

Análisis del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos fabricados con silicio

Berny Alejandro Forero Vélez* y Cristian David Esquivel Villamarin**

Resumen

En este artículo se muestra que en un sistema solar fotovoltaico existen diferentes variables que se deben tener presentes, ya que pueden afectar el rendimiento de los paneles, así como el resultado final de la energía eléctrica obtenida. Todo esto se realizará con énfasis en el material de construcción de los paneles solares fotovoltaicos, que en este caso es el silicio, y cómo este material de construcción puede llegar a afectar características físicas, químicas y de rendimiento en los paneles. También se realiza un análisis matemático con relación a este para poder entender por qué y cómo este material de construcción y otras variables se relacionan para finalmente dar como resultado el rendimiento del sistema solar fotovoltaico. Los resultados que se presentan en este proyecto llegarán a ser fundamentales para entender el funcionamiento básico de una planta solar fotovoltaica y para crear en el lector una perspectiva de análisis sobre qué tipo de panel solar adquirir según las necesidades que se tengan.

Abstract

This article shows that in a photovoltaic solar system there are different variables that must be considered, since they can affect the performance of the panels, as well as the final result of the electrical energy obtained. All this will be done with emphasis on the construction material of the photovoltaic solar panels, which in this case is silicon, and how this construction material can affect physically, chemically and performance characteristics in the panels. It is also made a mathematical analysis to understand why and how this construction material and other variables are related to the final outcome in the performance of the solar photovoltaic system. The results that are presented in this project will become fundamental to understand the basic operation of a photovoltaic solar plant, and to create in the reader an analytical perspective regarding what type of solar panel to acquire according to the needs that can appear.

Cómo citar este artículo

(APA): Forero, B. y Esquivel, C. (2019). Análisis del rendimiento de paneles solares fotovoltaicos fabricados con silicio. *Hashtag*, (15), 35-45

> **Palabras clave:** Análisis matemático, paneles solares fotovoltaicos, rendimiento, silicio

> **Keywords:** Mathematical analysis, photovoltaic solar panels, performance, silicon

* Ingeniería Mecatrónica. Energías Renovables. Contacto: alejforevel@hotmail.com

** Ingeniería Mecatrónica. Energías Renovables. Contacto: cdesquivel7@misena.edu.co

Introducción

La energía solar fotovoltaica, al igual que otras energías renovables, constituye una fuente inagotable que puede contribuir al autoabastecimiento energético nacional. Además, este tipo de energías es menos perjudicial para el medio ambiente con respecto a otras fuentes de energía. En la actualidad, el silicio es uno de los elementos más utilizados en la electrónica, microelectrónica y en células solares, por su abundancia en el planeta: $2,57 \times 10^5$ p.p.m; así como por sus particulares capacidades utilizables en estos campos. El silicio es el segundo elemento que más se encuentra en la corteza terrestre después del oxígeno. Además, este elemento compone alrededor del 20% de la corteza terrestre y se puede encontrar en lugares recurrentes como en la arena (Martínez, 2011).

El silicio, en la mayoría de los casos, es el material principal en la fabricación de células solares. Sin embargo, este proceso necesita un largo procedimiento con alto costo y consumo de energía, por lo cual la industrialización a gran escala de la fabricación de células solares de silicio se ha obstaculizado. Por ello, se han desarrollado métodos de purificación metalúrgica, dado su bajo costo y por ser menos nocivo para el medio ambiente (Khanna, Reddy y Tapas, 2018a; 2018b).

La complicación principal en su fabricación es el desafío que representa la eliminación de impurezas en el silicio, ya que estas no se pueden eliminar efectivamente mediante el último paso clave de solidificación direccional en la cadena de valor de las tecnologías de células solares de silicio. Por esta razón se investiga la remoción de estas impurezas a temperaturas ultra altas

(UHT) en un proceso de refinación por inducción al vacío (Liu, Chen y Chen, 2019).

De igual manera, para los paneles solares el silicio es el material fundamental para su fabricación. Su función es captar el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol y transformadas en energía eléctrica, gracias al efecto fotoeléctrico que poseen los paneles solares fotovoltaicos (Cantos, 2016).

