



REVISIÓN DE ALGORITMO PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA DE UN PANEL SOLAR

MODALIDAD DE SEMINARIO TALLER

ALEJANDRO JUNIOR FUENTES TINOCO -1216971535
RUBEN DARIO LOPEZ REYES -1098720293

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
TECNOLOGÍA EN ELECTRICIDAD INDUSTRIAL
BUCARAMANGA (03- 07- 2021)**



REVISIÓN DE ALGORITMO PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA
POTENCIA DE UN PANEL SOLAR

MODALIDAD DE SEMINARIO TALLER

ALEJANDRO JUNIOR FUENTES TINOCO – 1216971535

RUBEN DARIO LOPEZ REYES – 1098720293

Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en electricidad industrial

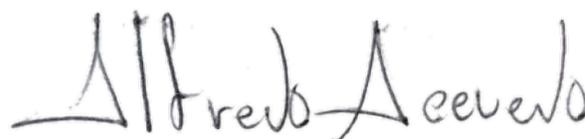
DIRECTOR

ALONSO DE JESUS RETAMOSO LLAMAS

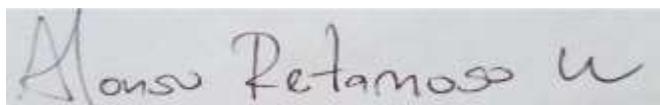
UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
TECNOLOGÍA EN ELECTRICIDAD INDUSTRIAL
BUCARAMANGA 03- 07- 2021

Nota de Aceptación

Aprobado



Firma del Evaluador



Firma del director

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por ayudarme a tomar siempre las mejores decisiones e iluminarme los caminos que debía tomar.

A mi familia por el constante apoyo brindado durante este ciclo tan importante para mí vida personal y profesional ya que se convirtieron en mi fuente de inspiración para llegar a las metas proyectadas.

Rubén Darío López Reyes

Principalmente dedico este escrito a Dios por la salud y la vida.

A mis padres (Alejandro Fuentes Rodríguez y Nolvis Navarro) por la confianza depositada en mí, por su total apoyo y acompañamiento en esta etapa de mi vida, que no ha sido fácil, pero sin ello hubiese sido más complicado lograrlo.

Alejandro Junior Fuentes Tinoco

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a todos los profesores y tutores del programa de tecnología en electricidad industrial de las Unidades Tecnológicas de Santander por brindarnos sus conocimientos y experiencias en pro de que podamos desempeñarnos eficientemente en nuestras vidas profesionales.

A sí mismo, a nuestro docente director Alfredo Rafael Acevedo Picón por su paciencia, por guiarnos y orientarnos con sus conocimientos para el desarrollo del presente trabajo.

A nuestros familiares y compañeros de estudio que hicieron parte y nos acompañaron durante todo el proceso de alcanzar nuestro título profesional

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	10
<u>INTRODUCCIÓN</u>	11
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 JUSTIFICACIÓN	17
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ESTADO DEL ARTE	20
<u>2. MARCO REFERENCIAL</u>	23
2.1 MARCO LEGAL	23
2.1.1 LEY 1715 DE 2014.	23
2.1.2 NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2050.	23
<u>3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</u>	24
3.1 FASES	24
3.2 MUESTRA	26
<u>4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	27
4.1 PUNTOS DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EN PANELES SOLARES Y LOS TIPOS DE ALGORITMOS DE MÁS COMUNES.	27
4.2 PUBLICACIONES QUE HABLEN SOBRE LOS ALGORITMOS DE LOS PUNTOS DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EN PANELES SOLARES.	31
<u>5. RESULTADOS</u>	36

5.1 ANÁLISIS DE LOS PUNTOS MÁS RELEVANTES DE LOS ALGORITMOS DE LOS PUNTOS DE MÁXIMA POTENCIA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EN PANELES SOLARES EN BASE A LOS DOCUMENTOS CONSULTADOS.	36
6. CONCLUSIONES	39
7. RECOMENDACIONES	42
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Punto de Máxima Potencia (MPP).	27
Figura 2. Punto de potencia máxima.	28
Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.	32
Figura 4. Diagrama de flujo del Algoritmo de Conductancia Incremental.	33
Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo red neuronal artificial en sobre parcial.	34

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cuadro comparativo entre los tipos de algoritmos MPPT.	36

RESUMEN EJECUTIVO

Los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en los días actuales se han caracterizado porque ayudan a la disminución del número de componentes electrónicos necesarios en una placa, así como en la obtención de rendimientos MPPT altos aprovechando las radiaciones solares, al igual que la reducción en pérdidas de control porque es menor la potencia que se disipa. En este sentido, el presente trabajo tuvo como objetivo general presentar un estado del arte con base en publicaciones sobre los algoritmos existentes para el MPPT en sistemas de generación en paneles solares. La metodología seguida para realizar el proyecto fue de enfoque cualitativo y de tipo descriptivo, en donde se utilizaron técnicas de investigación documental en una muestra de cinco publicaciones que hablarán sobre los tipos de algoritmos de MPPT. A modo de conclusión, se tuvo que uno de los más representativos es el método perturbar y observar, el cual se caracteriza por ser robusto y fácil de implementar pues solo lleva un operador matemático para obtener la potencia, dos comparadores y dos registros. El otro algoritmo más usado es el de conducción incremental, el cual, al contrario del algoritmo de perturbar y observar, la tensión se mantiene persistente una vez logrado el punto de máxima potencia (MPP). Y por último se estudió, el algoritmo de Redes Neuronales Artificiales de sombreado parcial, el cual es de gran utilidad en la medida que utiliza una tecnología basada en los Globales del Punto de Máxima Potencia (GMPPT).

PALABRAS CLAVE. Métodos, máxima potencia, algoritmos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de energía eléctrica es fundamental para la realización de las principales tareas laborales, familiares y de sociedad en toda comunidad, debido a ello, han sido muchas las iniciativas que se han buscado para que se de este recurso de la energía, pasando por las fuentes no renovables como minerales fósiles hasta recursos más modernos como la energía proveniente del sol.

