

General view of solar energy

Roberto Fuentes, Diego Rojas, Marco Rivera, José Riveros, Javier Muñoz, and Patrick Wheeler

Abstract—Solar energy is considered clean, renewable and seemingly inexhaustible source of energy. Solar Energy has been used since ancient times for light and as heat, but in the 20th century, thanks to technological advances, different devices have been developed capable of transforming the energy from the sun into distributable energy, such as electricity. The following article presents an overview of solar energy, presenting the benefits and passive and active technologies. Photovoltaic cells, semiconductors and the conversion of solar energy are also presented.

Keywords—Active technology, Passive technology, Photovoltaic cell, Semiconductor, Solar energy.

I. INTRODUCCIÓN

La demanda energética mundial ha incrementado bastante este último tiempo debido a la enorme tasa de crecimiento de la población, donde gran aporte lo brindan los países desarrollados o que estén en camino a ello. Esto, sumado a la necesidad de disminuir el uso de combustibles fósiles, hace que el siglo XXI se dirija hacia una crisis energética, donde la manera de prevenirla es apuntar hacia la búsqueda de energías renovables [1]. Una gran candidata que día a día mejora su rendimiento es la energía proveniente del sol [2].

La energía solar puede ser aprovechada de dos maneras en la tierra, como energía fotovoltaica (PV) y como energía solar concentrada (CSP) o termo solar, donde cada método posee características que lo hacen tener un avance distinto uno respecto al otro [3]. En si, la energía solar aún ocupa solo una fracción del total de la producción mundial de electricidad, aunque su rol está creciendo rápidamente. En estos últimos años, la energía del sol ha tomado relevancia en la escena energética, gracias a los resultados que presenta su implementación, entre otros factores [4].

En el último tiempo, el aumento de producción de energía eléctrica basada en la energía fotovoltaica ha aumentado en promedio un 27% respecto al escenario cinco años atrás, lo cual supera el aumento promedio de otras fuentes de energías renovables, como por ejemplo, la eólica que lo sigue con un 13% [5], lo que se debe al esfuerzo que empeñan investigadores para mejorar el desempeño de esta tecnología, ya que la eficiencia de las celdas solares que comenzó siendo

de un 6%, ya alcanza el 22% con tecnologías de módulos solares de bifaciales [2].

Se espera que la producción de energía eléctrica provenga entre un 30-50% de fuentes de energías renovables para el año 2030 por sobre el 15% en la actualidad, donde un 35% correspondería a energía solar [6].

En este trabajo se realizará una revisión a los principios básicos de la energía solar comenzando por indagar en el concepto de energía solar y su historia, sus beneficios y cómo ésta se clasifica. Luego, se dará pie a revisar la física detrás del efecto fotoeléctrico, el cual es el responsable de obtener energía de la radiación solar. Se espera que con esto se pueda contribuir a quienes estén comenzando con el estudio de este tipo de sistemas de generación de energía.

II. LA ENERGÍA SOLAR

La energía solar es el flujo de energía ilimitada proveniente del sol. La energía se transmite a través de la luz solar, que es uno de los claros ejemplos de energía solar directa entregada a la tierra.

Algunos tipos se encuentran en formas de energía solar almacenada, donde la lluvia y el viento sirven como almacenamiento a corto plazo de energía solar, y otros, como la biomasa, cuentan con el almacenamiento a largo plazo [7].

Es considerada como una energía inagotable y renovable, ya que se obtiene de una fuente natural que es el sol. El sol es un cuerpo negro con una temperatura superficial de 5500 °C en donde se producen varias reacciones de fusión que generan una gran cantidad de energía [8]. La energía liberada del sol es enorme y puede satisfacer las necesidades humanas en varios miles de millones de veces, donde la producción de energía solar se estima de 3.86×10^{11} MW y la cantidad de energía captada por la tierra anualmente es de 5.4×10^{24} J, que es equivalente a 4500 veces la energía que se consume en el mundo [9]. La energía viaja alrededor de 1.495×10^{11} m hasta llegar a la tierra con una energía potencial de 1.37 kW por m² [10].

La luz solar proveniente del sol viaja largas distancias hasta llegar a la atmósfera, sin embargo una pequeña cantidad de luz solar es bloqueada y regulada por la atmósfera en ciertas longitudes de onda [11]. Esta luz solar consiste de fotones que son partículas minúsculas que transportan las ondas electromagnéticas que se generan en el sol y viajan en el espacio [12]. Todos los fotones que llegan a una celda solar pueden ser convertidos en electricidad.

