

Basic principles of solar energy

Diego Rojas, Marco Rivera, and Patrick Wheeler,

Abstract—The sun provides the earth with its main source of energy. In terms of renewable energy, solar energy is the most promising direction for producing electrical energy. For the efficient use of solar energy it is necessary to understand how electrical energy is produced from the sun. This document describes the principle of solar energy to generate electrical energy. Analyze the relationships between voltage, current and power output of photovoltaic cells and how to maximize the efficiency of solar panels. The document will give greater emphasis to the generation of electrical energy from photovoltaic solar panels, due to its economic advantages compared to the conversion of thermal solar energy.

Keywords—Energy efficiency, Photovoltaic, Solar energy, Solar panels, Solar thermal.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica por medio de la energía solar aún representa solo un pequeño porcentaje en la producción mundial de electricidad [1]. Sin embargo en los últimos años ha adquirido popularidad gracias a los resultados satisfactorios obtenidos en su implementación, a saber sobre su madurez tecnológica en las industrias, en algunos casos su competitividad económica, además, el gobierno de cada país dan apoyo implementando incentivos y medidas para el uso de energías renovables en especial a la solar fotovoltaica [2], a parte, de ser un recurso energético puro, amplio y respetuoso con el medio ambiente [3].

Existen dos tecnologías diferentes de generar electricidad a través de la energía solar, los sistemas fotovoltaicos (PV) y la energía solar térmica, también conocida como energía solar concentrada (CSP) [4]. Las tecnologías PV y CSP han presentado resultados competitivos en aplicaciones comerciales, industriales y residenciales como fuente alternativas autónomas [5].

La energía eléctrica, se puede suministrar de forma sostenible mediante tecnologías solares en todo el mundo. Para 2040, las energías renovables alcanzarán el 34% de la generación de energía en todo el mundo [6]. Al ser una fuente de energía limpia, los sistemas solares pueden desempeñar un papel vital en la reducción de gases de efecto invernadero y pueden reducir considerablemente los efectos del calentamiento global [7]. Las tecnologías de energía solar se utilizan ampliamente en torres de base de telecomunicaciones, bomba de agua, redes inteligentes, microrredes

D. Rojas. Estudiante del Doctorado en Sistemas de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: diego.rojaso@utalca.cl).

M. Rivera. Director del Laboratorio de Conversión de Energías y Electrónica de Potencia, Universidad de Talca, Curicó, Chile (e-mail: marcoriv@utalca.cl).

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

y generación distribuida, sistemas de gestión de edificios, carga de vehículos eléctricos, satélites, aplicaciones marinas, entre otros [8], [9], [10].

El sistema solar fotovoltaico convierte directamente la radiación solar en electricidad mediante el uso de células fotovoltaicas. En los últimos años, el coste del sistema fotovoltaico ha caído enormemente y sigue cayendo [11]. Mediante el uso de métodos eficientes de seguimiento del punto de máxima potencia, los sistemas fotovoltaicos pueden aprovechar la máxima cantidad posible de energía y pueden integrarse con las redes inteligentes mediante un enfoque de electrónica de potencia [12]. En los sistemas de energía solar concentrada (CSP), la energía solar primero se convierte en calor y finalmente en electricidad, mediante el uso de un espejo o lentes y un sistema de seguimiento que concentra la luz solar en un punto focal para calentar un líquido, sólido o gas [13]. Los reflectores de torre de energía, colectores cilindro parabólicos, stirling de plato, chimenea solar y reflectores fresnel lineales de concentración son ejemplos de tecnologías CSP [14].

En comparación con los sistemas fotovoltaicos, los sistemas CSP tienen un mayor costo de funcionamiento e instalación y una mayor sensibilidad a la humedad y al polvo [15]. Es por eso por lo que, en este documento, se da mayor énfasis al sistema solar fotovoltaico. Describiendo los fundamentos en que se basan las células fotovoltaicas para producir energía eléctrica, las características eléctricas que poseen, la potencia y eficiencia de los paneles solares, además de describir el sistema CSP brevemente. El principal aporte de este trabajo es dar a conocer los principios básicos de la energía solar, en especial para aquellos estudiantes e investigadores que están comenzando a investigar sobre energía solar.

