

# Diseño técnico y económico de un banco de prueba solar fotovoltaico para generación de energía eléctrica de forma aislada

## Technical and economic design of a photovoltaic solar test bank for power generation off-grid

Yuranis Salas Reyes<sup>1\*</sup>, Hismary Gómez Blanco<sup>2</sup>, Marley Vanegas Chamorro<sup>3</sup>,  
Guillermo Valencia Ochoa<sup>4</sup>, Eunice Villicaña Ortíz<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Ing. Químico, <sup>3</sup> Ph.D. Ing. Químico, <sup>4</sup> Ms. Ing. Mecánico

<sup>1,2,3,4</sup> Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía Kaí, Facultad de Ingeniería,  
Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia

<sup>5</sup> Ph.D. Ing. Electrónico, Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), Lima, Perú

Email: yurisir9408@gmail.com

Recibido: 2/06/2018

Aceptado: 15/07/2018

Cite this article as: Y. Salas-Reyes, H. Gómez-Blanco, M. Vanegas-Chamorro, G. Valencia-Ochoa, E. Villicaña-Ortiz "Technical and economic design of a photovoltaic solar test bank for power generation off-grid", *Prospectiva*, Vol 16, N° 2, 82-88, 2018.

### RESUMEN

*En este artículo se presenta el diseño técnico y económico de un banco de prueba solar fotovoltaico para suministro de energía eléctrica de forma aislada la cual fue motivada principalmente por la importancia que tiene el desarrollo de las energías renovables en la región Caribe colombiana, y la necesidad de implementar en la Universidad del Atlántico un programa integral para la evaluación y aprovechamiento del recurso renovable, en este caso el recurso solar. El proyecto se inicia con el análisis detallado de la información fundamental disponible en las diferentes bases de datos acerca de investigaciones afines, posteriormente se utilizaron datos de radiación solar de la zona de estudio para proceder a aplicar un método de dimensionado del sistema fotovoltaico aislado y por último, se realiza el análisis económico del sistema. Los resultados obtenidos muestran que para el diseño de un sistema de este tipo es primordial un análisis de disponibilidad solar en el lugar de la instalación con el fin de dimensionar adecuadamente todos sus componentes y que éste sea apto para funcionar de forma eficiente sufriendo la corriente adecuada para mover las cargas tenidas en cuenta en el diseño. El análisis económico indica que se deben tener en cuenta los diferentes incentivos tributarios para que estos proyectos puedan ser viables y se pueda recuperar su inversión en el menor tiempo posible.*

**Palabras claves:** Solar fotovoltaico; Sistema aislado; Radiación solar; Diseño técnico; Análisis económico.

### ABSTRACT

*A technical and economic design of a solar photo voltaic test bench for off grid electricity generation is presented in this paper. This work us based on the relevance of solar energy in the development of renewable energies technologies in Colombian Caribbean region, and the necessity to conduct and implement an overall program for evaluation and development of renewable resources leaded by Universidad del Atlántico. The project starts with a detailed analysis of available information from different data bases about similar researches, consequently, solar radiation data from the sample zone were used to apply a dimensioning method for an off grid solar photo voltaic system, allowing to conduct an economic analysis of the system. Results show that a solar energy availability analysis is primary and essential for a design of solar photo voltaic system in the assembly places in order to properly determine the physical dimensions of the devices, components, and structure so that the equipment can be considered acceptable to efficiently work in the determined place, satisfactorily supplying the necessary power with respect to the electrical energy demand calculate in the zone. the economic analysis points out that fiscal incentives have to be taken in consideration so that this type of projects might be profitable with a proper payback period.*

**Key words:** Solar photovoltaic; Isolated system; System connected to the network; Solar radiation; Economic analysis.

## 1. INTRODUCCIÓN

El clima de la tierra está en función del equilibrio o balance radiativo de la atmósfera, el cual depende a su vez de la cantidad de radiación solar que ingresa a la atmósfera y de la concentración de algunos gases variables que ejercen un efecto invernadero natural. Estos agentes de forzamiento radiativo varían tanto de forma natural como por la actividad humana, produciendo alteraciones en el clima del planeta [1]. Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE) durante el período 1973 a 2013, las emisiones de dióxido de carbono debido a la quema de combustibles fósiles se han incrementado en 16.675 millones de toneladas, provocando un efecto perjudicial en la capa de ozono [2].