En [7] se presenta el espectro de la irradiancia solar que cubre un rango de longitudes de onda y forma la distribución de la radiación, sin embargo, la atmósfera atenúa ciertas ondas del espectro y regula la radiación en la superficie de la Tierra por eliminación de los rayos x.

R. Fuentes, D. Rojas. Estudiantes del Doctorado en Sistemas de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: rioberf@gmail.com, diego.rojass@utalca.cl).

M. Rivera, J. Muñoz. Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: marcoriv@utalca.cl, jamunoz@utalca.cl).

J. Riveros. Facultad Politécnica, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay (e-mail: joservs@gmail.com).

P. Wheeler. Power Electronics, Machines and Control Group, The University of Nottingham, Nottingham, UK (e-mail: Pat.Wheeler@nottingham.ac.uk).

La breve historia de la energía solar usada para generar electricidad y calor se encuentra con más detalle en [13]. El uso de la energía solar comienza en la antigüedad pero en 1839 el físico Alexandre Edmund Bequerel descubrió el efecto fotoeléctrico, dando origen a las células fotovoltaicas. Él descubrió que el voltaje aumentaba cuando una batería de material galvánico se exponía a la radiación solar. Sin embargo, Charles Fritts fue quien determinó las ideas base para el desarrollo futuro del efecto fotoeléctrico.

Después en 1954, un estudio en los laboratorios de Bell, los investigadores Gerald Pearson, Daryl Chapin y Calvin Fuller, trabajaron en la primera célula solar basado en silicio con un rendimiento del 6%. Muchas investigaciones e implementaciones de las placas fotovoltaicas se desarrollaron en la tecnología espacial. Por otro lado, la generación del calor por medio de la energía solar ha sido utilizado en la antigüedad, por ejemplo la antorcha Olímpica se encendía concentrando los rayos del sol por medio de espejos.

Más adelante, el científico Horace-Bénédict de Saussure asentó en el siglo XVIII los principios de los colectores solares. Sin embargo, la utilización de los colectores solares para la generación de calor se empezó a desarrollar desde los años setenta del siglo XX.

A. Tecnología Solar

La energía solar se puede aprovechar mediante el uso de diversas tecnologías, incluidos los colectores, concentradores y células solares térmicas para producir calor y electricidad [7]. Estas tecnologías también se clasifican según la forma de capturar la radiación solar y convertirla en energía utilizable [14]. Estas tecnologías son activa y pasiva.

- **Tecnología Activa:** son sistemas que usan dispositivos eléctricos o mecánicos para convertir la energía solar en otra forma de energía utilizable. Las más comunes formas de energía es la generación de electricidad y calor.

El dispositivo para generar electricidad es el panel fotovoltaico usando tecnología fotovoltaica [15]. El dispositivo para capturar el calor del sol son los colectores térmicos solares, que se usan para la preparación de agua caliente doméstica o calefacción auxiliar [15].

Ambas tecnologías tienen componentes de construcción y dispositivos adicionales tal como, inversores, protecciones ante fallas y condiciones climáticas extremas, estructura para el soporte, entre otros.

Otra de las tecnologías es la concentración solar de potencia (CSP) que usa un conjunto de espejos para concentrar la energía solar en canales que contienen fluido sensible al calor. Luego, las grandes temperaturas excitan el fluido a un punto en el que acciona una turbina o generador para producir energía eléctrica [16]. En la Fig. 1 se presenta el esquema de un concentrador solar de potencia para aplicaciones de gran escala.