Cabe mencionar que otras de las posibles variables que llegan a afectar el rendimiento de los paneles solares son el ángulo de inclinación de los paneles, la irradiancia que recibirá con respecto al lugar de la instalación del panel solar, la potencia pico del panel solar, temperatura del panel, entre otros. Estos factores serán mencionados y conceptualizados más adelante, de manera general, para entendimiento del lector.

Finalmente, cabe resaltar un concepto que se suele utilizar en el contexto de plantas solares: la irradiancia: En el interior del sol ocurren ciertas reacciones nucleares en las que la materia se transforma en energía. Una pequeña parte de la energía irradiada por el sol es interceptada por la tierra, la cual está situada a unos 150 millones de km de distancia. La irradiancia solar hace referencia a la magnitud empleada para indicar el valor de la radiación incidente en una superficie. En el caso del sol, se define como la energía solar recibida por cada m^2 en un segundo. Esta dependerá de la ubicación en la que nos encontremos en la tierra y del mes en curso. Este factor es fundamental, ya que se utilizará más adelante para el análisis de paneles solares y su eficiencia (Llorente, Álvarez y Blanco, 2011).

Metodología

Se utiliza un análisis general para identificar las principales características de los paneles solares fotovoltaicos y se detalla específicamente el apartado del material de su construcción, en este caso el silicio. Dentro de este análisis, se presentan varios procesos involucrados en la fabricación de las células solares, así como las características que tendrán, dependiendo del tipo de silicio que se haya utilizado para su construcción. Luego se revisará el apartado del rendimiento, sujeto principalmente al tipo de silicio que se utilizó y a otras variables primordiales presentes en el análisis de rendimiento para los paneles solares fotovoltaicos. De esta forma, teniendo claro lo que se va a buscar, se lleva a cabo una etapa de revisión y recopilación de información con respecto al tema, para luego filtrar y extraer los más fundamentales para el análisis y resultados de la parte final.

El proyecto se implementará mediante una investigación de tipo cuantitativa, enfocada a la recolección de datos numéricos, que permitan concluir y dar soporte a la relación en términos de rendimiento del silicio y del tipo de panel solar a construir. Las fases para seguir en el método que se va a desarrollar son:

- Fase 1. Diagnóstico: por medio de la observación, investigación y documentación, se podrá evaluar diferentes casos con respecto a los paneles solares utilizados en diferentes instalaciones, su tipo de material de construcción y su rendimiento energético final.
- Fase 2. Análisis de la información: por medio de los datos de rendimiento que se encuentren, se realizará un filtro para poder adquirir la documentación más relacionada a lo que se quiere buscar, para así tener bases sólidas para la construcción del documento.
- Fase 3. Análisis de información reunida: una vez identificadas las fuentes de información, se puede analizar la temática por tratar e ir sacando ideas principales, relaciones, variables, efectos en todo el sistema de una planta solar fotovoltaica, detallando específicamente el rendimiento sujeto al tipo de material del que está construido el panel.
- Fase 4. Análisis final y conclusiones finales: después de realizar un análisis detallado y de analizar situaciones, así como planteamiento matemático, se podrá extraer un análisis más completo con sus respectivas conclusiones finales del trabajo.

Resultados

El silicio se puede encontrar formando algunos óxidos como por ejemplo el cuarzo o los silicatos que se encuentran en la arena y el barro. El silicio está constituido por átomos que poseen 4 electrones de valencia, y es gracias a esta propiedad eléctrica que es posible la elaboración de los paneles solares, pues en ellos la energía producida por el sol consigue romper los enlaces covalentes contenidos en cada átomo de silicio para

que los electrones de valencia puedan fluir con libertad por la estructura de cristal del material semiconductor (Velandia, 2018).

Lo anterior tiene una gran relación con el funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos que funcionan gracias al efecto fotoeléctrico. Este principio en términos sencillos explica que hay unos fotones que contienen energía definida

por la frecuencia de la luz. Si el electrón absorbe la energía de un fotón y este último tiene más energía que la función del trabajo, el electrón será arrancado de este material. En cambio, en caso de que la energía del fotón sea muy baja, el electrón no será arrancado. Este fenómeno normalmente solo se suele dar en ciertos materiales al ser irradiados como es el caso del silicio dopado, con el que fabrican las células solares que están dentro de los paneles solares (Rutatizibwa, 2017).

