

# Introducción

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes inagotables como el viento o el sol. Se caracterizan por no producir emisiones de gases de efecto invernadero a partir de la utilización de combustibles fósiles y reducir algunos contaminantes del aire. En los últimos años han tomado gran relevancia puesto que permiten reducir la dependencia del carbón, el gas y el petróleo a través de la diversificación de la matriz energética (Penna, 2020; Robles Algarín y Rodríguez Álvarez, 2018).

Una de las fuentes de energía renovable que han tomado gran relevancia en los últimos años es la fotovoltaica (FV), la cual consiste en captar la energía proveniente del sol para convertirla en energía eléctrica con la utilización de módulos fotovoltaicos. Inicialmente, esta alternativa se aplicó en zonas rurales no interconectadas a la red eléctrica debido a los costos de implementación, pero con el paso de los años su uso se ha masificado hasta tal punto que en la actualidad se realizan instalaciones FV con conexión a la red eléctrica (Al-Waeli et al., 2019).

La energía solar fotovoltaica goza de gran popularidad en los

mercados locales por su fácil instalación y operación. El desarrollo de este tipo de tecnologías y su amplio uso en aplicaciones industriales, comerciales y militares ha disminuido considerablemente los costos y el tiempo de fabricación de las celdas solares. Sin embargo, su verdadero atractivo se centra en la generación de energía eléctrica limpia a partir de la incidencia directa de la radiación proveniente del sol (Han y Niosi, 2018).

De lo anterior se entiende que este tipo de tecnologías favorecen a las regiones en donde se presenta una alta densidad solar, por lo que se estima que en el futuro los sistemas fotovoltaicos se convertirán en una de las fuentes principales de generación y de suministro, dado que serán capaces de soportar la demanda energética de estas zonas. No obstante, el uso efectivo de la energía FV también depende de las tecnologías de los sistemas de gestión, regulación y almacenamiento que se implementen puesto que estos deben garantizar seguridad y confianza al consumidor final, y proporcionarle a cualquier dispositivo el fluido eléctrico necesario para poder funcionar. Comúnmente, para esta última labor se utilizan controladores y convertidores de potencia, los cuales desempeñan un papel muy importante en la instalación de un sistema fotovoltaico porque son los encargados de asegurar el correcto flujo de potencia hacia las cargas (Ngo Ngoc et al., 2017).

Los módulos FV son uno de los principales componentes de los sistemas FV, y su potencia máxima está determinada por el producto de la corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (MPP), la cual depende de la temperatura de operación y de la irradiación solar. Así pues, la corriente de cortocircuito del módulo FV es directamente proporcional a la irradiación solar, disminuyendo considerablemente en la me-

didada en que lo hace la irradiación, mientras que el voltaje de circuito abierto varía moderadamente. Por otra parte, la temperatura de operación afecta de forma considerable el voltaje de circuito abierto: este se reduce sensiblemente cuando aumenta la temperatura, en tanto que la corriente de cortocircuito se incrementa moderadamente (Deambi, 2016).

En síntesis, a mayor irradiación solar, mayor corriente de cortocircuito, mientras que, a mayor temperatura, menor voltaje de circuito abierto, lo cual afecta la potencia de salida del módulo FV. Esta variabilidad de la potencia de salida implica que, en caso de no existir un dispositivo de acople entre el módulo FV y la carga, el sistema no opere en el MPP, que es el punto en el cual se entrega la máxima potencia disponible para condiciones definidas en la irradiación solar y en la temperatura de operación (Deambi, 2016).

En este contexto surgen los controladores del punto de máxima potencia (MPPT), los cuales se encargan de entregar la máxima potencia disponible en un sistema FV de forma independiente a las variaciones en las condiciones climáticas. Estos dispositivos cumplen la función de regular la carga de las baterías controlando el punto en el que los módulos FV entregan la mayor cantidad de potencia disponible. Están compuestos por un algoritmo de control y un convertidor DC-DC que funciona como regulador de la potencia que se le suministra a la carga (Nasser et al., 2020).