Sobre la energía fotovoltaica, como también es llamada esa que proviene del sol, se puede decir que es aquella variación directa de la radiación solar en electricidad, la cual se desarrolla en unos instrumentos conocidos como paneles fotovoltaicos, en dichos dispositivos la radiación solar excita los electrones de un semiconductor dándose una diminuta diferencia de potencial, pero al darse una conexión consecutiva de estos artefactos, se obtiene unas diferencias de potencial mayores (Appa renovable, 2020, p.2).

En este mismo orden de ideas, autores como Estévez & Ortiz (2018), dan puntos positivos en relación con la energía fotovoltaica, en la medida que expresan que “esta presenta ventajas sencillas, claras y con operatividad, lo que hace que este tipo de herramientas tengan una vida útil larga, aproximadamente hasta cuarenta años, pues sus instalaciones al igual que los elementos auxiliares, las cajas, las canalizaciones y las conexiones, son de gran duración” (p.91).

Entendido todo lo anterior, un tema que es muy importante en todo este mundo de la energía solar, son las celdas fotovoltaicas, las cuales, según Almanza, García & García (2019), especifican que “poseen curvas características $V - I$ que definen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación” (p.2).

En este sentido, el punto de máxima potencia (de ahora en adelante MPP), juega un papel muy relevante, ya que es “el producto del voltaje en el punto máximo (VMPP) y corriente en el punto máximo (IMPP) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (PMPP). El punto de máxima potencia varía continuamente, ya que depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia” (Ruiz, Beristaín, Sosa & Hernández, 2010, p. 17).

Nombrado lo anterior, los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (de ahora en adelante MPPT) se usan en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía dada por ellos, ese seguimiento se efectúa cambiando el valor de ciclo útil de un convertidor de potencia. Para Chantres, Abreus & Martínez (2018), los algoritmos MPPT, “en la actualidad son útiles debido a que ayudan a la disminución del número de componentes electrónicos para ahorrar en placa, componentes y encapsulado, así como al logro de rendimientos MPPT mayores.

Aprovechando las radiaciones solares, al igual que a la reducción en pérdidas de control porque es menor la potencia que se disipa” (p.21).

En relación con lo expresado, el presente trabajo busca desarrollar un estudio de estado del arte sobre los algoritmos MPPT de un panel solar, para ello se realizará un estudio teórico donde se tomarán artículos científicos para su análisis. Vale decir que este escrito servirá como forma de consulta y ayuda a la comunidad académica en el sentido que puede tomar información actual del tema de MPPT. Así mismo se detalla la importancia de la energía fotovoltaica, ya que es de gran utilidad para la humanidad, debido a que se ha convertido en una iniciativa poco costosa, adicionalmente es renovable, caracterizada por ser una energía ilimitada y limpia, ya que no produce subproductos peligrosos para el medio ambiente y mucho menos gases de efecto invernadero.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La energía fotovoltaica ha surgido como esa realidad que busca hallar nuevas formas de ayuda al planeta, al igual que obtener fuentes energéticas más limpias. De allí que esta se constituye en una “fuente de energía renovable, la cual puede usarse en la generación de electricidad por medio de paneles solares fotovoltaicos que convierten la radiación solar en electricidad, haciéndola aplicable a múltiples tareas de la vida diaria” (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019, p.24).

Sobre las celdas fotovoltaicas, se debe decir que “son dispositivos contruidos por metales sensibles a la luz que desprenden electrones cuando los rayos de luz inciden sobre ellos, lo cual desarrolla energía eléctrica. Dichas celdas, están hechas con base en el silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, las cuales las hacen capaces de generar cada una de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0.46 a 0.48 Voltios” (Arancibia & Best, 2016, p.12).

En este orden de ideas, un punto fundamental en este mundo de la energía fotovoltaica es el entender cómo estos se “acoplan a un inversor de voltaje, los cuales son los responsable de convertir la corriente continua en corriente alterna, con la finalidad de usarse en los hogares o sitios de trabajo, en los cuales se usa corriente alterna” (Planas, 2016, p.2). Entonces para que el acople se pueda llevar

a cabo, se debe contar con un sistema de almacenamiento para carga, debido a que la energía proveniente del sol no es constante, por lo que se debe almacenar en los momentos que haya ausencia de luz.

En este orden de ideas, se debe contar entonces con un controlador de carga, el cual, en este tipo de energía solar, es mayormente utilizado en los llamados algoritmos MPPT, los cuales tienen la finalidad de encontrar el punto de operación de dicho panel, fundamentados en las condiciones del entorno. Es así como los “circuitos de control de seguimiento punto de máxima potencia son ideales para encontrar un punto en el que la fuente de energía (PV) funcione de una forma más ideal, en donde se dé un poco de pérdida de energía, para finalmente seguir a la carga de las baterías” (Bastidas, Franco, Petrone, Ramos & Spagnuolo, 2014, p.1397).

Dentro de las funciones que tiene un algoritmo MPPT, según Gómez, Betancur, Carvajal, Cortes, Gómez & Guerrero (2019), es “buscar de manera automática el voltaje en el cual un arreglo fotovoltaico opera dando la máxima potencia bajo condiciones de temperatura e irradiancia establecidas, debido a que bajo circunstancias en que se den sombras transitorias se pueden desarrollar distintos puntos donde se ubican estos niveles máximos” (p.6).

Expresado lo anterior, este tema de los algoritmos MPPT, es un concepto de gran relevancia para las personas que trabajen con este tipo de energía solar, por

ello y viendo las dificultades al momento que se presenta el estudio de este, el presente trabajo quiere surgir como esa forma de conocer más a fondo, todo lo que tiene que ver con MPPT y sus algoritmos, debido a que en algunos estudiantes en formación de tecnólogos en electricidad industrial y aquellos profesionales que ya laboran, se presenta desconocimiento de esta temática. Por ello es muy importante entender cómo los algoritmos MPPT ayudan al óptimo funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos y cuáles son las tecnologías utilizadas en estos días.

Debido a ello, el presente trabajo formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Según el estudio del estado del arte en investigaciones actuales, cuáles son los puntos más relevantes de los algoritmos de MPPT de un panel solar?

1.2 JUSTIFICACIÓN

En naciones como Colombia y en gran parte del mundo, durante las últimas décadas, han sido muy importantes los diferentes estudios que “busquen hallar iniciativas renovables que logren hacer peso a la gran demanda de energía eléctrica que se consume en diferentes hogares, fuentes de trabajo y demás actividades diarias propias del ser humano” (Plan Nacional Energético, 2015, p.8).