En Colombia, los avances logrados en los últimos años en la generación de energía a partir de fuentes renovables ha creado el interés de muchos sectores para trabajar en este tipo de proyectos y así aprovechar los recursos energéticos con que cuenta el país, entre los que se destacan la energía eólica, biomasa y energía solar disponibles en gran manera en la Región caribe colombiana [3-7].

Actualmente, la matriz energética a nivel mundial, se basa en combustibles fósiles y el ritmo de consumo es acelerado de modo que el agotamiento de las reservas existentes es una realidad que no admite discusión [8].

Por tal razón, se están implementando estrategias para el uso de energías renovables en diferentes sectores de la economía en todo el mundo y Colombia no debe ser ajena a esto ya que aproximadamente el 70% de su matriz energética la soportan las empresas hidroeléctricas, lo que ha hecho que el país atraviese por crisis muy severas cuando se presentan eventos climáticos importantes tales como el Fenómeno de El Niño, lo cual hace imperativa la necesidad de tener sistemas complementarios para suplir la demanda.

Como respuesta a toda esta problemática la industria y la academia se han dado a la tarea de investigar y desarrollar diferentes opciones tecnológicas para dar respuesta a este nuevo desafío y que a la vez se garantice el suministro de energía a las futuras generaciones. Estas respuestas consisten en estrategias para incentivar el uso de nuevas fuentes de energía y la implementación de programas integrales de eficiencia energética. Por tanto, las energías renovables serán una de varias soluciones para muchos de los problemas ambientales, como el cambio climático, los residuos radiactivos, las lluvias ácidas y la contaminación atmosférica [9].

Una de las fuentes renovables más importante es la solar. Las radiaciones directa y difusa que llegan a la tierra pueden generar a través de la tecnología solar fotovoltaica, la energía eléctrica necesaria para poder reemplazar en buena parte otras fuentes no renovables.

La existencia de zonas con niveles de radiación solar significativos en países latinoamericanos permite considerar la implementación de sistemas de generación de energía eléctrica a partir de esta fuente renovable [10]. La energía procedente del sol y que llega a la tierra en un año es mayor a toda la energía almacenada en las reservas de combustibles fósiles en el mundo. Si se pudiese aprovechar tan solo el 0,002% de dicha radiación, se podría abastecer toda la demanda energética mundial y todavía sobraría energía [11].

En términos de regulación y normativas en lo que respecta a la generación de energía a partir de fuentes renovables, el 13 de mayo del 2014 se aprobó en Colombia la Ley 1715 la cual puso de manifiesto la importancia de la implementación de nuevas tecnologías, para aprovechar los recursos renovables, tales como el solar. La finalidad de esta ley radica en establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del uso de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable. Además, fomenta la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, así como usos energéticos como el medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético [12].

En este artículo, se propone una alternativa para aprovechar la radiación solar que incide en la zona donde se encuentra ubicada la Universidad del Atlántico, a través del diseño técnico de un banco de prueba solar fotovoltaico que funcione de forma aislada, con el fin que los estudiantes de esta universidad y otras universidades de la región adquieran capacidades en esta tecnología tan importante para el desarrollo de la región. Se seleccionó la energía solar fotovoltaica como fuente de energía renovable para la producción de energía eléctrica, entendiendo que este tipo de energía es una fuente inagotable que puede autoabastecer energéticamente a la sociedad causando un menor impacto al medioambiente.

## 2. METODOLOGÍA

A continuación se presentan las ecuaciones fundamentales empleadas para el análisis de la disponibilidad solar, para el diseño del sistema solar fotovoltaico y finalmente se muestran las ecuaciones empleadas para el análisis económico.

### 2.1 Análisis de la disponibilidad solar

Para analizar la disponibilidad solar de la zona de estudio inicialmente se calcula la radiación media diaria mensual en superficie inclinada ( $I$ ) disponible en el

lugar de instalación, en este caso la Universidad del Atlántico, teniendo en cuenta que ésta se encuentra orientada hacia el sur y que el ángulo azimutal es cero, mediante la ecuación 1 [13].

$$I = \bar{R}_c \cdot \bar{R}_g \cdot K \quad (1)$$

donde  $\bar{R}_g$  es la radiación global promedio recibida sobre un plano horizontal,  $\bar{R}_c$  es el coeficiente de conversión y  $K_a$  es el factor de corrección de limpieza atmosférica.

Para determinar las horas solares pico (HSP), se empleó la ecuación 2 la cual se presenta a continuación.

$$HSP = (I/días)/86,01 \quad (2)$$

donde  $I$  representa la radiación para una superficie inclinada.