- **Tecnología Pasiva:** las tecnologías solares pasivas o indirectas no usan dispositivos externos sino que utilizan la orientación de las construcciones y materiales para reducir el uso de energía. En cambio, aprovechan el clima

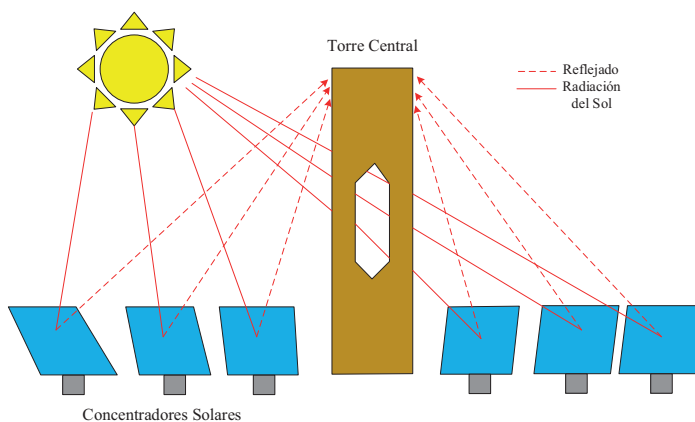


Fig. 1. Esquema de la concentración solar de potencia.

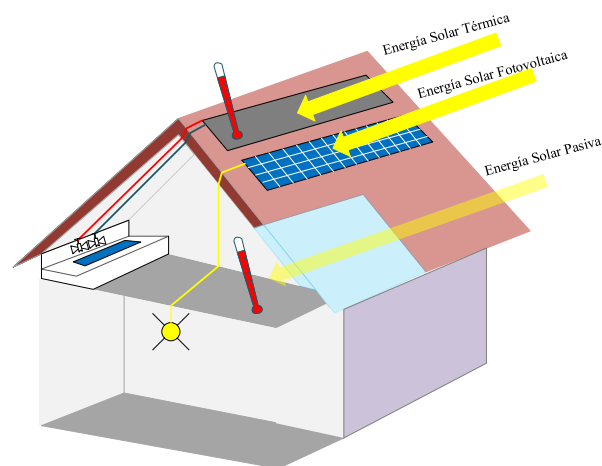


Fig. 2. Diferencia entre tecnología activa y pasiva en la energía solar.

local para calentar las estructuras durante el invierno y reflejan el calor durante el verano [14].

Estos sistemas hacen lo posible para usar la radiación natural del sol para aplicaciones térmicas o como lumínicas. Un ejemplo son la construcción de edificios con ventanas especiales en conjunto con una optimización energética de la orientación del edificio y el diseño de acuerdo con el curso del sol y las variaciones estacionales en la sombra durante el año [14].

Otro ejemplo es un buen diseño arquitectónico que permita mejorar la iluminación natural para reducir la factura de electricidad.

Una diferencia entre la energía activa y pasiva, es en que la energía activa usa la irradiancia del sol para calentar el agua, en cambio en la energía pasiva se usa directamente el calor del sol. En la Fig. 2 se representa la diferencia entre la tecnología pasiva y activa de la energía solar y en la Fig. 3 se presenta un ejemplo de la tecnología pasiva.

B. Beneficios de la Energía Solar

La energía solar tiene muchas ventajas que la hacen una solución prometedora para la generación de energía en el

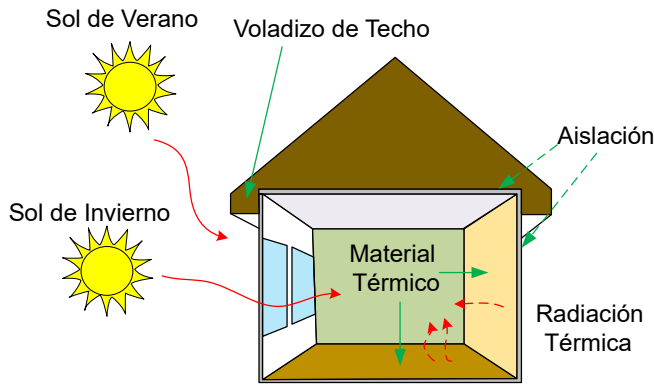


Fig. 3. Tecnología pasiva de la energía solar usado en un hogar.

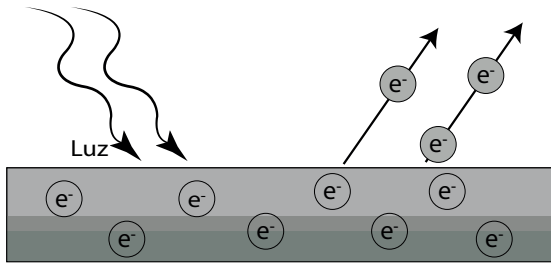


Fig. 4. Efecto fotoeléctrico.

futuro. Los beneficios son [17], [18], [19]:

- La energía solar es no contaminante, renovable y fácil de acceder.
- Es posible generar energía eléctrica en aplicaciones de pequeña y gran escala.
- La generación solar fotovoltaica no emite ruido ni gases contaminantes a la atmósfera.
- La energía es proveniente del sol, por lo tanto un país puede disminuir la dependencia energética con otros países, aumentando la seguridad energética.
- Energía limpia e inagotable debido a que proviene de una fuente natural que es el sol.
- Es posible generar su propia electricidad, reduciendo la boleta de la cuenta del proveedor de energía eléctrica.
- Menos pérdidas de electricidad debido a largas distancias de distribución y transporte de la energía eléctrica. Esto se logra por medio de generación fotovoltaica local (industrial o domiciliario).
- Tiene un bajo costo de aprovechamiento, tras la inversión inicial en la fabricación de los componentes y la instalación, que es la que puede resultar más costosa.
- Debido a que está disponible en todo el mundo, permite proveer energía utilizable a zonas aisladas en donde no es posible acceder a energía.
- Contribuye al desarrollo sostenible de un país.
- Gran cantidad de aplicaciones tales como iluminación solar, calefacción, transportes impulsados por energía solar, cargadores solares, generación eléctrica, satélite solar, riego de plantaciones, señales de tránsito, entre otras.

III. CELDAS FOTOVOLTAICAS Y LOS SEMICONDUCTORES

Una celda solar es un dispositivo electrónico que transforma la energía lumínica en energía eléctrica, esto gracias al efecto fotoeléctrico, el cual dicta lo siguiente: si se enfoca una superficie metálica con un concentrado haz de luz de una cierta frecuencia, este haz estimula los electrones de la superficie del material, provocando que se genere una corriente eléctrica (ver Fig. 4). La cantidad de electrones estimulados se relaciona directamente con la frecuencia del haz que ilumina el material [20]. Los paneles solares son conjuntos de celdas que se disponen juntas para aumentar la potencia eléctrica generada.

La historia de las celdas fotovoltaicas nacieron en el año 1839, de la mano del descubrimiento del efecto fotoeléctrico ya mencionado. Estas celdas se construyen de dos materiales semiconductores, uno dopado con carga positiva y otro con carga negativa. El funcionamiento radica en la extracción de los electrones excitados por el efecto fotoeléctrico, lo que libera un espacio, el cual es ocupado por otro electrón libre. Al mantener una iluminación constante, este efecto de vaciado y llenado de espacios genera un flujo de electrones, que es lo que se denomina corriente eléctrica.

Este efecto es posible en los semiconductores gracias a su baja energía de ligadura (menor a $3eV$), lo que hace que la luz (que posea energía superior a este límite) permita la expulsión del electrón [21]. La impresión que resulta de la definición anterior, es que una celda fotovoltaica es bastante similar a un diodo, tanto en que poseen una unión N-P que es la encargada de generar el flujo de electrones. Es por lo anterior que una forma bastante simplificada de exhibir un modelo de una celda es como se representa en la Fig. 5. Según [22], la intensidad generada viene dada por el par hueco electrón en un volumen, por lo que la ecuación que determina la corriente en función del volumen corresponde a lo indicado en la ecuación (1):

$$I_{ph} = QAG_0(L_p + L_n) \quad (1)$$

donde, Q es la carga elemental, A es el área transeccional de la celda, G_0 es la tasa de concentración de fotones en el material y L_p con L_n son las longitudes de difusión para huecos y electrones respectivamente.

Generalmente, se utiliza más el termino de densidad de carga (J) por sobre la intensidad (I), por lo que reescribiendo un modelo real de la celda, considerando la unión P-N y las resistencias parásitas, se obtiene la ecuación (2).

$$J = N_p \left[-J_{ph} + I_s \left[e^{\frac{q(V_A - JR_s)}{N_s}} - 1 \right] + \left[\frac{V_A}{R_s h} - JR_s \right] \right] \quad (2)$$

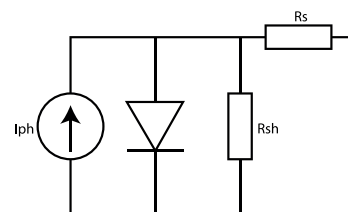


Fig. 5. Circuito equivalente de una celda solar.

