

60

Fecha de presentación: octubre, 2023

Fecha de aceptación: febrero, 2024

Fecha de publicación: marzo, 2024

DISMINUCIÓN POTENCIAL

DE COSTOS ENERGÉTICOS EN LA EMPRESA AGROPECUARIA HORQUITA EMPLEANDO GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

POTENTIAL REDUCTION OF ENERGY COSTS IN THE HORQUITA AGRICULTURAL ENTERPRISE USING PHOTOVOLTAIC GENERATION

Julio Rafael Gómez Sarduy¹

E-mail: jgomez@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3313-6572>

Isidro Fraga Hurtado¹

E-mail: ifraga@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0516-8553>

Zaid García Sánchez¹

E-mail: zgarcia@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1989-9362>

Yulier Ortuño Borroto²

E-mail: yortuno@uclv.cu

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2175-865X>

¹ Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” Cienfuegos. Cuba.

² Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Santa Clara. Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición):

Gómez Sarduy, J. R., Fraga Hurtado, I., García Sánchez, Z., Ortuño Borroto, Y. (2024). Disminución potencial de costos energéticos en la Empresa Agropecuaria Horquita empleando generación fotovoltaica. *Universidad y Sociedad*, 16(2), 539-552.

RESUMEN

La generación fotovoltaica se presenta hoy en día como una alternativa ventajosa desde el punto de vista ambiental frente a las fuentes convencionales de energía y es una opción para el sector agropecuario poder disminuir los gastos debido a la facturación de electricidad. Un sistema fotovoltaico conectado a la red en La Empresa Agropecuaria Horquita permitirá reducir el consumo de electricidad desde la empresa eléctrica. En este artículo se describe una propuesta de sistema fotovoltaico conectado a red que consta de 1014 paneles de 270 Wp con 13 inversores. La capacidad total del sistema es de 273 kWp y es capaz de generar 346,4 MWh/año. Se simuló el desempeño del sistema utilizando el software profesional PVSyst 7.1 para comprobar los resultados del cálculo manual además de obtener información adicional sobre el desempeño del sistema en el tiempo. La propuesta es factible económicamente arrojando un VPN de 1,7 MMCUP con un periodo de recuperación de 8 años a partir de la disminución de la facturación de electricidad en 640 840 CUP/año. Sin embargo, se detectó que este tipo de proyecto no es muy atractivo para aprovechar fondos de oportunidad si se tiene en cuenta que la TIR es muy baja (4%) en comparación con la tasa de descuento empleada. El proyecto tiene como ventaja adicional que permite la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera estimándose emisiones evitadas de 242,5 t de CO₂/año.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, fuentes renovables, paneles solares, energía, software PVSyst.

ABSTRAC

Photovoltaic generation is presented today as an environmentally advantageous alternative to conventional energy sources and is an option for the agricultural sector to reduce the expenditure incurred due to electricity billing. A photovoltaic system connected to the grid at the Horquita Agricultural Enterprise allow reducing electricity consumption from the electrical company. This paper details a proposal for a connected to grid photovoltaic system that consists of 1014 panels with 270 Wp connected to 13 inverters. The total capacity of the system is 273 kWp and it is capable of generating 346,4 MWh/year. The performance of the proposed system was simulated using the professional software PVSyst 7.1 and the results of the manual calculation were verified in addition to obtaining other information about its

performance. The proposal is feasible from an economic point of view, yielding a positive NPV of 1,7 MMCUP and a payback period of 8 years from the decrease in electricity billing by 640,840 CUP/year. However, it was detected that this type of project is not very attractive to take advantage of opportunity funds if it is taken into account that the IRR is very low (4%) compared to the discount rate used. The additional advantage of the project is that it allows the reduction of CO₂ emissions into the atmosphere, estimating avoided emissions of 242.5 t of CO₂/year.

Keywords: Phtovoltaic system, renewable sources, solar panels, energy, PVSyst software.

INTRODUCCIÓN

La agricultura actual se beneficia de tecnologías avanzadas como la agricultura de precisión, la biotecnología y la genómica, que permiten una producción más eficiente y sostenible. La agricultura sostenible es una prioridad, con un enfoque en prácticas respetuosas con el medio ambiente, la conservación del suelo y la gestión eficiente del agua. Sin embargo, la agricultura también enfrenta desafíos relacionados con el uso de la energía y la sostenibilidad, que requieren soluciones innovadoras para garantizar la seguridad alimentaria y la protección del planeta. En este sentido, el uso eficiente de la energía en las actividades agropecuarias es de una importancia trascendental.

La energía se emplea en la agricultura para diferentes propósitos. Hay que señalar primero su empleo en las máquinas agrícolas. La agricultura moderna depende en gran medida de maquinaria que utiliza combustibles fósiles, como tractores y cosechadoras, lo que plantea desafíos en términos de emisiones de carbono y sostenibilidad. La cadena de suministro también utiliza gran cantidad de energía. Por ejemplo, se utiliza gran cantidad de energía en la refrigeración, el transporte y el procesamiento de productos agrícolas a lo largo de la cadena de suministro.

Por esta razón, se dedican grandes esfuerzos a investigar y desarrollar soluciones más sostenibles, como la electrificación de maquinaria agrícola y la producción de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas. Una tendencia actual es al uso de fuentes renovables de energía que es fundamental para promover la sostenibilidad y reducir la huella ambiental del sector agropecuario.