Teniendo en cuenta que el rendimiento de los sistemas de aprovechamiento energético como los paneles solares fotovoltaicos dependen del ángulo óptimo de inclinación que se le asigne [14], se consideraron los promedios de las horas solares pico para cada ángulo, permitiendo seleccionar el mayor.

## 2.2 Diseño del sistema solar fotovoltaico

A partir del valor de radiación incidente en la zona, se realizaron una serie de cálculos para obtener los parámetros de diseño del sistema solar fotovoltaico, utilizando el método amperios-hora [15]. Para calcular el consumo en el dimensionado del banco de prueba en este proyecto, se asumió una carga total de 500 W.

La ecuación para obtener el consumo (Ah/día) es la siguiente [15]:

$$I_{DC} = \frac{V_{AC} \times I_{AC}}{V_{DC} \times \eta} = \frac{P_{AC}}{V_{DC} \times \eta} \quad (3)$$

donde  $P_{AC}$  es 500 W generados por el sistema para abastecer el consumo diario,  $V_{DC}$  es el voltaje de diseño del sistema, el cual está relacionado con la potencia que se necesita para alimentar la carga, se toma el valor de 12V, debido a que se recomienda tensiones de 12V para potencias menores de 1,5 kW y la constante  $\eta$  es el rendimiento de transformación o del inversor [15].

Para calcular la intensidad o corriente pico se emplea la ecuación 4. Este valor determina el régimen de corriente que deben soportar algunos elementos del sistema.

$$I_p = \frac{W_{AC} + W_{DC}}{V_{DC}} \quad (4)$$

donde  $I_p$  es la intensidad pico,  $W_{AC}$  es la potencia a la que opera el inversor del sistema,  $W_{DC}$  es la potencia que entra al inversor y  $V_{DC}$  es la tensión o el voltaje nominal del sistema [15].

Para la corrección del consumo se tiene en cuenta un factor que tiene en cuenta el rendimiento del cableado del sistema, este valor se toma como 0,98. En este caso el factor de rendimiento de la batería es 0,95, así como se plantea en la ecuación 5 [15].

$$I = \frac{I_{DC}}{0,98 \times 0,95} \quad (5)$$

Para el dimensionado de la batería del sistema fotovoltaico se calcula la capacidad necesaria de la batería con la ecuación 6 [15].

$$I_B = \frac{I \times N^\circ \text{ días de autonomía}}{Mpd} \quad (6)$$

donde  $I_B$  es la capacidad de la batería,  $I$  es el consumo total corregido calculado anteriormente, el número de días de autonomía hace referencia a los días en que el sistema fotovoltaico trabajaría sin exposición al sol y  $Mpd$  es la máxima profundidad de descarga, el cual es el límite de energía al cual se puede someter la batería [16].

Con el factor de corrección de temperatura la ecuación de la capacidad de la batería queda planteada como se presenta en la ecuación 7.

$$I_B = \frac{I \times N^\circ \text{ días de autonomía}}{Mpd \times \text{Corrección por Temperatura}} \quad (7)$$

Para obtener el número de baterías conectadas en serie en el sistema cociente entre el voltaje nominal de las cargas del consumo ( $V_{DC}$ ) y el voltaje nominal de la batería  $V_B$ . Se expresa con la ecuación 8 [15].

$$\text{Baterías en serie} = \frac{V_{DC}}{V_B} \quad (8)$$

El número de baterías conectadas en paralelo se calcula a través del cociente entre la capacidad necesaria de batería ( $I_B$ ) y la capacidad nominal de una sola batería ( $I_{BS}$ ) tal como se expresa en la ecuación 9 [15].

$$\text{Baterías en paralelo} = \frac{I_B}{I_{BS}} \quad (9)$$

Para el dimensionado del generador fotovoltaico (FV) en el sistema se calculó la corriente de diseño ( $C_d$ ) del generador FV mediante la ecuación 10 [15].

$$C_d = \frac{I}{HSP} \quad (10) \quad (10)$$

Donde  $C_d$  es la corriente de diseño,  $I$  es el consumo corregido en amperios-hora y  $HSP$  es el número de horas solares pico. Para obtener la corriente de diseño corregida se tiene en cuenta un factor de corrección del módulo el cual es función de la radiación.

El Número de módulos en paralelo del banco de prueba fotovoltaico se obtiene con la ecuación 11 [15].

$$M_{\text{paralelo}} = \frac{I_{Dc}^*}{I_n} \quad (11)$$

Donde  $I_{Dc}^*$  es el valor de la intensidad de diseño corregida y  $I_n$  es la intensidad nominal del módulo seleccionado de acuerdo a sus especificaciones.