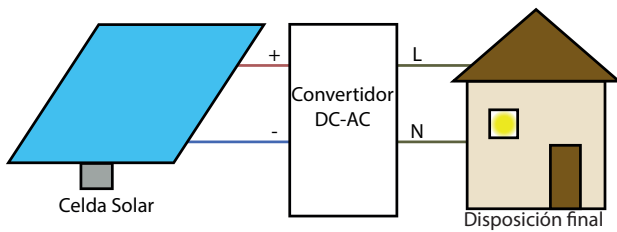


Fig. 6. Ejemplo básico de aplicación para convertidor DC-AC.

donde, J es la densidad de corriente entregada por la celda, J_{ph} es la densidad foto generada, q es la carga elemental, V_A es el voltaje del módulo, N_s es la cantidad de celdas conectadas en serie, N_p es la cantidad de celdas conectadas en paralelo, R_s es la resistencia serie asociada y R_{sh} es la resistencia paralelo o shunt del módulo fotovoltaico [23].

Un aspecto relevante en las celdas, es que gran parte de la energía es desaprovechada dado que la luz reflejada no es absorbida por la celda, lo que implica la baja eficiencia de las celdas en sus inicios. No obstante, en la actualidad se han desarrollado avances en su construcción que utilizan materiales que absorben mejor la luz, permitiendo aumentar enormemente la eficiencia de éstas. Un material que se usa en la fabricación de celdas es el Dióxido de Titanio (TiO_2) [24].

IV. CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR

Las celdas solares generan energía en forma de electricidad continua tal como se vio previamente. Esto, según la aplicación, puede ser un inconveniente considerando que la energía eléctrica se transporta y consume a nivel doméstico como corriente alterna, por lo que un aspecto a considerar es cómo se inyecta la energía obtenida desde las celdas hacia la red alterna común [25]. Para lo anterior es que se utilizan dispositivos electrónicos llamados convertidores, los cuales se encargan de convertir de un tipo de electricidad a otro (ver Fig.6). Para aplicaciones directas de una celda solar, existen convertidores DC-DC, los cuales simplemente se encargan de regular el voltaje/intensidad según los requerimientos del dispositivo que consumirá la energía en última instancia, pero cuando la aplicación requiere de utilizar corriente alterna, se abre toda una gama de distintos convertidores que se encargan de transformar la corriente DC a AC [26].

En general, los convertidores presentan su propia rama de estudio e investigación, realizando diseños cada vez más eficientes y aplicables a diversos casos [27].

V. CONCLUSIÓN

El artículo presentó una visión general de la energía solar, destacando los beneficios y las tecnologías pasivas y activas. Además, se presentó el funcionamiento de las celdas fotovoltaicas y el principio de conversión de la energía solar fotovoltaica.

La energía solar es una energía proveniente del sol y se transmite por medio de la luz solar. Esta energía tiene muchos beneficios tales como limpia, inagotable, permite una independencia energética, contribuye al desarrollo sostenible y permite proveer energía a lugares aislados.

Sin embargo, el desarrollo de esta energía aún está en progreso ya que hay varios desafíos que se deben lograr, tal como reducir el efecto de la intermitencia de generación solar fotovoltaica.

La energía solar se clasifica en dos tecnologías, tales como la activa y la pasiva. La tecnología activa es la que usa un dispositivo para la conversión a una energía utilizable, tales como el panel solar fotovoltaico y el colector térmico solar. En cambio, la tecnología pasiva no usa dispositivo para la conversión de energía, sino que usa directamente la energía solar de forma natural. Un ejemplo es la orientación de la construcción de una casa para ocupar de mejor manera la iluminación y calor del sol.

Uno de los más interesantes elementos desarrollados es la celda solar. El principio de funcionamiento es la captación de la luz solar para convertirla en electricidad. Aún hay varios avances tecnológicos con respecto al estudio de nuevos materiales capaces de aumentar la captación solar y mejorar la eficiencia de conversión.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al financiamiento del Programa FONDECYT Regular a través del proyecto 1191028 y FON-DAP SERC Chile 15110019.