II. FUNDAMENTOS DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

La teoría cuántica describe, que en un átomo los electrones pueden tener únicamente determinados valores o niveles de energía [16]. Este fenómeno, ocasiona que en un sólido de estructura cristalina las órbitas que presentan los electrones de diferentes átomos se solapen parcialmente y estos tienden a interactuar entre sí, de tal manera, que los niveles de energía permitidos pasan a ser bandas de energía, constituidas por un conjunto continuo de niveles de energía próximo. A temperaturas muy bajas como a -0 grados Kelvin ($0K$)—, los electrones ocupan el menor valor de energía posible, en otras palabras, llenan todos los niveles inferiores. De esta forma, se define banda de valencia o banda de mayor energía a aquel nivel, que a esta temperatura —alrededor de 0 grados Kelvin ($0K$)— permanece llena, es decir, con la totalidad de sus niveles energéticos ocupados por electrones [17].

En los conductores, se tiene, que la banda de valencia y de conducción se encuentran solapadas, así, los electrones

poseen gran movilidad, ya que tiene una banda de niveles de energía ocupada parcialmente. Por otro lado, en los materiales aislantes la banda de valencia está completamente llena, y la de conducción completamente vacía, siendo la banda prohibida que las separa muy ancha, así, para lograr que un electrón pase de la banda de valencia a la banda de conducción se necesita un gran incremento de energía alrededor de unos $7eV$. Los materiales semiconductores, poseen una disposición de bandas de energía similar a la de los aislantes, pero el ancho de la banda prohibida es considerablemente menor (menores a unos $3eV$) [18]. Todo este análisis se muestra en la Fig. 1.

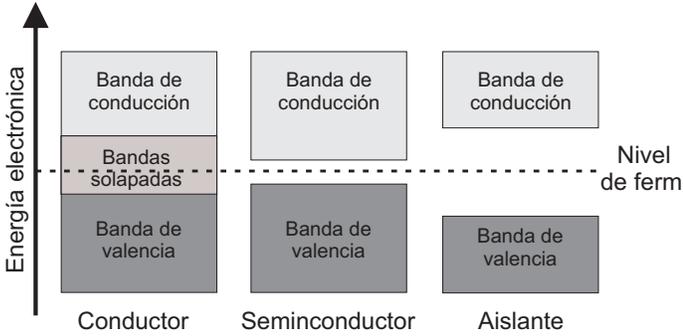


Fig. 1. Banda de energía de los materiales conductores, semiconductores y aislante.

El principio básico de una celda fotovoltaica se basa en la fotoconductividad. Cuando un fotón de la luz es absorbido por un semiconductor, si su energía es mayor que la energía de la banda prohibida de ese semiconductor, un electrón en la banda de valencia se excitará en la banda de conducción para formar un par electrón-hueco adicional. En este caso, se puede aumentar la conductividad del semiconductor, pero después de un período de tiempo muy corto, el electrón excitado perderá su energía y se recombinará con un agujero para que no se pueda generar electricidad útil [19].

De esa forma, la idea de una celda fotovoltaica es separar físicamente los electrones en la banda de conducción de los huecos en la banda de valencia antes de que se recombinen. Específicamente, una unión $P - N$ se forma al empujar un semiconductor tipo P y un semiconductor tipo N con diferentes impurezas. El semiconductor de tipo P acumulará muchos agujeros, mientras que el semiconductor de tipo N reunirá muchos electrones. Esto genera un campo electrostático y un voltaje incorporado en la unión. Cuando los fotones caen en la unión $P - N$, fluirá una corriente neta entre P y N o se generará un voltaje útil. Cuando se les conecta una carga, se puede extraer energía de esta corriente o voltaje. Efectivamente, la celda fotovoltaica es un diodo no sesgado, mientras que la llegada de fotones genera una corriente de fotones que se suma a la corriente de deriva de este diodo. Con base en esta equivalencia se describirá las ecuaciones que rigen el principio de los paneles solares fotovoltaicos.

III. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

En la Fig. 2, se puede observar una célula solar fotovoltaica típica, la estructura del contacto en la cara frontal posee unos

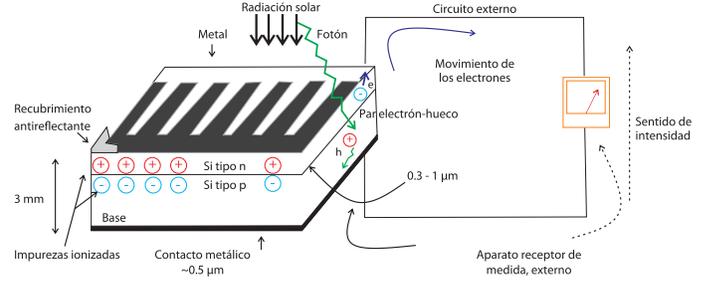


Fig. 2. Célula solar fotovoltaica conectada a un circuito eléctrico externo.

contactos metálicos delgados, bien espaciados, de forma a permitir el paso de la radiación solar entre ellos. La célula está recubierta con una capa delgada de material dieléctrico antirreflejante para disminuir lo máximo posible las pérdidas por reflexión en la cara superior. En la célula solar, la corriente generada en el semiconductor se extrae por los contactos en las caras anterior y posterior, es decir, si se conecta la cara anterior y posterior de la célula iluminada a un circuito externo se obtiene una corriente eléctrica I . Entonces, la corriente eléctrica que circula por la célula fotovoltaica, I , coincide con la de un diodo I_D , y es causada por la recombinación inducida en el interior del dispositivo por efecto de la tensión V , y está dada por la ecuación del diodo de la siguiente manera:

$$I = I_D = I_0(T) \left(e^{\frac{q_E V}{K_B T}} - 1 \right). \quad (1)$$

considerando la tensión V en voltios, la temperatura de funcionamiento de la celda fotovoltaica T en grados Kelvin y K_B la constante de Boltzmann. El parámetro $I_0(T)$, denominado, corriente inversa de saturación del diodo [A], depende de la temperatura T , según la expresión:

$$I_0(T) \propto \left(e^{\frac{q_E V}{K_B T}} \right). \quad (2)$$

En consecuencia de la iluminación se genera una corriente I_L denominada fotocorriente generada por la luz incidente, que consiste en una corriente en paralelo con el diodo (que representa la unión $P - N$). Entonces, la corriente de salida I viene a ser la diferencia entre la corriente I_L y la corriente del diodo I_D , y se rige por la siguiente expresión:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q_E V}{K_B T}} - 1 \right). \quad (3)$$

donde I es la corriente de salida de la celda fotovoltaica, I_L es la fotocorriente generada por la luz incidente, I_0 es la corriente saturada inversa del diodo, q_E es la carga de un electrón, k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura de funcionamiento de la celda fotovoltaica en Kelvin, y V es el voltaje de salida [20].

Un panel solar se puede representarse mediante un generador de corriente de fotones conectado a un diodo. En la Fig. 3 se muestra un diagrama de un panel solar ideal de este tipo. La resistencia serie, R_S es una resistencia interna de la célula y representa a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del material semiconductor. La resistencia R_p en paralelo, aparece debido a imperfecciones en

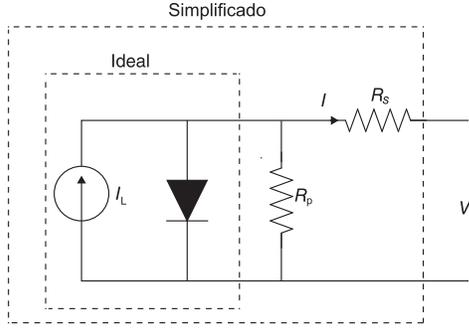


Fig. 3. Circuito equivalente de un panel solar.

la calidad de la unión $P-N$ y ocasiona las fugas de corriente. Debido a la existencia de ambas resistencias R_S y R_p el factor de forma (FF) (que definirá más adelante) es afectado, y por ende, la eficiencia de la célula. También, se define el factor de idealidad, η_I , que es un factor de corrección, cuyo valor suele estar comprendido entre 1 y 2. En el caso de una célula solar ideal se toma $\eta_I = 1$. En células solares reales, con una importante influencia de los procesos de recombinación, el factor de idealidad se acerca más a 2 [21].

