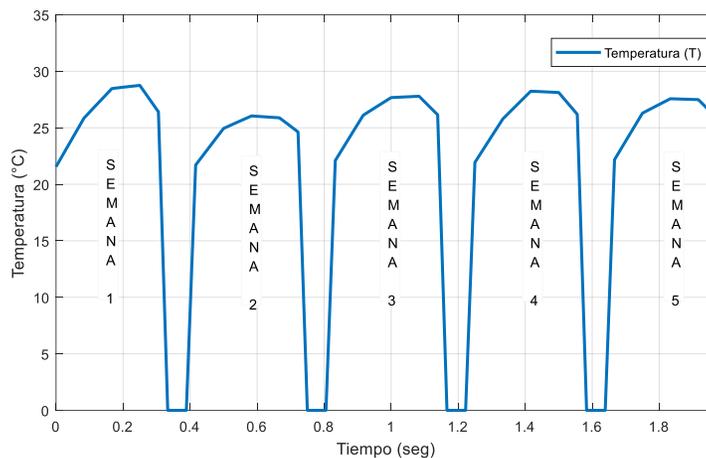
***Señal de Irradiancia Real***



Nota. Fuente del autor

**Figura 60.**

***Señal de Temperatura Real***



*Nota.* Fuente del autor

La figura 61 presenta las señales de salida del sistema fotovoltaico de los algoritmos diseñados.

En el algoritmo MPPT P&O (figura 61a) se puede visualizar que a cambios bruscos de potencia se producen fuertes oscilaciones en la señal de potencia de salida especialmente para valores de irradiancia inferiores de  $400 \text{ w/m}^2$ . El comportamiento en general del controlador es adecuado debido a que realiza un constante seguimiento del MPP de acuerdo a las señales de temperatura e irradiancia.

La respuesta del algoritmo INC (figura 61b) muestra que la cantidad de energía extraída es ligeramente mayor que el algoritmo P&O, a su vez este método reduce eventualmente las oscilaciones. La respuesta de la figura 61b presenta oscilaciones constantes que se incrementan en presencia de cambios bruscos de irradiancia.

En el algoritmo FLC (figura 61c) se puede observar que la potencia de salida del sistema presenta oscilaciones mucho menores que con los algoritmos normalmente utilizados en el mercado (P&O e INC). Se observa que existen oscilaciones leves en los picos de potencia. Si bien el control FLC presenta un correcto seguimiento del punto de máxima potencia una desventaja claramente marcada con respecto a los algoritmos P&O e INC es que la extracción de potencia es inferior en  $\pm 7$  voltios en niveles de irradiancia

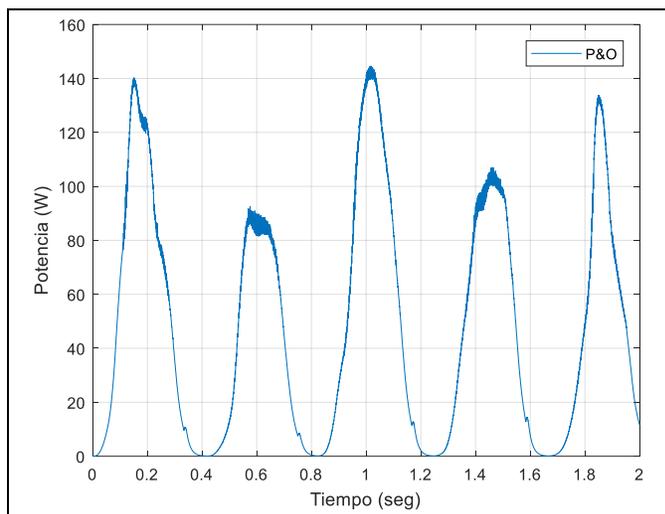
bajos del orden de  $300 - 400 \text{ W/m}^2$ , pero la extracción de potencia bajo condiciones climáticas reales es aceptable. La utilización de este de controlador depende netamente de la aplicación o instalación fotovoltaica. La peculiaridad presentada de menor oscilación con repercusión en la extracción de potencia puede resultar más practica en algunas ocasiones especialmente en aquellos aplicativos en los que la potencia instalada sea baja.