El número de módulos en serie ( $M_{\text{serie}}$ ) se obtiene mediante la ecuación 12 [15].

$$M_{\text{serie}} = \frac{V_N}{V_{nm}} \quad (12)$$

donde  $V_N$  es el voltaje nominal del sistema y  $V_{nm}$  es el voltaje nominal del módulo.

En la selección del regulador de carga se utilizó la ecuación 13 para el cálculo de la corriente en corto circuito del arreglo de un sistema de 12 V [15].

$$I_{\text{Carreglo}} = 1,25 * I_{\text{CCmódulo}} * M_{\text{paralelo}} \quad (13)$$

donde 1,25 es el factor de seguridad respecto a la corriente de cortocircuito del generador o del módulo y  $I_{\text{CCmódulo}}$  es la corriente de corto circuito del módulo.

En el cableado del sistema para dimensionar un conductor se consideraron dos variables, la caída de tensión máxima y la corriente máxima. La ecuación 14 se utilizó para calcular la sección transversal de un conductor [15].

$$S_{\text{min}} = \frac{K * I * L}{\delta * \Delta U} \quad (14)$$

Donde  $I$  es la intensidad en el tramo a considerar en amperios,  $L$  es la longitud del cable en metros,  $\delta$  es la conductividad del cable que depende del material del mismo y de las condiciones de temperatura a las que estará expuesta la instalación fotovoltaica,  $K$  el coeficiente que depende del tipo de alimentación y  $\Delta U$  es la caída de tensión máxima admitida o pérdida en el tramo.

Para determinar el dimensionamiento del inversor, hay que tener en cuenta que la potencia de este dispositivo está asociado al suministro de la potencia de las cargas AC y por los picos de demanda, debido a que algunas cargas conectadas al sistema FV poseen bobinas o inductancias (motores, compresores) que durante un corto periodo de tiempo de arranque aumentan la corriente demandada entre 4 a 6 veces la corriente de

operación. Las características de funcionamiento que definen un inversor o convertidor DC/AC son: Potencia Nominal (kW), Tensión Nominal de Entrada (V), Tensión Nominal de Salida (V), Rendimiento (%) y Frecuencia de operación (Hz).

### 2.3 Análisis económico para el sistema solar fotovoltaico

El método utilizado para realizar el análisis de factibilidad o rentabilidad económica del diseño consta de cuatro pasos que se detallan a continuación:

**Paso 1:** para el cálculo de la inversión inicial, se obtuvo un presupuesto que tenía en cuenta tanto el precio real de cada uno de los equipos como los costos de instalación [17].

**Paso 2:** seguidamente se calculó la producción anual, tomando como base de datos los valores de radiación horizontal para cada mes, teniendo en cuenta un factor k mensual del ángulo óptimo de inclinación en la latitud  $11^\circ$  [17].

**Paso 3:** se determinó el flujo de caja, considerando tanto ingresos como gastos, teniendo en cuenta las variaciones o incrementos que estos valores presentaran con el paso de los años, donde los gastos están representados por la inversión inicial del sistema, mientras que los ingresos corresponden a la producción anual de energía eléctrica en el lugar de instalación [17].

**Paso 4:** para el cálculo del valor actual neto (VAN), que permite calcular la factibilidad económica a partir de un determinado flujo de caja futuro, se consideró que, si el VAN es positivo, esto es indicativo que se ha recuperado la inversión en un periodo de tiempo determinado [17].

Para el cálculo de la VAN se utilizó la ecuación 15 como se detalla a continuación.

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{(1+TI)^i} \quad (15)$$

donde  $I$  es la inversión inicial,  $Q$  el flujo de caja o beneficio calculado,  $n$  el número de años y  $TI$  es la tasa de interés para este tipo de proyectos tomando un valor de 5%.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