La curva ideal de una célula se ve alterada por la presencia de los tres factores definidos arriba, el factor de idealidad, la resistencia serie y la resistencia en paralelo. Estos factores se consideran en el modelo de la célula, de forma que finalmente, su ecuación característica será [22]:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qE(V+R_S I)}{\eta_I K_B T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P}. \quad (4)$$

Su representación gráfica da lugar a la curva característica de la célula solar, representada genéricamente en la Fig. 4.

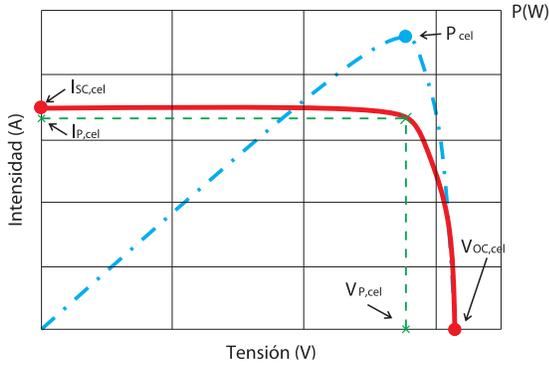


Fig. 4. Curva característica $I - V$ de una célula solar fotovoltaica.

IV. POTENCIA DE SALIDA Y EFICIENCIA DE LOS PANELES SOLARES

La eficiencia de la célula fotovoltaica normalmente oscila entre el 5% y el 20%. Esto significa que hay una pérdida de energía de alrededor del 80 – 95%. La pérdida proviene principalmente de dos fuentes: pérdida intrínseca y pérdida extrínseca. La pérdida intrínseca incluye fotones en la radiación solar que no son absorbidos por la célula fotovoltaica

debido a energías inferiores a la banda prohibida o fotones que se pierden en la red de la celda fotovoltaica como calor. La pérdida extrínseca incluye la pérdida eléctrica, como la recombinación de la superficie, la resistencia en serie y la resistencia en derivación, y la pérdida óptica, como el sombreado, la absorción incompleta y la reflexión de la superficie [23]. En algunos casos, si la célula fotovoltaica está encapsulada como un módulo, es posible que se hayan producido más pérdidas. Todas estas pérdidas suman entre el 80% y el 95% de la potencia de la luz incidente. Matemáticamente, la eficiencia de la célula fotovoltaica se puede definir como [24]:

$$\eta = \frac{P}{P_i} = \frac{VI}{P_i}. \quad (5)$$

donde P_i es la potencia de luz incidente en la entrada de la célula fotovoltaica, P es la potencia eléctrica en la salida de la célula fotovoltaica y $P = VI$ (donde V es el voltaje de salida e I es la corriente de salida). Para la mayoría de los estudios de células fotovoltaicas, la relación entre V e I o la relación entre P y V son de interés, ya que el valor de P_i depende únicamente del entorno operativo. A continuación, discutiremos la relación entre P y V .