La respuesta que presenta el sistema de la figura 61d rastrea el MPPT y obliga al convertidor a trabajar en ese punto, gracias a este seguimiento se produce un desempeño adecuado prácticamente sin oscilaciones pese a las condiciones cambiantes, la única oscilación existente se produce al existir un bajo nivel de irradiancia, pese a estos cambios bruscos el sistema trabaja adecuadamente.

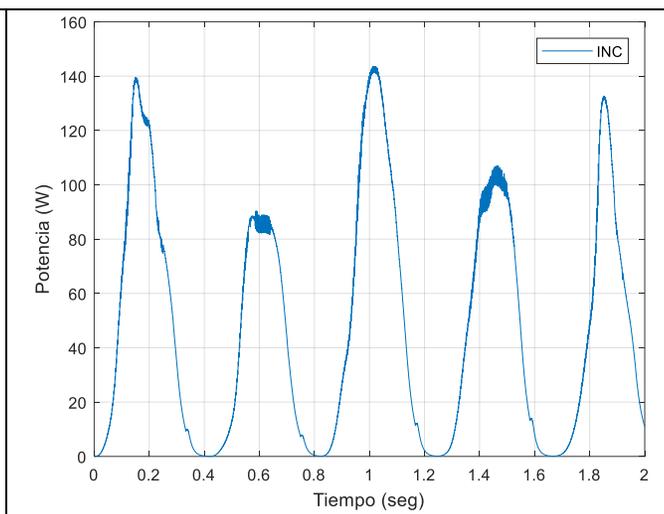
Una característica del control por modos deslizante es su robustez frente a perturbaciones. Los cambios climáticos de temperatura e irradiancia pueden considerarse como perturbaciones puesto que no se las puede prever con exactitud. En la Figura 61e se presenta la señal de salida del sistema fotovoltaico, como se puede visualizar el algoritmo SMC exhibe un adecuado seguimiento del punto de máxima potencia con oscilaciones nulas y una mayor extracción de energía en comparación a los anteriores algoritmos.