Continuando con la idea anterior, el efecto fotoeléctrico en la actualidad depende en mayor parte del material con el que está hecho el panel solar. Los paneles solares están hechos principalmente de silicio, y de ahí derivan los paneles de monocristales de silicio, policristales de silicio, entre otros, que se diferencian en varias características, especialmente en rendimiento, construcción y costo (Ecoinventos, 2019).

Estas células monocristalinas se crean en láminas con bordes redondeados a partir de un bloque cilíndrico y se diferencian de los policristalinos por estar fabricadas con silicio de muy alta pureza, lo que las hace más eficientes. Por su parte, las celdas policristalinas son menos puras que las monocristalinas, porque el silicio se funde en bruto, por lo que presenta impurezas. Normalmente estos paneles poseen una eficiencia máxima del 16 %, principalmente por la poca cantidad de silicio que contienen; pero el aspecto positivo de las células policristalinas radica en su bajo costo en relación con las células monocristalinas (Cantos, 2016).

En los materiales monocristalinos, los átomos se encuentran ordenados y se enlazan de la misma forma. Esta estructura se repite en la mayor parte del cristal. Normalmente la estructura del silicio monocristalino es de tipo diamante, con una red 0.54nm; en cambio, en los policristalinos cada átomo de silicio forma unos granos

monocristalinos pequeños cuyo orden es aleatorio. También, hay una estructura de tipo amorfa en la que sus átomos de silicio se orientan de forma aleatoria, pero conservan las características que tiene un sólido. El coeficiente de absorción que tiene es más grande que la del silicio monocristalino y la gran densidad de defectos presenta en su red hace que haya una longitud de difusión de unos portadores minoritarios mucho menor (Velandia, 2018).

Por todo lo anterior se puede afirmar que existe un gran número de aplicaciones para las nanoestructuras de silicio; entre ellas encontramos la nanoelectrónica, optoelectrónica, almacenamiento de energía, intercambio de energía, sensores biológicos/químicos, entre otras. Algunas de las nanoestructuras más comunes serían el silicio poroso, nanocables de silicio, nanopartículas, nanocristales y puntos cuánticos. Entre los métodos de fabricación de nanoestructuras se puede mencionar el grabado con iones reactivos, evaporación térmica, ablación láser, grabado con plasma, grabado químico asistido por metal, MACE.

Este último método, el método MACE, es un proceso simple, tiene ciclos de fabricación cortos y su costo de manufactura es bajo. Este método ha sido comprobado en celdas solares, batería de litio negativa, supercondensador y fabricación de sensores de nano cables. En este método los factores fundamentales de influencia que deciden el proceso de grabado y la morfología final son el sustrato metálico, la concentración de grabado, la temperatura de grabado, el tiempo de grabado, la intensidad de la luz y el sustrato de silicio.

Desde la perspectiva de los cálculos, es posible determinar la eficiencia del módulo fotovoltaico. Para este caso, se determina la cantidad de potencia que se adquiere de este módulo. Esta eficiencia se tomará en un porcentaje que

representa la energía eléctrica producida por cada módulo. Por ejemplo, mostrar que la energía eléctrica producida representa un 30% (y el

70% restante sería la luz solar que no se transforma en energía), se prueba con la siguiente ecuación, afirmando que el 70% es Q:

$$W + Q = \Delta U$$

donde

Transformación de la energía interna = ΔU

El calor que se adhiere al sistema = Q

El calor que procesa el sistema = W

(Ecuación 1)

Por esto la importancia de la variable de la temperatura, ya que, en términos generales, cuanto más temperatura tengan los paneles solares fotovoltaicos, más se podría afectar el rendimiento de estos, y, por ende, la energía eléctrica que se esté produciendo. Obviamente los paneles solares fotovoltaicos estarán expuestos a cierta temperatura del medio, pero cuando esta temperatura pase un umbral, determinado por el tipo de panel, esta temperatura de más pasará a afectar negativamente la planta solar.

ambiente, ya que los paneles deben tener alguna área totalmente despejada para que no haya una intercepción de rayos solares y, en condiciones comunes, debería estar a una temperatura ambiente de 25°C, porque una temperatura mayor puede afectar el rendimiento y causar daños en el módulo.

