

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2025,
Volumen 9, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2

UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EDIFICACIONES CONECTADAS A LA RED ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA CHIMBORAZO

USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN BUILDINGS CONNECTED TO THE ELECTRICAL GRID IN THE PROVINCE OF CHIMBORAZO

Lorenzo A. Enríquez G.

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

Luis J. García F.

Universidad de Oriente, Cuba

Ángel L. Brito S.

Universidad de Oriente, Cuba

Diego Veloz-Cherrez,

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i4.19686

Utilización de la Energía Solar Fotovoltaica en Edificaciones Conectadas a la Red Eléctrica en la Provincia Chimborazo

Lorenzo A. Enríquez G. ¹

lenriquez@espoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7300-8204>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Riobamba - Ecuador

Orcid:

Luis J. García F.

lgarcia@uo.edu.cu

<https://orcid.org/0000-0003-1237-3915>

Centro de Estudios de Energía y Refrigeración
Fernando Brossard Pérez, Universidad de
Oriente
Santiago de Cuba - Cuba

Ángel L. Brito S.

albrito@uo.edu.cu

<https://orcid.org/0000-0003-2862-0984>

Centro de Estudios de Energía y Refrigeración
Fernando Brossard Pérez, Universidad de
Oriente,
Santiago de Cuba - Cuba

Diego Veloz-Cherrez,

diego.veloz@espoch.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6084-2213>

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
(ESPOCH), Facultad de Informática y
Electrónica, Chimborazo,
Riobamba - Ecuador

RESUMEN

En la actualidad son muchas las formas en que se puede aprovechar la energía renovable del sol; la fotovoltaica es una de ellas. Inicialmente se utilizó fundamentalmente para sistemas de electrificación de viviendas aisladas, faros, torres de radio, televisión y telefonía alumbrados de puentes y otras aplicaciones donde resulta muy difícil y costosa llevar la electricidad, luego se fue extendiendo a sistemas de mayores dimensiones conectados a la red dentro de las cuales hay muchas alternativas diferentes. En este trabajo se aborda el estudio de factibilidad tecno-económica de utilización de sistemas fotovoltaicos de baja y mediana potencia en edificaciones tales como hospitales, universidades, fábricas, edificios multifamiliares y otros que, estando conectados a la red eléctrica convencional, disponen de las condiciones adecuadas para la utilización de la energía solar fotovoltaica como alternativa para amortizar el costo del consumo de electricidad. Para el dimensionado técnico y análisis de rentabilidad se ha diseñado una herramienta de fácil interacción con el usuario. Se expone como caso de estudio el proyecto realizado bajo el principio de toda la energía consumida se compra-toda la producida se vende (out to red-in from red) a una vivienda de la ciudad de Riobamba en la provincia Chimborazo de la República de Ecuador.

Palabras claves: sistemas fotovoltaicos conectados a red, análisis de rentabilidad y sensibilidad, radiación global, potencia pico, horas equivalentes

¹ Autor principal

Correspondencia: lenriquez@espoch.edu.ec

Use of Photovoltaic Solar Energy in Buildings Connected to the Electrical Grid in the Province of Chimborazo

ABSTRACT

Currently there are many ways in which renewable energy from the sun can be used; photovoltaics is one of them. Initially it was used mainly for electrification systems for isolated homes, lighthouses, radio, television and telephone towers, bridge lighting and other applications where it is very difficult and expensive to carry electricity, then it was extended to larger systems connected to the network. Within which there are many different alternatives. This work addresses the techno-economic feasibility study of the use of low and medium power photovoltaic systems in buildings such as hospitals, universities, factories, multi-family buildings and others that, being connected to the conventional electrical grid, have the appropriate conditions for the use of photovoltaic solar energy as an alternative to amortize the cost of electricity consumption. For technical sizing and profitability analysis, a tool that is easy to interact with the user has been designed. The project carried out under the principle of all the energy consumed is bought-all the energy produced is sold (out to red-in from red) to a home in the city of Riobamba in the Chimborazo province of the Republic of Ecuador.