Los controladores MPPT tienen varias ventajas cuando se utilizan en los sistemas FV, entre las que se destacan: 1) obtienen más potencia de los módulos FV; 2) permiten hacer uso de módulos FV que no se pueden emplear con controladores tradicionales debido a incompatibilidad de voltaje con las

baterías; 3) pueden operar a mayor voltaje, lo cual permite recurrir a cables de menor sección y, por ende, una disminución en los costos (Zou et al., 2020).

En contraste con los controladores MPPT, los controladores tradicionales realizan una conexión directa de los módulos FV a las baterías, lo cual requiere que los módulos operen en un rango de voltaje que está por debajo del voltaje del MPP. Debido a esta situación, con los controladores tradicionales no se aprovecha al máximo la energía que son capaces de entregar los módulos FV, la cual puede ser utilizada para cargar las baterías y energizar cargas del sistema.

El método tradicional que se ha implementado en el seguimiento del MPP es conocido como perturbar y observar (P&O). Como su nombre lo indica, se encarga de perturbar la tensión de salida FV y observar el resultado en el cambio de la potencia del arreglo FV, para luego comparar las dos potencias. Este comportamiento, sin embargo, genera oscilaciones alrededor del MPP durante el estado estacionario y diverge del punto máximo cuando se produce un cambio rápido en las condiciones ambientales. Es decir que, por lo general, presenta problemas de estabilidad y convergencia cuando existen cambios súbitos en la irradiancia solar y en la temperatura de operación del módulo FV, lo que ocasiona una mayor pérdida de potencia y, por lo tanto, una baja eficiencia (Numan et al., 2020). De tal modo han surgido técnicas que buscan solucionar este tipo de problemas, como el algoritmo P&O mejorado, el algoritmo de conductancia incremental (Chuang et al., 2020) y, últimamente, métodos que utilizan algoritmos de control inteligente, como la lógica difusa y las redes neuronales, así como algoritmos de optimización (Fathi y Parian, 2021).

Las técnicas de control inteligente, en particular, tienen como ventaja que son ideales para trabajar con sistemas dinámicos no lineales por su alta eficiencia y facilidad de implementación mediante sistemas embebidos, además del robusto procesamiento para resolver problemas de optimización y simular procesos complejos. Por consiguiente, se destacan sus notables aplicaciones en áreas relacionadas con las energías renovables dado que los cambios de potencia en los paneles solares presentan una respuesta no lineal. En ese sentido, el principal reto de las investigaciones actuales se centra en implementar controladores MPPT eficientes, que minimicen las oscilaciones y tengan una buena relación costo-beneficio.

En la literatura se encuentran diferentes investigaciones que abordan la problemática existente con las oscilaciones recurrentes alrededor del MPP. Así, en Salman et al. (2018) se observa una implementación del algoritmo P&O, en su versión estándar, en un controlador MPPT de un sistema FV autónomo de 200 W. No obstante, la mayoría de los trabajos recientes abordan la versión P&O mejorada en busca de maximizar la eficiencia y reducir los tiempos de convergencia, desviaciones del MPP y oscilaciones medidas en términos de potencia al modificar ciertas reglas en el algoritmo. Por ejemplo, se ha propuesto aplicar ocho casos de perturbación del punto de operación en vez de los cuatro que tiene el algoritmo original, o alternar entre pasos fijos o variables que modifiquen el porcentaje de ciclo útil de salida en función de la carga conectada al sistema (Abdel-Salam et al., 2020; Belkaid et al., 2017; Haque y Zaheeruddin, 2017; Hebchi et al., 2018; Numan et al., 2020).