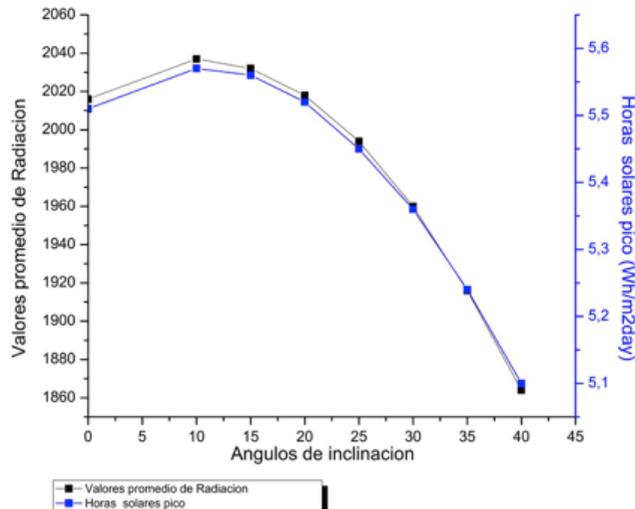
### 3.1 Análisis de la disponibilidad solar

Para calcular los valores de radiación global promedio para una superficie inclinada, se empleó la ecuación 1, donde se tuvo en cuenta que el factor de corrección atmosférico (para una atmósfera limpia) es 1,05. Los datos de radiación se observan en la figura 1, donde se representan los valores promedio de radiación a dife-

rentes ángulos de inclinación; en esta gráfica se observa que en el intervalo entre 10°-15° se encuentran los mayores valores de radiación.

Se calcula el valor de las horas solares pico aplicando la ecuación 2 donde de  $I$  son los valores de radiación tomados de la figura 1. Se observa también los valores promedio de las horas solares pico y su comportamiento a diferentes ángulos de inclinación.

Figura 1. Radiación y horas solares pico a diferentes ángulos de inclinación.  
Figure 1. Radiation at different angles of inclination and peak solar hours at different angles of inclination.



### 3.2 Determinación del ángulo óptimo de inclinación

Se observa en la figura 1 que en el intervalo de 10 y 15 grados de inclinación para la latitud 11° se encuentra el mejor valor para la radiación. Por esta razón, se selecciona para la instalación un ángulo de inclinación de 10°.

### 3.3 Diseño y dimensionado de sistemas fotovoltaicos de 12 y 24V

Utilizando el conjunto de ecuaciones relacionadas en el apartado metodológico y teniendo en cuenta los parámetros de diseño se obtienen los resultados para el dimensionado y selección de los componentes del banco de prueba solar fotovoltaico con una tensión del sistema de 12 y 24V. En la tabla 1 se muestran los valores obtenidos para el consumo de los sistemas en Ah/día, la intensidad o corriente pico y el consumo corregido.

Tabla 1. Valores del dimensionado de la batería para el banco de prueba solar fotovoltaico a 12 y 24 V.  
Table 1. Values of the measuring of the battery for the photovoltaic bank of solar test to 12 and 24 V.

	Intensidad y consumos	
	24V	12V
Consumo en Ah/Día	66,14	132,48
Intensidad pico (A)	20,83	41,66
Consumo corregido en Ah/día	71,04	142,08

Para el dimensionado y selección de la batería es fundamental el valor de capacidad en Ah y el N° de baterías en serie y paralelo del sistema, como se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Valores del dimensionado de la batería para el banco de prueba solar fotovoltaico a 12 y 24 V.  
Table 2. Values of the measuring of the battery for the photovoltaic bank of solar test to 12 and 24 V.

	Dimensionado de batería	
	24V	12V
Capacidad de la batería en Ah	101,48	202,97
Baterías en serie	2	1
Baterías en paralelo	1	2

La batería seleccionada para el diseño del banco de prueba solar fotovoltaico a 12 y 24 V es una Green Solar Solutions de material de Polipropileno (país Colombia), la capacidad de la batería es de 160 Ah, con una dimensión de 26x181x281 mm, un peso de 28 kg y el tipo de batería es de plomo-ácido.

En el dimensionado del generador fotovoltaico se deben tener en cuenta el ángulo óptimo de inclinación obtenido en el análisis de la disponibilidad solar, la corriente de diseño corregida y el número de módulos en serie o en paralelo. Estos valores se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores del dimensionado del generador fotovoltaico para el banco de prueba a 12 y 24 V.  
Table 3. Values of the dimensioning of the photovoltaic generator for the test bench to 12 and 24 V.