Keywords: grid-photovoltaics connected systems, reliability and sensibility analysis, global radiation, peak power, equivalent hours

Artículo recibido 19 julio 2025

Aceptado para publicación: 22 agosto 2025



INTRODUCCION

En sus inicios, la energía solar fotovoltaica fue utilizada como una simple forma emergente de sustitución de los combustibles fósiles, pero las investigaciones realizadas en esta ciencia ha traído consigo el aumento de la eficiencia de los paneles solares fotovoltaicos y la disminución de los costos lo que ha hecho de ella una de las formas más seguras y rentables de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía (FRE) en la actualidad, dejando de ser exclusiva de las grandes empresas de proyectos y acercando cada día a proyectistas individuales porque independientemente de los complejos procesos que ocurren en la transformación de la energía del sol en eléctrica, nuevos conceptos aplicados en los proyectos como los de potencia pico de los paneles, horas pico u horas equivalentes y otros que veremos más adelante, han facilitado el uso de esta tecnología.

Muchos estados, sobre todo los que no poseen grandes reservas de combustibles fósiles ven la necesidad de promover el uso de las fuentes renovables de energía y en especial la proveniente del sol, ya que esta es limpia e inagotable, y aunque tiene el inconveniente de presentarse solo algunas horas del día, lo hace con mayor precisión que las otras fuentes renovables de energía, lo cual conduce a resultados más fiables. La promoción que hacen los estados para incentivar su uso, generalmente viene acompañada de cursos para la capacitación, herramientas para su implementación y facilidades económicas para el financiamiento de los proyectos individuales con muy bajas o ninguna tasa de interés anual.

Generalmente para estos proyectos se recurre al uso de softwares profesionales, pero éstos no siempre están disponibles, las variables de entrada no se adaptan a la información que dispone el usuario o las de salida no son las esperadas.

El objetivo propuesto en este trabajo es mostrar el procedimiento seguido por una herramienta diseñada por los autores para facilitar los estudios de factibilidad, dimensionado y rentabilidad de los proyectos de electrificación de edificaciones conectadas a una red nacional o local trabajando bajo el principio de “Toda la energía fotovoltaica producida se vende a la red, toda la energía consumida se compra a la red”.



MATERIAL Y METODO

Para cumplir con el objetivo propuesto se aplican al proyecto de electrificación de una vivienda en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo la metodología y herramienta de cálculo diseñadas por los autores fundamentadas en los principios básicos de la transformación de la energía, la optimización y el análisis financiero de los proyectos.

Parametros de entrada

Para cualquier proyecto de electrificación con energía solar existen tres variables de entrada que prácticamente definen las dimensiones que puede tener el proyecto. Ellas son:

- El recurso solar
- La demanda de energía eléctrica
- La potencia fotovoltaica a instalar

El recurso solar está determinado por la energía radiante del sol que tiene posibilidad de transformarse en energía eléctrica. Fuera de la atmósfera terrestre la energía solar tiene un valor constante (constante solar) de $1\,367\text{ W/m}^2$. Las nubes, el aire, cualquier obstáculo que se interponga entre el sol y la tierra hace disminuir esa magnitud por adsorción, reflexión y refracción de los rayos del sol, además, debido a la variación de la distancia de la tierra al sol en su recorrido anual por la trayectoria elíptica alrededor de éste y a la rotación alrededor de su eje, hace que la radiación global que llega a los diferentes puntos de la tierra varíe según la época y días del año. Tanto la potencia de los rayos del sol que llega de forma directa (H_b) como la que llega de forma reflejada o difusa (H_d) toman parte en la energía global o total que puede ser transformada en energía eléctrica; esta se expresa normalmente en $\text{kWh/m}^2\cdot\text{d}$, la cual representa la integración de la potencia horaria sobre una superficie horizontal de un metro cuadrado a lo largo del día [Duffie, J.A.; Beckman, William. A, 2013] Para tener el valor de la radiación global en un determinado sitio se puede recurrir a las mediciones directas, observatorios meteorológicos, informaciones satelitales, atlas de energía solar u otros medios. Para el proyecto de referencia, la radiación solar de la provincia Chimborazo fue obtenida del atlas de energía solar con fines de electrificación de la república de Ecuador [CONELEC, 2008] y verificada con la información satelital de la NASA a través de la red canadiense RetScreen [RetScreen, 2024]. En la figura 1 se muestra la



radiación promedio en kWh/m²/d para los diferentes meses en la ciudad de Riobamba y en la figura 2, la radiación global para cada hora en W/m² y en % del total de un día promedio anual.