La conductancia incremental es otro de los métodos convencionales que se han implementado en investigaciones recientes,

pero en sus versiones mejoradas. Con el objetivo de mejorar la eficiencia (velocidad y precisión) y maximizar la potencia de salida en el seguimiento del MPP en los sistemas FV, se ha desarrollado un novedoso método de tamaño de paso variable con un factor de escalamiento adaptativo. Este emplea una técnica de estimación de estado para calcular el nivel de irradiancia, determinar un factor de escalamiento apropiado y, en consecuencia, mejorar el MPPT. También se ha modificado el algoritmo original al utilizar los cambios instantáneos de corriente y tensión de los módulos FV para establecer adecuadamente las direcciones de potencia, voltaje y corriente; no solo en la posición del MPP como la lógica original (Chuang et al., 2020; Ilyas et al., 2018; Shang et al., 2020).

De forma paralela a la implementación de los métodos tradicionales, en la literatura se destacan investigaciones que realizan el modelado e implementación de controladores MPPT utilizando las técnicas de control inteligente ya mencionadas, esto es, la lógica difusa y las redes neuronales. Los estudios con lógica difusa buscan aprovechar las ventajas de este método para implementar controladores robustos a través de expresiones lingüísticas, con el fin de minimizar las oscilaciones y garantizar la máxima potencia disponible (Jain et al., 2021; Nasser et al., 2020; Rajavel y Rathina Prabha, 2021; Zou et al., 2020). Entretanto, los trabajos con redes neuronales recurren al entrenamiento offline con el fin de aprovechar la capacidad de estas para implementar modelos artificiales que resuelvan problemas complejos como el que representa la búsqueda de mejoras en la eficiencia y estabilidad de los controladores MPPT (Hameed et al., 2019; Mittal et al., 2020; Saadaoui et al., 2019; Zečević y Rolevski, 2020). Adicionalmente, se reporta el uso de algoritmos de optimización adaptados a algunos de los métodos anteriormente mencionados, con el fin de me-

jorar aspectos como los tiempos de cómputo y la facilidad de implementación (Fathi y Parian, 2021; Ibnelouad et al., 2020).

Considerando el contexto anterior, en esta obra se encuentran consignados años de experiencia de los autores en la elaboración de controladores del seguimiento del MPP de sistemas FV inspirados en métodos de inteligencia computacional. Así, este libro presenta el proceso de análisis, diseño y desarrollo de controladores, además de examinar el diseño de convertidores DC-DC, necesarios para transferir la energía generada por el módulo FV a una carga. También se proponen los controladores inteligentes basados en lógica difusa y en redes neuronales como una alternativa al método tradicional de P&O, que presenta inestabilidad alrededor del punto de operación y ocasiona pérdida de eficiencia en el sistema fotovoltaico. Los resultados obtenidos demuestran la relevancia de la investigación considerando las mejoras obtenidas con los controladores inteligentes en aspectos claves como el tiempo de establecimiento, el seguimiento del MPP, la disminución considerable de las oscilaciones, y mejoras en la eficiencia y potencia suministrada a la carga.

En el capítulo 1 se presentan los principales conceptos teóricos que soportan esta investigación, relacionados con los sistemas FV, convertidores DC-DC y las técnicas de control basadas en los algoritmos P&O, lógica difusa y redes neuronales. De esta forma se comprende la importancia de los controladores para el seguimiento del MPP en los paneles fotovoltaicos.

En el capítulo 2 se detalla el diseño y modelado en MATLAB de cada uno de los bloques que integran los controladores propuestos. Inicialmente, se muestra el modelado matemático del módulo FV utilizado para los escenarios de simula-

ción. Luego, se presenta el diseño y modelado del convertidor DC-DC en modo buck. Finalmente, se exponen el diseño, los diagramas de flujo y el modelado de los controladores P&O, difusos y neuronales dinámicos con diferentes algoritmos de entrenamiento: uno con arquitectura NARX (Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Inputs) implementada con entrenamiento offline y otro con una red tipo ADALINE (Adaptive Linear Neuron), la cual se implementó con entrenamiento online empleando los algoritmos LMS (Least Mean Square) y RTRL (Real-Time Recurrent Learning).

En el capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos para escenarios de simulación computacional con diversas pendientes y cambios abruptos en las condiciones ambientales, evaluando sombreado parcial o total en los paneles. En primera instancia, se muestran los resultados del modelado del panel FV y del convertidor DC-DC cuando funcionan de forma independiente. Luego se presentan los resultados de cada uno de los controladores MPPT en sistemas FV aislados y, por último, se realiza un análisis comparativo entre los controladores desarrollados.