País	Canadá
Marca	Canadian Solar
Modelo Seleccionado	CS6C-140P
Potencia	140W
Dimensiones en mm	1485 x 666 x 40
Peso en kg	12
Tensión a la máxima potencia	17,9V
Corriente a la máxima potencia	7,84 A
Tensión de circuito abierto	22,1V
Corriente de corto circuito	8,40 A
Tolerancia mínima de potencia	3%

En el diseño del sistema solar fotovoltaico a 12 y 24 V se seleccionó el generador o módulo fotovoltaico Canadian Solar modelo CS6C-140P, con una potencia de 140 W, una dimensión de 1485x666x40 mm, peso de 12 kg, una tensión a la máxima potencia de 17,9V, una corriente a la máxima potencia de 7,84 A corriente de corto circuito 8,40 A, una tolerancia mínima de potencia de 3% y una tensión de circuito abierto de 22,1V. Para los sistemas de 12V y 24V se seleccionó un inversor con tecnología PWM y sus características se muestran a continuación en la tabla 4.

**Tabla 4.** Características del inversor seleccionado para el sistema a 12 y 24 V.  
**Table 4.** Characteristics of the inverter selected for the system at 12 and 24 V.

	Potencia Nominal (kW)	Tensión nominal de entrada	Tensión nominal de Salida	Frecuencia de operación	Rendimiento
24V	3	24V	220V	50Hz ± 0,3 Hz	90%
12V	3	12V	110V	50Hz ± 0,3 Hz	90%

En el dimensionado del regulador de carga se obtuvo que la corriente del arreglo es de 21 A, por lo tanto, el controlador con las especificaciones requeridas para el sistema a 24 V es de 30 A, mientras que para el sistema de 12V se obtuvo que la corriente del arreglo es de 42 A, por lo tanto, el controlador con las especificaciones requeridas para el sistema es de 60 A. La tabla 5 muestra las características de los reguladores seleccionados.

**Tabla 5.** Características del regulador seleccionado para el sistema a 12 y 24 V.

**Table 5.** Characteristics of the controller selected for the system at 12 and 24 V.

	Modelo	Tecnología	Eficiencia	Intensidad	Tensión del sistema
24V	Tracer-3215RN	MPPT	96%	30 A	24 V
12V	CN60240	PWM	96%	60 A	12 V

Los requerimientos de cableado de ambos sistemas se resumen en la tabla 6, donde se muestran las secciones transversales y los calibres para cada tramo del sistema fotovoltaico.

**Tabla 6.** Requerimientos de cableado para el sistema de 12 y 24V.  
**Table 6.** Wiring requirements for the 12 and 24v system.

TRAMO	Generador	Caja de conexión	Regulador	Regulador	Inversor-	Tablero de
	de caja de conexión	Regulador	/batería	/Inversor	Tablero de	distribución
Sección transversal (mm <sup>2</sup> )	24V	3,8	1,52	5,10	6,78	0,07
(AWG)		12	14	10	8	22
Sección transversal (mm <sup>2</sup> )	12V	3,8	6,08	20,42	27,08	0,29
(AWG)		12	8	4	2	22

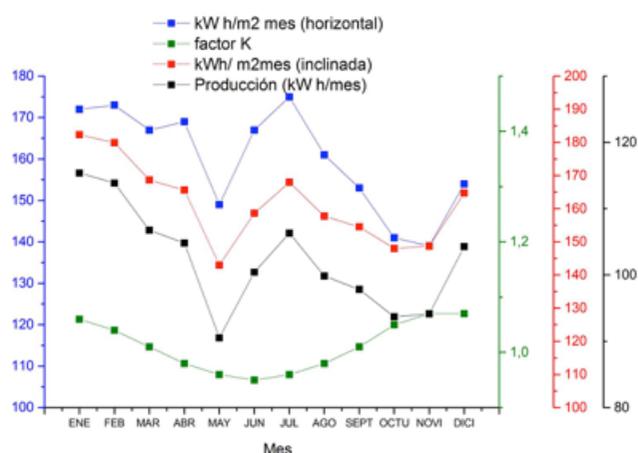
### 3.4 Análisis económico para el sistema fotovoltaico autónomo

Para el análisis de factibilidad o rentabilidad económica para el banco de prueba fotovoltaico aislado a 12 V y 24 V, se desarrollaron dos etapas, inicialmente se realizó el cálculo de la inversión inicial sumando el precio real de cada uno de los equipos seleccionados para el sistema incluyendo los costos de instalación, el cual es un 10% del valor total en equipos. La inversión inicial del sistema con tensión de 12 V fue de \$5.016.000, mientras que para el sistema de 24 V fue de \$6.413.000. Seguidamente, se

calculó la producción anual, obteniendo que el número de paneles utilizados en el sistema a 12 y 24 V fue de 4 con un área de 0,98901m<sup>2</sup>, un largo de 1,485m, un ancho 0,666m y un rendimiento de 0,16.