Usando la ecuación (3), dado que $P = VI$, la potencia solar fotovoltaica se puede obtener en función de V , como:

$$P = \left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{qE V}{K_B T}} - 1 \right) \right] V. \quad (6)$$

Y en función de I , como:

$$P = \frac{k_B T I}{qE} \ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right). \quad (7)$$

En la ecuación (7) se ve que la potencia de salida P aumenta con I pero disminuye con $I_L - I$. Por lo tanto, puede existir una potencia de salida óptima. El valor óptimo de I que maximiza la potencia de salida está determinado por:

$$\ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right) = \frac{I}{I_0 + I_L - I}. \quad (8)$$

Usando las ecuaciones (6) y (7), la eficiencia de la célula fotovoltaica se calcula a partir de la ecuación (5), como:

$$\eta = \frac{\left[I_L - I_0 \left(e^{\frac{qE V}{K_B T}} - 1 \right) \right] V}{P_i} = \frac{\frac{K_B T I}{qE} \ln \left(1 + \frac{I_L - I}{I_0} \right)}{P_i}. \quad (9)$$

Dado que la potencia de luz incidente P_i es fija, la maximización de la eficiencia es equivalente a la maximización de la potencia eléctrica de salida. Por lo tanto, se puede utilizar técnicas de seguimiento de la posición de máxima potencia para ajustar los parámetros de la célula fotovoltaica de modo que puede trabajar a la corriente de salida determinada por (8) para generar la máxima potencia eléctrica para un mejor rendimiento [25].

V. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de la célula solar, se definen por los siguientes parámetros, destacados en la Fig. 4:

- Intensidad de cortocircuito ($I_{SC,cel}$): corriente eléctrica proveniente de la célula, obtenida al cortocircuitar las

terminales de la célula, sin carga externa, y así la tensión entre los bornes es nula. Representa la máxima corriente que puede obtenerse. El valor típico de esta corriente es de decenas de miliamperios por centímetros cuadrado de célula.

- Tensión en cortocircuito ($V_{OC,cel}$): representa la tensión máxima a obtenerse, donde los procesos de recombinación es igual al de generación, dando corriente nula en la salida de la célula.
- Potencia máxima o potencia pico (P_{cel}): el producto de IV , representa la potencia que entrega la célula fotovoltaica, y se representa en la Fig. 4 mediante la línea de trazos y puntos. Se puede observar, que tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia generada es nula. Como se observa en la Fig. 4, el punto ($I_{p,cel}, V_{p,cel}$) corresponde al punto de máxima potencia disipada en la carga, bajo unas condiciones estándar de la radiación incidente, y se obtiene como el producto de la tensión pico por la intensidad pico:

$$P_{cel} = I_{p,cel} V_{p,cel}. \quad (10)$$

Siendo la intensidad pico, $I_{p,cel}$ y la tensión pico, $V_{p,cel}$. Las definiciones de estos parámetros característicos de las células son también válidas para caracterizar los módulos o paneles fotovoltaicos, constituidos a partir de un conjunto de células solares.

- Factor de forma (FF): el factor de forma se define como el cociente entre la máxima potencia obtenible, y el producto de la tensión en circuito abierto e intensidad de cortocircuito. El FF es una medida de la desviación entre la máxima potencia obtenible y el producto de la tensión en circuito abierto e intensidad de cortocircuito, por tanto, es un indicador de la calidad de la célula.

$$FF = \frac{I_{p,cel} V_{p,cel}}{I_{SC,cel} V_{OC,cel}}. \quad (11)$$

Las expresiones aproximadas para el cálculo del FF en función de la resistencia en serie y paralelo, es:

$$FF = FF_0 \left(1 - R_S \frac{I_{SC,cel}}{V_{OC,cel}} \right). \quad (12)$$

donde FF_0 es el factor de forma cuando el efecto de las resistencias serie o paralelo es despreciable.

Por otro lado, cuando existe influencia mayoritaria de las resistencias paralelo, el FF puede aproximarse a la siguiente ecuación:

$$FF = FF_0 \left(1 - \frac{V_{OC} + 0,7 FF_0 V_{OC,cel}}{V_{OC} R_p I_{SC,cel}} \right). \quad (13)$$

el factor de forma siempre es más pequeño que 1 y da una idea cuantitativa de cómo se ve la curva característica. En la práctica, el FF suele variar poco entre las diferentes células tomando valores entre 0,7 y 0,8 para los dispositivos de *Si* y *GaAs*. Utilizando este nuevo parámetro se puede escribir la potencia máxima como:

$$P_{cel} = FF \cdot I_{SC,cel} \cdot V_{OC,cel}. \quad (14)$$

- Eficiencia (η_{cel}): la eficiencia de una célula fotovoltaica para la conversión de energía se puede definir como la

relación entre la máxima potencia suministrada a la carga entre la potencia de radiación solar incidente, de valor $I_S S_{cel}$ siendo I_S la irradiancia y S_{cel} la superficie de la célula.

