

Modelado de eficiencia energética de paneles solares fotovoltaicos

Energy efficiency modeling of photovoltaic solar panels

Itzel Anayansi Hernández Delgado¹, Daniel Espitia García², Josué Abiel Olguín Hernández³, Josué Candelario Tolentino Cárdenas⁴, Alejandro Juárez Vidal⁵ y Amanda Enriqueta Violante Gavira⁶.

DICS, Ingeniería Mecánica

ia.hernandezdelgado@ugto.mx¹, d.espitiagarcia@ugto.mx², ja.olguinhernandez@ugto.mx³, jc.tolentinocardenas@ugto.mx⁴, a.juarezvidal@ugto.mx⁵, amanda@ugto.mx⁶.

Resumen

El cambio climático y los graves impactos ambientales, sociales y económicos que representa este fenómeno, han marcado la necesidad de migrar el consumo de energías fósiles a energías renovables. El aprovechamiento de la energía del sol es una alternativa que están usando varios países de la Unión Europea y de norte América. Los sistemas fotovoltaicos integran equipos y dispositivos eléctricos y electrónicos para producir electricidad a partir de la radiación solar. Los módulos fotovoltaicos son componentes de gran interés entre la comunidad científica, bajo la premisa de incrementar el rendimiento de la producción de energía. Algunos de los factores que inciden en la eficiencia de los paneles solares son: la calidad de cada tecnología, el índice de degradación que sufren a lo largo de su ciclo de vida, el ángulo de inclinación y la temperatura ambiente. La finalidad de este trabajo es estimar la eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos, con la aplicación de un modelo matemático y la plataforma POWER Data de la NASA para tres posibles sitios de instalación (Coatepec, Salamanca y Rosarito) y dos tecnologías particulares (PERC y PERC BIFACIAL). Los resultados sugieren esta última fue la que mostró una mayor eficiencia, lo que la hace más competitiva en el mercado por las características de doble celda que ofrece. De igual forma la eficiencia más alta de la comparativa de sitios geográficos, se obtuvo en la zona norte para la ciudad de Rosarito, B.C.

Palabras clave: celdas fotovoltaicas, eficiencia energética, irradiancia, temperatura y tecnologías.

Introducción

La energía eléctrica y térmica son indispensables para el desarrollo de cualquier país. Históricamente, los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural han sido dominantes en el mercado energético (Mejía, 2021). Su uso presenta dos complicaciones: por un lado, la reproducción de los combustibles fósiles es lenta, lo que los convierte en recursos finitos y puede llevar a agotar las reservas y a afectar los precios. Por otro lado, el impacto ambiental de estos combustibles, tanto a nivel local como global, se ha vuelto un factor importante en términos de sostenibilidad (Mikati, Santos y Armenta, 2012).

El cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo en las temperaturas y los patrones climáticos. Estos cambios pueden ser naturales, como resultado de la actividad solar o erupciones volcánicas significativas. Sin embargo, desde el siglo XIX, las acciones humanas han sido la principal causa del cambio climático, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas. Esta quema de combustibles libera gases de efecto invernadero que actúan como una capa alrededor de la Tierra, atrapando el calor solar y aumentando las temperaturas (Naciones Unidas, 2023a). Los principales gases efecto invernadero (GEI) son los siguientes: vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorocarbonos (CFC), el ozono (O₃), y el Hexafluoruro de azufre (SF₆). Sin embargo, los que más contribuyen al cambio climático: son el dióxido de carbono y el metano (De Corso y Pinilla 2017). Estos gases se generan, en varias actividades que requieren combustiones: al usar gasolina para conducir un automóvil o carbón para calentar un edificio. Además, la deforestación y la degradación de la tierra también pueden liberar dióxido de carbono. La agricultura y las actividades relacionadas con la extracción de petróleo y gas son importantes fuentes de emisiones de metano. La energía, la industria, el transporte, los edificios, la agricultura y el uso del suelo son los principales sectores emisores (Naciones Unidas, 2023a).

A continuación, se muestran en la Tabla 1 las principales causas del cambio climático.

Tabla 1. Causas del cambio climático.

Factor	Características
Los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas)	Los que más contribuyen al cambio climático mundial. A medida que las emisiones de gases de efecto invernadero cubren la Tierra, atrapan el calor del sol, lo que conduce al calentamiento global y al cambio climático. Con el tiempo, las temperaturas más cálidas están cambiando los patrones climáticos y alterando el equilibrio normal de la naturaleza.
La generación de Energía	La generación de electricidad y calor a través de combustibles fósiles produce una gran cantidad de emisiones globales. La combustión de carbón o gas para generar electricidad es común y contribuye a la emisión de dióxido de carbono y óxido nítrico, que son potentes gases de efecto invernadero.
Productos de fabricación	La industria y las fábricas generan emisiones a través de la quema de combustibles fósiles para generar energía en la fabricación de diversos productos: cemento, hierro, acero, componentes electrónicos, ropa y otros bienes. La minería y otros procesos industriales y la construcción también producen gases contaminantes.
La tala de los bosques	Los bosques tienen la capacidad de absorber dióxido de carbono, por lo que su destrucción limita la capacidad de la naturaleza para mantener estas emisiones fuera de la atmósfera. La deforestación, junto con la agricultura y otros cambios en el uso del suelo, es responsable de aproximadamente un cuarto de las emisiones de gases de efecto invernadero.
El uso de transporte	El sector del transporte es uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en términos de emisiones de dióxido de carbono. Los vehículos terrestres, debido a la combustión de productos derivados del petróleo en motores de combustión interna, son responsables de la mayor parte de las emisiones del sector. El transporte representa aproximadamente una cuarta parte de las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía a nivel mundial.
La producción de alimentos	La producción de alimentos genera emisiones de metano, dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en diversas formas. Las prácticas agrícolas como la deforestación y la roturación de tierras para la agricultura y el pastoreo contribuyen a estas emisiones. El uso de combustibles fósiles para la operación de equipos en granjas y barcos pesqueros es común y contribuye a las emisiones. En conjunto, la producción de alimentos es uno de los sectores que más contribuye al cambio climático.
La energía en los edificios	A nivel global, tanto los edificios residenciales como los comerciales consumen más de la mitad de la electricidad total. Estos edificios todavía dependen en gran medida de fuentes de energía como el carbón, los hidrocarburos y el gas natural para los sistemas de calefacción y climatización. Debido al uso de estas fuentes de energía, los edificios emiten cantidades significativas de gases de efecto invernadero.

Fuente. (Naciones Unidas, 202b).

En la Tabla 2 algunos de los principales efectos del cambio climático provocando daños ambientales, sociales, económicos, de salud y de supervivencia.

Tabla 2. Efectos del cambio climático.

Factor	Efecto
Elevación de las temperaturas	A medida que se eleva la concentración de gases de efecto invernadero, también lo hace la temperatura de la superficie del planeta. En la última década, del 2011 al 2020, se ha registrado el mayor calentamiento hasta la fecha. Desde los años 80, cada década ha sido más cálida que la anterior. En casi todas las zonas se han producido más olas de calor y días más calurosos provocando un aumento en las enfermedades relacionadas con el calor y hace que trabajar en exteriores sea más difícil. Se producen incendios incontrolados con mayor facilidad y se extienden más rápidamente cuando el ambiente es más cálido.
Tormentas más potentes	Las tormentas destructivas más intensas y frecuentes en muchas regiones, a medida que se elevan las temperaturas se evapora mayor humedad, lo que causa inundaciones y precipitaciones extremas, provocando más tormentas destructivas. El calentamiento del océano también afecta a la frecuencia y magnitud de las tormentas tropicales, ya que los ciclones, huracanes y tifones se alimentan de las aguas templadas de la superficie del océano. Estas tormentas destruyen a menudo hogares y comunidades enteras, lo que provoca pérdidas ingentes en la economía y en vidas humanas.

Factor	Efecto
Aumento de las sequías	El calentamiento global genera escasez de agua en regiones ya de por sí secas, y está incrementando el riesgo de sequías agrícolas que afectan a cultivos y sequías ecológicas que aumentan la vulnerabilidad de los ecosistemas. Las sequías también pueden provocar destructivas tormentas de arena y polvo capaces de desplazar miles de millones de toneladas de arena de un continente a otro. Los desiertos se expanden y se reducen las tierras aptas para el crecimiento de cultivos.
Aumento del nivel del océano y calentamiento del agua	El océano absorbe la mayor parte del calor generado por el calentamiento global. El ritmo al que se ha elevado el calentamiento del océano ha aumentado considerablemente durante las últimas dos décadas a todas las profundidades. A medida que se calienta el océano, su volumen aumenta porque el agua se expande. El deshielo de las placas de hielo y los icebergs hace que se eleve el nivel del mar amenazando a las comunidades litorales e insulares. Además, el océano absorbe dióxido de carbono y evita su acumulación en la atmósfera, también provoca su acidificación lo que pone en peligro tanto a las especies marinas.
Desaparición de especies	El cambio climático pone en riesgo la supervivencia de las especies terrestres y oceánicas En el mundo se extinguen especies a un ritmo 1000 veces mayor que en cualquier otra época de la que se tenga constancia en la historia humana. Los incendios forestales, un clima extremo y la invasión de plagas con la aparición de enfermedades, todo esto está entre las amenazas relacionadas con el cambio climático. Algunas especies serán capaces de adaptarse geográficamente, pero otras, no.
Escasez de alimentos	Los cambios en el clima y el aumento de condiciones meteorológicas extremas son algunos de los motivos que provocan un aumento global en la desnutrición en las poblaciones más pobres. Los recursos pesqueros, los cultivos y el ganado pueden desaparecer o volverse menos productivos. Debido a una continua acidificación oceánica, los recursos marinos que dan alimento a miles de millones de personas se encuentran en riesgo. Los cambios en las capas de nieve y hielo de los casquetes polares han alterado el suministro de alimentos generados por la ganadería, la caza y la pesca.
Más riesgos para la salud	El cambio climático supone la mayor amenaza única para la salud de la humanidad, a través de la contaminación, las enfermedades, los fenómenos meteorológicos extremos, los desplazamientos forzados, las presiones en la salud mental, así como un aumento del hambre y la desnutrición en lugares donde las personas no pueden producir o encontrar alimentos suficientes. Cada año, los factores medioambientales acaban con la vida de cerca de 13 millones de personas.
Pobreza y desplazamiento	El cambio climático aumenta los factores que llevan y mantienen a la gente en la pobreza. Las inundaciones pueden arrasar barrios marginales, destruyendo hogares y comunidades. El calor dificulta la ejecución de trabajos en el exterior. Durante la última década (2010-2019), los sucesos relacionados con el clima desplazaron a un total aproximado de 23,1 millones de personas de media al año, aumentando sus probabilidades de caer en la pobreza. Muchos refugiados provienen de países que son más vulnerables y menos preparados para adaptarse a los efectos del cambio climático.

Fuente. (Naciones Unidas, 2023b)

Las energías alternativas

Las energías renovables tienen la gran ventaja de reducir los impactos en el entorno y a diferencia de las no renovables, a las que se asocia con emisiones contaminantes y con emisiones de gases efecto invernadero (GEI) (Luna y Ramos, 2014). Comprenden todas aquellas energías de origen no fósil. Entre las cuales se encuentran: la energía eólica, la energía mareomotriz, la biomasa, la energía hidro motriz y la energía solar. El sector eléctrico se compromete a cumplir con los acuerdos internacionales sobre reducción de emisiones y mitigación del cambio climático. Para lograrlo, se planea aumentar gradualmente la generación de energía utilizando fuentes limpias y renovables. El informe también incluye un reporte detallado sobre la planificación del Gobierno de México para cumplir con las metas establecidas en materia de Energías Limpias (SENER, 2023).

Dentro de las energías renovables o energías limpias, destaca por su abundancia la energía solar. Su aprovechamiento se realiza mediante células o paneles solares que la captan y la transforman en energía eléctrica por el efecto fotoeléctrico. Actualmente la eficiencia de estas tecnologías no supera el 20% (Chai, Wong y Joudkazis, 2020). La cantidad de energía solar aprovechada depende de la intensidad de radiación solar que llega a la Tierra. Esta radiación puede variar según la latitud, la hora del día y las condiciones climáticas. La medida utilizada para cuantificar la radiación es el W/m^2 , que representa la cantidad de energía en Watts que incide en un metro cuadrado. En condiciones ideales de un día despejado de verano al mediodía, la radiación solar máxima medida en la superficie terrestre es de aproximadamente $1000 W/m^2$ (Hernández, 2017).

De acuerdo con (Fernández y Cervantes, 2017) la radiación que nuestro planeta recibe del Sol se divide en:
Radiación directa. Atraviesa la atmósfera sin cambiar de dirección.

Radiación dispersa o difusa. Es la radiación que recibimos después de que ocurren fenómenos de reflexión y dispersión.

Radiación reflejada. Es la radiación que refleja la superficie terrestre, su magnitud depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies horizontales no reciben radiación reflejada, mientras que las superficies verticales captan más radiación reflejada.

Radiación global. Integra la radiación total que proviene del Sol: directa más la difusa.