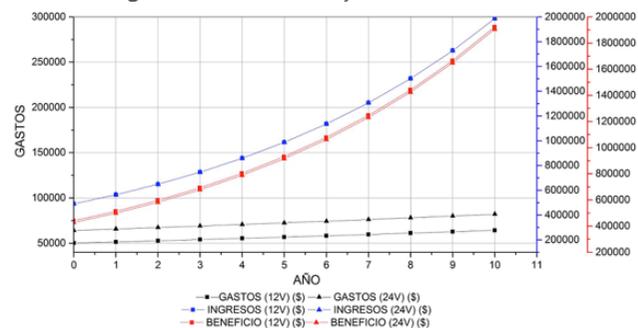
En este paso se toma en la base de datos los valores de radiación horizontal para cada mes, teniendo en cuenta un factor de corrección (k) mensual del ángulo óptimo de inclinación en la latitud 11. Los valores de radiación obtenidos en kWh/m<sup>2</sup>mes se multiplican por las características del módulo fotovoltaico para obtener la producción en kWh/mes. Por último, se suman los valores de producción mensual para obtener la producción anual. Se calcula la producción anual en kWh/mes durante un año. De la figura 2 se obtiene que en un año se producen 1228,012 kWh.

**Figura 2.** Producción anual del sistema.  
**Figure 2.** Annual production of the system.



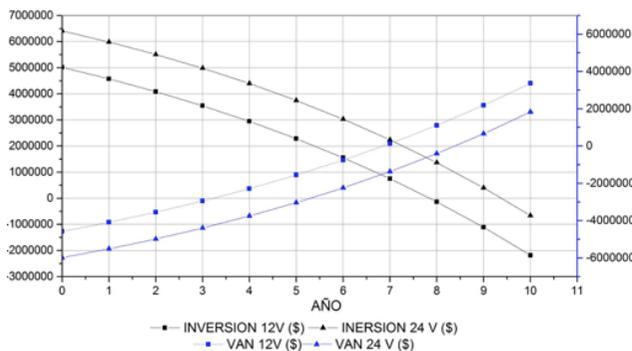
El flujo de caja está representado por los ingresos menos los gastos anuales, con lo cual se obtiene el beneficio para cada sistema, como se pueden observar en la figura 3 para el sistema en 12 y 24V. Los gastos corresponden al 1% de la inversión inicial del sistema, y este valor incrementa anualmente un 2,5%, donde el precio de la energía eléctrica en el lugar de instalación aumenta aproximadamente el 2% anual. Con base a esta variación se calculan los ingresos teniendo en cuenta que el precio del kWh para el año 0 es de \$400, se realizó la proyección durante 10 años para ambos sistemas.

**Figura 3.** Flujo de caja para el sistema a 12 V y 24 V.  
**Figure 3.** Cash flow for the system at 12 V and 24 v.



Para el cálculo de factibilidad económica se debe obtener el valor actual neto para cada año, el cual permitió calcular el valor presente de un determinado flujo de caja futuro, es decir, actúa junto con la TIR (Tasa Interna de Retorno) como indicador del nivel de rentabilidad de un proyecto, por lo que si al final de la vida de la instalación, el VAN es positivo, quiere decir que se ha recuperado la inversión. Se observan los valores calculados en la figura 4 para el sistema de 12 y 24 V, donde se puede observar que a partir del año 7 en el sistema de 12 V el valor del VAN es positivo, es decir que se recupera la inversión inicial a partir de ese momento. En la figura 4 se muestra que a partir del año 9 en el sistema de 24 V el valor del VAN es positivo, es decir que se recupera la inversión inicial a partir de ese momento.

Figura 4. Valor actual neto para el sistema a 12 V y 24 V, evolución del VAN sistema de 12V y 24 V.  
 Figure 4. Net present value for the system to 12 V and 24 V, evolution of the VAN system of 12V and 24 V.



#### 4. CONCLUSIONES

Mediante este estudio experimental fue posible determinar que la zona de estudio que el mayor número de horas solares pico fueron 5,56 y 5,57 para los ángulos de inclinación de 15° y 10° respectivamente, por lo que se seleccionó una inclinación óptima de 10° para realizar el diseño del sistema solar fotovoltaico aislado. En cuanto a los componentes del sistema, se seleccionó una batería con capacidad de 160 Ah, utilizando dos de ellas en serie de 12 V cada una para el sistema de 24V. Para el sistema autónomo con tensión de 12 V se utilizaron 4 paneles en paralelo, mientras que para el sistema de 24V se ubican 2 paneles en serie y 2 paneles en paralelo. Por otro lado, para el sistema autónomo de 12 V se seleccionó un regulador de 60 A, mientras que para el sistema de 24 V se seleccionó un regulador de 30 A.

