

Propuesta de instalación de sistema fotovoltaico en la Empresa de Productos Lácteos Villa Clara, UEB pasteurizadora Sagua la Grande

Proposal for the installation of a photovoltaic system at the Empresa de Productos Lácteos Villa Clara, UEB pasteurizadora Sagua la Grande

Alejandro Yamil Álvarez-García¹ <https://orcid.org/0009-0009-7384-7695>

¹Empresa de Productos Lácteos Villa Clara (EPLVC), Santa Clara, Cuba

*Autor para la correspondencia: aleyamil459@gmail.com

RESUMEN

En el presente trabajo se evalúa la implementación de paneles solares en la Empresa de Productos Lácteos Villa Clara, UEB Sagua la Grande. Se realizaron mediciones de las estructuras y se eligieron las orientaciones óptimas para mejorar el rendimiento. Se utilizó el software gratuito de la comisión europea PVGIS, para facilitar el estudio del recurso solar y el potencial fotovoltaico. Se trata de una herramienta muy útil para hacer estudios de viabilidad de sistemas fotovoltaicos. Con el análisis de rendimiento, se pronostica una generación anual de 648,5 MWh. Este enfoque no solo es energéticamente eficiente, sino ambientalmente significativo, ya que evitará la emisión de 9453 toneladas de CO₂, 53 toneladas de SO₂ y 18 toneladas de NO₂ a la atmósfera. Además, se destaca que el proyecto contribuirá al ahorro de 2882 toneladas de combustible al país. Estos resultados subrayan la importancia y el potencial de las energías renovables, no solo para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, sino también para mitigar el cambio climático al reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero.

Palabras clave: ahorro energético; energía renovable; energía solar fotovoltaica.



ABSTRACT

In this work, the implementation of solar panels in the Villa Clara Dairy Products Company, UEB Sagua la Grande, is evaluated. Measurements of the structures were made and optimal orientations were chosen to improve performance. The free software of the European commission PVGIS was used to facilitate the study of the solar resource and photovoltaic potential. It is a very useful tool for carrying out feasibility studies of photovoltaic systems. With the performance analysis, an annual generation of 648.5 MWh is forecast. This approach is not only energy efficient, but environmentally significant, as it will avoid the emission of 9,453 tons of CO₂, 53 tons of SO₂ and 18 tons of NO₂ into the atmosphere. In addition, it is highlighted that the project will contribute to saving the country 2,882 tons of fuel. These results underline the importance and potential of renewable energy, not only to reduce dependence on fossil fuels, but also to mitigate climate change by reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: energy saving; photovoltaic solar energy; renewable energy.

Recibido: 20/08/2023

Aceptado: 15/12/2023

Introducción

La UEB Pasteurizadora de Sagua es la industria más productiva de la Empresa de Productos Lácteos de Villa Clara, debido a la situación energética que vive el país, frecuentemente se ve obligada a limitar sus operaciones por problemas de electricidad, afectando su economía al retardar los procesos productivos y por consecuencia a los consumidores. Por sus características climáticas, se considera un lugar favorable para la implementación de sistemas fotovoltaicos y pueden aprovecharse todas las zonas techadas. Entre los beneficios de esta inversión para la empresa se incluye:

- Reducción de los costos energéticos.
- Independencia energética.
- Mejor imagen corporativa por el uso de energías limpias.

En la actual era del conocimiento y de la aplicación de las tecnologías de la información, es difícil imaginar cuántas de las actividades del día a día se pueden realizar sin el uso de la energía.⁽¹⁾ En el planeta, las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) continúan aumentando lentamente, sobre todo, las debidas a la producción de energía (combustibles fósiles) y a los procesos industriales.⁽²⁾ Los sectores agrícola y agroindustrial son responsables de alrededor del 12 % de las emisiones de gases de efecto invernadero, relacionadas principalmente con las fermentaciones entéricas, generadoras de metano, y la producción de estiércol.⁽³⁾ Estos sectores tuvieron un crecimiento de 1, 4 % en sus emisiones desde 2016, ligado a un crecimiento económico mundial del 3, 7 %, un crecimiento en la demanda energética del 2, 1%, con precios bajos en los combustibles fósiles.⁽⁴⁾ Los mayores países contaminantes coinciden con las mayores potencias económicas, como carácter positivo, a lo largo de los últimos 20 años han desarrollado iniciativas destinadas a cambiar la dependencia energética, habiendo realizado numerosas inversiones en el campo de las fuentes renovables de energía.⁽⁵⁾