Por esto mismo se debe tomar en cuenta, en la eficiencia el tamaño del módulo, la temperatura

También se identificará otra variable, llamada factor forma (FF), que ayudará a determinar la eficiencia del módulo. Para calcularla usaremos la siguiente ecuación (Torres, Jurado, Granados y Lozano, 2018):

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Donde:

V_{mp} = Tensión del panel en el punto máximo de potencia

I_{mp} = Corriente del panel en el punto máximo de potencia

V_{oc} = Máxima tensión en circuito abierto

I_{sc} = Máxima corriente en corto circuito

(Ecuación 2)

Estas cuatro medidas son realmente importantes en cualquier instalación solar fotovoltaica, ya que estas estarán en la información suministrada por parte del fabricante de los paneles solares fotovoltaicos hacia el usuario. A continuación se presenta una pequeña explicación de su significado:

- **Intensidad en cortocircuito o ISC (Short Circuit Current):** significa la intensidad de corriente en amperios que el panel puede producir cuando está en cortocircuito. En otras palabras, si unimos el cable positivo del panel con el cable negativo, se entra en cortocircuito; mediante una pinza de medición

podremos comprobar la intensidad máxima que es capaz de producir el panel.

- **Voltaje a máxima potencia o VMP (Maximum Power Voltage):** es la cifra que nos determina qué tipo de panel es, 12V, 24V u otro, según el caso. Para ser un panel de 12V la cifra debe estar entre 15V y 19V; mientras que para que sea de 24V, esta cifra debe estar entre 36V y 39V. Esto es así porque, en aislada, el voltaje que ofrece el panel siempre debe ser superior al voltaje de carga de la batería. En el caso que nos ocupa, es un panel de 12V.
- **Intensidad a máxima potencia o IMP (Maximum Power Current):** esta nos indica la intensidad máxima en amperios que produce el panel cuando está conectado a la instalación. Debe considerarse esta cifra para no

quedarnos limitados por el regulador de carga. Si como el panel de ejemplo produce 11.13A, no podremos usar un regulador de 10A, puesto que se quedará corto para la potencia que puede llegar a entregar el panel.

- **Potencia Máxima o P_{MAX}:** es la cifra de potencia que determina el modelo del panel. También se puede calcular al multiplicar el VMP por IMP. Esta cifra se da en vatios y en el ejemplo que vemos son 200W (AutoSolar, 2017).

Por último, se utilizará la siguiente ecuación para determinar la eficiencia, usando los valores encontrados anteriormente. Estaremos involucrando varias partes del sistema para dar con un valor de rendimiento un poco más completo.

$$n = \frac{FF \times Voc \times Isc}{G \times area}$$

donde

G= Irradiancia que recibe en W/m²

Área= Dimensiones de la superficie del módulo en m²

(Ecuación 3)

De esta forma podemos observar cómo por medio de diferentes medidas, se puede sacar valores de rendimiento asociados con este, a través de relaciones matemáticas sencillas. Además, estos valores varían dependiendo de qué tipo de panel solar se tenga, y si profundizamos un poco más, encontraremos que el tipo de panel solar se establecerá de acuerdo al tipo de material con el que está construido, pues este determina las características físicas y químicas que tendrán las células solares y, por ende, el panel.

A continuación, se expondrán los tipos de paneles que más se van a encontrar en el mercado, así como sus características principales que varían según la manera como estén contruidos.

Esto con el objetivo de que la persona que quiera comprar un panel solar fotovoltaico ya tenga una referencia de lo que se va a encontrar a nivel comercial.

- **Paneles monocristalinos.** Estos son los paneles más eficientes en el mercado, son los más antiguos que se han fabricado y han tenido una mejora continua a lo largo de los años. Entre sus ventajas se destaca la duración de operación, no son afectados en gran medida las altas temperaturas, su eficiencia puede llegar al 22 % y tiene un requerimiento mínimo de espacio. Entre sus desventajas se menciona que el costo es alto y son físicamente frágiles.

- **Paneles policristalinos.** Estos son los paneles con mejor precio en el mercado. Entre sus ventajas se puede destacar su manufactura simple y que su durabilidad es bastante similar al de los monocristalinos. Entre sus desventajas se menciona que necesita mucho espacio y su eficiencia máxima llega al 17 %.