Una de estas que ha llevado la bandera como iniciativa que no daña al planeta y ayuda al no desarrollo del efecto invernadero es la llamada energía fotovoltaica, “la cual se ha convertido en un tema de mucho análisis para los estudiosos de las fuentes de energía debido a las tecnologías que utiliza en sus paneles solares como los son los controladores de carga, los cuales utilizan un algoritmo MPPT, para encargarse de encontrar el mejor punto de operación de la fuente” (Barrera & Castilla, 2018,13).

En este sentido, se puede decir que la energía fotovoltaica es “esa energía que desarrolla electricidad de fuentes renovables dada la radiación solar por medio de un dispositivo semiconductor llamado célula fotovoltaica” (Aguilar, Aledo & Quiles, 201, p.3). De allí que, durante las últimas décadas, “los sistemas fotovoltaicos se han transformado en esa manera de forma de energía eléctrica efectiva, particularmente en sitios con buena radiación debido a que su instalación

es fácil, así como su mantenimiento es de bajo costo, lo que ayuda a que estos sistemas sean utilizados con mucha frecuencia” (Abella, 2016, p.2).

Dentro de este universo que es la energía fotovoltaica, es muy relevante decir que para que esta se dé, es necesario el llamado efecto fotoeléctrico, el cual es ese fenómeno físico, desarrollado en los fotodetectores de comunicaciones ópticas (López, 2017, p.8).

Teniendo presente, los conceptos anteriores, la importancia que representa este trabajo, dentro del contexto académico, es en primera medida, conocer mediante estudios modernos, la relevancia de los algoritmos MTTP y su importancia para mantener el sistema fotovoltaico funcionando en condiciones variables tales como el cambio en la temperatura, la carga y la irradiancia solar.

En segunda instancia, es desarrollar un estudio de contenido de bases de datos científicas en revistas especializadas en temas de algoritmos de MPPT, tomando particularmente cinco documentos, con los cuales se dé un análisis que ayude a entender su importancia, con lo cual los estudiosos de este tipo de energía renovable, incluyendo en ellos a los estudiantes de tecnología en electricidad industrial, puedan tener bases teóricas al momento de la utilización de estas iniciativas, y le sirvan para desenvolverse mejor en sus futuros trabajos o para realizar asesorías en este campo de la energía fotovoltaica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar un estado del arte con base en publicaciones sobre los algoritmos existentes para el seguimiento del punto de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares y los tipos de algoritmos MPPT más comunes.
2. Identificar publicaciones que hablen sobre los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares.
3. Describir los puntos más relevantes de los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares con base en los documentos consultados.

1.4 ESTADO DEL ARTE

En el contexto internacional, se puede nombrar el estudio titulado “Estudio comparativo de distintas estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico”, realizado en el país de España, por el autor Benito (2020), en el cual se detallan algunas definiciones relevantes sobre los algoritmos MPPT, más utilizados en la actualidad, por ello exponen que uno con las mejores características es el algoritmo para sombreado parcial, ya que este ha desarrollado una tecnología basada en detectar la existencia del sombreado parcial y localizar el punto real de máxima potencia, dicho método es conocido como seguidores Globales del Punto de Máxima Potencia (GMPPT), que se fundamenta en inteligencia artificial por medio de algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales (Benito, 2020, p.35).

Otra investigación internacional, es la llamada “Detección de sombreado parcial y algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia global para energía fotovoltaica con la variación de la irradiación y la temperatura”, en este estudio se nombra que cuando se produce un sombreado parcial del entorno, su sombra incidente disminuye la irradiación y reduce la energía generada. Dado que los métodos convencionales de MPPT no pudieron distinguir la potencia máxima global de la curva característica potencia-voltaje (PV), es necesario desarrollar un

nuevo método como lo son los algoritmos de sombreado parcial (Fujita & Gosumbonggot, 2019).

En esta investigación se propone un método de MTTP global que utiliza la detección de sombreado y la tendencia de las pendientes de cada sección de la curva. Para detallar la funcionalidad de dicho algoritmo, se realizan simulaciones basadas en datos meteorológicos reales tanto en estudios a corto como a largo plazo, estos resultados de la simulación muestran un resultado de seguimiento preciso y el sistema puede mejorar la energía total generada en un 8,55% en comparación con el método de exploración convencional.

En este mismo orden de ideas, la investigación “Un algoritmo MPPT global para el sistema fotovoltaico existente que mitiga las condiciones de funcionamiento subóptimas”, expone cómo el algoritmo de sombreado parcial, se desarrolla con base en dos pasos para rastrear el MPP global de una cadena fotovoltaica, implementado en un inversor de conexión a red de 3 kW, el cual originalmente usa el algoritmo P&O, (algoritmo de perturbación y observación) pero a diferencia de éste, el de sombreado parcial permite al inversor tener la capacidad de rastrear el GMPP, lo cual se ratifica en una prueba de campo donde se demostró su mayor capacidad con respecto al P&O, al extraer un 35% más de energía(Chung, H., Chuang, S., Tse, N & Yeung, 2017, p.158).

A nivel Colombia, se puede traer a escena el estudio “Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos”, desarrollado por Díaz, Mejía & Torres (2016), el cual tuvo como finalidad desarrollar un escrito sobre utilización de diferentes técnicas para algoritmos MPPT.

Para ello, se efectuaron los análisis computacionales y teóricos para identificar las funciones de comportamiento de los d las técnicas de MPPT. Dicho estudio arrojó que el método de algoritmo conductancia incremental plantea unos buenos resultados en el reporte de temperatura de radiación, lo que lo hace mejor que el algoritmos Perturbación & Observación, en donde son constante algunos errores (Díaz, Mejía & Torres, 2016, p.49).

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 MARCO LEGAL

2.1.1 Ley 1715 de 2014.

Dicha ley tiene como finalidad el uso y desarrollo de las Fuentes No Convencionales de Energía, particularmente en esas que se caractericen por ser renovables en el territorio colombiano (Ley 1715,2014).

2.1.2 Norma técnica colombiana 2050.

Esta tiene como objetivo salvaguardar a los bienes y a las personas en contra de riesgos por la manipulación de electricidad. Así como el cumplimiento de parámetros para una práctica libre de riesgos en esta profesión de la electricidad. (NTC, 1998).