La geometría solar. Comprende un conjunto de variables importantes para cuantificar la irradiación solar (Alvarado, 2015). Estos parámetros son relevantes ya que afectan los valores de irradiancia y resultan fundamentales para el análisis de la proyección de sombras. La geometría solar incluye las coordenadas de la posición geográfica de un sitio en particular: Latitud, Longitud y Altitud, así como ángulos específicos que a continuación se señalan:

Ángulo de declinación (δ). Indica la posición del sol con respecto al ecuador. Varía a lo largo del año debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra.

Altitud o elevación solar (α). Es la inclinación entre el plano horizontal y el rayo solar incidente en un plano determinado por el ángulo cenital y la posición del sol. Mide la altura del sol sobre el horizonte.

Ángulo azimut (ψ). Mide la posición angular este-oeste del sol desde el sur, el valor cero se alcanza al mediodía teórico.

Ángulo horario (ω). Es el valor de la diferencia angular entre el mediodía y un momento específico del día, expresado en términos de la rotación completa de 360 grados en 24 horas.

Estos ángulos son fundamentales para comprender la geometría solar y su influencia en la radiación solar incidente en un determinado lugar y momento.

Energía fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la forma más sencilla de producir electricidad, en cuanto se siga investigando y perfeccionando este proceso, podría ayudar a cubrir las necesidades energéticas de los millones de usuarios de manera sustentable, también a llevar este servicio a comunidades que no disponen de este servicio. Hay varios tipos de sistemas de generación fotovoltaica, y cada tecnología difiere en términos de precio, rendimiento y material. El creciente interés por los problemas ambientales y la creciente demanda de energía están impulsando el uso de fuentes de energía alternativas. La energía solar se destaca como la opción más asequible y abundante a largo plazo. El rendimiento de un sistema fotovoltaico está fuertemente influenciado por el clima. condiciones como la temperatura y la radiación solar (Baghdadi, Yaakoubi, Attari, Leemrani y Asselman, 2018).

De acuerdo con varios estudios, la energía solar fotovoltaica produce electricidad con un menor impacto ambiental porque no requiere el uso de ningún material peligroso en su producción. También tiene la ventaja de poder adaptarse fácilmente a la morfología de los lugares donde se instala. La sencillez de acceso de los inversores a todo tipo de energía solar fotovoltaica es uno de sus beneficios sociales (Collado, 2009). La clasificación térmica del equipo de red, el rango de voltaje permitido, la clasificación del nivel de falla del equipo de red y los problemas de calidad de energía asociados, la confiabilidad de la red y la protección de la red, son algunos de los factores que limitan la expansión fotovoltaica (Bayer, Patrick, Heiko y Adela, 2018)

Un sistema fotovoltaico (SF) es un conjunto de aparatos o partes que permiten la captura y utilización de la energía solar para la generación de energía eléctrica. Hay tres tipos diferentes de estos: (a) sistemas que no están conectados a la red, que pueden tener o no dispositivos de almacenamiento de energía (baterías), (b) sistemas que son autónomos y tienen una configuración más básica sin baterías; y (c) sistemas híbridos que son una combinación de los anteriores (Gobierno de México, 2016).

El funcionamiento del sistema fotovoltaico de la Figura 1, se explica a continuación:

1. Los rayos del sol inciden en los paneles fotovoltaicos. Estos paneles, gracias al efecto fotoeléctrico convierte esa energía en corriente continua que se recoge en el inversor.
2. El inversor convierte la corriente continua en corriente alterna, que es como se consume normalmente la electricidad.
3. Cuando los paneles solares producen más electricidad de la demandada, el exceso de energía es enviada al sistema eléctrico. De esta manera la energía producida y no utilizada no se desperdicia.
4. Los sistemas fotovoltaicos producen una electricidad de alta calidad que reduce las fluctuaciones y el ruido que podría dañar los electrodomésticos.

5. Cuando la demanda de energía supera la energía generada por los paneles fotovoltaicos el sistema eléctrico proporciona la energía necesaria hasta cubrir las necesidades.

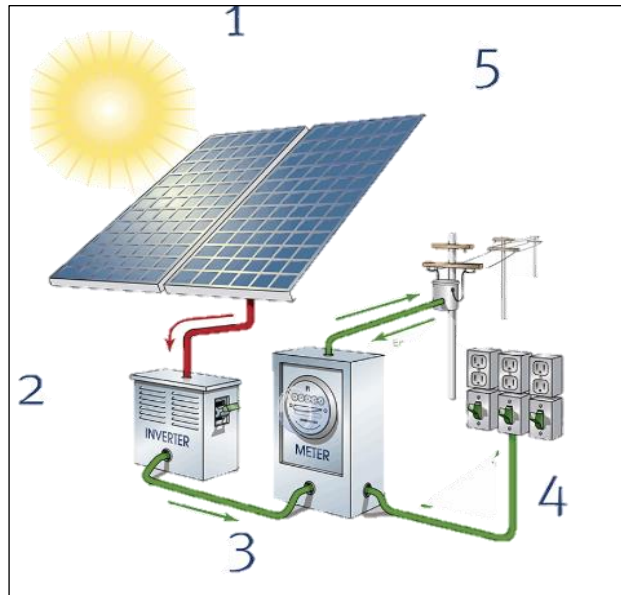


Figura 1. Sistema Fotovoltaico (Helio Esfera, 2017).

En la Tabla 3 se muestra la clasificación de los sistemas fotovoltaicos de acuerdo con su operación.

Tabla 3. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos.

Tipo sistema fotovoltaico	Descripción
Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (SFIR)	Estos sistemas son los más económicos, no obstante, forzosamente deben estar conectados a la red eléctrica nacional (CFE). Requieren muy bajo mantenimiento, el cual se limita a la limpieza de los paneles solares para eliminar la suciedad y el polvo.
Sistemas fotovoltaicos independientes o isla. (SFI)	Son una buena opción cuando CFE no provee servicio en la zona. Como tienen más elementos que los sistemas interconectados, requieren mayor inversión y mantenimiento. Cuentan con paneles solares, inversores que trabajan en isla (desconectados de CFE), baterías para almacenar la energía, controladores de carga y sistemas de montaje.
Sistemas fotovoltaicos híbridos	Son una combinación de los dos tipos anteriores. Pueden funcionar tanto interconectados a CFE como en modo isla.

Fuente. Adaptado de (Fernández y Cervantes, 2017)

Un módulo fotovoltaico es una unidad pequeña de generación de energía solar lista para su uso. Consiste en un conjunto de células fotovoltaicas interconectadas eléctricamente, agrupadas y encapsuladas para su protección. Una célula fotovoltaica es el componente más pequeño que convierte la luz solar en energía eléctrica de corriente directa. Existen 5 criterios para clasificar a los módulos fotovoltaicos: Tipo de celada, material encapsulado, sustrato, estructura del marco y construcción y funciones adicionales. Para evaluar el rendimiento de un módulo o conjunto de módulos, se emplean dos parámetros eléctricos: la eficiencia y el factor de forma (Alvarado, 2015).