**Figura 61.**

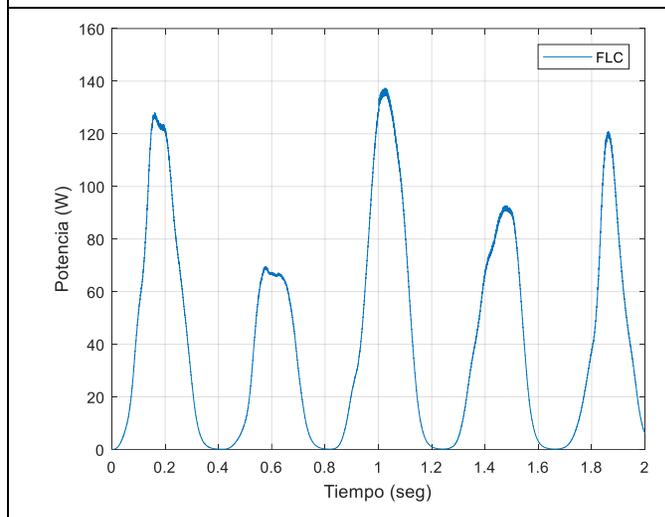
***Potencia P&O – Datos Reales***



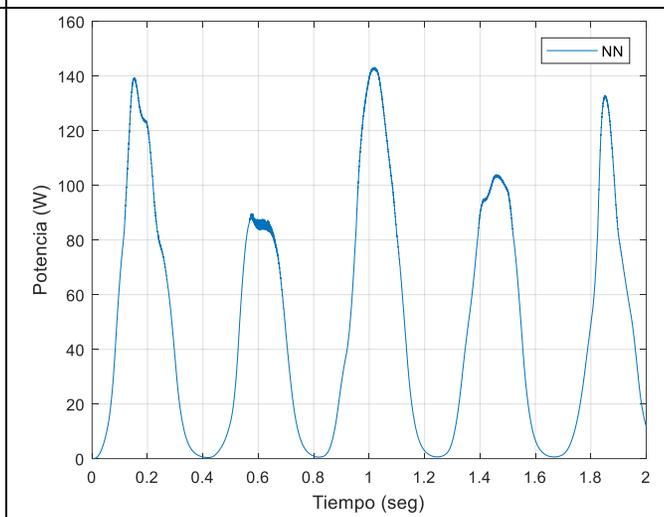
a) P&O



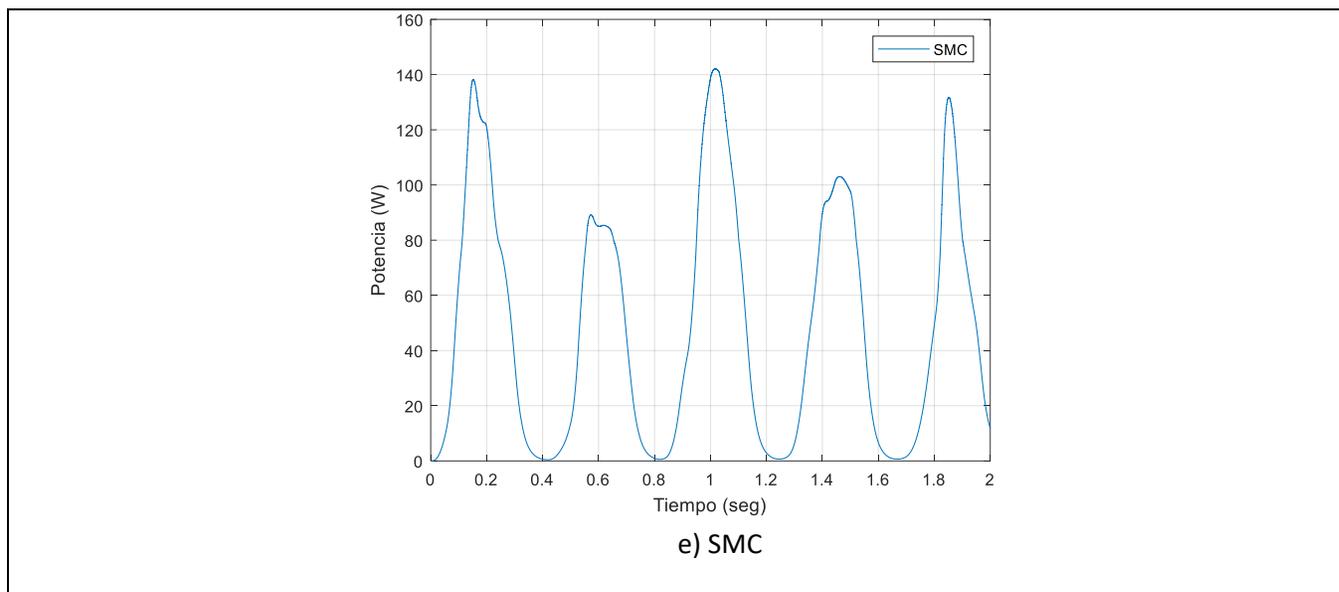
b) INC



c) FLC

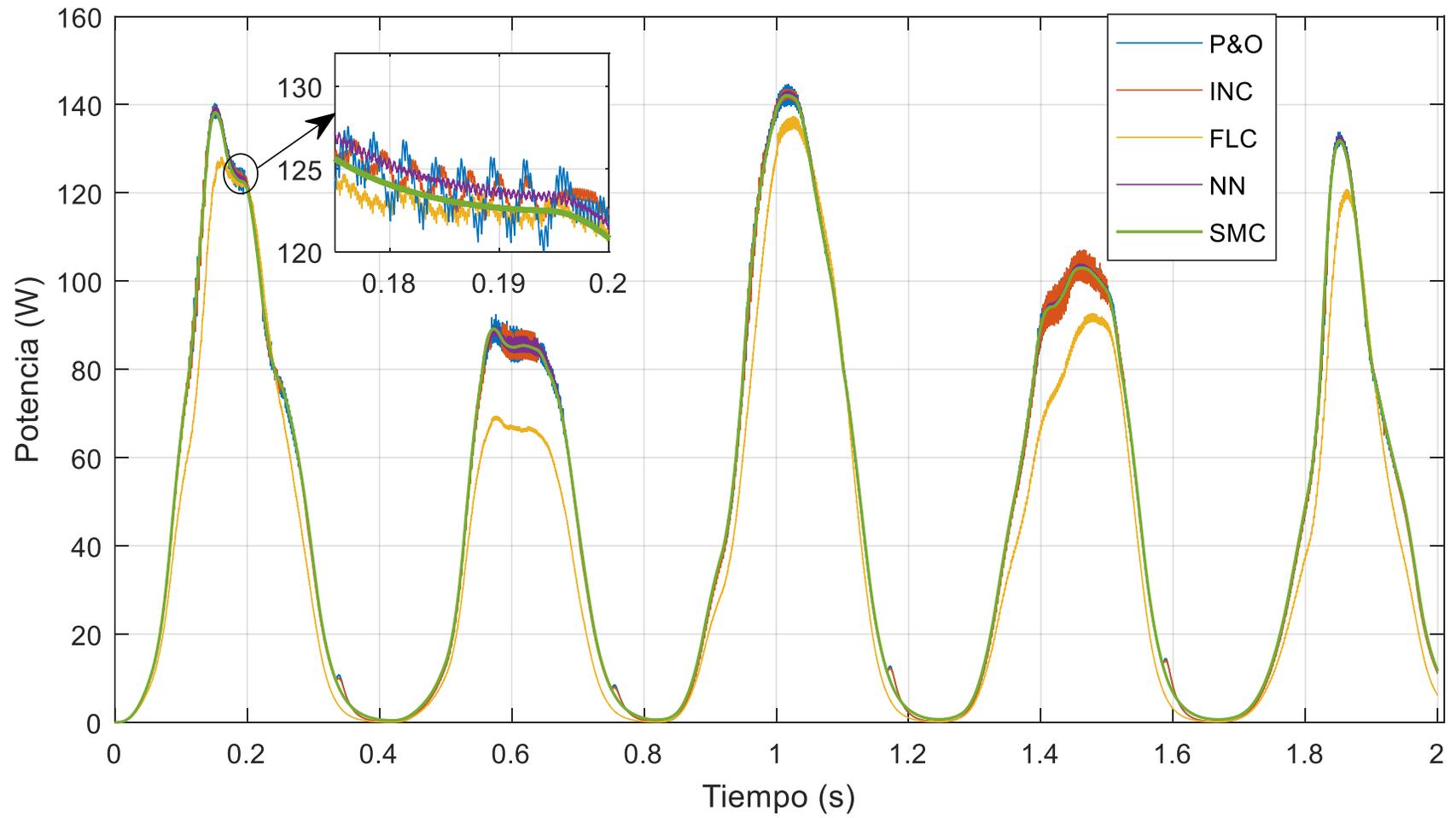


d) NN



En la figura 62 se presenta una comparativa en contraposición de la respuesta de los algoritmos diseñados bajo el cuarto escenario de simulación. Es importante mencionar que la señal del algoritmo SMC ha sido aumentada su grosor para que pueda ser visualizada.

Figura 62.

**Comparación del Desempeño de Algoritmos – Escenario 4**

En la Figura 62 se presenta una comparativa de las señales de potencia de salida del sistema fotovoltaico con los cinco diferentes controladores diseñados. Para la comparativa se utilizó los datos del cuarto escenario de simulación, es decir con datos reales de irradiancia y temperatura. En la figura 62 se aprecia señales de color azul, tomate, amarillo, morado y verde mismas que representan a los controladores P&O, INC, FLC, NN y SMC respectivamente. A su vez la figura incluye un acercamiento para visualizar las oscilaciones y la diferencia en la cantidad de potencia extraída. Al realizar un análisis se puede afirmar que:

- Las oscilaciones en la potencia de salida se presentan de forma constante en los algoritmos P&O e INC; el algoritmo FLC marca una disminución de oscilaciones mientras que los algoritmos NN y SMC practicante eliminan esta característica.
- Los métodos convencionales de MPPT más utilizados en el mercado (P&O e INC) son aquellos que más oscilaciones presentan, esta característica se exhibe en todos los escenarios de simulación.
- Una característica oscilatoria común que se presenta en los algoritmos P&O, INC, FLC y NN se produce frente a cambios bruscos de los niveles de irradiancia, pero es más común en valores del orden de 300 a 400  $W/m^2$ .
- La cantidad de potencia extraída bajo condiciones climáticas fluctuantes son similares en los algoritmos P&O, INC, NN y SMC, pese a que todos presentan un adecuado seguimiento del punto de máxima potencia el algoritmo FLC tiende a extraer valores de potencia inferiores en niveles de irradiancia bajos.

Al analizar la información obtenida de las distintas pruebas de funcionamiento, se puede afirmar que los algoritmos de control P&O e INC son los más recomendables a usar en instalaciones de baja escala

(instalaciones residenciales) y media escala (Industrias pequeñas). Pese a que son los métodos con mayor presencia de oscilaciones y en ocasiones presenta distorsiones en la señal de potencia de salida su seguimiento del MPP es adecuado. A su vez su implementación no implica la utilización de controladores con características avanzadas, lo que permite su fácil producción y replicación en masa. Gracias a estas características su uso está muy marcado en el mercado fotovoltaico.

Por otro lado, los algoritmos basados en técnicas de computación más avanzadas FLC, NN, SMC son recomendables utilizarlos en instalaciones a gran escala (parques industriales, plantas solares) donde la incidencia solar es máxima, puesto que su seguimiento y extracción de potencia es ligeramente mayor (en el orden de  $\pm 6$  voltios) pero al ser una producción en grandes cantidades este pequeño aumento representa cantidades considerables de energía. De igual manera el seguimiento del punto de máxima potencia en los tres algoritmos presenta un mejor desempeño. Por otro lado, los tres algoritmos reducen severamente las oscilaciones y esto conlleva a incrementar la vida útil de los equipos y proporcionar un mejor cuidado, específicamente de los inversores solares.

## Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Actualmente la industria fotovoltaica establece un nuevo mercado con una huella verde, esto debido a la factibilidad tecnológica y a la disminución de costos en elementos utilizados dentro de plantas fotovoltaicas. Si bien el aumento del mercado ha significado nuevas fuentes de trabajo y cuidado del planeta, las líneas de investigación no deben ser la excepción. Dentro del marco de la tecnología fotovoltaica cada día salen al mercado paneles solares con mejores eficiencias, metodologías ingeniosas de aprovechamiento de la radiación, materiales de fabricación con más prestaciones, entre otras características.

Pese a la afectación de la pandemia debido al Covid-19, la industria fotovoltaica es una de las pocas que presenta un crecimiento positivo a nivel global. A su vez se proyecta que en un futuro sea una de las primeras fuentes de generación de energía.

En contexto con lo mencionado se enumera las conclusiones que se ha obtenido a lo largo de la realización del vigente proyecto de investigación.

- Debido al avance de las líneas de investigación las nuevas tecnologías de fabricación de los paneles solares han dado un golpe revolucionario dentro de esta industria. Tecnologías como Half-Cell, PERC, Bifacial cuentan con nuevas prestaciones específicas que permiten maximizar la extracción de energía solar. Todas estas nuevas tecnologías comparten un principio común, por lo tanto, establecer un modelo de simulación que parta desde su formulación matemática permite comprender la manera en que interactúa cada variable y parámetro dentro de la producción de energía.