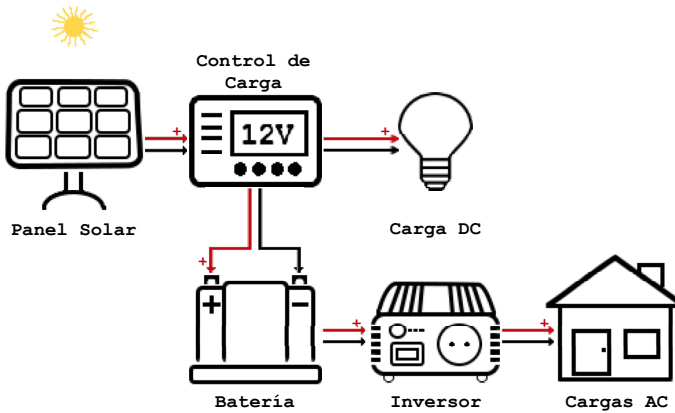
# Capítulo 1

## Bases teóricas

### **Sistemas fotovoltaicos (FV)**

Un sistema FV está compuesto por un conjunto de componentes encargados de producir energía eléctrica con el fin de suplir la demanda energética requerida por una carga (Gasquet, 2004). Regularmente, un sistema FV está compuesto por una batería, como en el caso de sistemas fuera de red, una unidad de control y un inversor. Estos distintos bloques se pueden identificar muy fácilmente al observar la Figura 1.1.

Adicionalmente, en este tipo de sistemas es necesario contar con una estructura metálica de soporte, cableado eléctrico y dispositivos de protección como fusibles, puestas a tierra e interruptores (Perpiñán Lamigueiro, 2018). Por supuesto que el componente principal de un sistema FV siguen siendo los módulos solares, cuya función se centra en la generación de electricidad a partir de la energía del sol. Sin embargo, en una instalación FV no siempre se utilizan los mismos elementos. El número de componentes varía conforme la aplicación y la necesidad del usuario final.

**Figura 1.1:** Esquema representativo de un sistema FV

Dependiendo de su estructura, los sistemas FV se pueden clasificar de tres formas: sistemas autónomos (*off-grid*), sistemas híbridos y sistemas conectados a la red (*on-grid*). En el mercado actual se encuentran sistemas mixtos o complementarios, y su aplicación depende del momento en el que se necesite la energía generada (día, noche) y de la rapidez de su consumo (energía por unidad de tiempo). Una de las aplicaciones más comunes de estos sistemas es la generación de energía eléctrica para uso doméstico en la electrificación de viviendas o núcleos rurales (Gasquet, 2004), aunque los Gobiernos centrales de diferentes países también han encontrado un enorme potencial en el uso y aprovechamiento de este tipo de tecnologías al aplicarlas en la iluminación pública aislada y en las señalizaciones de tránsito como semáforos. A esta idea se han sumado otros sectores productivos, como el industrial y el de transporte, con aplicaciones agropecuarias, sistemas de riego, plantas de tratamiento de agua, vehículos eléctricos, entre otros (Díaz Martínez y López Castrillón, 2017).

Las ventajas económicas que ofrece una instalación FV com-

pensar las dificultades técnicas que se pueden presentar en cuanto al déficit de almacenamiento, puesto que no es posible disponer de toda la energía producida debido a las pérdidas que se ocasionan en algunos componentes durante el proceso de carga. No obstante, la industria FV tiene el potencial para asumir un rol principal en la generación de energía en el siglo XXI con miras a reducir el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases contaminantes, al tiempo que se permita el progreso de los países subdesarrollados y se asegure una fuente de energía confiable y limpia (Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, 2002). La descripción cualitativa de cada uno de estos elementos se enfoca de forma primordial en los bloques que hacen parte de una instalación FV aislada, puesto que su funcionalidad completamente autónoma es de principal interés para la presente investigación.