$$\eta_{cel} = \frac{P_{cel}}{I_S S_{cel}} = \frac{I_{p,cel} V_{p,cel}}{I_S S_{cel}} = \frac{FF I_{SC,cel} V_{OC,cel}}{I_S S_{cel}}. \quad (15)$$

VI. SISTEMA CSP

Se utilizan varios tipos de diseños ópticos reflectantes y refractivos en los sistemas CSP para la concentración de la irradiancia normal directa (DNI) del sol, estos son, colectores cilindro parabólicos, reflector de Fresnel concentrador lineal, plato parabólico y torre de energía solar [26]. En los sistemas CSP, el DNI se concentra en un fluido de transferencia de calor que puede ser agua, aire o aceite, que luego pasa a través de una serie de intercambiadores de calor para producir vapor sobrecalentado, este vapor se convierte en energía eléctrica en una turbina de vapor convencional [27].

A. Tipos de CSP

A continuación, se describe los distintos tipos de CSP, para ello se clasifica el CSP en dos grupos, uno de ellos el que posee un enfoque lineal y el otro un enfoque puntual. Hay que tener en cuenta que el principio de funcionamiento es el mismo en los diferentes diseños de CSP [28].

- Enfoque lineal:

Este enfoque concentra la radiación solar en un tubo absorbente lineal o una serie de tubos, luego los reflectores se rastrean alrededor de un solo eje para mantener la imagen del sol enfocada en el tubo absorbente del revestimiento.

- Sistema de colectores cilindro parabólico: consiste en varios espejos curvos paralelos que enfocan los rayos del sol en un tubo receptor que se encuentra en la línea focal de la parábola y contiene fluido. La radiación solar concentrada aumenta la temperatura de fluido y luego se transforma en energía térmica [29].

- Reflector de Fresnel concentrador lineal: este enfoque es un espejo de seguimiento de un solo eje alineado a lo largo de un eje norte-sur, capaz de seguir el sol de este a oeste. A diferencia con el enfoque anterior, utiliza reflectores Fresnel que son de forma plana y la tubería está distante de la unidad de reflexión. La tubería está conectada a la turbina de vapor para producir electricidad de manera convencional al producir un par mecánico [30].

- Enfoque puntual:

En este enfoque todos los concentradores desviarán la radiación del sol a un punto central denominado punto focal.

- Sistema de torre solar: este tipo de CSP, utiliza espejos de seguimiento solar llamados helióstatos para concentrar la radiación solar en un receptor en la parte superior de una torre. Un fluido se calienta en

el receptor y convierte este calor en energía térmica que se utiliza para generar vapor sobrecalentado para la turbina [31].

- Sistema de plato parabólico: este sistema utiliza un concentrador solar en forma de plato parabólico que enfoca la luz del sol en un receptor central único frente al espejo. Este concentrador rastrea la radiación solar con un sistema de rastreo de dos ejes. El calor recolectado es utilizado directamente por un motor Stirling que está conectado al receptor [28].

B. Eficiencia de los CSP

En cuanto a la eficiencia de los CSP depende de qué tipo de tecnología es utilizada, de la temperatura a la que se encuentra el receptor, el rechazo de calor, las pérdidas térmicas y de la eficiencia del sistema óptico que concentra la luz solar [32]. En cuanto a resultados prácticos, se tiene que en sistemas de conversión CSP tipo torre solar la eficiencia de conversión es de 23-35%, operando a temperaturas de 250 – 565°C, con el número de eficiencia más alto asumiendo una turbina de ciclo combinado. Los sistemas plato parabólico, que operan a temperaturas de 550 – 750°C, tiene eficiencias de aproximadamente el 30% [33]. Debido a la variación en la incidencia del sol durante el día, la eficiencia de conversión promedio lograda no es igual a estas eficiencias máximas [30].