REFERENCIAS

- [1] N. Kannan and D. Vakeesan, "Solar energy for future world: - a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 1092–1105, 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bHVodd>
- [2] D. Strebkov and N. Y. Bobovnikov, "Technical and economic indicators of solar power plants," *Applied Solar Energy*, vol. 54, pp. 456–460, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3103/S0003701X18060142>
- [3] A. Pino, F. J. P. Lucena, and J. G. Macho, "Economic analysis for solar energy integration in a microbrewery," in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2019, pp. 1–6.
- [4] M. Ahsan, N. Ahmad, and H. M. W. Badar, "Simulation of solar angles for maximizing efficiency of solar thermal collectors," in *2019 3rd International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, 2019, pp. 1–5.
- [5] Erdiwansyah, Mahidin, H. Husin, Nasaruddin, M. Zaki, and Muhibuddin, "A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 6, no. 1, 12 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3mIs5xt>
- [6] B. Grassi, E. A. Piana, G. P. Beretta, and M. Pilotelli, "Dynamic approach to evaluate the effect of reducing district heating temperature on indoor thermal comfort," *Energies*, vol. 14, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/1/25>
- [7] S. Gorjian and H. Ebadi, "Chapter 1 - introduction," in *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, S. Gorjian and A. Shukla, Eds. Academic Press, 2020, pp. 1–26. [Online]. Available: <https://bit.ly/3nY2vUx>
- [8] "El sol," Nov 2020. [Online]. Available: <https://bit.ly/3weS8zo>
- [9] Ambientum, "El sol fuente básica de la energía - enciclopedia medioambiental," Apr 2018. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BXLj6N>
- [10] P. Hersch and K. Zweibel, "Basic photovoltaic principles and methods," vol. 1, no. 2, 2 1982. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/5191389>
- [11] A. A. Bayod-Rújula, "Chapter 8 - solar photovoltaics (pv)," in *Solar Hydrogen Production*, F. Calise, M. D. D'Accadia, M. Santarelli, A. Lanzini, and D. Ferrero, Eds. Academic Press, 2019, pp. 237–295. [Online]. Available: <https://bit.ly/3k99zMZ>
- [12] "Los fotones." [Online]. Available: <https://bit.ly/3wgDp72>
- [13] P. Giese. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wp6TzS>
- [14] N. G. Society, "solar energy," Nov 2012. [Online]. Available: <https://bit.ly/3BJMNB9>
- [15] Swissolar, "Swissolar." [Online]. Available: <https://bit.ly/3nXedic>

- [16] Environmental and E. S. I. (EESI), "Solar energy." [Online]. Available: <https://bit.ly/31mfvLY>
- [17] I. F. Aldariz, "Energía solar: Qué es, tipos, usos, ventajas y desventajas," Jan 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/31Bk2up>
- [18] "7 benefits of using solar energy." [Online]. Available: <https://bit.ly/3mSwjTr>
- [19] "Beneficios de la energía solar;" Sep 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3k9yGPE>
- [20] J. L. Rodríguez-Meza, M. A. Cervantes-Cota, "El efecto fotoeléctrico," *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 2006. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GKiIoS>
- [21] "¿cómo funcionan las celdas fotovoltaicas?" October 2016. [Online]. Available: <https://bit.ly/3bFeX5Q>
- [22] S. L. Chuang, *Physics of Photonic Devices*, 2nd ed. Wiley, 2009.
- [23] F. J. Eraso, O. F. Erazo, and E. Escobar, "Modelo para la estimación de potencia eléctrica en módulos fotovoltaicos de tecnología basada en silicio," *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 27, no. 2, pp. 188–196, 04 2019. [Online]. Available: <https://bit.ly/3GTL3t9>
- [24] K. Al-Attafi, A. Nattestad, H. Qutaish, M.-S. Park, L. K. Shrestha, K. Ariga, S. X. Dou, and J. H. Kim, "Solvothermally synthesized anatase tio₂ nanoparticles for photoanodes in dye-sensitized solar cells," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 22, no. 1, pp. 100–112, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/14686996.2021.1873059>
- [25] "Corriente alterna vs corriente continua," November 2014. [Online]. Available: <http://www.laenergiadelcambio.com/corriente-alterna-vs-corriente-continua/>
- [26] N. Mohan, T. M. Underland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Wiley, 2002.
- [27] J. P. Carvalho Silveira, P. J. dos Santos Neto, T. A. dos Santos Barros, and E. Ruppert Filho, "Power management of energy storage system with modified interlinking converters topology in hybrid ac/dc microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 130, p. 106880, 2021. [Online]. Available: <https://bit.ly/3q5dnTl>