De la evaluación económica se concluyó que la recuperación de la inversión cuando el sistema está a 12 V se obtiene a partir de los 7 años, mientras que para el sistema a 24 V la inversión se recupera a partir de los 9 años.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de una manera especial al Grupo de Investigación en Gestión Eficiente de la Energía, Kaí y la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universi-

dad del Atlántico por el apoyo recibido para el desarrollo de este proyecto.

#### REFERENCIAS

- [1] H. O. Benavides Ballesteros, G. E. León Aristizabal, *Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático*, Colombia: Ed. Ideam, 2007, pp. 1–102.
- [2] L. Watson *et al.*, "Impact of emissions and +2 °C climate change upon future ozone and nitrogen dioxide over Europe" *Atmospheric Environment*, 142, 271–285, 2016.
- [3] A. Allouhi *et al.*, "Design optimization of a multi-temperature solar thermal heating system for an industrial process", *Applied Energy*, 206, 382–392, 2017.
- [4] G. Valencia, M. Vanegas, *Atlas eólico de la Región Caribe Colombiana*, Colombia: 1st ed. Sello Editorial de la Universidad del Atlántico, 2016.
- [5] G. Valencia, M. Vanegas, *Atlas Solar de la Región Caribe Colombiana*, Colombia: 1st ed. Sello Editorial de la Universidad del Atlántico, 2016.
- [6] M. R. Martínez, C. Ballestero, G. Valencia, M. Vanegas, *Estudio de la Persistencia del Viento en la Región Caribe Colombiana con Énfasis en la Guajira*, Colombia: 1st ed. Sello Editorial de la Universidad del Atlántico, 2016.
- [7] G. Valencia, E. Villicaña. *Disponibilidad Geográfica y Temporal de la Energía Solar en la Costa Caribe Colombiana*, Colombia: 1st ed. Sello Editorial de la Universidad del Atlántico, 2016.
- [8] G. Valencia, M. Polo, *Análisis Estadístico de Velocidad y Dirección del Viento en la Región Caribe Colombiana con Énfasis en la Guajira*, Colombia: 1st ed. Sello Editorial de la Universidad del Atlántico, 2016.
- [9] J. Aguila, A. Gómez, R. de Torres. *Riesgos del sistema energético actual - Una estrategia solar para Jaén* [Online]. Universidad de Jaén. Disponible: [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/08\\_lecciones/01\\_leccion/www/riesgos\\_del\\_sistema\\_energetico\\_a.htm](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/08_lecciones/01_leccion/www/riesgos_del_sistema_energetico_a.htm).
- [10] J. Santamarta. (2010), *Las energías renovables son el futuro* [Online]. Disponible: <http://www.nacionmulticultural.unam.mx/mezinal/docs/511.pdf>.
- [11] J. Schallenberg, G. Piermavieja, C. Hernandez, P. Unamunzaga, R. García, M. Díaz, D. Cabrera, G. Martel, J. Pardilla, V. Subiela, "Bloque 2. Energías Renovables", en libro de *energías renovables y eficiencia energética*, Instituto Tecnológico de Canarias S.A., p. 49-59.
- [12] Congreso de la Republica y Ministerio de Minas y Energía. (2014) Ley 1715 del 13 de mayo del 2014. [Online]. Disponible: <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/893-nueva-ley-1715-de-2014-promueve-el-aprovechamiento-de-las-fuentes-no-convencionales-de-energia->.
- [13] J. Page. The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N–40°S, UN Conference on New Energy Sources, paper no. 598, 4, pp. 378–390. Ed. 1961.
- [14] Grossi Gallegos H. *Ángulo óptimo para planos colectores de energía solar integrados a edificios*, Argentina: Universidad Nacional de Luján, Argentina. Ed. 2012.
- [15] A. Abella, M. Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas (CIEMAT). Dimensionado de sistemas fotovoltaicos Anexo 1: Otros métodos de dimensionado fotovoltaico. España.
- [16] E. Harper, *El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos*, México: Editorial LIMUSA. Ed. 2011.
- [17] N. Noyón. *Huerta fotovoltaica de 1,2 mw, con seguimiento solar y conexión a red, en Sevilla*. España: Universidad de Oviedo, Departamento de energía. Ed. 2008.