Para el cálculo de la eficiencia se logra a través de la siguiente ecuación [34]:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sigma T_H^4}{I \cdot C}\right) \cdot \left(1 - \frac{T_Q}{T_H}\right). \quad (16)$$

Donde, η es la constante de Stefan-Boltzmann, T_H es la temperatura del receptor, T_Q es la temperatura del disipador de calor, I es radiación solar ($\frac{W}{m^2}$) y C es el factor de concentración.

VII. CONCLUSIÓN

Este documento presentó las disponibilidades de generación de energía eléctrica proveniente de la energía solar, fotovoltaica (PV) y la energía solar térmica (CSP). Se logró comprender la relación entre los parámetros de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas. De esta forma, aplicando las distintas relaciones obtenidas es posible obtener una expresión matemática para el seguimiento del haz incidente del sol, para obtener la mayor potencia posible de los paneles solares fotovoltaicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al financiamiento del Programa FONDECYT Regular a través del proyecto 1191028, Proyecto MEC 80150056 and FONDAP SERC Chile.

REFERENCIAS

- [1] T. V. Myasnikova, A. A. Kirillova, S. P. Ivanova, O. V. Sveklova, and O. A. Nadezhdina, "Simulation of solar energy photovoltaic conversion," in *2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 2020, pp. 1–4.
- [2] 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.
- [3] F. M. Guangul and G. T. Chala, "Solar energy as renewable energy source: Swot analysis," in *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, 2019, pp. 1–5.
- [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] M. Najibullah, M. M. Mu Shabbir, and M. Y. Ali, "Solar based energy saving smart industrial exhaust fan," in *2019 22nd International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)*, 2019, pp. 1–5.
- [6] T. Kesavan, S. Sheebarani, V. Gomathy, R. Kavin, and S. Sivaranjani, "Renewable energy based on energy conservation and crossover system," in *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2020, pp. 155–157.
- [7] E. V. Platonova, A. S. Toropov, and A. N. Tulikov, "Simulation of energy input to solar panels," in *2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*, 2019, pp. 133–137.
- [8] R. Kavin, T. Kesavan, S. Sheebarani Gnanamalar, and K. Rameshkumar, "Optimal charging and discharging planning for electric vehicles in energy saving system," in *2019 5th International Conference on Advanced Computing Communication Systems (ICACCS)*, March 2019, pp. 976–978.
- [9] M. F. Abdel-Fattah and J. Punt, "Investigations on the integration of solar photovoltaic with battery energy storage for home energy systems," in *2019 IEEE 60th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, 2019, pp. 1–5.
- [10] L. Gevorkov and V. Šmídl, "Simulation model for efficiency estimation of photovoltaic water pumping system," in *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 2020, pp. 1–5.
- [11] T. Bano and K. Rao, "The effect of solar pv module price and capital cost on the leveled electricity cost of the solar pv power plant in the context of india," in *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*, 2016, pp. 1–6.
- [12] V. Sharma and L. Gidwani, "Optimistic use of dstatcom controlled battery energy storage system to mitigate grid disturbances with solar energy penetration," in *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2019, pp. 1–6.
- [13] M. BEN ZOHRA, A. RIAD, and A. ALHAMANY, "Development of thermal energy storage system based on phase change materials," in *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)*, 2019, pp. 1–4.
- [14] A. Riahi, A. B. Haj Ali, A. Guizani, and M. Balghouthi, "Performance study of a concentrated photovoltaic thermal hybrid solar system," in *2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2019, pp. 1–5.
- [15] G. Gajardo-Miranda, W. Puchi, J. L. Venegas, N. Risso, and F. Salgado, "A sustainability-based comparison between photovoltaics and concentrating solar power in chile," in *2019 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 2019, pp. 1–6.
- [16] Y. Vorobyov, A. Avachev, N. Tolkach, A. Ermachikhin, and D. Kusakin, "An analytical solution for the fermi level of the non-degenerate semiconductor in thermal equilibrium over a wide temperature range," in *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, 2017, pp. 1–3.
- [17] F. Baig, Y. H. Khattak, B. Mari, S. Ullah, H. Ullah, and S. Ahmed, "Efficiency enhancement of sns solar cell using back surface field," in *2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, 2018, pp. 1–5.
- [18] S. Biswas, I. Mahbub, and M. S. Islam, "Conduction band-valence band coupling effects on the band structure of in0.28ga0.72n/gan quantum well," in *2013 Spanish Conference on Electron Devices*, 2013, pp. 211–214.
- [19] P. V. Rosu, A.-T. Plesca, G. Gabor, and G. Chiriac, "Optimizing the operation of photovoltaic panel systems," in *2020 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, 2020, pp. 318–321.
- [20] J. Zhang, Y. Liu, K. Ding, L. Feng, F. U. Hamelmann, and X. Chen, "Model parameter analysis of cracked photovoltaic module under outdoor conditions," in *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2020, pp. 2509–2512.

- [21] C. Oleg and B. Vladimir, "Flexible polynomial mathematical model of a photovoltaic power plant," in *2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 2019, pp. 1–6.
- [22] C. F. Abe, J. B. Dias, G. Notton, and P. Poggi, "Computing solar irradiance and average temperature of photovoltaic modules from the maximum power point coordinates," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 2, pp. 655–663, 2020.
- [23] A. Joshi, A. Khan, and A. SP, "Comparison of half cut solar cells with standard solar cells," in *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2019, pp. 1–3.
- [24] A. K. Dash, S. Agarwal, S. Gairola, and A. Banswar, "A cumulative study of different power output and carbon credit earned in roof integrated photovoltaic thermal (bipvt) system," in *2019 2nd International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC)*, 2019, pp. 224–228.
- [25] M. Hanan, X. Ai, S. Azhar, A. Azhar, A. Siddique, and W. Aslam, "Harmonics analysis of grid tied solar system by employing fft," in *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, pp. 2382–2385.
- [26] R. Islam, A. B. M. N. Bhuiyan, and M. W. Ullah, "An overview of concentrated solar power (csp) technologies and its opportunities in bangladesh," in *2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, 2017, pp. 844–849.
- [27] A. Sharma and M. Sharma, "Power amp; energy optimization in solar photovoltaic and concentrated solar power systems," in *2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2017, pp. 1–6.
- [28] M. N. S. K. Shabbir, M. S. A. Chowdhury, and X. Liang, "A guideline of feasibility analysis and design for concentrated solar power plants," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 41, no. 4, pp. 203–217, 2018.
- [29] A. J. Purwanto and G. Pikra, "Influence of aperture width and focal distance to the parabolic trough solar collector geometry," in *2019 International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)*, 2019, pp. 159–162.
- [30] F. E. hamdani, S. Abderafi, T. Bounahmidi, and S. Vaudreuil, "Economic comparison of parabolic trough collector and linear fresnel reflectors power plants," in *2019 7th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2019, pp. 1–4.
- [31] N. C. Cruz, J. Domingo Álvarez, J. L. Redondo, M. Berenguel, P. M. Ortigosa, and R. Klempous, "Control and optimal management of a heliostat field for solar power tower systems," in *2019 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*, 2019, pp. 000271–000274.
- [32] Z. Xingping, Z. Xiaoying, Y. Yuanbo, W. Kun, C. Wei, and W. Xiaolan, "Operation mode and economic analysis of concentrating solar power station," in *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, 2019, pp. 751–755.
- [33] E. Du, N. Zhang, B. Hodge, Q. Wang, C. Kang, B. Kroposki, and Q. Xia, "The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems," in *2019 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)*, Aug 2019, pp. 1–1.
- [34] A. Harrouz, I. Daouali, K. Kayisli, H. I. Bulbul, and I. Colak, "Comparative study between csp and cpv as two energy systems," in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2018, pp. 1380–1383.