- Los convertidores presentan un papel importante dentro de los sistemas fotovoltaicos debido a que ellos modifican la señal proveniente de los paneles solares. Los convertidores son los encargados de amplificar o reducir el voltaje. Para lograr ese fin se debe analizar el aplicativo y seleccionar una configuración que se ajuste a nuestras necesidades y posteriormente realizar su diseño en base a los datos del panel.
- La extracción de potencia de los paneles solares depende en gran medida del algoritmo aplicado para el efecto, los algoritmos convencionales más utilizados en el mercado son Conductancia Incremental y Perturbación y Observación. Aunque presentan constantes oscilaciones muestran un adecuado seguimiento del MPP y extracción de potencia sin comprometer el costo computacional requerido para su desarrollo e implementación.
- Se han aplicado nueva e ingeniosas metodologías que solventan las deficiencias de los algoritmos convencionales. Es por ello que se han diseñado tres diferentes tipos de algoritmos más sofisticados, robustos y con mejores prestaciones los cuales son FLC, NN, SMC. Las constantes oscilaciones de los algoritmos convencionales generan daños en los equipos de potencia a largo plazo, los tres algoritmos mencionados solventan dichas oscilaciones, pero en el caso específico del control por lógica difusa disminuye la cantidad de potencia extraída. Los algoritmos basados en redes neuronales y modos deslizantes son los que presentan un correcto seguimiento del MPP, mayor extracción de energía y solventan oscilaciones, pero cabe mencionar que se fundamentan en lógica computacional avanzada por lo que aumenta su tiempo de procesamiento a nivel que sean aplicables en controladores avanzados.

- Si bien es cierto que la temperatura e irradiación son parámetros que están en constante cambio los controladores son los encargados de linealizar el comportamiento del sistema. Es por ello que se utilizó datos reales para los escenarios de prueba, con lo que se concluye que pese a las condiciones atmosféricas variantes los cinco algoritmos desarrollados presentan un adecuado desempeño con características y limitaciones específicas para cada uno de ellos.

## Recomendaciones

- En varias ocasiones el software de simulación Matlab/Simulink presenta bloques prediseñados de modelos, elementos, o partes de diseños que se quiere recrear. La utilización de estos bloques depende del estudio realizado, es decir, si se desea analizar el comportamiento interno de los mismos no es recomendable utilizarlos. Pero pueden ser de gran ayuda para corroborar y comparar resultados con diseños elaborados de fuente propia.
- En esquemas de simulación complejos es preferible realizar pruebas de manera separada, es decir, dividida por subsistemas puesto que la interferencia de cada subsistemas o elemento interfiere en el desenvolvimiento general del sistema.
- El tiempo de procesamiento de un controlador MPPT basado en lógica difusa depende de las funciones de membresía utilizadas. La utilización de una u otra depende del grado de complejidad del sistema. Por ello es recomendable realizar pruebas con distintas funciones de membresía de manera que el diseño realizado sea lo más óptimo posible.
- La industria de energías renovables en especial la fotovoltaica crece de manera acelerada y el estudio e investigación de proyectos acordes a este tópico debe ir a la par. Como punto de

partida este proyecto de investigación se recomienda realizar estudios de sombreado parcial, producción de hidrogeno verde, estudios de parámetros óptimos para plantas fotovoltaicas en Ecuador.

### Referencias Bibliográficas

- Abderrahim, T., Abdelwahed, T., & Radouane, M. (2020, Junio). Improved strategy of an MPPT based on the sliding mode control for a PV system. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, X(3), 3074-3085. doi:0.11591/ijece.v10i3.pp3074-3085
- Abril, C., Arias, R., Guerrero, L., & González, L. (2014). *Diseño de un convertidor elevador, para aplicaciones de energías renovables en instalaciones aisladas*. Venezuela.
- Adedayo, F. (2017). *Different Photovoltaic MPPT Techniques Under Various Weather Conditions*. Tesis, University of Johannesburg, Electrical Engineering.
- Agha, H. S., Koreshi, Z.-u., & Khan, M. B. (2017). Artificial Neural Network based Maximum Power Point Tracking for Solar Photovoltaics. *IEEE*.
- Alarcón, P. I. (2015). *Revisión y comparacion de los principales metodos MPPT para sistemas fotovoltaicos*. Valparaiso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Andrianantenaina, C., Rajonirina, S., & Razafinjaka, J. (2019). Comparative study of MPPT algorithms for photovoltaic system. *IJARIE*, V, 2395-4396.
- ANPIER. (2020). Datos macroeconómicos. Potencia total instalada. *Anuario Fotovoltaico 2020*, 28-30.
- Arcos, D. G. (2016). *“Energy management strategies based on Fuzzy Logic control for Grid-Tied domestic electro-thermal microgrid*. España.