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el caso específico de este trabajo tiene un enfoque cualitativo y de tipo descriptivo. Sobre lo que es una investigación cualitativa, autores como Rodríguez, Gil & García (1996), afirman que los “trabajos cualitativos son esos diseños de investigación que extraen descripciones por medio de observaciones que adoptan la forma de entrevistas, narraciones, notas de campo, registros escritos y grabaciones, para con ellos dar una posición y un análisis” (p.40). En referencia al trabajo a desarrollar se toma este enfoque cualitativo, ya que se hará un análisis sobre los documentos consultados sobre MPPT y los algoritmos, de los cuales se extrae una idea central acerca de su relevancia y empleo en el entorno práctico.

Sobre el método a utilizar este será de análisis, pues se tomarán los documentos consultados en la revisión bibliográfica, y se hará un estudio a profundidad de ellos, para seguidamente agrupar conceptos y dar una idea final en torno a los algoritmos MPPT.

3.1 FASES

Fase inicial. En este punto se comenzará con el desarrollo de la primera actividad, la cual consiste en la realización de los aspectos teóricos del trabajo, en referencia a que es la energía solar y su relevancia, para posteriormente llegar al tema de los algoritmos MPPT, después de ello, se dará solución al primer objetivo

de este trabajo, el cual consiste en la descripción de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares y los tipos de algoritmos más comunes, para ello se hará un resumen de la información encontrada en bases de datos científicas y se tomará la más relevante. Este punto se realizará bajo la técnica de investigación documental.

Seguidamente, se efectuará la segunda actividad y con ello el segundo objetivo general, el cual es describir la importancia de cinco publicaciones que hablen sobre los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares, estos serán tomados nuevamente de bases científicas, los cuales se hayan desarrollada dentro de los últimos cinco años. Este apartado también se realizará basado en la técnica documental.

Fase de análisis de la información. En este punto se desarrollará la tercera actividad, la cual es el tercer objetivo de este trabajo, es decir analizar los puntos más relevantes de los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares con base en los documentos consultados, esta información será tomada después de sacar mediante un cuadro de comparación los puntos más sobresaliente de las cinco publicaciones tomadas como muestra. Vale decir que se utilizará la técnica de análisis documental, es decir se darán unas conclusiones desde una perspectiva científica sobre lo consultado.

Fase final e informe. Como cuarta y última actividad, se mostrarán los resultados y las conclusiones del trabajo hecho, y se dará su respectiva publicación en relación a los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares y MPPT.

3.2 MUESTRA

Se realizará una consulta sistematizada teniendo en cuenta la búsqueda manual en revistas científicas, libros, listas de referencias y citaciones, registros de estudios en curso, así como datos bibliográficos electrónicos. La búsqueda se realizará usando palabras claves como: energía solar. Esta será limitada a artículos publicados entre el 2010 y el 2021.

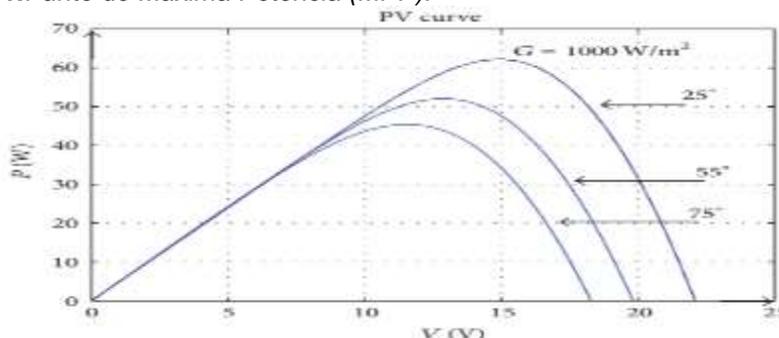
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

En este apartado se desarrollarán los objetivos planteados en este trabajo, en donde se buscará inicialmente dar un entendimiento de lo que son los puntos máximos de potencia hasta llegar a comprender la relevancia de los algoritmos y cuáles son los más utilizados.

4.1 Puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares y los tipos de algoritmos más comunes.

Inicialmente se puede decir que los paneles solares tienen una respuesta en tensión o intensidad, altamente dependiente de algunas variables de entrada, particularmente la radiación solar y la temperatura. De acuerdo con estas condiciones, solo existe un MPP para cada valor de radiación (G) y de Temperatura (T) (Ver figura 1).

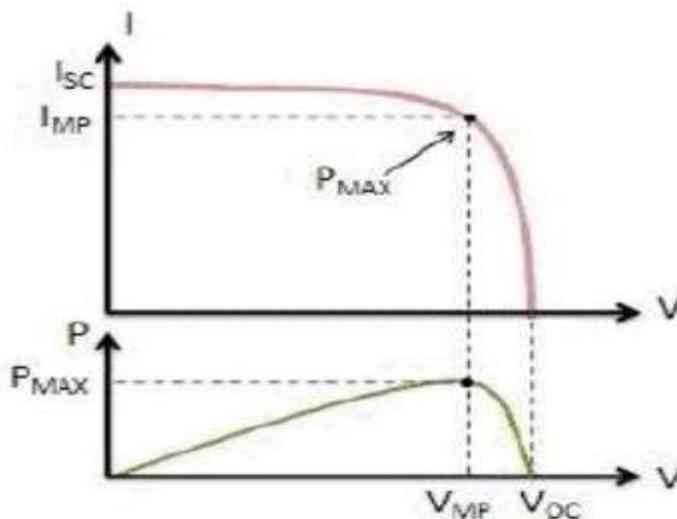
Figura 1. Punto de Máxima Potencia (MPP).



Nota: Tomado de Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares (p.23), por Cuellar, 2019.

Teniendo presente la anterior figura, se detalla que los paneles solares suelen tener curvas características muy particulares (Ver figura 2), en la que se relacionan gráficas de los distintos puntos de operación en los cuales ocurre máxima transferencia de potencia en el panel solar. Con fundamento en estas curvas de carga, es factible desarrollar un ajuste de las condiciones de carga, teniendo presente que el voltaje y la corriente en los paneles se ve afectada por condiciones atmosféricas, se hace necesario ajustar condiciones de carga, entendiéndose este último como el convertidor conmutado CC/CC, de esta forma se puede adaptar continuamente el convertidor conmutado, de forma tal que la potencia entregada por el panel solar siempre esté al máximo.