### *Módulo FV*

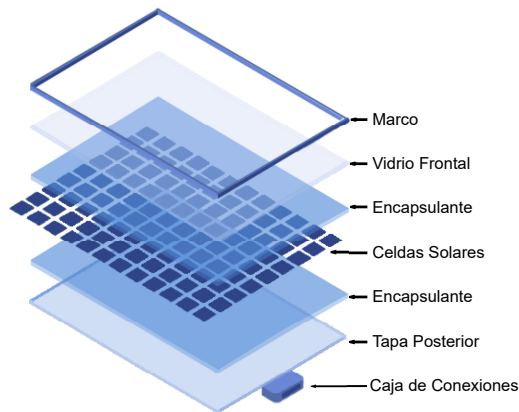
Un módulo FV o panel solar se encuentra constituido por un arreglo de células solares individuales que están conectadas en serie y paralelo, dentro de una estructura que por lo general tiene una geometría rectangular con bordes redondeados. En la parte frontal, dicha estructura cuenta con un vidrio templado de protección, que aísla las células solares del aire, la humedad y agentes atmosféricos externos como la lluvia o el polvo; de esta manera, solo los rayos del sol pueden ingresar directamente a la célula, realizar el debido proceso de generación de energía eléctrica y generar el nivel de tensión finalmente deseado (Díaz Martínez y López Castrillón, 2017; Valenzuela Zapata et al., 2009).

Las células solares, también conocidas como celdas, son las encargadas de convertir la energía solar en energía eléctrica (Viloria Porto et al., 2018b), la cual se produce siempre y

cuando la luz del sol incide directamente sobre ellas; en caso contrario, se disminuye la generación de energía (Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, 2002). Por lo tanto, cuando los módulos solares están parcialmente sombreados, su capacidad de generación se afecta considerablemente debido a que la superficie sombreada es equivalente a conectar una resistencia en serie con los módulos (Gasquet, 2004).

En la parte posterior del módulo FV se encuentran los bornes de conexión, los cuales brindan la posibilidad de conectar dos o más módulos, bien sea en serie o en paralelo, para lograr potencias más altas (Figura 1.2). Algunos módulos FV no tienen la estructura estándar de interconexión de celdas, sino una estructura semiconductor que se deposita sobre una base metálica laminar.

**Figura 1.2:** Elementos físicos que componen un módulo FV



Existen dos tipos de materiales semiconductores con los que se construyen las celdas solares. Uno utiliza células monocristalinas, mientras que el otro implementa una estructura policristalina. Estos materiales se pueden identificar a sim-

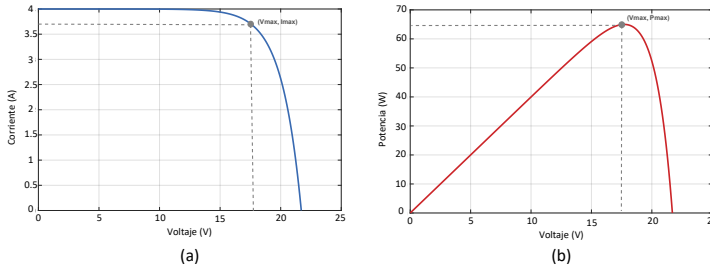
ple vista: la estructura monocristalina tiene una superficie de brillo uniforme; la policristalina, en cambio, tiene zonas de brillo diferentes (Gasquet, 2004). El voltaje de salida de una celda solar depende del tipo de semiconductor con el que se construya. El máximo valor obtenido hasta el momento es de alrededor de  $0,5\text{ V}$ . Ahora bien, como los voltajes más utilizados en los sistemas FV son  $12\text{ V}$  y  $24\text{ V}$ , se deben conectar varias celdas en serie para poder alcanzar estos valores (Gasquet, 2004).