Como último aspecto a considerar con respecto de la energía solar, debemos mencionar los parámetros necesarios para que la producción de esta sea óptima, con el fin de aprovechar el máximo rendimiento de los módulos fotovoltaicos. Los parámetros como la latitud o ángulo de declinación, entre otros, ya han sido definidos y

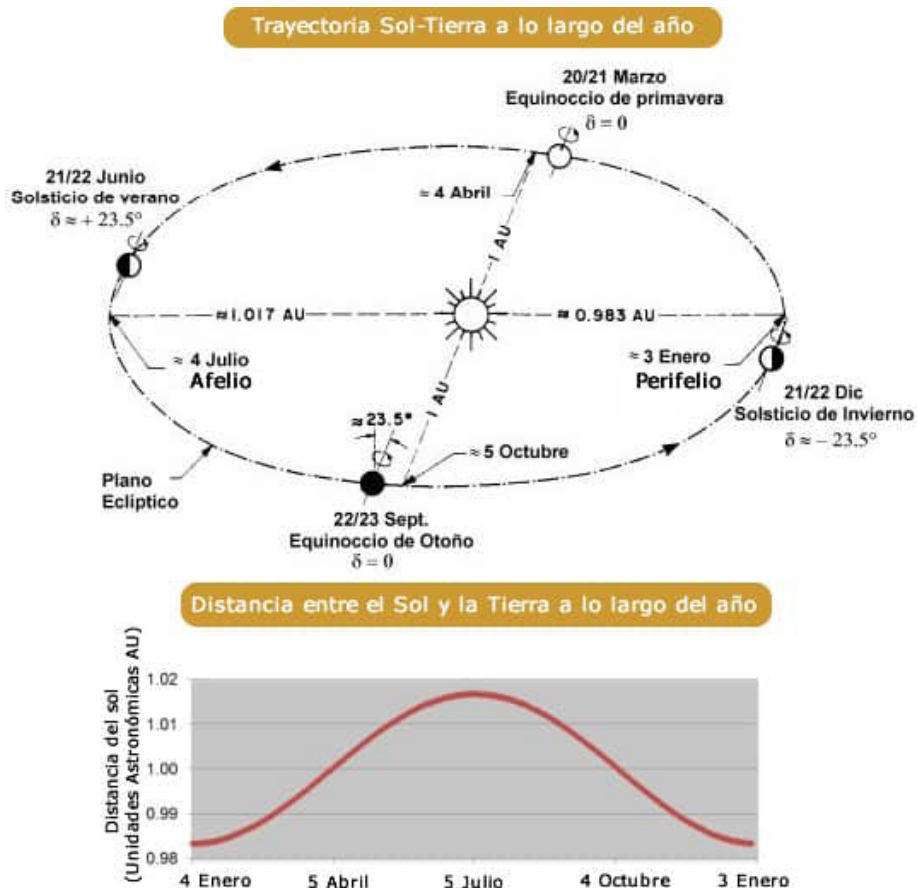
se han convertido en la parte esencial de cualquier proyecto que pretenda implementar el uso de energía solar.

Para tener mayor claridad respecto de los parámetros de producción, consideremos, en primer lugar, que la tierra gira alrededor del sol en una órbita elíptica con el sol en uno de los focos. Una parte de la radiación que llega del sol a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol, por lo que es importante un valor exacto de la distancia sol-tierra. La distancia media sol-tierra se llama una unidad astronómica.

$$AU = 1496 \times 10^8 km$$

(Ecuación 4)

Figura 1. Trayectoria Sol-Tierra a lo largo del año

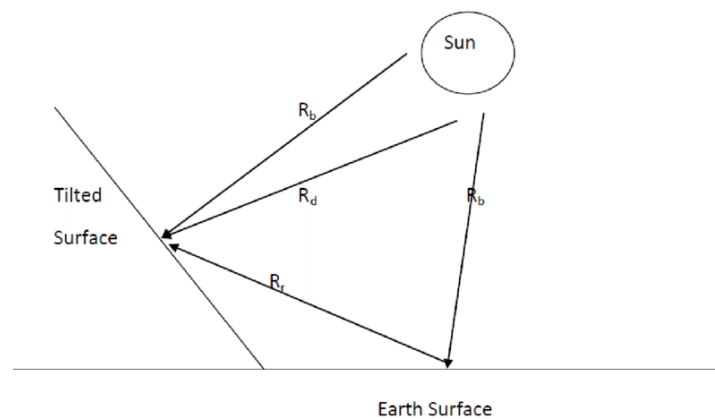


Fuente: Alonso, 2018.