A continuación, se señalan algunos parámetros importantes de los módulos fotovoltaicos:

La eficiencia del módulo. Es la cantidad de radiación solar aprovechada en un área específica y varía según la tecnología utilizada. En México, los módulos de silicio monocristalino son los más eficientes, seguidos de los de silicio policristalino y los de capa delgada (CuInSe₂, GaAs, CdTe, silicio amorfo).

El factor de forma. Establece una relación entre los límites físicos del módulo fotovoltaico y los parámetros en su punto máximo de potencia.

La potencia. Es la velocidad de transformación de la energía y se mide en watts (W).

El voltaje. Representa la diferencia de potencial entre dos puntos y la corriente es proporcional al área expuesta a la radiación solar en el módulo.

La temperatura de operación nominal de una célula solar. Es la temperatura alcanzada cuando recibe una irradiación de 800 W/m^2 con una distribución espectral de 1,5 G, una temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ y una velocidad del viento de 1 m/s . Aumentar la temperatura de la célula solar tiene diversas consecuencias negativas en su funcionamiento, como un leve aumento en la intensidad de cortocircuito, una disminución en la tensión de circuito abierto (aproximadamente $-2.3 \text{ mV/}^\circ\text{C}$), una reducción en el factor de forma y un descenso en el rendimiento.

Tecnologías de las celdas solares

La mejor tecnología se selecciona en función del rendimiento, el costo y los materiales utilizados en la fabricación. El clima (incluida la radiación solar y la temperatura) tiene un impacto significativo en el rendimiento de un sistema fotovoltaico. Los sistemas fotovoltaicos deben dimensionarse adecuadamente para garantizar una disponibilidad de energía constante durante todo el año (Baghdadi et al., 2018).

La tecnología fotovoltaica aprovecha eficientemente la energía solar convirtiéndola en electricidad a través de células solares. Esta tecnología se ha venido desarrollando en los últimos años (Thompson, 2007). Actualmente, las células solares de silicio cristalino son las más comunes en el mercado. Sin embargo, las ventas de células solares no basadas en silicio (C-Si) han experimentado un crecimiento significativo debido al desarrollo de nanomateriales. La principal razón detrás de esta tendencia es la reducción del costo de fabricación en comparación con las células convencionales. Estas células solares no basadas en C-Si son considerablemente más baratas que las basadas en silicio y son más livianas, flexibles y versátiles, y requieren una cantidad menor de silicio (Syafaruddina, Engin y Takashi, 2011).

Las tecnologías emergentes de células solares de silicio no cristalino están experimentando avances significativos en el mercado. Aunque la mayoría de los investigadores se han centrado en las células solares de silicio cristalino en aplicaciones de seguimiento de puntos de máxima potencia, las tecnologías de células solares que no son de silicio cristalino tienen diferentes características de corriente-voltaje en el punto de máxima potencia. Por ello es importante determinar el punto de funcionamiento óptimo, debido a que esto incide en el correspondiente al incremento de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos con estas tecnologías Al-Ezzi (Ansari, 2022).

Algunas perspectivas de estudio de la literatura sobre energía fotovoltaica son las siguientes: Desviación de la frecuencia de la red producida por desajustes de la potencia de los generadores por la intermitencia operativa de las energías renovables (Tang et al., 2019). Influencia de las condiciones climáticas en sistemas con material monocristalino y policristalino (Chai et al., 2020). Reducción de las intermitencias de la energía renovable híbrida de un sistema interconectado eólico y solar (Sun et al., 2019). Factibilidad técnica y económica sobre generación híbrida (Ahmad, et al., 2018). Factibilidad económica mediante el análisis del comportamiento mercado de la electricidad enfocado en la energía fotovoltaica (Janda, 2018). Control de potencia fotovoltaica para la regulación de frecuencia en cualquier sistema de almacenamiento de energía (Rajan y Fernández, 2019).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue realizar la estimación de la eficiencia energética de los módulos fotovoltaicos, con la aplicación de un modelo matemático la plataforma POWER Data de la NASA (a partir de datos ambientales del sitio donde se desean instalar y de la información de los parámetros eléctricos en condiciones ideales para distintas tecnologías).

Metodología

Se realizó el estudio para estimar la eficiencia energética de paneles solares fotovoltaicos de dos tecnologías específicas y tres ciudades ubicadas en diferentes zonas geográficas de México. Para ello se usaron datos meteorológicos de cada ciudad y datos que reportan los fabricantes de las tecnologías de paneles solares seleccionadas. Finalmente, con esta información se calcularon distintos valores entre potencias, tensiones y

corrientes para determinar la eficiencia real de cada uno de los paneles de acuerdo con una fecha y horarios definidos.

Información de las tecnologías seleccionadas

Se realizó un análisis detallado de cada ciudad según la región, para ello se obtuvieron datos de una ficha técnica del panel solar HiKu6 monocristalino 1-PERC de 525W y del panel solar ET-M772BH525TW/TB monocristalino 1-PERC BIFACIAL de 525W.

La tecnología 1-PERC (Passivated Emitter Rear Cell) consiste en colocar una capa reflectante (Dielectric Layer) para aprovechar al máximo la radiación. Es decir, es el proceso que añade una capa adicional en la parte trasera del panel solar y dicha capa permite reflejar de nuevo hacia la célula parte de los fotones que atraviesan la célula, aumentando así la eficiencia total del panel a 20%. Por lo tanto, en los paneles solares fabricados con esta tecnología, las células disponen de una capa posterior que ayuda a captar más irradiación solar y una lámina que hace que la luz solar sobrante rebote dentro de la célula y se pueda recuperar (a diferencia de las placas solares fotovoltaicas tradicionales que no aprovechan dicho sobrante). Esto permite aumentar la eficiencia de captación de las células solares en comparación a placas solares fotovoltaicas con la misma distribución, reduciendo el coste final de las placas. La principal ventaja de estos paneles solares PERC es que permiten a los fabricantes lograr mayores eficiencias que con las celdas solares estándar. Actualmente con esta tecnología, es posible lograr hasta un 1% de ganancia absoluta en eficiencia. Si bien hay más pasos en el proceso de fabricación, la ganancia en eficiencia permite disminuir los costos a nivel del sistema. Siempre se debe tener en cuenta el objetivo de los paneles que es mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción al mismo tiempo. Ahora bien, al contar con instalaciones solares que producen más electricidad por metro cuadrado se tiene que se puede generar la misma cantidad de energía utilizando menos paneles solares PERC que con más placas solares estándar. En consecuencia, al necesitar menos paneles solares para la instalación, los costos de instalación también tienden a reducirse (TECNO SOL, 2023).

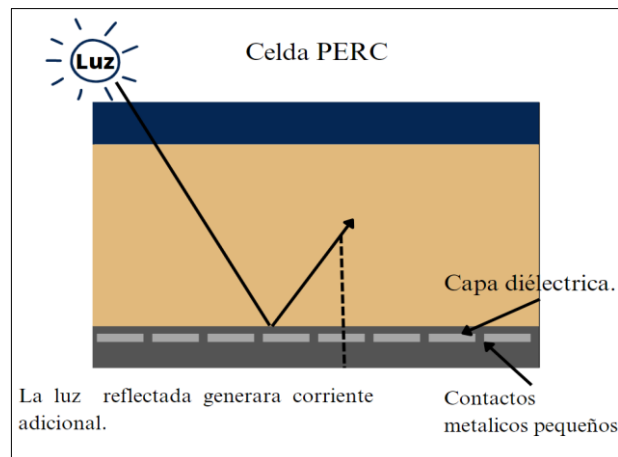


Figura 2. Funcionamiento Celda PERC.

Por otro lado, los módulos fotovoltaicos 1-PERC BIFACIAL capturan la luz solar de ambos lados, tienen una lámina posterior que no expone la parte posterior de las celdas, mientras que los módulos bifaciales tienen una lámina posterior transparente esto hace que aumente en un 1% la eficiencia de estos paneles, por lo tanto, para este tipo de tecnología se tiene una eficiencia del 21%. De esa manera, las células reciben la luz del sol por delante y por detrás. La luz que se absorbe en la parte trasera es la luz que se refleja desde el suelo donde están instalados los paneles solares. Hay varios tipos de módulos bifaciales. Algunos módulos tienen solo un lado de las celdas con una barra colectora y exponen la parte posterior de las celdas gracias a una lámina posterior de vidrio o TPT transparente. Otros tienen barras colectoras impresas en ambos lados de las celdas. La reflectividad de la superficie del suelo bajo los paneles solares se denomina albedo. Es la proporción de luz solar que se reflejará en el suelo y alcanzará la parte posterior de los módulos bifaciales. Por lo general, se instalan en un ángulo diferente al suelo para aumentar la producción. La ventaja principal del panel solar bifacial es la mayor eficiencia que proviene de la producción de energía desde ambos lados

de los módulos. Otra ventaja es que son duraderos, sin embargo, son una tecnología más costosa debido a su proceso de fabricación (ECO GREEN ENERGY, 2023).

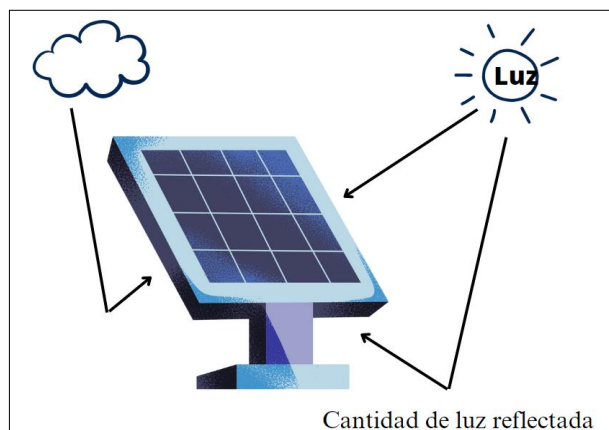


Figura 3. Funcionamiento Celda PERC BIFACIAL.

Una vez explicado el funcionamiento de cada tecnología se presentan en la Tabla 4, los datos requeridos para los cálculos, obtenidos de las fichas técnicas de cada panel solar:

Tabla 4. Datos de las fichas técnicas.

Especificación	Tecnología 1-PERC	Tecnología 1-PERC BIFACIAL
Coefficiente de temperatura (P_{MAX})	-0.34%/°C	-.35%/°C
Coefficiente de temperatura (V_{OC})	-0.26%/°C	-0.29%/°C
Coefficiente de temperatura (I_{SC})	-0.5%/°C	-0.048%/°C
Temperatura de operación nominal del módulo A NOCT	42°C	43°C
Temperatura ambiente prueba NOCT	20°C	20°C
Temperatura de la celda a condiciones estándar	25°C	25°C
Irradiancia normal de operación de célula W/m ²	800 W/m ²	800 W/m ²
Potencia máxima de celda a condiciones estándar	525 W	525 W
Tensión óptima de operación	38 V	39 V
Tensión en circuito abierto	45.8 V	49.06 V

Datos meteorológicos

México se divide en 3 zonas, esta división regional del territorio mexicano se estableció a partir de la combinación de factores físico-naturales e histórico-culturales, la agrupación de los estados que presentan características similares, ya sean de tipo físico, cultural y/o económico, que dio origen a la formación de 3 regiones, lo cual permite facilitar el estudio de México. Para la zona norte se seleccionó Rosarito, Baja California, para la zona sur Coatepec, Veracruz y para la zona del bajo Salamanca, Guanajuato.

Los datos de temperatura e irradiancia de cada sitio de estudio se obtuvieron del sitio oficial de la NASA: "NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources". Dentro de la información de acceso libre, ofrece mapas interactivos, aplicaciones y servicios de datos a través del Proyecto de Predicción de Recursos Energéticos Globales (POWER). Estos recursos describen las condiciones climáticas, la radiación solar y cómo pueden

cambiar con el tiempo. Los datos de la NASA son utilizados por líderes de la ciudad, empresas de servicios públicos, gerentes de instalaciones y diseñadores de sistemas de energía renovable para estimar el potencial de energía solar y eólica, modelar el uso de energía de los edificios y calcular la generación potencial de energía. Los datos también ayudan a agricultores, comerciantes de productos básicos y navegantes. El proyecto POWER ha crecido desde su inicio en 2002 y sirve como acelerador en el cambio hacia la energía limpia. Proporciona datos climáticos y series de tiempo como servicio, ayudando a educar a los planificadores sobre futuras expectativas. El Visor de acceso a datos y la interfaz de programación de aplicaciones (API) permiten a los usuarios ver, explorar y utilizar los datos de energía renovable en aplicaciones y análisis de GIZ (Cummins, 2022).

Se definieron los meses de mayo y diciembre en horarios de 12:00 pm y 16:00 pm porque se comparó la eficiencia en un día de primavera y en otro de invierno cuando el sol esta más fuerte y cuando ya va bajando para ver la variación que existe entre una estación del año donde la temperatura e irradiación es elevada y otra donde no lo es.

La simbología de color para cada ciudad mostrada en los siguientes mapas va de acuerdo con la irradiancia que se tiene en cada sitio, para n la zona norte (color rojo) existe una irradiancia mayor, mientras que la zona bajo (anaranjado) cuenta con una irradiancia media y finalmente la zona sur (amarillo) tiene la menor irradiancia.