Ha existido un crecimiento de las Energías Renovables en el sector de la energía a nivel mundial siendo la Unión Europea la que tiene mayor participación en la energía eólica y la fotovoltaica, representando el 86 % de la capacidad de generación de energía.^(6, 7)

La promoción de la eficiencia energética en todos los sectores de la economía nacional es una de las prioridades del proceso actual de reestructuración de la economía cubana. Hasta el año 2021 se han construido 72 parques con una potencia instalada total de 226 MW, que actualmente representa alrededor del 35 % de los 700 MW que inicialmente se planificaron para 2030.⁽⁶⁾ En una proyección más reciente se espera superar los 2000 MW.⁽⁸⁾

Este proyecto se enfoca en el diseño y evaluación de una instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica. Esta suministrará electricidad a la Empresa de Productos Lácteos UEB Sagua la Grande, además convertiría a la empresa en un prosumidor (un usuario que consume y entrega electricidad a la red eléctrica). Para la instalación se considerará la superficie techada del bloque energético, edificio del helado, edificio administrativo y los almacenes.

Materiales y métodos

Metodología de desarrollo del proyecto:

1. Definir las características del área techada (dimensiones, orientación, e inclinación de la cubierta).
2. Calcular subarreglos del Sistema Fotovoltaico (SFV).
3. Utilizar PVGIS para evaluar el desempeño del sistema.
4. Evaluar el desempeño medio ambiental y económico para el país del sistema.

En este caso, se propone el desarrollo de un sistema fotovoltaico conectado a la red.

UEB Pasteurizadora de Sagua la Grande

La Industria se encuentra ubicada en la carretera circuito norte del municipio Sagua la Grande. El área techada está dividida en 6 áreas donde se instalará el sistema solar fotovoltaico. Se considerarán para el montaje de paneles las 2 secciones de cada superficie, puesto que utilizaremos un sistema a dos aguas en toda la industria. Se considerará como área disponible el área total menos la utilizada como espacio entre paneles y la correspondiente a pasillos necesarios para el acceso a los mismos en caso de reparación, inspección o mantenimiento, en la tabla 1 se muestra la superficie techada en la UEB Sagua la Grande.

Tabla 1- Área de superficie techada UEB Sagua la Grande

Superficie Techada de la UEB Sagua la Grande	
Local	Area (m ²)
Bloque Energético	842,4
Helado	106,2
Administración	522
Almacenes	861,24
Total	2331,84

Consumo de Energía de la Industria

La UEB Lácteo de Sagua se encuentra conectado a la red eléctrica nacional a través de un banco de 3 transformadores de 167 KVA, conectados en estrella-delta, el cual alimenta a 240 V trifásico, todo el edificio. Cuentan con un grupo diésel de respaldo, que tiene capacidad para toda la industria. El consumo de electricidad de la industria en el año 2022 fue de 612 MWh, consumiendo un promedio de 51 MWh mensuales, variando entre 33 MWh/mes y 72 MWh/mes durante el año, los resultados se muestran en la figura 1.

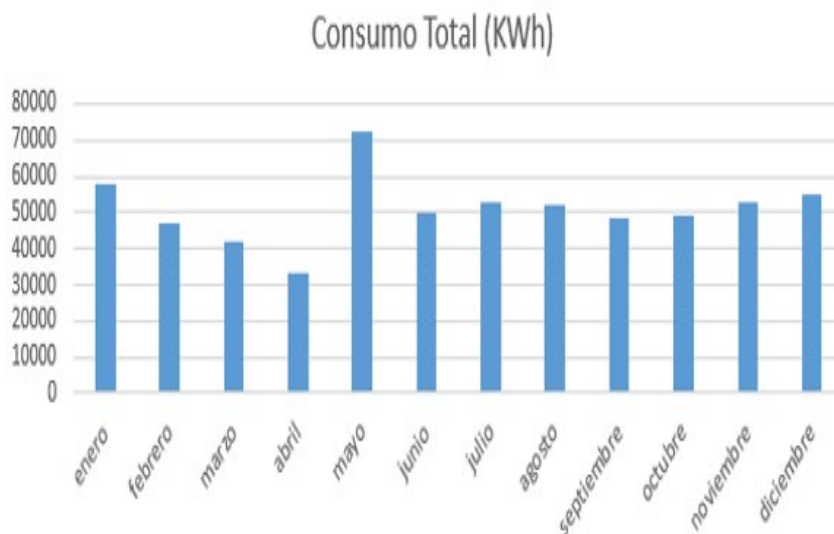


Fig. 1- Consumo anual del año 2022 de la UEB Sagua la Grande

Paneles Fotovoltaicos

El módulo fotovoltaico utilizado para el estudio es MAX6-475-AC. Este módulo de fabricante SunPower, está compuesto por 72 celdas solares de silicio monocristalino de tipo Maxeon Gen 6. En la tabla 2 se muestran las principales características de los módulos MAX6-475-AC de SunPower.

Tabla 2- Características de los módulos MAX6-475-AC de SunPower

Características	Valor	Unidad
Largo	2047	mm
Ancho	1039	mm
Alto	35	mm
Potencia nominal	475	Wp
Corriente de cortocircuito	11,57	A
Corriente mpp	10,82	A
Tensión circuito abierto	52,6	V
Tensión mpp	43,9	V
Topereción	-40 a +85	°C

Potencia Fotovoltaica

Según algunos autores,⁽⁹⁾ La capacidad de generación fotovoltaica en la superficie techada depende de los siguientes ítems:

1. La distancia entre los módulos y el borde del techo debe ser de un mínimo de 3 veces la distancia vertical que hay entre la superficie del módulo y el techo. En este caso se considera 1 m.
2. La distancia mínima de expansión entre paneles será entre 6 mm y 10 mm.

El número de paneles que puedo instalar en cada local es necesario conocer las dimensiones netas por la ecuación (1) :⁽⁹⁾

$$A_{neta} = L_{neta} * W_{neta} \quad (1)$$

donde:

L_{neta} : largo.

W_{neta} : ancho.

El área de los paneles se calcula por la ecuación (2).⁽⁹⁾

$$A_{\text{paneles}} = L_{\text{paneles}} * W_{\text{paneles}} \quad (2)$$

donde:

L_{paneles} : largo de los paneles.

W_{paneles} : ancho de los paneles.

Adicionamos 0,1 m al largo y ancho de los paneles, para que así esté incluida la separación entre paneles:

Conocidas las dimensiones de los paneles solares, calculamos el número de paneles en la fila por la ecuación (3): ⁽¹⁰⁾

$$N_{\text{paneles por fila}} = \frac{W_{\text{panel}}}{W_{\text{neto}}} \quad (3)$$

Finalmente, el número de paneles será calculado por la ecuación (4):⁽⁹⁾

$$N_{\text{paneles}} = \frac{A_{\text{neto}}}{A_{\text{paneles}}} \quad (4)$$

Selección de los inversores

Hay que tener en cuenta que la potencia nominal del inversor es la potencia de salida. La potencia de entrada correspondiente del inversor es calculada por la ecuación (5):⁽⁹⁾

$$P_{\text{nomDC}} = \frac{P_{\text{nomAC}}}{\eta} \quad (5)$$

En general, los fabricantes exigen que la potencia del inversor esté en el rango de 1 a 1,1 la potencia del arreglo de paneles, el factor de dimensionado del inversor, se rige por la siguiente ecuación (6):⁽¹¹⁾

$$\text{Factor Dimensionado Inversor} = \frac{P_{fv}}{P_{inv}} \quad (6)$$

donde:

P_{fv} : Potencia del circuito.

P_{inv} : Potencia del inversor.

Si es superior al 90% se considera bien dimensionado.

El número máximo de paneles en serie se calcula en función del límite de temperatura mínima. Por lo que la tensión de circuito abierto del arreglo debe ser menor que la tensión máxima de entrada del inversor. Se calcula por la ecuación (7).⁽⁹⁾

$$N_{max-serie} = \frac{V_{mpp\ max-inv}}{V_{oc}} \quad (7)$$

Siendo:

$V_{mpp\ max-inv}$: Tensión del punto de máxima potencia del inversor.

V_{oc} : Tensión de circuito abierto del módulo fotovoltaico.

El número mínimo de paneles en serie se calcula de manera que la tensión en la cadena, a máxima temperatura no caiga por debajo de la tensión MPP mínimo del inversor, ecuación (8).⁽⁹⁾

$$N_{min-serie} = \frac{V_{mpp\ min-inv}}{V_{oc}} \quad (8)$$

El número de paneles debe ser:

$$N_{min} - serie < N_{circuito} < N_{max} - serie$$

donde

$N_{circuito}$ representa el número de paneles por circuito en serie.

Debe calcularse cuantos circuitos pueden conectarse a un inversor ($Q_{circuito}$), asegurando que la corriente máxima del circuito fotovoltaico no exceda la corriente máxima de entrada del inversor, ecuación (9):⁽⁹⁾

$$Q_{circuito} = \frac{I_{max(inv)}}{I_{circuito}} \quad (9)$$

donde

$I_{max.inv}$ es la corriente DC máxima de entrada del inversor y la corriente DC máxima del circuito.

Finalmente, debe definirse el número total de inversores por sección, ecuación (10):

$$V_{seccion} = \frac{N_{circuito}}{Q_{circuito}} \quad (10)$$

La generación del sistema no es 100% eficiente y el ángulo de inclinación será de 10° y azimut 0°. Para el cálculo del rendimiento energético de la instalación, eficiencia en condiciones de trabajo (PR) se toma en cuenta la ecuación (11):⁽¹²⁾

$$PR = \eta_{pmp} * \eta_{inv} * \eta_g \quad (11)$$

donde:

- η_{pmp} : eficiencia del punto de máxima potencia del arreglo por trabajar fuera de las STC (1000 W/m², 25°C).

- η_{inv} : eficiencia de inversor.
- η_g : Eficiencia general del sistema, pérdidas asociadas a: caídas de tensiones, dispersión de parámetros entre módulos, dispersión angular espectral, etcétera.

Para el cálculo del factor que considera las pérdidas medias mensuales debidas a la temperatura, η_{pmp} , se hace uso de la siguiente ecuación (12):⁽¹³⁾

$$\eta_{pmp} = \left(1 - \mu_p \left(T_{amb} - 25 + \left(\frac{T_{onc} - 20}{800}\right) * S\right)\right) \quad (12)$$

donde:

- μ_p : coeficiente de reducción de potencia del módulo con la temperatura, en 1/ °C.
- S: irradiación media en un día soleado, varía según el mes.
- T_{amb} : temperatura ambiente.
- T_{onc} : temperatura de operación nominal de la célula.

Se utilizará la siguiente ecuación (13) para el cálculo de la energía.⁽¹²⁾

$$E_p = G_{dm}(\alpha, \beta) * P_{mp} * PR \text{ (KWh/día)} \quad (13)$$

donde:

- $G_{dm}(\alpha, \beta)$: Irradiación en función de la orientación de los paneles.
- P_{mp} : Potencia Pico del campo fotovoltaico.
- PR: Rendimiento energético de la instalación.

Impacto medio ambiental

En una termoeléctrica convencional por cada 1 kW/h que se generan, se emite a la atmósfera 820 gramos de dióxido de carbono, 4,6 g de dióxido de azufre y 1,6 g de dióxido de nitrógeno.⁽²⁾

Para el cálculo estimado de la cantidad de gases de efecto invernadero dejado de emitir a la atmosfera se tiene la formula (14):

$$Emisiones = KWh * C \quad (14)$$

donde:

Emisión: cantidad de gas que se emite a la atmósfera (g).

kWh: energía generada/ anual.

C: peso del gas emitido por kWh generado (g/kWh).

Impacto económico al país

El costo del kWh fósil depende del costo del combustible y de la cantidad de gramos de combustibles necesarios para generar 1 kWh. Se considera un índice consumo de combustible medio de 250 g/kWh. La energía eléctrica generada antes de llegar al consumidor final por los distintos sectores se consume por pérdidas en la distribución y transmisión, así como por insumos de las propias plantas termoeléctricas. En este caso se supone una pérdida media del 21% de la energía consumida por estos conceptos, siendo un valor para este índice bastante conservador con respecto a la operación real de los generadores existentes.⁽²⁾

El cálculo del combustible dejado de quemar por concepto de la energía generada de la planta fotovoltaica se realiza por la ecuación (15).⁽¹⁴⁾

$$Cdq = Gp * CEN \quad (15)$$

donde:

GP: Generación del SFV (kWh/año).

CEN: Consumo Específico Neto de Sistema Eléctrico Nacional se estima 0,25 g/kWh.

Cdq: Combustible dejado de quemar.

Los ahorros se determinan partiendo de la ecuación (16):

$$Ahorro = \frac{Cdq}{1-p} * P \tag{16}$$

donde:

- p: Pérdidas en transmisión y distribución.
- P: Precio promedio del combustible del Sistema Eléctrico Nacional.

Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados del diseño y simulación de la instalación fotovoltaica.

Diseño de la instalación

Para el diseño de la instalación se seleccionó el inversor trifásico de la marca SMA. En la tabla 3 se muestra las características de los inversores SMA Tripower TL

Tabla 3- Características de los Inversores SMA Tripower 15000 y 25000 TL

Datos de Inversores SMA			
	Tipo de Inversor	Tripower 15000	Tripower 25000
CD	Vdc max	1000 V	1000 V
	Vdc MPP	240-800 V	390-800 V
	Idc max	33 A	33 A
	Isc PV	43 A	43 A
CA	Pac	20000 W	20000 W
	Smax	15000 VA	25000 VA
	Fac	50/60 Hz	50/60 Hz
	Iac max	21,7 A	36,2 A
	Cos(ø)	1	1

En la tabla 4, se muestra el diseño del sistema fotovoltaico de la UEB Sagua la Grande.

Tabla 4- Características de diseño del sistema fotovoltaico de la UEB Sagua la Grande

Lugar	Número de Módulos	Potencia Instalada (KWp)	Número de Inversores
Bloque Energético	308	146,3	6
Administración	180	85,5	3
Edificio del Helado	28	13,3	1
Edificio 1 de Almacenes	60	28,5	1
Edificio 2 de Almacenes	120	57	2
Edificio 3 de Almacenes	88	41,8	2
Total	784	372,4	15

Generación del sistema

Utilizando el software PVGIS se tomaron datos de la radiación y la temperatura de los todos los meses, donde el valor promedio de radiación es de 5 kWh/m², siendo enero el valor más bajo con 4,7 kWh/m², marzo con el más alto con 6.7 kWh/m², con una radiación anual de más de 2000 kWh/m². En cuanto a temperatura el mayor valor fue en agosto con 28, 5°C y el menor valor fue en febrero con 22°C, y la temperatura promedio fue de 25, 86°C.

En la figura 2 se muestra la generación de energía en su primer año, utilizando la ecuación (13) y los datos del software PVGIS.

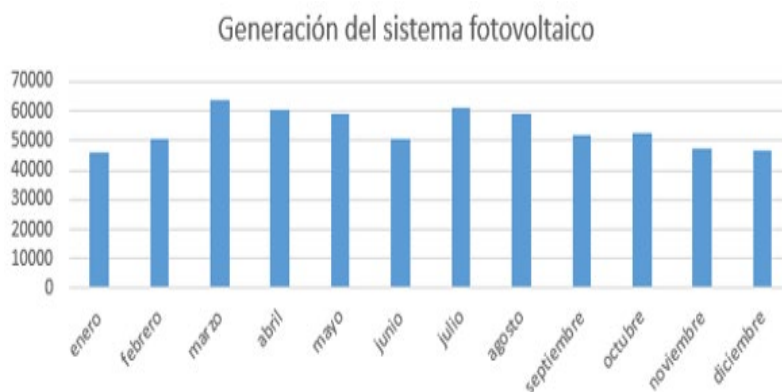


Fig. 2- Generación del sistema fotovoltaico en su primer año

En el primer año el sistema fotovoltaico generó 648,5 MWh, donde la generación oscila entre 45,6 MWh y 63,6 MWh, para un promedio de 54 MWh.

Los resultados se basan en una eficiencia del panel del 22,3%. La figura 3 compara el consumo de la industria y la generación de electricidad calculada.

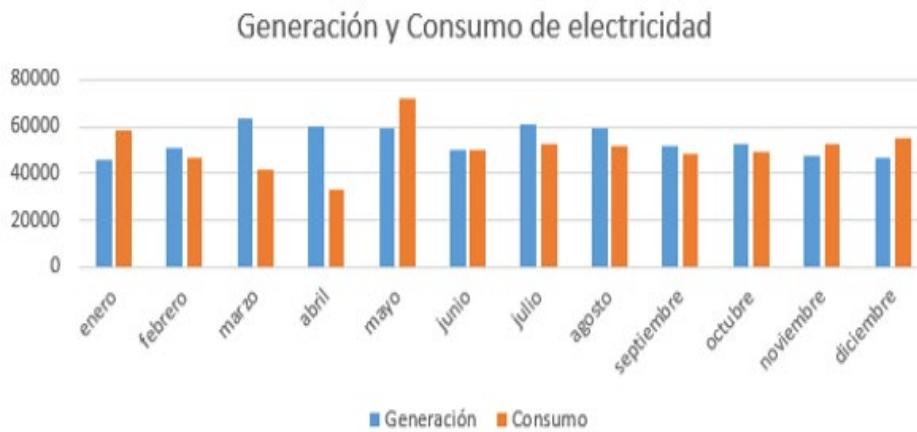


Fig. 3- Comparación entre consumo de la industria y generación del sistema fotovoltaico

En la mitad de los meses del año la generación logra superar el consumo, incluso género más en el año de lo que consumió. El consumo de energía de la industria es elevado, ya que tienen sistemas de refrigeración que trabaja las 24 h. La generación del sistema fotovoltaico se concentra en las horas del día, puesto que el sistema va a entregar un excedente cuando termine de suplir la carga.

Impacto ambiental y ahorro al país

Como el sistema es capaz de generar 648,5 MWh en su primer año, es una energía que el país no va a tener que generar en las plantas convencionales, en el primer año se deja de emitir de acuerdo con la ecuación (14), 531 t de CO₂, 2,9 t de SO₂ y 1 t de NO₂, Además, el país puede ahorrar en el orden de las 162 t de combustible fósil según la ecuación (15), que puede utilizar en otros servicios prioritarios como la generación distribuida o el transporte, en relación al costo evitado por generación fósil rondan los 170000 USD utilizando

la ecuación (16). A medida que pasan los años, este valor se incrementa, hasta llegar a suplir el costo de la inversión.

Conclusiones

1. La utilización del sistema fotovoltaico reduce el combustible utilizado para operar el grupo electrógeno, puesto que el sistema puede sincronizar con este, lo que aumenta la fiabilidad en la operación del servicio eléctrico si es interrumpido.
2. Reducción del consumo de electricidad, donde en el primer año puede generar hasta 648,5 MWh
3. Su implementación es una medida amigable con el medioambiente, reduce la demanda de electricidad en el país, que depende fundamentalmente de los combustibles fósiles.
4. Al final de su vida útil se habrá ahorrado en el orden de 3 465 712 de dólares y 2882 t de combustibles.
5. Se estimó que se dejará de emitir alrededor de 9 453 toneladas de CO₂, 53 toneladas de SO₂ y 8 toneladas de NO₂.

Referencias bibliográficas

1. ALGARÍN, C. R., GIRALDO, J.T., CASTRO, A.O. Procedimiento para la Selección de Criterios en la Planificación Energética de Zonas Rurales Colombianas. *Información Tecnológica*, **29**, 2018. ISSN 0718-0764
2. RODRÍGUEZ, D., "Nuevas condiciones para el emplazamiento de los sistemas solares fotovoltaicos en cubiertas del hotel Pasacaballos Cienfuegos," Tesis para el título de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cienfuegos, Cuba., 2022
3. GUZMÁN, T. O., ÁLVAREZ, J., ILUNDAIN, X., JUAN, R., CASTRO, G. Evaluation of solar thermal and photovoltaic systems in three milk processing

plants in the Northern Huetar Region, Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, **33**, 2019. ISSN 2215-3241.

4. CELIS R. G. Matriz energética mundial y el cambio climático: Estado actual.

UTADEO, **1**, 2020.

5. RODRÍGUEZ, P., "Estudio de viabilidad para una minicentral solar térmica aplicada a edificación residencial". Tesis para título de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018

6. VALLADAREZ, J., NIETO, O., MARTINEZ, E., SANTOS, A., Analysis of the influence of azimuth and tilt angle in photovoltaic power plants in Cuba. *Ingeniería Energética*, 2023. ISSN: 1815-5901

7. IEA. Analysis and forecast to 2027. *Renowables*, 2022. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>, License: CC BY 4.0

8. STOLIK, D. Photovoltaic Energy and Cuba's Energy Transitio. *Eco Solar*, (78), 28-33, 2021. ISSN: 1028-6004

9. GÓMEZ, J. Instalación de sistema fotovoltaico en un almacén de cítrico en el puerto de Cienfuegos, Cuba *LADEE*, **2**, pp. 33-43, 2021. ISSN: 2744-9750

10. GONZÁLEZ, R., "Propuesta de un Sistema Híbrido Eólico – Fotovoltaico para el Hotel Santa Clara Libre," Tesis para título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Marta Abreu de las Villas, Cuba., 2019.

11. FERNÁNDEZ, D., "Diseño de una instalación fotovoltaica para autoconsumo industrial". Tesis para título de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid España, 2020.

12. GARCÍA, G., "Calculation and Desing of a Solar Installations for Self-Consumption in a Single-Family House," Tesis para título de Ingeniería Electromecánica, Universidad Pontificias Comillas Madrid, España, 2020.

13. CHAVES, V., Design, implementation and economic analysis of a 3 kW photovoltaic system connected to the grid (SFCR) with dc/dc converters analyzed under geographical and climatological conditions the city of Juliaca, *ÑAWPARISUN, Revista de Investigación Científica*, **3**, 2020, Art no. 1. ISSN 2706-6789

14. DÍAZ, R. C., SANTOS, M., VILARAGUT, A. M., Influence analysis in the inclination angle into the photovoltaic power plant generation, *ResearchGate*, **39**, 2018. ISSN 1815-5901

Conflicto de interés

El autor declara que no hay conflictos de intereses

Contribución de los autores

Alejandro Yamil Álvarez García: asumió todas l