Figura 1. Radiación global mensual de la ciudad Riobamba. Provincia de Chimborazo

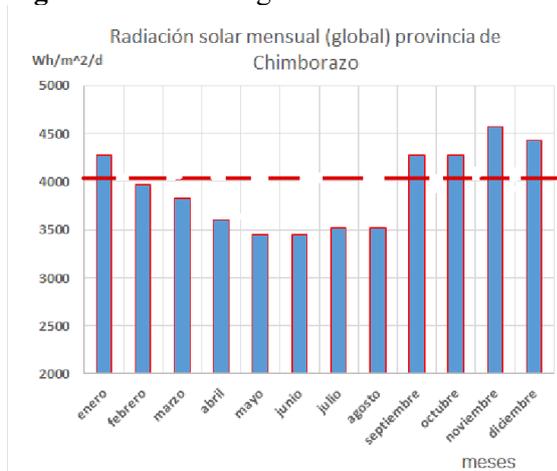
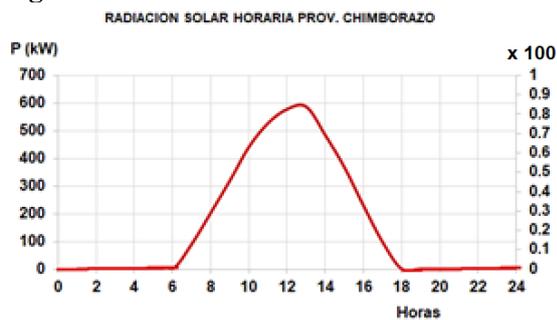


Figura 2. Radiación solar horaria ciudad de Riobamba, provincia Chimborazo



Como se puede observar en la figura 2, la potencia que incide sobre una superficie horizontal de 1 metro cuadrado (W/m²) varía desde el nacimiento hasta la puesta del sol, tiene su valor máximo alrededor de las 12:00 M, con una distribución casi simétrica. La integración de la potencia durante las horas de sol (área que queda debajo de la curva) es la energía desarrollada por el sol en el día (kWh/m²/d).

La demanda de energía eléctrica depende de la potencia de los equipos instalados y del uso que se haga de ellos, está influenciada por los hábitos de la población, desarrollo tecnológico, económico y social, época del año y otros factores. Existen patrones típicos de la demanda diaria residencial, el alumbrado público, las instalaciones industriales, de servicio, comercio, etc., que se pueden utilizar como referencias para estimar la potencia a instalar. Para proyectos de nueva creación existen coeficientes empíricos mediante los cuales se pueden determinar la carga y la demanda diaria. [González, Alfredo et

al, 2007]. En los casos en que se dispone de los registros históricos de consumos mensuales, estos son suficientes para los proyectos conectados a red bajo el principio de “Toda la energía producida se vende a la red, y toda la consumida se compra” porque no es de interés la hora ni el día en que se compra o vende la energía.

La potencia fotovoltaica a instalar puede variar en dependencia de los objetivos específicos del proyecto, pero está influenciada por factores tales como: la capacidad de financiamiento del proyecto y el área disponible. Se demuestra, como se verá más adelante que los proyectos de electrificación con energía solar fotovoltaica pueden ser rentables, aunque su costo capital total es alto, oscilando entre 1,200 -1,300 \$/kW y el área ocupada grande, llegando a ser de 5 m²/kW a 7 m²/kW según el ángulo de montaje y la potencia pico de los paneles ya que en paneles de un mismo tipo su área depende de la potencia pico. Teniendo en cuenta esos factores la potencia a instalar queda determinada por la potencia que convierte cada panel y el número de paneles utilizados. El concepto de potencia pico de los paneles es relativamente nuevo, lo cual junto al concepto de horas pico u horas equivalentes de 1 000 W simplifica notablemente los proyectos.

La potencia pico del panel es la potencia que deberá desarrollar el panel cuando sobre él incide una potencia equivalente a 1 000 W/m² de radiación solar, por tanto, para otra potencia de radiación solar el panel desarrolla otra potencia F.V. proporcional.

Las horas equivalentes o horas pico de 1 000 W son las horas que hipotéticamente producirían la misma energía durante el día si la potencia solar fuera constante y de 1 000 W/m². Por tanto, Como:

Energía=Potencia x tiempo, se tiene que:

$$h_{1000\text{ W}} = \frac{\text{Energía} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right)}{P_{\text{pico}} \left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right)} \quad (\text{h}) \quad (1)$$

Y la energía fotovoltaica diaria útil que puede desarrollar la instalación se determina por

$$\text{Energía FV.} = P_{\text{p panel}} \cdot N_{\text{paneles}} \cdot \text{horas}_{1000\text{ W}} \cdot \eta_{\text{conv}} \quad \text{kWh} \\ / \text{d} \quad (2)$$

En la cual:

η_{conv} – Eficiencia del convertidor compuesto por el regulador de voltaje y el inversor CD/CA



Para estar seguro de que un panel desarrolla la potencia pico que afirma el fabricante, lo ideal es someter una muestra representativa de ese panel a ensayos estandarizados de laboratorios, pero no siempre esto es posible por lo que no queda otra alternativa que considerar un margen de seguridad en el cálculo de la potencia a instalar.

Desarrollo del proyecto

El caso de estudio tomado como ejemplo fue realizado a una vivienda de la ciudad de Riobamba, provincia Chimborazo, República de Ecuador cuya foto se muestra en la figura 3. Tiene una superficie disponible sobre el techo de 8 m x 6 m sobre el cual se situarán paneles de silicio mono cristalino de 500 Wp de potencia, de 2130x1051x35 mm y 25 Kg de peso cada uno con ángulo de inclinación respecto a la horizontal de $1,7^{\circ}$, que es la latitud del lugar, orientados hacia el hemisferio norte.

Figura 3. Vivienda en la que se realiza el proyecto



a) vivienda



b) paneles en el techo

En la figura 4 se muestra la herramienta diseñada para este tipo de proyectos, aunque puede ser utilizada también para sistemas conectados a red que trabajan bajo el principio de compensación horaria de la demanda y la generación fotovoltaica. Dispone de dos bloques, en el de izquierda se suministran los datos necesarios numerados en orden consecutivo; en el de la derecha se tienen los resultados del balance de energía y económicos y se procede a hacer el análisis de rentabilidad y sensibilidad del proyecto.

Figura 4. Herramienta diseñada por los autores para los proyectos de electrificación conectados a red



En (1) se suministra la radiación global promedio diaria. Para este caso la herramienta tiene en su base de datos la radiación para todos los cantones de la provincia Chimborazo, confeccionada con el atlas con fines energéticos de la República de Ecuador [CONELEC, 2008] y corroborados por la base de datos satelitales de la NASA a través de RetScreen International [RetScreen, 2024]. En el cantón Riobamba la radiación global media anual es de 4,06 kWh/m²/d, en otras provincias u otros países debe tomarse de mediciones en observatorios meteorológicos, mediciones in sites, datos de satélites, atlas solares, etc.

En (2), si el proyecto fuese conectado a la red con compensación de la demanda horaria, esta debe suministrarse lo más exacto posible, sin embargo, para este caso puede introducirse el valor promedio de la demanda de cada hora porque no es de interés estimar el déficit o exceso de la energía cada hora.

La demanda diaria promedio fue estimada a partir del consumo de varios meses certificado por los recibos de la empresa eléctrica de Riobamba EERSA. Para este caso, el usuario consumió durante el año 2023 un total de 7 245 kWh y efectuó un pago total de \$784.18 lo que arroja una tarifa promedio de 0.108 \$/kWh, la demanda promedio diaria del año 2023 fue de 19,9 kWh, la cual fue incrementada hasta 21,5 kWh diarias (10 % aproximadamente) para tener un margen de seguridad en el proyecto. Si fuera necesario, con la demanda horaria se traza la curva de demanda figura 5 (en rojo). En este caso, la demanda diaria sigue un patrón típico de una casa de la ciudad en la cual las menores demandas se producen durante las horas de la madrugada, luego al amanecer comienza a aumentar con la utilización de los equipos eléctricos, posteriormente hay una pequeña disminución entre las 12:00 M y las 2:00 PM y luego vuelve a aumentar, produciéndose la mayor demanda generalmente alrededor de las 18:00 h y las 21:00 h, disminuyendo finalmente hasta las horas de la madrugada.

En (3) Se calcula la potencia pico a instalar en función de la potencia pico de los paneles y el número de paneles. Como de inicio no se conoce el número adecuado de paneles a instalar, para evitar el proceso de tanteo que utilizan otros softwares la herramienta aplica para su determinación el siguiente criterio: **“En número óptimo de paneles es aquél que garantiza que la Energía Fotovoltaica producida en el día sea igual a la demanda diaria”**. Es decir, de la ecuación 2:

Demanda diaria= Energía FV. =

$$P_{p \text{ panel}} \cdot N_{\text{paneles}} \cdot \text{horas}_{1000 \text{ W}} \cdot \eta_{\text{conv}} \quad (3)$$

De ahí:

$$N_{\text{paneles}} = \frac{\text{Demanda diaria}}{P_{p \text{ panel}} \cdot \text{horas}_{1000 \text{ W}} \cdot \eta_{\text{conv}}} \quad (4)$$

En esta:

η_{conv} = Eficiencia del regulador + inversor (85 % – 90 %)

El número de horas equivalentes o de 1 000 W se determina por la definición dada en 1:



$$h_{1000} = \frac{4,06 \frac{kWh}{m^2 \cdot d}}{1 \frac{kW}{m^2}} = 4,06 \frac{h}{d}$$

Y el número óptimo de paneles:

$$N_{paneles} = \frac{21,5 \text{ kWh/d}}{0,5 \text{ kW} \cdot 4,06 \text{ h/d} \cdot 0,90} = 11,76$$

Se tomaron 12 paneles de 500 Wp

Si se desea tener mayor venta de energía que la que se compra a la red, podrá aumentarse el número de paneles, pero debe tenerse en cuenta el área disponible y el aumento del costo del proyecto. Se podrá verificar en la parte superior del bloque de la derecha que cuando el número de paneles es de 12, la compra de energía a la red coincide con la demanda, la generación fotovoltaica tiene un pequeño exceso de energía porque con 12 paneles se produce algo más que la necesaria (no es posible un panel fraccionario).

Conocida la energía fotovoltaica diaria, es posible determinar la producción para cada hora a partir de:

E. FV_{hi}

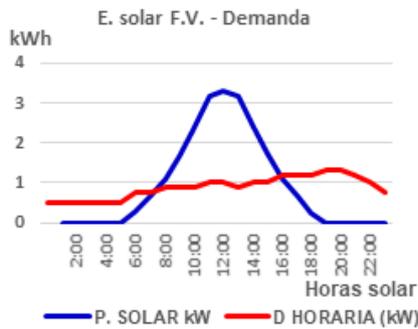
$$= \%_i \cdot N_{paneles} \cdot P_{panel} \cdot h_{1000W} \cdot \eta_{conv} \quad (kWh) \quad (5)$$

En la cual: %_i corresponde al % de la potencia solar de cada hora respecto a la radiación total del día como se pudo observar en la figura 2.

El trazado de la curva de producción fotovoltaica con la de demanda en un mismo gráfico permite determinar el déficit o exceso de energía cada hora, Las curvas de demanda (en rojo) y la de generación fotovoltaica (en azul) se presentan en la figura 5.



Figura 5. Curvas de demanda y producción FV. Horaria (generados por la herramienta)



En (4) se le da entrada a otras variables que intervienen en el cálculo económico y financiero del proyecto.

Precio de venta y compra de la energía a la red. Lo ideal es que existan iguales tarifas, en ese caso no habría desbalance entre la venta y la compra de energía. La manera en que se confeccionan las tarifas de venta de electricidad depende de la estrategia seguida por las empresas distribuidoras, algunas presentan tarifas descendentes a medida que aumenta el consumo, otras, para estimular el ahorro de energía, sobre todo cuando se produce con combustibles fósiles, presentan tarifas con aumento creciente en \$/kWh. En todos los casos el precio a considerar será el promedio del pagado por el consumo en un período largo de tiempo.

En algunos países latino americanos, Mexico es uno de ellos, se estimula el uso de las FRE, el estado ofrece facilidades económicas para el financiamiento de los proyectos y se dan tarifas de venta de la energía fotovoltaica similares a las de compra a la red.

La tasa de descuento anual es uno de los factores que mayor incidencia negativa tiene en los proyecto, como se podrá observar más adelante, es el pago que debe efectuarse en cada período, generalmente anual cuando el proyecto se realiza con financiamiento externo; cuando corre a cargo del estado, generalmente la tasa es baja e incluso puede llegar a ser nula; cuando el financiamiento es externo, el proyectista debe estar conciente de la influencia que ejerce éste factor sobre la rentabilidad del proyecto para poder llegar a acuerdos razonables sobre dicha tasa.

El costo de operación y mantenimiento generalmente se toma como un % del costo capital o del ingreso por la energía producida, ejerce poca influencia en la sensibilidad del criterio financiero adoptado para evaluar el proyecto, en este caso el Valor Actual Neto.

El Valor residual del proyecto es un elemento positivo en la rentabilidad porque representa el valor de los componentes que al finalizar el ciclo de vida del proyecto pueden ser reutilizados o vendidos como materia prima,

El costo capital tiene en cuenta actividades que van desde la etapa preparatoria hasta que el proyecto queda en condición de comenzar a producir, estos se incurren una sola vez durante el ciclo de vida del proyecto.

En la práctica, la determinación del costo capital se puede llevar a cabo mediante dos procedimientos generales: la determinación directa paso a paso o discreta y la determinación mediante algún método de estimación. El cálculo discreto del costo de los proyectos normalmente se realiza mediante la suma de los costos individuales de ingeniería, equipamientos, materiales y labor dentro del costo capital. El resultado puede ser preciso si se dominan todos los factores determinantes del costo, pero es laborioso, consume mucho tiempo de trabajo y **no revela la relación existente entre los parámetros técnicos y el costo.**

Existen diferentes **métodos de estimación no discretos del costo capital**, algunos de ellos se pueden aplicar durante las primeras etapas del proyecto en las cuales solo hace falta tener una idea del costo, otros pueden llegar a ser tan exactos como el cálculo discreto. En este trabajo se aplica un modelo matemático desarrollado para estimar el costo capital de los proyectos de electrificación con energía fotovoltaica a partir de los parámetros técnicos relevantes. La ecuación fue desarrollada a partir de una amplia base de datos recopilada de proyectos similares de varios países latino americanos dentro de los cuales se encuentran México, Colombia, Perú, Bolivia y Cuba. Tiene como ventaja indiscutible que, al presentarse en forma de ecuación en función de los parámetros técnicos relevantes del proyecto, cualquier cambio que se produzca en uno de esos parámetros, se manifiesta en el costo sin necesidad de realizar de nuevo el cálculo.

En el volumen 4 del manual de Costo de la NASA [NASA, 2007] se define la Estimación Paramétrica por una técnica que emplea una o más relaciones matemáticas y lógicas, que es utilizada en ingeniería



para calcular el costo relacionado con el proyecto, se fundamenta en dos teorías [Hamaker, J.W, 2002]: La curva de aprendizaje (The learning curve”), que pone de manifiesto la disminución del costo con el aumento del número de unidades producidas: y la teoría de la economía de escala, la cual establece que en equipos similares, el costo por unidad de capacidad disminuye según aumenta la capacidad del equipo, conocida también como la Teoría de las seis décimas (“Six Tenth Theory”) [Randall, P. E et al, 2007]. La técnica paramétrica hace énfasis sobre cuestiones controladoras del costo (drivers), como potencia, capacidad, tamaño, peso, empuje, etcétera, no sobre los detalles irrelevantes. La ecuación desarrollada tiene la ventaja adicional, que incluye todos los elementos que intervienen en el costo capital: costo de los paneles, regulador, inversor, pizarra, instrumentos de protección cables, estructura del montaje, mano de obra, etc.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balance de energía

Con la información solicitada en el orden indicado y las ecuaciones propuestas, (1-5) es posible realizar los principales cálculos de energía sin necesidad de software profesional, la herramienta que se propone es con el objetivo de facilitar las operaciones de forma rápida y segura. En el bloque de la derecha en la parte superior se tienen los resultados del balance de energía. Se puede observar que existe plena coincidencia entre la demanda de energía, la producción fotovoltaica y la venta, esto se pudo lograr porque se aplicó el criterio dado en la ecuación (3) y la potencia fotovoltaica es la adecuada para cumplir con esa condición. Se reitera que si se deseara mayor producción de energía F.V. que la demandada y existen las condiciones de área y financieras, esto se puede lograr con el aumento del número de paneles. El beneficio económico que esto puede reportar se analiza más adelante.

Resultados económicos y financieros

La energía eléctrica facturada en el año al usuario ascendió a \$784,18 por los 7 245 kWh consumidos con un precio de 0,108 \$/kWh. Como hubo un incremento en el número de paneles hasta 12, la energía que se puede vender a la red en el año es algo superior, 8030 kWh que con un precio de venta similar al de compra el ingreso anual es de \$800.



Costo del proyecto

El costo capital de los proyectos de electrificación con energía solar fotovoltaica se determina mediante la ecuación paramétrica desarrollada con ese objetivo. Presenta la forma general [Enriquez, A et al, 2016]:

$$C_c = A \cdot \frac{P_{pico}^a}{1000^a} N^b \quad (\$) \quad \text{©} \quad (6)$$

En(la cual:

A, a, b coeficiente y exponentes de escalado

Tiene en cuenta todos los costos asociados al proyecto, siendo los parámetros relevantes la potencia pico de los paneles y su número los mismos que se utilizan para el cálculo de la energía y la evaluación financiera, presenta la ventaja de poder trabajar de forma continua dentro del algoritmo de optimización.

El margen de error entre los valores del costo capital calculados por esta ecuación y las obtenidas por métodos discretos es menor en todos los casos del 10%. En la tabla 1 se muestran algunos ejemplos.

Tabla 1. Error relativo de la ecuación paramétrica

| potencia pico/panel | N PANELES | Costo/ecuación | Costo discreto | Error (%) |
|---------------------|-----------|----------------|----------------|-----------|
| 500 Wp | 4 | \$2 239 | \$2 455 | 10% |
| 500 Wp | 8 | \$5 718 | \$6 146 | 7,5% |
| 500 Wp | 12 | \$8 431 | \$9 434 | 6.5% |
| 500 Wp | 16 | \$11 123 | \$11 679 | 5,0% |

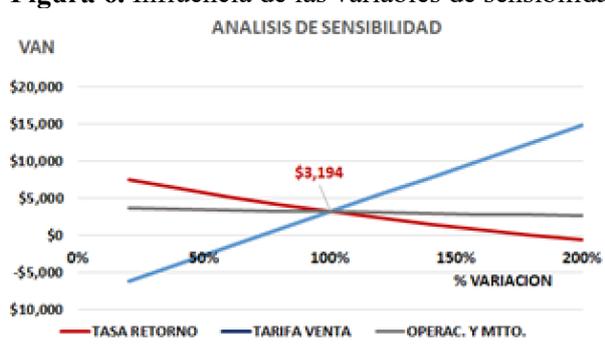
Validación financiera

Para la validación financiera se utilizan el Valor Actual Neto (VAN) y como criterio complementario, el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) [Retama, Álvarez J.C, 2007], [VGB, 2007],[Blank, L; Tarquin, Y. A, 2002]

El VAN define si el proyecto es rentable o no y en cuánto durante el ciclo de vida: el LCOE indica hasta cuánto puede bajar el precio de venta de la energía sin que el proyecto deje de ser rentable. Otros autores utilizan como criterios el Período de Retorno del Capital (Payback) [Antúnez, E.R. et al, 2024] pero este criterio puede dar una idea errónea de la rentabilidad de las FRE en comparación con otras fuentes no renovables que continúan consumiendo combustible después de recuperado el proyecto, por lo que es preferible utilizarlo como criterio complementario.

Variables de sensibilidad Los criterios financieros VAN y LCOE adoptados como criterios de validación de la rentabilidad están en función de parámetros constantes y otros que pueden variar a lo largo del ciclo de vida del proyecto. La potencia pico y el número de paneles después que han sido adoptados, aunque influyen en la rentabilidad resulta casi imposible realizar cambios sobre ellos. Otros parámetros que pueden ser variables dentro de determinados rangos y ejercen notable influencia sobre los criterios de validación financieros reciben el nombre de variables de sensibilidad, dentro de ellos se encuentran la tasa interna de retorno, la tarifa eléctrica, el costo de combustible en sistemas híbridos y otros en dependencia del tipo de proyecto. Para analizar la influencia que ejerce cada una de esas variables sobre el VAN se analiza el comportamiento por separado de cada una de ellas manteniendo las restantes constantes como se muestra en la figura 6. El VAN que se obtiene para el valor del 100% recibe el nombre de VAN del 100% es aquél con el cual están funcionando las variables en ese momento. En este caso el proyecto está funcionando con un VAN de equilibrio de \$3 194

Figura 6. Influencia de las variables de sensibilidad sobre el VAN. (generado por la herramienta)



En la tabla 2 se muestra la marcada influencia que ejercen la tasa de descuento en el entorno del (0%-4%) de variación y la tarifa de venta de la electricidad en el entorno de (\$0.08 - \$0.108). Los valores subrayados en letra amarilla corresponden a los mejores resultados para este proyecto.