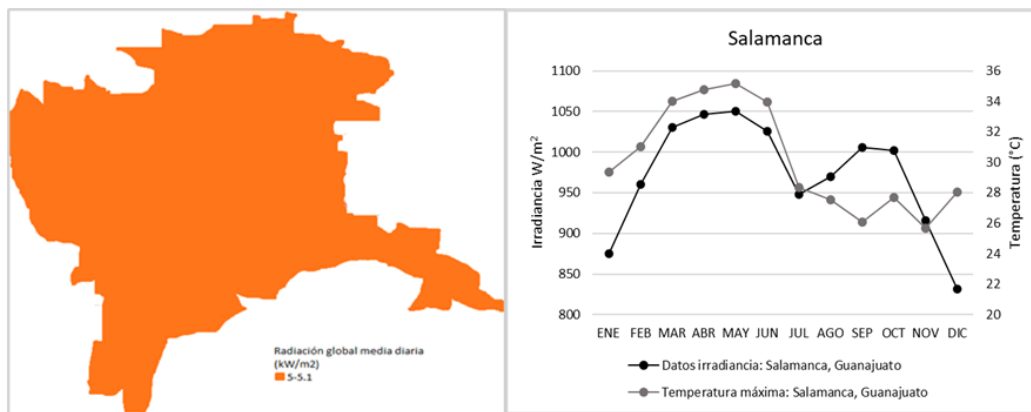


Figura 4. Irradiancia y temperatura de Salamanca, Gto.

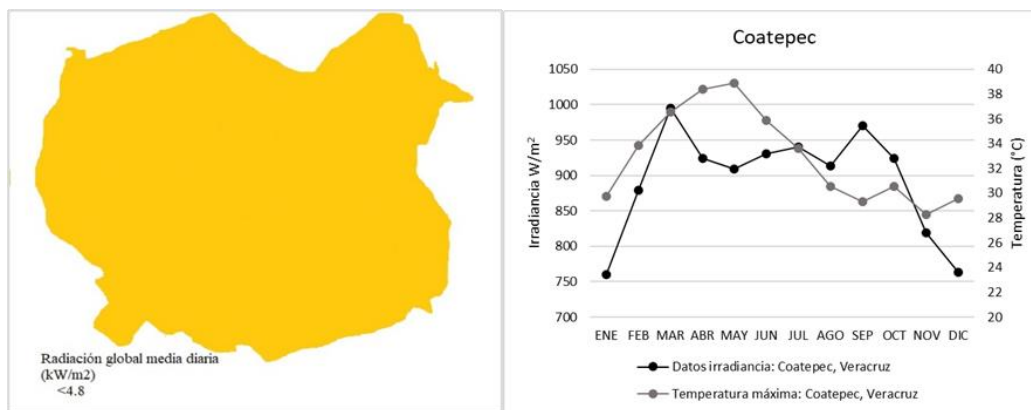


Figura 5. Irradiancia y temperatura de Coatepec, Veracruz.

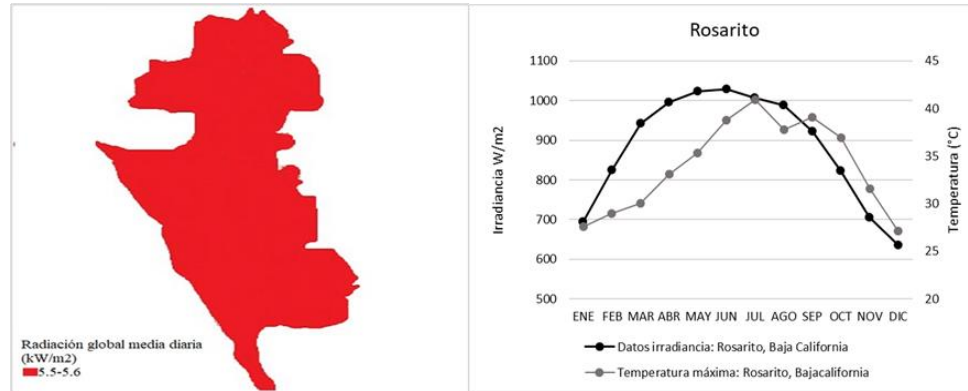


Figura 6. Irradiancia y temperatura de Rosarito, BCN.

Modelo matemático

Para el modelo matemático se utilizaron una serie de ecuaciones para calcular las diferentes tensiones, corrientes y voltajes que presenta cada tipo de celda de acuerdo con sus datos técnicos y la zona geográfica en la que se encuentren, esto para obtener la eficiencia del panel (Alvarado, 2015).

El primer objetivo del cálculo se centró en encontrar la temperatura que tendría el panel en la superficie bajo las condiciones específicas que se mencionaron anteriormente y se obtuvo de la siguiente manera:

$$T_{cel} = [T_{amb} + (T_{NOCT} - T_{ambNOCT}) \cdot \frac{E_s}{E_{NOCT}}] \quad (1)$$

Donde:

T_{amb} =Temperatura ambiente [°C]

T_{cel} =Temperatura celda [°C]

T_{NOCT} =Temperatura nominal de operación de célula a NOCT [°C]

$T_{ambNOCT}$ =Temperatura ambiente prueba NOCT [°C]

E_s =Irradiancia del sitio [W/m²]

E_{NOCT} =Irradiancia normal de operación de célula [W/m²]

A continuación, se obtuvo un gradiente de temperatura que calculo para después poder obtener las corrientes, tensiones e intensidades de cada panel:

$$\Delta T = T_{cel} - T_{std} \quad (2)$$

Donde:

ΔT = Gradiente de temperatura [°C]

T_{cel} = Temperatura de celda [°C]

T_{std} = Temperatura de la celda a condiciones estándar [°C]

Se realizó el cálculo de variaciones de tensiones, corrientes y potencias con las siguientes fórmulas:

$$P_m \text{ en } \% = Coef_{temPm} \cdot \Delta T \quad (3)$$

Donde:

P_m en % = Variación de la potencia máxima [%]

$Coef_{temoPm}$ = Coeficiente en temperatura de la potencia máxima [°C]

ΔT = Gradiente de temperatura [°C]

$$V_{oc} \text{ ó en } V_{mp} \text{ en \%} = Coef_{temVoc} \cdot \Delta T \quad (4)$$

Donde:

V_{oc}/V_{mp} = Variación de la tensión de circuito abierto/tensión a máxima potencia [V]

$Coef_{temoVoc}$ = Coeficiente de temperatura circuito abierto [°C]

ΔT = Gradiente de temperatura [°C]

$$I_{mp} \text{ ó } I_{sc} \text{ en \%} = Coef_{temImp} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Donde:

I_{mp}/I_{sc} = Variación de las corriente de circuito abierto/corriente a máxima potencia [A]