- Arcos, D., Urbina, M., & Sotomayor, D. (2012, Noviembre). Controlador en Modo Deslizante para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red Eléctrica. *MASKAY*.
- Astocondor, J. (2017). *Controlador de Seguimiento del Punto de Maxima Potencia en Sistema Fotovoltaico Autonomo con Logica Fuzzy*. Universidad del Callao, Ingenieria Electrica y Electronica, Perú.
- Belaidi, R., Bendib, B., Ghribi, D., Bouzidi, B., & Mghezzi, M. (2019). A comparative study on conventional and modern maximum power point tracking algorithms applied to photovoltaic systems. *World Journal of Environmental Research, IX(2)*, 29-35.
- Cordero, V. P. (2014). *Simulación mediante Psim de algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas fotovoltaicos*. Valladolid .
- Cuzco, R., Arcos, D., Jacqueline, L., Ortíz, D., & Martínez, W. (2021). Comparative analysis of the performance of maximum power point tracking algorithms in photovoltaic systems. *Multidisciplinary International Congress on Science and Technology (CIT 2021)*. Quito.
- Dkhichi, F., Oukarfi, B., Ouoba, D., Fakkar, A., & Achalhi, A. (2016, Octubre). Behavior of neural network MPPT technique on a PV system operating under variable load and irradiation. *IEEE*, 1-4. doi:10.1109/CISTEM.2016.8066822
- Elkin, H., Márquez, D., Villegas, J., Serna, S., Ramos, C., & Gonzales, D. (2016). Modelo matematico de Sistemas Fotovoltaicos para busqueda distribuida del punto de maxima potencia. *Tecno Lógicas, XIX(37)*, 107-124.
- Esrám, T., & Chapman, P. (2007, Junio). Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE, XXII(2)*, 439-449.

- Ezquibel, A. (2003). *Seguimiento del Punto de Maxima Potencia en Paneles Solares con Lógica Difusa*. Tijuana.
- Farayola, A., Hasan, A., & Ahmed, A. (2017). Comparison of Modified Incremental Conductance and Fuzzy Logic MPPT Algorithm Using Modified CUK Converter. doi:10.1109/IREC.2017.7926029
- Farhat, M., Barambones, O., Ramos, J., Duran, E., & Andujar, J. (2015). Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industria*(12), 476–487.
- Garelli, F. (2007). *Sistemas de estructura variable. Aplicación al control con restricciones*. Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Departamento de Electrotecnia, Plata.
- Gates, B. (2021). *Cómo Evitar un Desastre Climático*. Barcelona: Nomos S.A.
- Gerzhel, J., Olenka, J., & Mendoza, J. (2014). Controlador en modo deslizante del punto de maxima potencia en la carga de bateria de un sistema fotovoltaico. *Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías*, I(1), 1-13.
- Gohar, H., Vilanova, R., Herrera, J., Tobón, A., & Peláez, J. (2020). *Non-Linear Sliding Mode Controller for Photovoltaic Panels with Maximum Power Point Tracking*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Guenounou, O., Dahhou, B., & Chabour, F. (2014). Adaptive fuzzy controller based MPPT for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*(78), 843–850.