Tabla 2 Resumen de sensibilidad (generados por la herramienta diseñada por los autores)

| Variables de sensibilidad | | Resultados | |
|---------------------------|---------------------------|------------|---------------|
| Tasa descuento (%) | Tarifa eléctrica (\$/kwh) | VAN (\$) | LCOE (\$/kwh) |
| 0 | 0.08 | 5209 | 0.05 |
| 2 | 0.08 | 741 | 0.07 |
| 4 | 0.08 | -230 | 0.11 |
| 0 | 0.09 | 6809 | 0.05 |
| 2 | 0.09 | 1823 | 0.07 |
| 4 | 0.09 | -1480 | 0.11 |
| 0 | 0.10 | 8410 | 0.05 |
| 2 | 0.10 | 2900 | 0.07 |
| 4 | 0.10 | -749 | 0.11 |
| 0 | 0.108 | 9690 | 0.05 |
| 2 | 0.108 | 3762 | 0.07 |
| 4 | 0.108 | -165 | 0.11 |

CONCLUSIONES

Se ha podido comprobar que es posible llevar a cabo proyectos de electrificación con energía solar fotovoltaica de sistemas conectados a red de baja y mediana potencias en edificaciones de forma sostenible y rentables si se dispone de la información precisa sobre el recurso solar y la demanda de energía mediante una adecuada metodología y con auxilio de una herramienta de cálculo que englobe el dimensionado, balance de energía, cálculo económico y financiero y finalmente el ajuste de las variables de sensibilidad para llevar el proyecto a condiciones de operación rentables. En la tabla 2 se muestran los mejores resultados del VAN y el LCOE con los datos suministrados para este proyecto, podrían ser mejores si se logra una tasa de descuento igual a cero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Duffie, J. A; Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2013
- González, Alfredo; Borges Davel; Martínez Mario. Métodos de estimación de la demanda en sistemas de baja tensión. energética Vol. XXVIII, No. 3/2007, La Habana, Cuba, 2007
- CONELEC, Consejo Nacional de Electrificación de Ecuador. Atlas solar con fines de generación eléctrica. Ecuador, 2008



RetScreen Internacional. Software de versión de energías limpias. V.9.1.10, Canadá, 2024

National Aeronautic and Space Administration. Cost Estimating Handbook. V-4. Update of 2008 edition, 60p. NASA. USA February-2015

http://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NASA_Cost_Estimating_Handbook_Recommended_Revision_Submission_Form_Tagged.pdf.

Hamaker, J. W. The History of NASA Cost Estimating. NASA Cost Estimating Web Site, 2002. Disponible en: <http://www.nasa.gov/sites/>

Apgar Henry. The Legacy of Parametric Estimating (CV01). International Cost Estimating and Analyzing Association. Professional Development & Training Workshop. Tampa, Florida, U.S.A. May 14-18, 2019.

www.iceaaonline.com

Randall, P. E; White Sides, W. Process Equipment Cost Estimating by Ratio and Proportion. PDH Course G127 Copyright © 2012

<https://www.pdhonline.com/courses/g127/g127content.pdf>

Enriquez Garcia, L. A; Garcia Faure, L. J; Oro Ortiz, C. S. Algorithm for The Techno-Economic Optimization Applied in Projects Of Wind Parks Of Latin America. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 13, Issue 4 Ver. VI (Jul. - Aug. 2016), PP 60-65.

<http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue4/Version-6/I13040646065.pdf>

Retana Álvarez, Julio Cesar. Integración del Valor Presente Neto, la Simulación y las Opciones Reales en el Desarrollo Estratégico de la Evaluación de Proyectos. Universidad Nacional Autónoma De México. Programa De Maestría Y Doctorado en Ingeniería. Facultad De Ingeniería. México, DF, 2007 <https://www.slideshare.net/VictorGuerreroDiaz/retanalvarez>

VGB. Electronic BOOK. Levelized Cost of Energy. VGB Power Tech Service GmbH Verlag technisch-wissenschaftlicher Schriften . ISBN: 978-3-86875-876-4 P.O. box 103932, 45039 Essen, Germany, 2015

Blank, L; Tarquin, Y. A. Ingeniería Económica. 6ta Edic. Mc Graw Hill, Bogotá, Colombia, 2002, 885p, ISBN: 970-10-5608-6



Antúnez, E. R; Concepción Díaz; Ovel, Figueiras Sainz, M; Concepción Díaz; Fuentefria Ariel, Santos.
Análisis del costo/beneficio para consumidores de energía solar. Universidad Tecnológica de
La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, vol.45 no.1 La Habana ene.-abr. 2024 Epub 30-
Mar-2024.