$Coef_{temoVoc}$ = Coeficiente de temperatura circuito abierto [°C]

ΔT = Gradiente de temperatura [°C]

Finalmente se obtuvieron los valores finales de las tensiones, corrientes y potencias:

Cálculo del valor de la potencia máxima corregida:

$$P_{mc} = \left[\frac{(100\% + P_m\%)}{100\%} \right] \cdot P_{std} \quad (6)$$

Donde:

P_{mc} = Valor potencia máxima corregida [W]

P_m en % = Variación de la potencia máxima [%]

P_{mstd} = Potencia máxima a condiciones estándar [W]

Cálculo del valor de la tensión a máxima potencia corregida:

$$M_{pc} = \left[\frac{(100\% + V_{mp}\%)}{100\%} \right] \cdot M_{pstd} \quad (7)$$

Donde:

M_{pc} = Valor de la tensión a máxima potencia corregida [V]

V_{mp} en % = Variación de la tensión a máxima potencia [%]

M_{pstd} = Tensión a máxima potencia a condiciones estándar [V]

Cálculo del valor de la tensión de circuito abierto corregida:

$$V_{oc} = \left[\frac{(100\% + V_{oc})}{100\%} \right] \cdot V_{ocstd} \quad (8)$$

Donde:

V_{oc} = Valor de la tensión de circuito abierto corregida [V]
 V_{oc} en %=Variación de la tensión de circuito abierto [%]
 V_{ocstd} = Tensión de circuito abierto a condiciones estándar [V]

Cálculo del valor de la intensidad a máxima potencia corregida:

$$I_{mpc} = \left[\frac{(100\% + I_{mp}\%) }{100\%} \right] \cdot I_{mpstd} \quad (9)$$

Donde:

I_{mpc} = Valor de la intensidad a máxima potencia corregida [A]
 I_{mp} en %=Variación de la intensidad a máxima potencia [%]
 I_{mpstd} = Intensidad a máxima potencia a condiciones estándar [A]

Cálculo del valor de la intensidad de circuito abierta corregida:

$$I_{sc} = \left[\frac{(100\% + I_{sc}\%) }{100\%} \right] \cdot I_{scstd} \quad (10)$$

Donde:

I_{sc} = Valor de la intensidad de circuito abierto corregida [A]
 I_{sc} en %=Variación de la intensidad de circuito abierto [%]
 I_{scstd} = Intensidad de circuito abierto a condiciones estándar [A]

Finalmente, la eficiencia de operación del módulo en sitio está dada por el valor de la potencia máxima corregida y la potencia máxima a condiciones estándar:

$$\eta_{rc} = \frac{P_{mc}}{P_{mstd}} \cdot 100 \quad (11)$$

Donde:

η_{rc} = Eficiencia del sistema
 P_{mc} = Valor potencia máxima corregida
 P_{mstd} = Potencia máxima a condiciones estándar

Resultados

A continuación, se sintetizan los resultados de las estimaciones de la eficiencia energética para la tecnología 1-PERC en la Tabla 5, y la para la tecnología 1-PERC BIFACIAL en la Tabla 6.

Se observa que los valores correspondientes a las temperaturas son mayores en la zona norte del país, este factor tiene un papel importante ya que los paneles fotovoltaicos al contrario de lo que se cree, tienen una eficiencia menor cuando la temperatura es mayor, es decir, un panel solar tiene un mejor funcionamiento cuando la temperatura del sitio esta aproximada a la temperatura a condiciones estándar (25°C), es por ello por lo que tenemos una eficiencia mayor en los meses de invierno.

Por su parte la irradiancia también es mayor en la zona norte que en el sur o el bajío, como se aprecia en los valores indicados.

Rosarito cuenta con una irradiancia mayor a las de Salamanca y Coatepec, es por ello por lo que la eficiencia que tendrían los paneles será mayor en esa zona, aunque sea primavera e invierno.

Tabla 5. Resumen de cálculos tecnología PERC.

Primavera Tecnología 1-PERC										
Ciudad	Latitud	Longitud	Hora	T1 (°C)	R1(Wh/m ²)	E1 (%)	Hora	T2 (°C)	R2 (kW/m ²)	E2 (%)
Rosarito	32.36	-117.04	12:00	27.6	846.8	18.2	16:00	23.8	386.46	19.4
Salamanca	20.5669	-101.2001	12:00	31.9	770.8	18.1	16:00	30.4	343.25	19.0
Coatepec	19.4557	-96.9611	12:00	33.1	674.0	14.6	16:00	30.8	320.5	17.0
Invierno Tecnología 1-PERC										
Ciudad	Latitud	Longitud	Hora	T3 (°C)	R3(Wh/m ²)	E3 (%)	Hora	T4 (°C)	R4(Wh/m ²)	E4 (%)
Rosarito	32.36	-117.04	12:00	22.9	795	18.7	16:00	22.4	95.5	20
Salamanca	20.5669	-101.2001	12:00	24.9	789.7	18.5	16:00	24.55	81.9	19.9
Coatepec	19.4557	-96.9611	12:00	26	710	18.6	16:00	20.2	99.90	18.5

Tabla 6. Resumen de cálculos tecnología PERC BIFACIAL.

Primavera Tecnología 1-PERC BIFACIAL										
Ciudad	Latitud	Longitud	Hora	T (°C)	R1(Wh/m ²)	E1 (%)	Hora	T2 (°C)	R2(Wh/m ²)	E2 (%)
Rosarito	32.36	-117.04	12:00	27.6	846.8	18.1	16:00	23.8	386.46	19.3
Salamanca	20.5669	-101.2001	12:00	31.9	770.8	18.0	16:00	30.4	343.25	18.9
Coatepec	19.4557	-96.9611	12:00	33.1	674.0	18.1	16:00	30.8	320.5	16.5
Invierno Tecnología 1-PERC BIFACIAL										
Ciudad	Latitud	Longitud	Hora	T3 (°C)	R3 (Wh/m ²)	E3 (%)	Hora	T4 (°C)	R4(Wh/m ²)	E4 (%)
Rosarito	32.36	-117.04	12:00	22.9	795	20.0	16:00	22.4	95.5	19.9
Salamanca	20.5669	-101.2001	12:00	24.9	789.7	18.4	16:00	24.55	81.9	19.8
Coatepec	19.4557	-96.9611	12:00	22.1	710	18.8	16:00	20.2	99.9	19.9

También se observa que cuando la temperatura comienza a descender a las 4:00 pm la eficiencia del panel incrementa, pues como se mencionó anteriormente, entre más cercana esta la temperatura del sitio a la temperatura estándar (25°C) será más óptimo el funcionamiento del panel fotovoltaico.

Acorde con la literatura, los valores de la eficiencia que reportan las tecnologías de los paneles solares a la fecha (alrededor del 20%) se concluye que entre las dos tecnologías estudiadas: 1-PERC y 1-PERC BIFACIAL, esta última fue la que mostró una mayor eficiencia, lo que la hace más competitiva en el mercado por las características de doble celda que ofrece.

Conclusiones

Emigrar a energías alternativas para la producción de electricidad es una estrategia inteligente en la que distintos países han ido involucrándose de cara a un planeta más sustentable, en el cumplimiento de los Acuerdos Internacionales de reducir las emisiones GEI, lo que implica reducir impactos ambientales, sociales y económicos que sufre la sociedad moderna.

La energía solar fotovoltaica es una forma sencilla y factible de producir energía eléctrica sin emisiones contaminantes ni emisiones de GEI.

El correcto diseño de los sistemas fotovoltaicos que satisfaga las necesidades que demanda la sociedad moderna a través de las distintas actividades económicas requeridas para su desarrollo, implica un estudio previo de valores entre potencias, tensiones y corrientes para determinar la eficiencia real de las tecnologías que se ofrecen en el mercado. Para esto, los diseñadores aportan información valiosa para estas estimaciones a través de las fichas técnicas que ponen al alcance de los responsables de hacer tangibles

estos proyectos de energías limpias. De igual manera la NASA, ofrece distintas plataformas con datos meteorológicos diversos, entre los que se destaca la irradiancia y la temperatura dependiendo de la ubicación geográfica donde se instalará el sistema fotovoltaico. Estas estimaciones permiten además de un correcto diseño, argumentos fuertes para la selección de la tecnología más adecuada para las necesidades energéticas de los usuarios.

Bibliografía/Referencias

- Al-Ezzi, A. S. y Ansari, M. N. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. MDPI.
- Alvarado, R. (2015). Manual para la evaluación técnica-económica de: "Sistemas Fotovoltaicos Interconectados. Distrito Federal: GIZ.
- Ahmad, J., Imran, M., Khalid, A. I., Ashraf, S. R., Adnan, M., Ali, S. F. y Khokhar, K. (2018). Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar. *Energy*, 208-234.
- Baghdadi, I., Yaakoubi, A., Attari, K., Leemrani, Z. Y Asselman, A. (2018). International Conference interdisciplinarity in Engineering. 667-674.
- Bayer, B., Patrick, M., Heiko, T. Y Adela, M. (2018). The German experience with integrating photovoltaic systems into the low-voltage grids. *Science Direct*, 1-13.
- Chai, J.-H., Wong, B. y Joudkazis, S. (2020). Black-silicon-assisted photovoltaic cells for better conversion efficiencies: a review on recent research and Development efforts. *Materials Today Energy*, 1-23.
- Collado, E. (2009). Energía solar fotovoltaica, competitividad y evaluación económica, comparativa y modelos. 1-397.
- Cummens, P. (22 de marzo de 2022). Obtenido de ESRI Ecuador: <https://www.esri.ec/arcgisblog/cartografia-del-potencial-de-las-energias-renovables-con-la-ayuda-de-nasa-power/#:~:text=A%20través%20de%20su%20Proyecto,pueden%20cambiar%20con%20el%20tiempo>.
- De Corso, G. y. Pinilla (2017). Análisis de las políticas energéticas a partir del cumplimiento de la reducción de emisiones de dióxido de carbono (CO2) entre países de América Latina con economía extractiva. *Facultad de Ciencias Básicas*, 34-43.
- ECO GREEN ENERGY (6 DE JULIO DE 2023). Obtenido de Guía completa panel solar bifacial <https://www.eco-greenenergy.com/es/panel-solar-bifacial/>.
- Fernández, L. y Cervantes, A. (2017). Proyecto de diseño e implementación de un sistema fotovoltaico de interconexión a la red eléctrica en la Universidad Tecnológica de Altamira. 1-136.
- Helio Esfera. (2017). Obtenido de Helio Esfera: <https://www.helioesfera.com/como-funciona-un-sistema-fotovoltaico-de-autoconsumo/>
- Hernández, R. (2017). Análisis de factibilidad para la instalación de un sistema de energía limpia mediante celdas fotovoltaicas para la alimentación eléctrica del edificio 4 en el itslv. *CIATEQ*, 1-85.
- Janda, K. (2018). Slovak electricity market and the price merit order effect of photovoltaics. *Energy Policy*, 551-562.
- Luna, R., y Ramos, H. (octubre de 2014). Diseño de un sistema Fotovoltaico integrado a la Red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca. Tesis. Chihuahua, Chihuahua, México: CIMAR.
- Mejía. E.J. (2019). Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo para el suministro de energía eléctrica al laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Amazónica. *Revista Pakamuros*. 73-88.
- Mikati, M., Santos, M. y Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar. *Science Direct*, 1-15.
- Naciones Unidas. (13 de Mayo de 2023). Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Naciones Unidas. (13 de Mayo de 2023 a). Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Naciones Unidas. (12 de Mayo de 2023 b). Obtenido de <https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change>
- Rajan, J. y Fernández, F. (2019). Power control strategy of photovoltaic plants for frequency regulation in a hybrid power system. *Electrical Power and Energy Systems*, 171-183.
- Rouse, M. (24 de Agosto de 2021). Obtenido de techno pedía: <https://www.techopedia.com/definition/14871/ambient-temperature-data-centers>
- SENER. (09 de Mayo de 2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037-335360?idiom=es>
- Sun, K., Li, K., Pan, J., Liu, Y. y Liu, Y. (2019). An optimal combined operation scheme for pumped storage and hybrid wind-photovoltaic complementary power generation system. *Applied Energy*, 1155-1163.
- Syafaruddin, Engin, K. y Takashi, h. (2011). Fuzzy wavelet network identification of optimum operating point of non-crystalline silicon solar cells. *ELSEVIER*.

- Tang, Z., Lim, Y., Morris, S., Yi, J. L., Lyons, P. F. y Taylor, P. C. (2019). A comprehensive work package for energy storage systems as a means of frequency regulation with increased penetration of photovoltaic systems. *Electrical Power and Energy Systems*, 197-207.
- TECNOSOL (5 de julio de 2023). Obtenido de Tecnología PERC y HALF CELL en paneles solares. [https://tecnosolab.com/noticias/tecnologia-perc-y-half-cell-en-paneles-solares/#:~:text=PERC%20\(Passivated%20Emitter%20Rear%20Cell,parte%20trasera%20del%20panel%20solar.](https://tecnosolab.com/noticias/tecnologia-perc-y-half-cell-en-paneles-solares/#:~:text=PERC%20(Passivated%20Emitter%20Rear%20Cell,parte%20trasera%20del%20panel%20solar.)
- Thompson, M. (2007). Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems, *IET Renewable Power Generation* 1. IEEE Xplore.