**Curvas I-V y P-V.** El desempeño eléctrico de un módulo FV frente a la radiación solar y a la temperatura de operación se representa a través de las curvas características I-V y P-V (Figura 1.3). Este comportamiento se debe a las propiedades intrínsecas de los materiales semiconductores que componen el módulo. De acuerdo con los fabricantes, la curva característica se obtiene de la relación de salida de corriente-voltaje (I-V) y potencia-voltaje (P-V), al exponer el panel a unas condiciones de prueba de rendimiento, conocidas como condiciones de prueba estándar (Standard Test Conditions—STC—), que vienen dadas por una irradiación solar constante de  $1.000\text{ W}/\text{m}^2$ , temperatura de operación de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y una distribución espectral AM 1,5 (Díaz Martínez y López Castrillón, 2017).

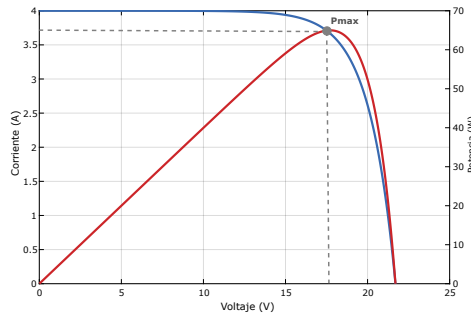
**Punto de máxima potencia (MPP).** La potencia máxima de un módulo FV depende de la irradiación solar y de la temperatura de operación. El MPP es el punto de trabajo donde la potencia suministrada por el módulo FV es máxima. En las especificaciones técnicas consignadas en la hoja de datos del dispositivo FV, el fabricante estipula, para cada valor de voltaje y corriente ( $V_p$  e  $I_p$ ), un valor máximo de potencia. Las curvas I-V y P-V que se observan en la Figura 1.4 descri-

ben el desempeño típico de un módulo solar en función de la temperatura de trabajo. A partir de la intersección de estas dos curvas es posible determinar la  $P_{m\acute{a}x}$ .

**Figura 1.3:** Curvas características de un módulo FV: (a) relación I-V; (b) relación P-V



**Figura 1.4:** Punto de máxima potencia de un módulo FV



Un aspecto importante en los sistemas FV es la implementación de alternativas para el seguimiento del MPP con el fin de maximizar la máxima potencia de salida. En este contexto surgen los controladores para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), los cuales se pueden implementar con métodos pasivos y activos. Los primeros son fáciles de incorporar utilizando fuentes de voltaje constante o una resistencia en serie con la carga, pero suelen perder eficiencia ante

las condiciones de operación dinámicas a las que están expuestos los módulos FV. En contraste, en los segundos se recurre a diferentes tipos de algoritmos inteligentes que permiten hacer un seguimiento dinámico del MPP.

### *Almacenamiento de la energía eléctrica*

Este bloque está compuesto por las baterías de plomo-ácido o níquel-cadmio, las cuales son convenientes para aplicaciones “estacionarias” o de “descarga profunda” (Grupo de Nuevas Actividades Profesionales, 2002). En una instalación FV la función de las baterías es almacenar la energía eléctrica generada por el conjunto de paneles solares para luego suministrarla a las diferentes cargas conectadas al sistema. Si todo funciona correctamente, el banco de baterías deberá proporcionar un nivel de tensión constante y estable, independiente de las variaciones en la incidencia luminosa.

Por lo general, las baterías que se usan en las instalaciones FV son capaces de soportar un número limitado de cargas y descargas puesto que los electrodos pierden gran parte del material electroquímico por cada descarga. Durante estos procesos de carga y descarga también se pueden experimentar pérdidas de energía debido al sobrecalentamiento (Gasquet, 2004). Cuando la temperatura en los electrolitos se incrementa de forma considerable, aumentan las reacciones químicas, lo cual ocasiona un fenómeno de corrosión que disminuye la vida útil de las baterías (Díaz Martínez y López Castrillón, 2017).

Otro factor muy importante es la profundidad de descarga máxima de la batería. Este valor se encuentra estipulado por el fabricante y corresponde al porcentaje límite de descarga que se puede alcanzar sin perjudicar la composición química de la batería en estudio (Valenzuela Zapata et al., 2009). De-