La tierra recibe energía solar en forma de radiación. Estas radiaciones comprenden radiación ultravioleta, visible e infrarroja. La cantidad de radiación solar que llega a una ubicación determinada depende de varios factores, como la ubicación geográfica, la hora del día, la temporada, el alcance de la tierra, el clima local, etc. Dado

que la tierra es prácticamente redonda, los rayos del sol inciden en la superficie de la tierra en diferentes ángulos (que van de 0 ° a 90 °). Cuando los rayos del sol son verticales, la superficie de la tierra obtiene la máxima energía posible (Rajput, 2017).

Figura 2. Radiación directa, difusa y de albedo.



Fuente: Rajput, 2017

$R_b = \text{Radiación directa}$ $R_d = \text{Radiación difusa}$ $R_r = \text{Radiación de albedo}$

$R_t = \text{Radiación total}$

$$R_t = R_b + R_d + R_r$$

(Ecuación 5)

En la figura 2 se observa una representación de los tipos de radiación; con la ecuación se encuentra que la radiación total R_t es igual a la sumatoria de todas las radiaciones que inciden sobre la superficie inclinada de los módulos fotovoltaicos.

Ángulo de declinación

El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación (δ). Si el ángulo resulta al norte de la línea ecuatorial es positivo; si resulta al sur es negativo, entonces en cualquier día del año la declinación se define como:

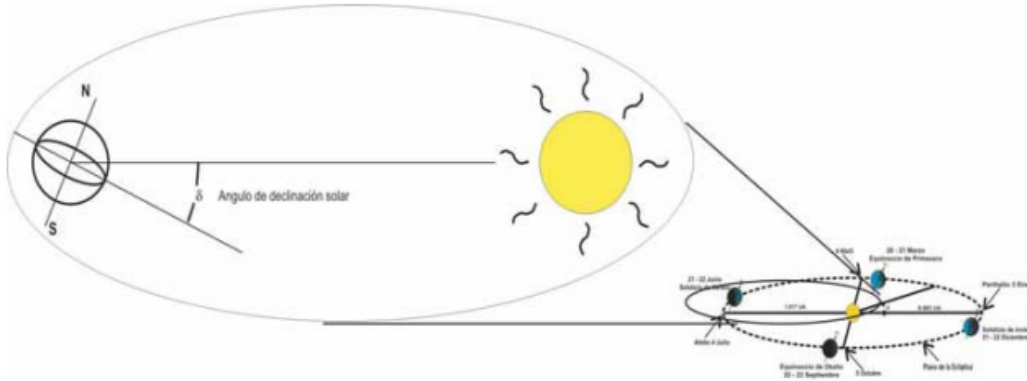
$$\delta = 23.45^\circ \text{sen } 360\left(\frac{284 + n}{365}\right)$$

(Ecuación 6)

El ángulo de declinación varía desde un valor máximo de + 23,45 ° el 21 de junio (solsticio de verano), hasta un valor mínimo de -23,45 el 21 de diciembre (solsticio de invierno). (Unidad de

Planeación Minero Energética, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales, 2005).

Figura 3. Declinación solar



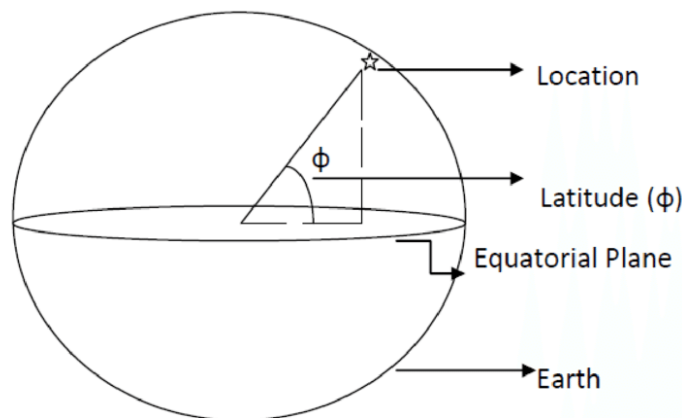
Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales, 2005

Latitud

La latitud de una ubicación es el ángulo formado por la línea radial que une la ubicación con el

centro de la Tierra con la proyección de la línea en el plano ecuatorial.