Figura 2. Punto de potencia máxima.



Nota: Tomado de Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares (p.23), por Cuellar, 2019.

Dentro de los algoritmos MPPT más comunes se pueden nombrar: Primero, el método perturbar y observar, es comúnmente conocido como P&O, se implementó en los simuladores, vale decir que es uno de los métodos mayormente utilizados a nivel mundial, dada su sencillez y facilidad para la implementación.

Segundo, método de P&O con Perturbación de radiación solar, para implementar el algoritmo MPPT en el PSIM, se usa un módulo de código en lenguaje C, que el mismo software trae implementado y que permite que, las señales se conviertan en variables, se realice el procedimiento necesario y se regrese a través de las salidas del módulo el valor deseado de V_{ref} . (Algoritmo MMT, 2020)

Para otros autores como Ruiz, Beristáin, Sosa & Hernández (2010), los algoritmos de MPPT, se “utilizan en sistemas fotovoltaicos para maximizar la energía entregada por los mismos, dicho seguimiento se realiza básicamente variando el valor de ciclo útil de un convertidor de potencia” (p.20). En este orden de ideas, exponen que existen gran variedad de algoritmos de MPPT como, por ejemplo: el de redes neuronales artificiales, el de perturbar y observar, los de conducta incremental, todos estos poseen características particulares las cuales varían dependiendo su complejidad, efectividad y costo.

Por otro lado, Rocha (2019), especifica que en “el punto de máxima potencia, se utiliza un controlador denominado seguidor de punto de máxima potencia

(MPPT). El MPPT opera en conjunto con un convertidor DC-DC, que se utiliza para acoplar las impedancias de la carga y el arreglo” (p.6).

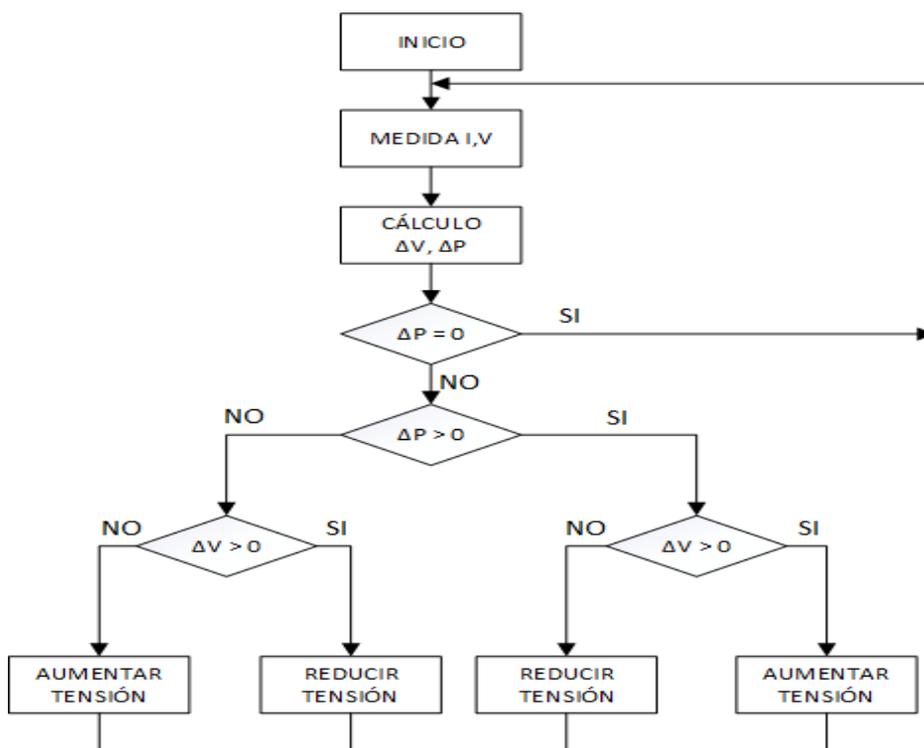
Para el acople de impedancias el MPPT debe disponer de un método en el cual se cambie el ciclo de labor del convertidor, de modo tal que el voltaje del arreglo fotovoltaico corresponda al punto de máxima potencia. El método mediante el cual se ajusta la operación se denomina algoritmo de MPPT. Actualmente, “existen distintos algoritmos de MPPT con diferentes restricciones de operación entre los cuales sobresale el algoritmo de *Perturb and Observe* (P&O); pero igualmente, existen otros métodos como el basado en potencia incremental, o el de redes neuronales artificiales” (Rizzo & Scelba, 2015, p.127).

4.2 Publicaciones que hablen sobre los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares.

Sobre las publicaciones que se han desarrollado, las cuales pueden dar una idea de lo que son los tipos de algoritmos de MPPT, se puede traer a escena la titulada “estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar”, desarrollado por los autores Ruiz, Beristaín, Sosa & Hernández (2010), en ella se expone por ejemplo que “el algoritmo perturbar y observar (P & O), el cual se basa en el siguiente criterio: si el voltaje de operación, V_{pv} , del arreglo fotovoltaico se perturba en cierta dirección y la potencia extraída

del mismo se incrementa significa que el punto de operación se ha movido hacia el MPP” (p.20) (Ver figura 3).

Figura 3. Diagrama de flujo del algoritmo P&O.



Nota: Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar (p.20), por Ruiz, Beristaín, Sosa & Hernández, 2010.

Otra manera de expresar de manera sencilla el comportamiento del algoritmo es mediante las siguientes leyes de control:

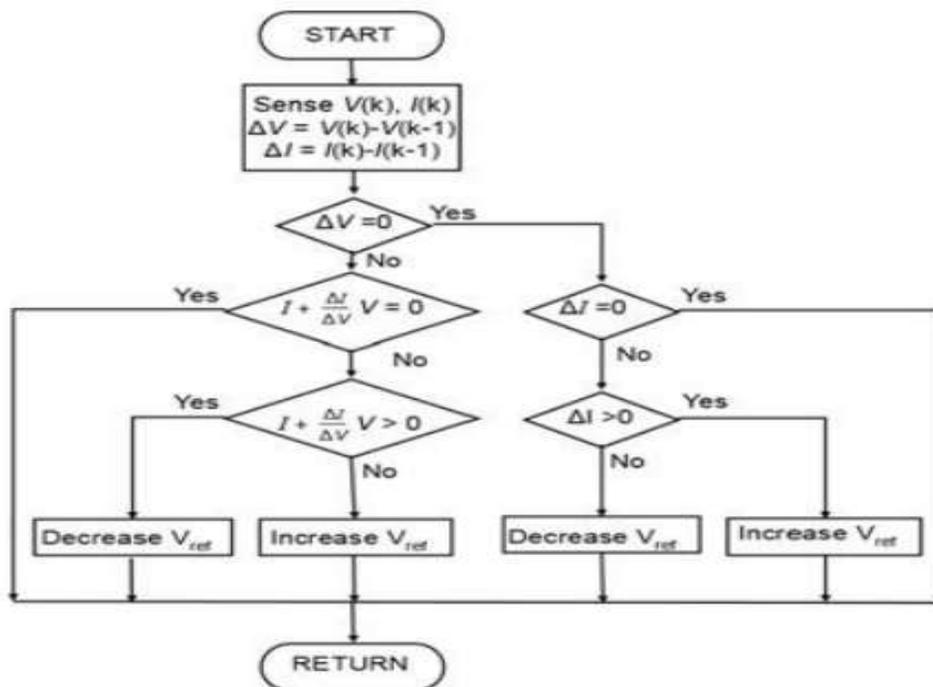
$$\Delta V \cdot \Delta P > 0 \rightarrow \text{Aumentar la tensión } V_{t+1} = V_t + V_{step}$$

$$\Delta V \cdot \Delta P < 0 \rightarrow \text{Disminuir la tensión } V_{t+1} = V_t - V_{step}$$

En otro estudio titulado “diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares”, del autor Cuellar (2019), se habla sobre “el método de conductancia incremental, el cual se basa en medir y comparar los cambios de la intensidad respecto de la tensión del convertidor” (p.59), es decir el cambio de conductancia de la siguiente manera: $dP/dV = d(IV)/dV = I + dI/dV$
*V

El comportamiento y el criterio principal se pueden detallar en la figura 4, mediante su diagrama de flujo, donde se aprecian sus funciones principales.

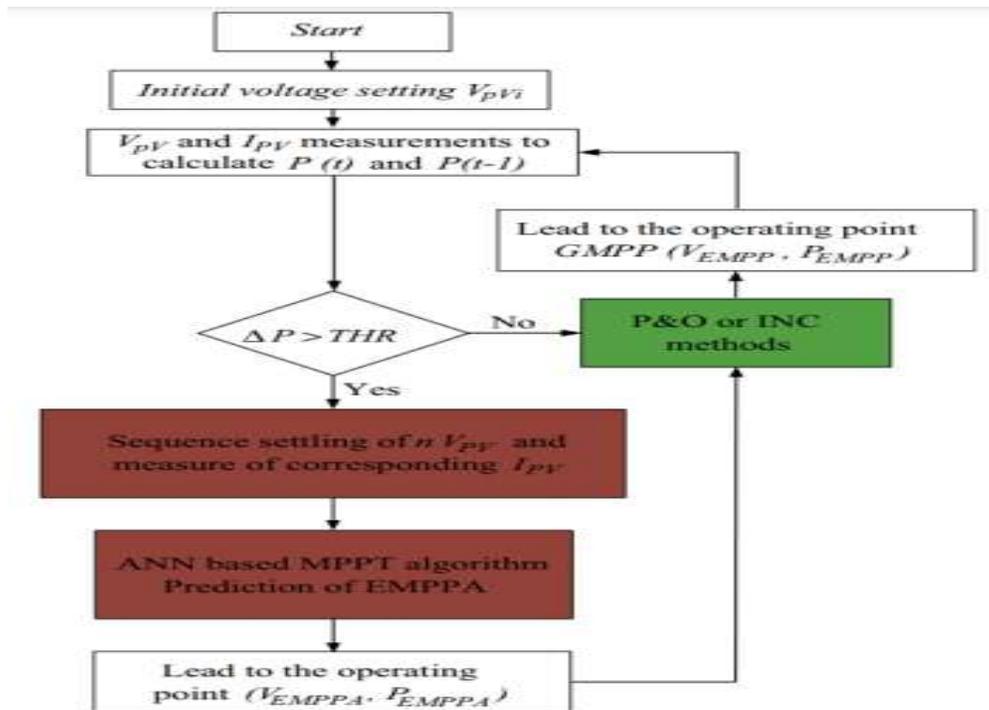
Figura 4. Diagrama de flujo del Algoritmo de Conductancia Incremental.



Nota: Diseño de un controlador para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares, (p.59), por Cuellar (2019), <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/16519/2019jairocuellar1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Finalmente, es bueno traer a colación la investigación titulada “Estudio comparativo de distintas estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico”, desarrollado por Benito (2019), en donde se especifica “el algoritmo de redes de neuronas artificiales con sombreado parcial”(p.21), el cual fue realizado por Rizzo & Scelba (2015), dichos autores explican que este algoritmo depende de cómo varían una serie de mediciones de potencia realizadas en intervalos fijos de tiempo (Ver figura 5).

Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo red neuronal artificial en sobre parcial.



Nota: Diseño de un nuevo algoritmo de GMPPT para paneles solares en condición de sombra (p.8), por Rocha, N. 2019.

Si la variación de potencia es mayor a un umbral preestablecido, se realizan mediciones adicionales que serán las entradas de la red neuronal artificial. Si la red neuronal es utilizada, esta dará como resultado un punto de operación cercano al GMPP. El valor estimado será ajustado mediante un algoritmo de MPPT como P&O, que también será empleado cuando la variación de potencia no supere el umbral (Benito, 2019, p.22).

5. RESULTADOS

5.1 Análisis de los puntos más relevantes de los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares con base en los documentos consultados.

Para la realización de un análisis sobre los aspectos más importantes de los algoritmos de MPPT, visto en los puntos anteriores de este trabajo, se hará un cuadro comparativo entre ellos, en donde se busque ver sus conceptos, su importancia y la tecnología utilizada (Ver tabla 1).

Tabla 1. Cuadro comparativo entre los tipos de algoritmos MPPT.

Cuadro comparativo entre los tipos de algoritmos MPPT						
Nombre	Concepto	Fórmula	Importancia	Tecnología que utiliza	Complejidad de implementación	Puntos desfavorables
Algoritmo perturbar y observar (P & O)	Este método se basa en la constante modificación del voltaje de operación en función de la variación de la potencia medida.	$\Delta V = V_t - V_{t-1}$ $\Delta P = P_t - P_{t-1}$	El método aprovecha la curva de potencia (curva PV) del arreglo fotovoltaico para localizar el MPP, es decir el P&O funciona como un algoritmo de ascenso de colina sobre la curva PV del panel.	Se usa un convertidor CC-CC SEPIC	Baja	Su mal funcionamiento en condiciones de sombreado parcial. Esto se debe a que la curva PV presenta varios máximos bajo estas condiciones y el algoritmo no es capaz de diferenciar cuál de dichos máximos es el absoluto, pudiendo converger a máximos locales distintos al MPP.
	Se utiliza para determinar si se debe aumentar o disminuir la tensión, se utilizan como variables de control el incremento de tensión y de potencia.	Donde V_t y P_t son respectivamente la tensión y potencia correspondientes a la toma de datos actual (o ciclo de trabajo actual) y V_{t-1} y P_{t-1} las de la toma o ciclo de trabajo anterior.	Es uno de los más sencillos, por lo cual es el utilizado en la actualidad			

Algoritmo de Conductancia Incremental I.

Se basa en medir y comparar los cambios de la intensidad respecto de la tensión del convertidor.

El objetivo del algoritmo es trabajar en un punto en el cual la derivada de la potencia se anule, significando que el punto de trabajo se sitúa en el máximo de la curva de potencia P-V curva de potencia P-V.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \approx I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

Se busca anular la pendiente de la curva P-V mostrada en la ecuación, modificando el valor de la tensión del módulo en función de dicha pendiente.

El algoritmo calcula en cada momento la dirección hacia donde modificar el punto de trabajo del generador fotovoltaico para aproximarlos al MPP, y determina cuándo se ha alcanzado.

Para cambios atmosféricos rápidos no tomará una dirección errónea y no oscila en torno al MPP una vez alcanzado

Coloca la conductancia instantánea y la conductancia incremental en un sistema FV.

Media

El algoritmo de conductancia incremental trabaja mal bajo condiciones de sombreado parcial, al no poder distinguir el máximo absoluto de la curva PV.

**Redes
Neuronales
Artificiales
de
sombreado
parcial**

Utilizan redes neuronales artificiales para estimar el GMPP cuando se presenta la condición de sombra parcial. El algoritmo depende de cómo varían una serie de mediciones de potencia realizadas en intervalos fijos de tiempo. Si la variación de potencia es mayor a un umbral preestablecido, se realizan mediciones adicionales que serían las entradas de la red neuronal artificial.

Si la red neuronal es utilizada, esta dará como resultado un punto de operación cercano al GMPP. El valor estimado será ajustado mediante un algoritmo de MPPT como P&O, que también será utilizado cuando la variación de potencia no supere el umbral.

Es novedosa en el sentido que utiliza redes neuronales artificiales para estimar el GMPPT. El uso de la red neuronal le permite al algoritmo un alto nivel de precisión, siempre y cuando se haya hecho un entrenamiento correcto de la red.

Redes neuronales artificiales

Alta

Dificultad de implementación

Nota: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Desarrollado los puntos de este trabajo, y en búsqueda del desarrollo del primer objetivo específico, el cual es describir qué son los MPP en paneles solares y los tipos de algoritmos más comunes, se entendió inicialmente que el punto de máxima potencia utiliza un controlador denominado seguidor de punto de máxima potencia (MPPT), el cual opera en conjunto con un convertidor DC-DC, que se utiliza para acoplar las impedancias de la carga y el arreglo.

En lo que tuvo que ver con el segundo objetivo específico, el cual tenía por definición, detallar publicaciones que hablen sobre los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares, autores como Benito (2019), especifican que existen distintos algoritmos de MPPT con diferentes restricciones de operación entre los cuales sobresale el algoritmo de Perturb and Observe (P&O), el de potencia incremental y el de redes neuronales artificiales, desarrollado este último por Rizzo & Scelba (2015).

Por otro lado, y en relación con el desarrollo del tercer objetivo, el cual es analizar los puntos más relevantes de los algoritmos de los puntos de máxima potencia en sistemas de generación en paneles solares con base en los documentos consultados, se pudo referenciar como el método P & Q, es el más utilizado, pues es un algoritmo el cual es continuo, robusto y fácil de implementar

pues solo lleva un operador matemático para obtener la potencia, dos comparadores y dos registros.

El sistema inicialmente arranca y solicita las mediciones de voltaje y corriente para hallar la potencia, luego verifica si es cero porque puede ser que se encuentre desde el inicio en el MPP, en caso contrario se comienza a estimar a partir de la misma potencia y del voltaje, incrementando o disminuyendo el ciclo de trabajo del convertidor según sea la respuesta de la variación de potencia y de lavación de voltaje. Dentro de sus puntos negativos, se puede nombrar las dificultades en las variaciones de temperatura, ya que la potencia de salida alcanza valores por fuera del rango deseado, es decir el comportamiento del algoritmo no es el mejor.

En lo que tuvo que ver con algoritmo de conducción incremental, se puede decir que también es uno de los sistemas más usados para los paneles fotovoltaicos, pues sus costos no son tan elevados y su durabilidad es buena. Dentro sus especificaciones se logran detallar que la pendiente que tiene la derivada de la corriente con respecto a la tensión es utilizada para obtener MPP ($dl/dU=-I/U$), en este sentido cuando la tensión varía hacia valores menores o mayores, la potencia cambia. Así mismo, se puede decir que a diferencia de P&O, la tensión permanece igual cuando se alcanza el MPP. Dentro de sus puntos poco favorables de este algoritmo, se puede nombrar que trabaja mal bajo condiciones de sombreado parcial, al no poder distinguir el máximo absoluto de la curva PV.

Finalmente y en relación al algoritmo de Redes Neuronales Artificiales de sombreado parcial, es una nueva herramienta que hace modificaciones introducidas en este GMPPT, en lo que tiene que ver con que ha sustituido el algoritmo de Conductancia Incremental por uno de P&O; al igual que ha simplificado la metodología de detección de máximos debido a que se producían comportamientos anómalos; así como que ha modificado las tensiones de búsqueda de los distintos MPP locales para mejorar la rapidez del algoritmo.

7. RECOMENDACIONES

Es importante que en otros trabajos se estudien otros tipos de algoritmos MPPT, como Célula Piloto, Controlador Difuso y el modelo de un diodo en simulink, los cuales tienen mucha relevancia en la energía solar y son de gran utilización. Así mismo se recomienda hacer un estudio sobre los algoritmos MPPT, más utilizados en Colombia, teniendo presente el tipo de climas que se ven en diferentes regiones de Colombia.

Se recomienda también, hacer estudios en laboratorios donde se vea en la práctica el actuar de los diferentes algoritmos MTTP, para con ello sacar conclusiones más exactas de sus puntos favorables y desfavorables de cada uno de ellos. Igualmente, es bueno efectuar trabajos sobre su aplicación en empresas de Colombia que utilicen estos algoritmos para sus fuentes de energía, con lo que ayude ver, en la realidad su utilización.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abella, M. A. (2016). Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos: Otros métodos de dimensionado de sistemas FV autónomos. Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Departamento de Energía Renovables, *Ciemat*, 2-14.
http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45340/componente45338.pdf
- Aguilar, F., Aledo, S., & Quiles, P. (2016). Experimental study of the solar photovoltaic contribution for the domestic hot water production with heat pumps in dwellings. *Applied Thermal Engineering*, 101, 1-11. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.127.
- Almanza, García & García (2019). Desarrollo de un sistema para la medición de la eficiencia energética de celdas solares. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28, (1), 1-10.
- Algoritmo MMT. (2020). <https://es.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/mppt-algorithm.html>
- Appa renovable. (2020). ¿Qué es la energía fotovoltaica?
<https://www.appa.es/appa-fotovoltaica/que-es-la-energia-fotovoltaica/>
- Arancibia. C., & Best. R. (2017). Energía del sol. *Ciencia*, 10-17.
https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/pdf/energiasol.pdf

Arancibia, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica Redvet. *Electrónica de Veterinaria*, 17 (9), 1-4.

Bastidas, J., Franco, E., Petrone, G., Ramos, C., & Spagnuolo, G. (2014). Maximum power point tracking architectures for photovoltaic systems in mismatching conditions: a review, 7, 1396–1413. Doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0406>

Barrera, W. & Castilla, F. (2018). *Propuesta de un sistema fotovoltaico para consumo eléctrico en el municipio de Quebrada negra, Cundinamarca*. [Tesis de maestría Universidad Libre de Colombia]. [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15472/monograf%
c3%8da%2c%20propuesta%20de%20un%20sistema%20fotovoltaico%20par
a%20consumo%20el%c3%89ctrico%20en%20el%20municipio%20de%20q
uebra.pdf?sequence=1&isallowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15472/monograf%c3%8da%2c%20propuesta%20de%20un%20sistema%20fotovoltaico%20para%20consumo%20el%c3%89ctrico%20en%20el%20municipio%20de%20quebra.pdf?sequence=1&isallowed=y)

Benito, A. (2020). *Estudio comparativo de distintas estrategias de seguimiento del punto de máxima potencia de un generador fotovoltaico*. [Universidad Politécnica de Madrid]. http://oa.upm.es/64320/1/TFG_Alvaro_Benito_Oliva.pdf

Betancur, F., Carvajal, S., Cortes, C., Gómez, G., & Guerrero, N. (2019). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor

centralizado y con micro inversores: caso de estudio Manizales.

Tecnológicas, 23, (47), 1-21.

Chantres, J., Abreus, J., & Martínez, J. (2018). *Comparación de algoritmos MPPT aplicados a sistemas fotovoltaicos*. [Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba]

Chung, H., Chuang, S., Tse, N & Yeung, R. (2017). Un algoritmo MPPT global para el sistema fotovoltaico existente que mitiga las condiciones de funcionamiento subóptimas, *Sol. Energy*, 141, 145-158, doi: 10.1016/j.solener.2016.11.017

Estévez, J., & Ortiz, J. (2018), Identificación de los factores críticos para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia. *Dinámica ambiental*, 2(2), 90-98.

Fujita, G., & Gosumbonggot, F. (2019). Detección de sombreado parcial y algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia global para energía fotovoltaica con la variación de la irradiación y la temperatura. *Energies*, 12, (2), 202, doi: 10.3390/en12020202.

Ley 1715 (2014). Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014. https://www1.upme.gov.co/documents/cartilla_ige_incentivos_tributarios_ley1715.pdf

López, A. (2017). Análisis del Efecto Fotoeléctrico presente en Fotodetectores para Comunicaciones Ópticas.

<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/6556/tfg-lop-ana.pdf?sequence=1>

Díaz, L., Mejía, D., & Torres, I. (2016). Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos. *El Hombre y la Máquina*, 45, 44-55. <https://www.redalyc.org/pdf/478/47838946006.pdf>

Norma técnica colombiana 2050 de 1998.
<https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc%2020500.pdf>

Planas, O. (2016). *Panels de energía solar fotovoltaica*. <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/convertidores-corriente>

Plan Nacional Energético. (2015). *Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050*.
http://www.upme.gov.co/docs/pen/pen_idearioenergetico2050.pdf

Rizzo, S., & Scelba, G. (2015). ANN based MPPT method for rapidly variable shading conditions. *Elsevier Applied Energy*, 145, 124–132.

Rocha, N. (2019). Diseño de un nuevo algoritmo de GMPPT para paneles solares en condición de sombra. [Universidad de los Andes, Colombia].

<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/45744/u828002.pdf?sequence=1>

Rodríguez, G. Gil, J. & García E. (1996). *Metodología de la investigación cualitativa*.

Ruiz, L., Beristaín, J., Sosa, I., & Hernández, J. (2010). Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar. *Ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, 8 (1), 17-24.

https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/Documents/v8/art3vf_estudio_del_algoritmo_de_seguimiento_de_punto_de_maxima_potencia_perturbar_y_observar.pdf

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2019). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.

http://www1.upme.gov.co/demandaenergetica/integracion_energias_renovables_web.pdf