- Habbati, B., Ramdani, Y., & Moulay, F. (2014, Abril). A detailed modeling of photovoltaic module using. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 53-61.  
doi:10.1016/j.nrjag.2014.04.001
- Hagan, M., Demuth, H., & De Jesús, O. (2002, Septiembre 3). An Introduction to the use of neural networks in control systems. *Robust and Nonlinear Control*, XII(11), 959-985.  
doi:10.1002/727
- Hernández, E. (2020, Junio 14). *Solar Fotovoltaico*. Retrieved febrero 9, 2020, from Solar Fotovoltaico: <https://solar-fotovoltaico.com/componentes/panel-solar/>
- IBM Corporation. (n.d.). *IBM Documentation*. Retrieved Noviembre 9, 2020, from IBM Documentation: <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/SaaS?topic=networks-neural-model>
- Kasper, M., Bortis, D., & Kolar, J. (2014). Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC-DC Converter Concepts. *IEEE Transactions on Power Electronics*, XXIX(5), 2511-2526.
- Ko, J.-S., Huh, J.-H., & Kim, J.-C. (2020, Mayo). Overview of Maximum Power Point Tracking Methods for PV System in Micro Grid. *MDPI Electronics*. doi:10.3390/electronics905081
- López, M. C. (2019). *Desarrollo de un convertidor elevador para un aerogenerados de 2.5 kW conectado a red*. Universidad de Madrid, Especialidad Electrónica, España.
- Martínez, O. (2015). *Control por Modo Deslizante*. La Habana: Facultad de Ingeniería Eléctrica.

- Mathworks. (2017a). Neural Net Fitting Toolbox User's Guide (r2017a). Retrieved Diciembre 3, 2020, from [https://la.mathworks.com/help/releases/R2017a/pdf\\_doc/nnet/rn.pdf](https://la.mathworks.com/help/releases/R2017a/pdf_doc/nnet/rn.pdf)
- Messalti, S., Harrag, A. G., & Elhamid, A. (2015). A New Neural Networks MPPT controller for PV Systems. *International Renewable Energy Congress (IREC)*.
- Neha, A. (2015, Marzo). Computational studies of charge transfer in organic solar photovoltaic cells: A review. *Science Direct, XVIII*, 18-31.
- Peñas, M. (2018). *Evaluacion de estrategias se seguimiento del punto de maxima potencia para sistemas fotovoltaicos con Matlab/Simulink*. Tesis de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Ingeniería Electrica y Electrónica , Madrid.
- Ramakrishna, B., Srikanth, T., Naga, B., & Vijay, T. (2019). Comparative Analysis of Perturb and Observe Method and Current Based Method. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), VIII(6)*, 2278-3075.
- Ramos, J. A. (2017). *Optimización de Modelos de Módulos Fotovoltaicos y del Control del MPPT*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica, España.
- Ramos, J., Lopez, J., Ekaitz, Z., & Barambones, O. (2017). Novel control algorithm for MPPT with Boost converters in photovoltaic systems. *ScienceDirect*, 1-25.
- Rezk, H., & Eltamaly, A. (2015). A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. *Solar Energy(112)*, 1-11.

- Saleh, A., Azmi, F., & Hardianto, T. (2018). Comparison of MPPT Fuzzy Logic Controller Based on Perturb and Observe (P&O) and Incremental Conductance (InC) Algorithm On Buck-Boost Converter. *Electrical Engineering and Informatics EEI*, 154-158.
- Shadmand, M., Mosa, M., Balog, R., & Haitham, A. (2014). An improved MPPT technique for high gain DC-DC converter using model predictive control for photovoltaic applications. *IEEE*, 2993-2999. doi:10.1109/APEC.2014.6803730
- Shadmand, M., Mosa, M., Balog, R., & Haitham, A. (2015). *Maximum Power Point Tracking of Grid Connected Photovoltaic System Employing Model Predictive Control*. Texas: IEEE.
- Shazly, M., & Montaser, S. (2019). A comparative study of P&O and INC maximum power point tracking techniques for grid-connected PV systems. *Springer Nature Journal*.
- SolarHub. (n.d.). *SolarHub*. Retrieved Octobre 29, 2020, from SolarHub: <http://www.solarhub.com/product-catalog/pv-modules/5623-1STH-215-P-1Soltech>
- Xuan, H., & Minh, P. (2015). Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, IV(24). doi:10.1186/s40068-015-0047-9