Figura 3: Ángulo de latitud.



Fuente: Rajput, 2017

Se puede observar que la latitud varía entre:

$$-90^{\circ} \leq \varphi \leq +90^{\circ}$$

(Ecuación 7)

Conclusiones

Cuando se considera instalar un sistema solar fotovoltaico, es conveniente tener en cuenta los planteamientos de este estudio, específicamente al momento de comprar paneles solares fotovoltaicos. Esto permite escoger el que mejor se ajuste a nuestras necesidades, una vez se conocen las características principales de aquellos, lo que permite tener una mejor idea del funcionamiento de variables que puedan afectar su rendimiento.

Analizar proyectos de investigación desde la perspectiva matemática nos permite comprender fenómenos y sus efectos, para un mayor reconocimiento y explicación de los datos obtenidos. Los paneles solares fotovoltaicos están sujetos a diferentes variables que pueden llegar a afectar el funcionamiento adecuado, así como el resultado final de la energía eléctrica obtenida. Aquí se trató de hacer énfasis en el material de construcción del panel y cómo este puede llegar a afectar características físicas y químicas de los paneles solares.

Referencias

- Alonso, A. (2018). Radiación, Geometría, Recorrido óptico, Irradiancia y HSP. Sun-Fields Europe. Recuperado de: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/energia-fotovoltaica-radiacion-geometria-recorrido-optico-irradiancia-y-hsp/>
- AutoSolar. (2017). Cómo entender la ficha técnica de un panel solar. Recuperado de: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-entender-la-ficha-tecnica-de-un-panel-solar>.
- Cantos, J. (2016). *Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas*. Ediciones Paraninfo.
- Ecoinventos (20 de septiembre de 2019). Diferencia entre paneles solares monocristalinos y policristalinos. Recuperado de: <https://ecoinventos.com/diferencia-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos/>
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- Khanna, S., Reddy, K., y Tapas K. Mallick. (2018a). Effect of climate on electrical performance of finned phase change material integrated solar photovoltaic, *Solar Energy*, 174(1) Pag 593 – 605. DOI: 10.1016/j.solener.2018.09.023.

- Khanna, S., Reddy, K., & Tapas K. Mallick. (2018b). Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material, *Solar Energy*, 163, No.1. Pag 591-599. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.002>
- Liu, C.M., Chen, G.B., Chen, H.H. (2019) Cancer cell membrane-cloaked mesoporous silica nanoparticles with a pH-sensitive gatekeeper for cancer treatment, *Colloids Surfaces B Bio-interfaces*, 175(1), 477-486. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.12.038
- Llorente, I., Alvarez, L y Blanco D. (2011). Performance model for parabolic trough solar thermal power plants with thermal storage: Comparison to operating plant data. *Solar energy*, 85(10), 2443-2460. DOI: 10.1016/j.solener.2011.07.002
- Martínez, M. (2011). Capítulo 11: Silicio. Materiales y materias primas. Recuperado de: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/silicio.pdf>
- Rajput, S. (2017). *SOLAR ENERGY- Fundamentals, Economic and Energy Analysis*. Publisher Nitra.
- Rutatizibwa, R. (2017). A Review of Organic Photovoltaic Energy Source and Its Technological Designs, *International Journal of Photoenergy*, 2017. DOI: 10.1155/2017/1656512
- Torres, P., Jurado, P., Granados, L. y Lozano, L. (2018). Efficiency in solar panels. *Revista del Diseño Innovativo*, 2(2). Recuperado de: http://www.ecorfan.org/taiwan/research_journals/Diseno_Innovativo/vol2num2/Revista_Diseno_Innovativo_V2_N2_2.pdf
- Velandia, O. J. (2018). *Estudio y desarrollo de celdas solares basadas en estructuras de silicio cristalino/silicio amorfo dopado* (tesis de grado) Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica Puebla, San Andrés Cholula, México.
- Unidad de Planeación Minero Energética, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales, (2005). Atlas Radiación Solar de Colombia. Apéndice A Relaciones Astronómicas Sol - Tierra. Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf