

REVISIÓN Y ANÁLISIS DEL FENÓMENO FOTOELÉCTRICO ASOCIADO A LOS SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

Sarroca, Esteban ⁽¹⁻²⁾ – **Camargo, Federico** ⁽¹⁻²⁻³⁾ – **Argañaraz, Félix** ⁽¹⁻²⁾ – **Rossomando, Francisco** ⁽³⁾ – **Gandolfo, Daniel** ⁽³⁾ – **Cabana, José** ⁽¹⁻²⁾ – **Karam, Claudio** ⁽¹⁻²⁾ – **Sosa, Gonzalo** ⁽¹⁻²⁾ – **Vergara, Martín** ⁽¹⁻²⁾ – **Lafit, Julio** ⁽¹⁻²⁾ – **Alaniz, Ignacio** ⁽¹⁻²⁾

(1) GATYER - FRLR - UTN

(2) Departamento de Electromecánica, FRLR - UTN

(3) Energías Alternativas, Departamento de Automática, CONICET-INAUT-UNSJ
E-mail: esarroca@gmail.com

Resumen: En el presente trabajo se presenta el estado del arte sobre el fenómeno fotoeléctrico, aplicado a los paneles solares fotovoltaicos. La importancia de los paneles solares fotovoltaicos es que producen energía sin emisiones y también la amplia disponibilidad de energía del sol. Se busca realizar un análisis que permitan la instalación de los paneles solares fotovoltaicos en generación distribuida y microrredes con la incorporación del prosumidor. Se busca mostrar que la aplicación de estas tecnologías todavía es motivo de discusión en el estado del arte, lo cual justifica la investigación del tema y su originalidad. Esta línea de investigación busca definir en el presente y futuros trabajos, criterios y factores influyentes, a mediano y largo plazo, en la sustentabilidad energética, ambiental y económica del sistema energético, con la intención de incorporarlos en ámbitos de investigación y enseñanza pertinentes, propiciando su análisis y discusión.

Palabras Claves: Fotovoltaicos, Fotoeléctrico, Sistemas.

Introducción

Se define la energía como: “Capacidad para causar cambios”, sabemos que hay diferentes formas de energía, una de ellas es la energía que transporta la radiación electromagnética: “La energía que transporta la radiación electromagnética viaja en forma de ondas incluso a través del espacio vacío”. La energía electromagnética es de grado elevado, pero su conversión directa en electricidad, por medio de dispositivos fotovoltaicos o foto electroquímicos, apenas si se ha podido llevar a cabo en un 30%” (Iwan et. al, 2021; Reisi et al., 2013). Esta forma de energía (abundante y gratuita) llega a la tierra desde el sol donde hay reacciones de fusión, los átomos de hidrógeno producen helio y una cantidad de energía radiante que viaja en el espacio hasta llegar a la superficie de la tierra. Aunque debe investigarse cómo mejorar la eficiencia energética de los dispositivos contribuyendo al ahorro de energía de la sociedad e industrias. El artículo se estructura como se detalla a continuación. En la Sección 2 se presenta el estado del arte: descripción del modelo de bandas de energía (sección 2.1) y la descripción del funcionamiento de la célula solar (Sección 2.2). En la Sección 3 se resumen los principales aspectos analizados y se presentan conclusiones, observando las futuras aplicaciones.

Estado del arte

Modelo de bandas de energía

Las fuerzas de repulsión y atracción entre átomos encontrarán su equilibrio cuando los átomos están separados por la distancia interatómica típica del cristal en cuestión. La distancia real entre los átomos en un cristal será tal que la energía de un cuerpo sólido será mínima; en un cuerpo sólido, el número de átomos es tan grande que los niveles de energía forman bandas continuas de energía. Los electrones asociados con los átomos del sólido llenan estas bandas en orden ascendente, y la banda completamente ocupada con mayor energía se llama banda de valencia (electrones unidos a los átomos). La siguiente zona, parcialmente ocupada o vacía, se llama banda de conducción (los electrones se desprenden de los átomos). En un conductor la E_g es muy baja y los electrones circulan fácilmente por la banda de conducción. En un aislante se necesita una cantidad de energía muy alta para que los electrones puedan acceder a la banda de conducción dado que la E_g es muy alta ($E_g > 5 \text{ eV}$). Sin embargo, en un semiconductor la E_g es baja ($E_g < 5 \text{ eV}$), de forma que los electrones pueden “saltar” a la banda de conducción con un aporte energético. Por ejemplo, para el silicio $E_g = 1,12 \text{ eV}$. Dado el uso predominante de este material en la industria solar, en adelante nos referiremos a este semiconductor de forma preferente. Si esta energía en forma de fotones incide sobre el silicio; que se caracterizan por tener la banda de conducción y la banda de valencia separada por una E_g de niveles no permitidos menor; permitirá la migración de electrones produciendo la generación y movimientos de huecos (Iwan et. al., 2021; Reisi et al., 2013). El silicio como semiconductor tiene una concentración intrínseca de electrones libres (o huecos), debido al incremento de la concentración intrínseca la resistencia de los semiconductores disminuye de los conductores. A) Cuando un semiconductor se ilumina con fotones de energía mayor que la energía de su gap su conductividad se incrementa debido al aumento de electrones que llegan a la banda de conducción gracias a la energía que obtienen de los fotones. B) Para explicar los fenómenos ligados a la conducción eléctrica de los semiconductores es necesario recurrir a la existencia de partículas positivas (huecos) y negativas (electrones).

A cualquier temperatura por encima del cero absoluto, algunos enlaces se rompen debido a la vibración térmica de los átomos de la red, creando electrones libres en el sólido. Un electrón que ha adquirido esta energía y permanece libre realiza una transición de la banda de valencia a la banda de conducción. En la banda de conducción, los electrones libres pueden adquirir movimiento bajo la acción de un campo externo. Pero los electrones unidos de la banda de valencia también podrán moverse, ya que existen estados libres (enlaces covalentes con vacancia debido a un electrón que ha migrado a la banda de conducción). Cuando un electrón de la banda de valencia ocupa está vacante en un enlace adyacente, a su vez deja otra vacante con la correspondiente carga positiva. Por esta razón, la corriente de electrones en la banda de valencia está representada por la corriente de huecos. Sin embargo, la densidad de huecos y electrones es la misma. Dado que el objetivo es preservar la existencia de una corriente eléctrica y utilizarla desde el exterior, es necesario evitar la recombinación, para lo cual es necesario dirigir el movimiento de electrones y huecos mediante un campo eléctrico.

La unión pn: si los semiconductores están dopados, se introducen impurezas en el cristal de forma controlada: átomos de fósforo (símbolo P en la tabla periódica). Los

átomos de fósforo tienen cinco electrones de valencia (uno más que el silicio). Si un cristal de silicio está dopado con átomos de fósforo, el quinto electrón no queda bien integrado en la red y por tanto la ruptura de este enlace se produce con un aporte energético menor que el ancho de la banda prohibida del semiconductor intrínseco. Este quinto electrón permanece libre en la banda de conducción, pero la carga positiva asociada (ion P⁺) permanece unida a la red cristalina sin poder contribuir a la conducción eléctrica. Los átomos de boro tienen tres electrones de valencia (uno menos que el silicio). Cuando un cristal de silicio se contamina con átomos de boro, se crea una brecha en los enlaces que lo rodean (hueco). El hueco queda libre para contribuir a la corriente eléctrica pero la carga negativa (ion B⁻) permanece ligada a la red cristalina. En este caso, la densidad de huecos es superior a la de electrones y a este semiconductor se le clasifica como tipo p (Figura 2).

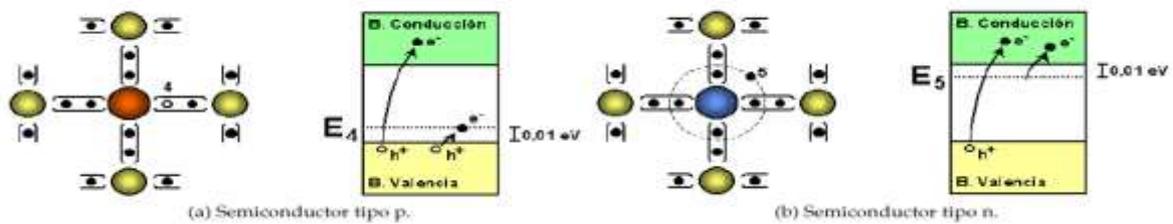


Figura 1: Semiconductores dopados.

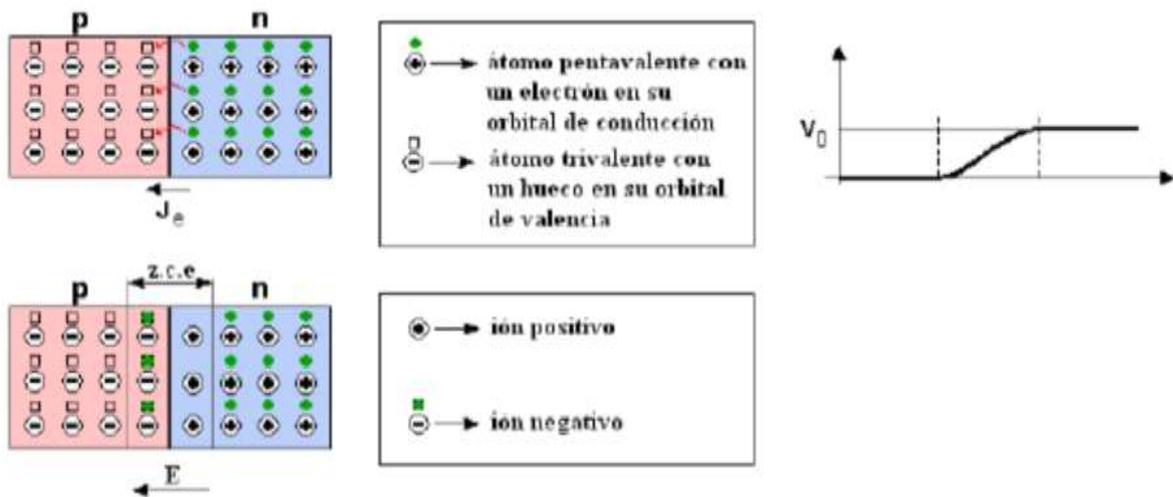


Figura 2: Unión p-n.

Ahora el portador mayoritario es el hueco. Supongamos ahora la existencia de dos semiconductores, uno tipo p y otro tipo n. Al unirlos físicamente se produce un desequilibrio dada la diferente concentración de electrones y huecos en cada cristal. Para alcanzar el equilibrio se produce la difusión de portadores mayoritarios, de forma que aparece un movimiento de huecos desde el cristal p al n, quedando aquel cargado negativamente. Simultáneamente existe un movimiento de electrones desde el cristal n al p, quedando aquel cargado positivamente. Si los huecos y electrones no tuvieran carga, este proceso de difusión continuaría hasta alcanzar una concentración uniforme en todo el volumen. Pero la carga de los portadores de los iones que permanecen ligados a la red impide que el proceso de difusión se desarrolle totalmente. Los iones cargados son el origen de un campo eléctrico orientado desde el semiconductor n (cargado positivamente) hacia el semiconductor p (cargado negativamente). Este campo arrastra a los electrones del cristal p hacia el n, y expulsa a los huecos desde el cristal n hacia el p. La dirección de este

proceso de arrastre es precisamente la contraria al proceso de difusión. El equilibrio se alcanza cuando los movimientos de difusión y de arrastre se compensan.

En el equilibrio, los portadores minoritarios (huecos en n y electrones en p) que atraviesan la unión se recombinan y forman enlaces en la zona cercana a la unión, denominada zona de carga de espacio, la cual queda despoblada de portadores y habitada sólo por iones cargados ligados a la red que generan un campo eléctrico de arrastre en la unión. Este campo eléctrico supone la existencia de una barrera de potencial que recibe el nombre de potencial termodinámico y que impide el paso de los portadores mayoritarios de uno a otro cristal. Así, una vez alcanzado el equilibrio en una unión p-n, la corriente eléctrica es nuevamente nula. Para conseguir la circulación de corriente a través de esta unión p-n es necesario romper el equilibrio alcanzado y reducir el valor del potencial termodinámico.

Si se polariza la unión p-n y aplica una diferencia de potencial entre los extremos del cristal de forma que el lado p adquiera una tensión positiva respecto al lado n, diremos que la unión p-n está polarizada en directa. En estas condiciones se reduce la barrera de potencial y, en consecuencia el valor del campo eléctrico de la zona de unión. Por ello, la corriente de arrastre disminuye y no puede compensar la corriente de difusión. El equilibrio ya no existe y aparece un flujo neto de corriente. Los huecos (electrones) del lado p (n) pueden ahora atravesar la zona de carga de espacio y son inyectados en la zona n (p), donde son portadores minoritarios. Aquí, aparecerá un exceso de huecos respecto del equilibrio y por tanto se originará un proceso de difusión y recombinación. Así, aparecen dos corrientes en sentidos contrarios pero, dado que se trata de partículas de diferente signo, las dos corrientes no se anulan entre sí y dan origen a una corriente total aprovechable.

El criterio convencional en electricidad toma como sentido de la corriente el debido a las cargas positivas, y por tanto la corriente entra en la unión por la zona p y sale por la zona n. Si la diferencia de potencial aplicada consigue que la zona p esté a menor tensión que la zona n, la unión queda polarizada en inversa. En estas condiciones la barrera de potencial en la unión queda reforzada y el paso de portadores de una a otra zona queda aún más debilitado. Así, la corriente que atraviesa la unión en polarización inversa es de muy bajo valor. El dispositivo electrónico basado en una unión p-n se denomina diodo. La zona p del diodo es el ánodo y la zona n es el cátodo. La característica tensión-corriente de este dispositivo queda recogida en la ecuación de Shockley (Ec. (1)) y representada en la Fig (2):

$$I_D = I_0 \cdot [\exp(V_m \cdot VT) - 1] \quad I_D = I_0 \cdot [\exp(V_m \cdot VT) - 1] \quad (1)$$

Donde I_0 es la corriente de saturación en oscuridad del diodo, V la tensión aplicada al diodo (considerada positiva cuando el valor en el ánodo es superior al del cátodo) y m el factor de idealidad del diodo. Este factor puede tomar valores entre 1 y 2, y se emplea para ajustar la Ec. (1) al funcionamiento real del diodo. Para una temperatura ambiente de 300 K, $VT = kT/e = 25,85 \text{ mV}$, conocido como potencial térmico, donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura del diodo (en grados Kelvin), y e es la carga del electrón. Como se observa en la figura, cuando la polarización del diodo es directa, la corriente que circula por él crece de forma exponencial, pero permanece cercana a cero (I_0) cuando la polarización es inversa.

La Unión P-N Iluminada: El efecto fotoeléctrico es la base para el funcionamiento de las células solares, dispositivos basados en la unión p-n descrita anteriormente,

cuyos electrones se mueven hacia la banda de conducción debido al aporte de energía de los fotones incidentes. Sin embargo, la presencia de una tensión entre los terminales de conexión (por ejemplo, la diferencia de potencial en una resistencia alimentada por el dispositivo) reduce la barrera de potencial de la unión y, en consecuencia, favorece los procesos de recombinación que, como se describió anteriormente, forman la corriente del diodo, ahora llamada la corriente oscura. En consecuencia, en una unión pn iluminada coexisten dos corrientes con direcciones opuestas y orígenes diferentes. La corriente oscura o corriente de diodo fluye desde la región p a la región n debido a la recombinación de portadoras favorecida por el voltaje en el circuito externo (Fig. 3).

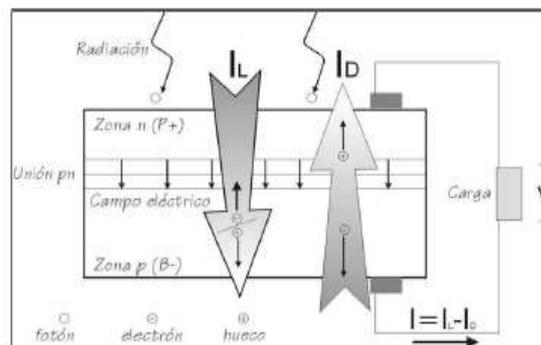


Figura 3: Corriente de iluminación y corriente de diodo en una célula solar y carga.

La corriente total se expresa mediante $I = I_L - I_0 \cdot [\exp(V_m \cdot VT) - 1]$
 $I = I_L - I_0 \cdot [\exp(V_m \cdot VT) - 1]$. Se emplea I_L para designar a la fotocorriente y, dado que el aprovechamiento de la célula solar consiste en extraer esta corriente al exterior, se ha utilizado el signo negativo para la corriente de diodo. El fenómeno de generación de portadores debido al efecto fotoeléctrico depende de la frecuencia de los fotones incidentes. Si el fotón incidente es poco energético respecto a las características de la unión p-n ($E_f < E_g$), no interactúa con el semiconductor y lo atraviesa como si fuese transparente. Los fotones más energéticos (aquellos con baja longitud de onda y alta frecuencia) provoca la rotura de un enlace en la superficie del semiconductor. El par electrón-hueco producido se encuentra lejos del campo eléctrico de la unión, de forma que éste no podrá ejercer sobre ellos la fuerza adecuada para evitar que se recombinan antes de salir del semiconductor al circuito exterior. De forma intuitiva se comprende que la unión p-n podrá aprovechar adecuadamente aquellos fotones suficientemente energéticos para provocar la rotura de un enlace, pero no tanto como para que esta interacción se realice demasiado lejos de la unión. Para el silicio son aprovechables los fotones en el espectro visible ($400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$) y ultravioleta cercano ($300 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$). Sin embargo, los fotones que pertenecen al infrarrojo ($\lambda > 1100 \text{ nm}$) no consiguen romper enlaces y los del ultravioleta son demasiado energéticos (Fig. (3)).

Los fotones con $E_f < E_g$ atraviesan el cristal sin ser absorbidos y son cuantificados mediante las pérdidas de no absorción. Debido a la anchura finita del semiconductor y su coeficiente de absorción, parte de los fotones con $E_f > E_g$ no son absorbidos y constituyen las pérdidas de transmisión. Aquellos que son absorbidos pero se recombinan dentro del dispositivo componen las pérdidas

por recombinación. Para reducir las pérdidas de reflexión (provocada por la diferencia entre los índices de refracción del aire y el dispositivo) se recurre a capas que adaptan los dos índices de refracción y al texturizado de la superficie para conseguir que el rayo de luz reflejado vuelva a introducirse en el material. Suponiendo conocido el número de fotones incidentes por unidad de área para cada energía, $S(E)S(E)$, y el área del dispositivo, A, la Ec. (2) expresa que el dispositivo no podrá aprovechar íntegramente el flujo fotónico incidente.

$$I_L < e \cdot A \cdot \int_0^\infty EG S(E) dE \quad I_L < e \cdot A \cdot \int_0^\infty EG S(E) dE \quad (2)$$

Funcionamiento de una célula solar

Si la tensión aplicada es nula (célula cortocircuitada), la corriente se debe exclusivamente a la fotocorriente, la cual permanece casi constante hasta las cercanías del valor de tensión en el que el diodo comienza a conducir (Iwan et al, 2021; Reisi et al., 2013). Esta disminuye abruptamente hasta cero (célula en circuito abierto) en el punto donde la fotocorriente y la corriente de oscuridad quedan compensadas. Los dos puntos extremos de cortocircuito y circuito abierto quedan definidos con dos parámetros, la corriente de cortocircuito, $I_{sc}I_{sc}$, y la tensión de circuito abierto, $V_{oc}V_{oc}$. La corriente de cortocircuito es fácilmente calculable a partir de la Ec. (3) sin más que imponer $V = 0$:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad I_{sc} = I(V = 0) = I_L \quad (3)$$

Mientras que la tensión de circuito abierto se deduce con la condición $I = 0$:

$$V_{oc} = V(I = 0) = m \cdot k \cdot T_c / e \cdot \ln (I_L / I_0 + 1) \quad (4)$$

Estos dos parámetros suelen estar disponibles en la información asociada a una célula. Será conveniente reescribir la Ec. (1) para incluirlos y obtener la Ec. (5):

$$I = I_{sc} \cdot [1 - \exp (e \cdot (V_{oc} - V) / m \cdot k \cdot T_c)] \quad (5)$$

Superpuesta a la curva corriente-tensión incluye la relación entre la potencia y la tensión. Es evidente la presencia de un máximo que adquiere el nombre de punto de máxima potencia (MPP). La localización de este punto viene definida por la condición $dP/dV = 0$. La potencia entregada por la célula en este punto será la considerada como potencia nominal, $P_{mpp} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}$. Las unidades de esta potencia son vatios pico ($W_p W_p$), reflejando la idea de potencia máxima alcanzable. Dado que la célula funciona en corriente continua, su potencia es $P = V \cdot I$ y por tanto:

$$d(I \cdot V) / dV = V \cdot dI / dV + I \cdot dV / dV \Rightarrow dP = V \cdot dI + I \cdot dV \quad (6)$$

Antes de este punto, $dP/dV > 0$ o, de forma equivalente, $dI/dV > -I/V$. Entre este punto y el circuito abierto $dP/dV < 0$ o, de forma equivalente, $dI/dV < -I/V$. En el punto de P_{max} se cumplirá la Ec. (7). Donde PL representa la potencia luminosa que incide en la célula y este valor de eficiencia se corresponde al caso en el que el acoplamiento entre la carga y la célula permite a ésta trabajar en el punto de máxima

potencia. Las células industriales de silicio suelen ofrecer eficiencias comprendidas entre el 13 % y el 17 %.

$$dI/dV = -I_{mpp}/V_{mpp} \quad dI/dV = -I_{mpp}/V_{mpp} \quad (7)$$

El área encerrada por el rectángulo definido por el producto $I_{mpp} \cdot V_{mpp}$ es inferior a la representada por el producto $I_{sc} \cdot V_{oc}$. La relación entre estas dos superficies se cuantifica con el factor de forma:

$$FF = I_{mpp} \cdot V_{mpp} / I_{sc} \cdot V_{oc} \quad FF = I_{mpp} \cdot V_{mpp} / I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (8)$$

El factor de forma es tanto más cercano a la unidad cuánto más acentuado sea el codo localizado en el punto de máxima potencia. Su valor, normalmente comprendido entre 0,7 y 0,8, varía poco de unas células a otras. Conociendo los valores de I_{sc} y V_{oc} es posible calcular la potencia en el punto de máxima potencia, dado que $P_{mpp} = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}$. Por otra parte, la calidad de una célula se puede cuantificar con la eficiencia de conversión como: $\eta = I_{mpp} \cdot V_{mpp} / P_L$

Análisis y Conclusiones

Se presentaron los distintos aspectos asociados al funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos que permita la instalación de los paneles solares fotovoltaicos en generación distribuida y microrredes con la incorporación del prosumidor. La aplicación de estas tecnologías todavía es motivo de discusión en el estado del arte, lo cual justifica la investigación del tema y su originalidad. El efecto fotovoltaico en paneles solares se genera gracias al silicio del cual se componen las células fotovoltaicas. Este material semiconductor recibe la radiación solar que es absorbida por cada célula, provocando el salto de electrones de una capa a otra y generando la corriente eléctrica. El efecto fotoeléctrico es la base de la producción de energía solar fotovoltaica y, además de la generación solar fotovoltaica, este principio se utiliza también para la fabricación de células utilizadas en los detectores de llama de las calderas de las grandes centrales termoeléctricas, así como para los sensores utilizados en las cámaras digitales. La teoría de Einstein no sólo proporcionaba explicaciones a los problemas planteados por el efecto fotoeléctrico; también daba formas de ser comprobada experimentalmente. Su teoría implicaba que había una correlación entre la frecuencia de la luz y la energía dada a los electrones. La mejora en los paneles solares requiere de mejoras en los materiales y de diseño que permitan hacer más eficiente el aprovechamiento de la luz solar, lo cual puede ser mejorado en futuras investigaciones mediante la implementación de las tecnologías actuales y nuevas, mejorando la sustentabilidad energética, económica y ambiental (Camargo, 2021a, 2022b, 2022c, 2023d; Camargo et al. 2014; Camargo et al. 2018; Camargo et al. 2023).

Referencias

Iwan, A., Pellowski, W., & Bogdanowicz, K. A. (2021). Conversion of Radiophotoluminescence irradiation into Electricity in Photovoltaic Cells. A review of theoretical considerations and practical solutions. *Energies*, 14(19), 6186. <https://doi.org/10.3390/en14196186>

- Reisi, A. R., Moradi, M. H., & Jamasb, S. (2013). Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 19, 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052>
- Camargo, F. G. (2021a). Survey and calculation of the energy potential and solar, wind and biomass EROI: application to a case study in Argentina. *DYNA*, 88(219), 50-58.
- Camargo, F. G. (2022b). Dynamic Modeling Of The Energy Returned On Invested. *DYNA*, 89(221), 50-59.
- Camargo, F. G. (2022c). Fuzzy multi-objective optimization of the energy transition towards renewable energies with a mixed methodology. *Production*, 32, e20210132.
- Camargo, F. G. (2023d). A hybrid novel method to economically evaluate the carbon dioxide emissions in the productive chain of Argentina. *Production*, 33, e20220053. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20220053>
- Camargo, F., Casanova, C., Perez, E., & Schweickardt, G. (2019). METODOLOGÍA REGULATORIA PARA PROPICIAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DESDE EL LADO DE LA OFERTA CON PENETRACIÓN DE FUENTES PRIMARIAS DE ENERGÍAS RENOVABLES. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 27(45), 5–24. Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/24350>
- Camargo, F. G., Sarroca, E., Faure, O., Argañaraz, F. D., Cabana, J. A., Karam, C., Sosa, G., Romero, Y. R., Calbo, V., & Perez, E. A. (2023). Discusión de la teoría económica y su aplicación en modelos multidisciplinarios energéticos: Parte 1: Introducción a los métodos de decisión difusos. *Revista De La Escuela De Perfeccionamiento En Investigación Operativa*, 31(53). Recuperado a partir de <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/epio/article/view/41269>
- Camargo, F. G., & Schweickardt, G. A. (2014). Estimación de la tasa de retorno energético: Análisis comparativo de las metodologías disponibles en la actualidad. *Maskana*, 5, 65-73.
- Camargo, F. G., Schweickardt, G. A., & Casanova, C. A. (2018). Maps of Intrinsic Cost (IC) in reliability problems of medium voltage power distribution systems through a Fuzzy multi-objective model. *Dyna*, 85(204), 334-343.