Es una realidad que cada día se hace más importante el ahorro y la eficiencia en el mundo actual. El sector

energético se ve particularmente afectado por las conductas derrochadoras, el funcionamiento inadecuado de los equipos y componentes que lo integran o su ineficiente explotación en la interacción de los mismos como un sistema. El uso eficiente de la energía se ha convertido en los últimos años en una de las mayores preocupaciones a escala mundial. Debido al alto costo de la energía eléctrica, se impone cualquier medio que permita ahorrarla y aprovecharla óptimamente, lo que puede traducirse en disminución de pérdidas y mejora del factor de potencia, todo esto teniendo en cuenta las limitaciones actuales que requieren la búsqueda de nuevos métodos que sean eficientes y económicamente justificables.

La optimización del consumo de energía eléctrica en Cuba ha sido una de las tareas fundamentales del estado ya que no solo garantiza el incremento de la economía nacional, sino que propicia una mayor calidad de vida para la población. Este interés abarca también al sector agrícola cubano, que es una de las ramas de la economía que, combinada con la energía, constituye un aspecto estratégico para el país.

El sol, fuente de vida y origen de las demás fuentes de energía que se han utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas las necesidades energéticas si se aprende a aprovechar de forma racional la energía que continuamente incide sobre el planeta. Anualmente, el sol derrama sobre la tierra 4 000 veces más energía que la que se consume en todos los países del mundo. Para conseguir su aprovechamiento se emplean sistemas de captación y transformación que se van desarrollando con el avance de la ciencia y la tecnología. La utilización de la luz del solar, el viento, la corriente de los ríos, los mares y la biomasa, más que una alternativa, es una solución posible a las exigencias energéticas de Cuba y del mundo de cara al desarrollo sostenible. La utilización de este tipo de recursos implica retos que vencer sobre todo debido a su alta variabilidad (Fraga et al., 2023) (Gómez et al., 2021) no obstante, todo el consumo mundial de energía se puede cubrir con el empleo de la energía solar en las diferentes variantes de su aprovechamiento (Álvarez, 2020).

Sin embargo, todavía quedan potencialidades por explorar dentro de la agricultura cubana para incrementar el uso de fuentes renovables de energía. Un ejemplo es la Empresa Agropecuaria Horquitas, el mayor polo productivo de Cienfuegos. Esta empresa, ubicada en el municipio Abreus, impulsa durante todo el año la producción de diversos tipos de vegetales destinados al consumo nacional y el turismo en la provincia de Cienfuegos. Cabe

destacar que el consumo de electricidad de esta empresa ascendió a más de 3,4 TWh anual en los años 2022 y 2023, siendo todo este consumo suministrado desde el Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y que en su mayoría proviene de combustibles fósiles con el consiguiente impacto negativo sobre el medio ambiente y la propia economía de la empresa.

Por esta razón, es importante el diseño de un sistema fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica en esta empresa agropecuaria lo que debe representar una disminución de los costos de electricidad y la reducción del impacto ambiental por la energía eléctrica dejada de consumir.

Uso de la energía en el sector agrícola

La agricultura, desde su inicio, se ha caracterizado por mantener un equilibrio energético, donde la energía adicional aportada debe ser inferior a la obtenida a través de cosechas útiles, aprovechando los recursos naturales como el sol, la lluvia y los nutrientes. En un mundo marcado por la creciente escasez de recursos (suelo, agua, energía, aire limpio) y una demanda en aumento de productos agrícolas en cantidad y calidad, la eficiencia en el uso de los recursos y la sostenibilidad se vuelven imperativos cruciales en la agricultura.

El empleo de la energía en la agricultura tiene diversos objetivos, desde el bombeo de agua en sistemas de riego hasta la maquinaria utilizada en labores, tratamientos y cosecha. También se aprovecha la energía solar y calefacciones en invernaderos, así como en el transporte de productos desde las fincas hasta los centros de transformación o comercialización. Asimismo, la energía desempeña un papel fundamental en los procesos de transformación de productos agroalimentarios y la conservación mediante cámaras de frío o atmósferas controladas.

En el ámbito energético, se observa un rápido avance en la tecnología de generación eléctrica, tanto en fuentes renovables como la eólica o la solar fotovoltaica, como en combustibles fósiles como el petróleo o el gas de esquisto. La solar fotovoltaica, en particular, experimenta reducciones significativas en costos unitarios, siendo modular, de mantenimiento sencillo y predecible, lo cual la hace idónea para la agricultura. Paralelamente, las tecnologías de almacenamiento de energía, especialmente las baterías, evolucionan rápidamente, reduciendo costos y mejorando prestaciones.

En un desarrollo simultáneo, las tecnologías de información y comunicación (TIC) permiten una gestión más

inteligente de la energía, mediante la medición de consumos y eficiencia, control remoto, y la aplicación de algoritmos inteligentes que optimizan su uso. En este sentido, las TIC representan un avance significativo, ya que todo lo que se mide y controla tiende a mejorar. La combinación de algoritmos inteligentes y automatización acelera y hace más evidente esta mejora.

El futuro se perfila hacia un mundo con energía cada vez más barata y abundante, con la tecnología facilitando una gestión inteligente de la misma. El sector agrícola, siendo un gran consumidor de energía y con potencial para la producción, debe adaptarse a los cambios tecnológicos y demandas sociales mediante la innovación. A nivel global, muchas empresas tecnológicas especializadas en soluciones de gestión para el sector agrícola, han estado innovando e invirtiendo para proporcionar las mejores soluciones que permitan una gestión más eficiente de la energía y un mayor control y trazabilidad de su consumo.

Mirando hacia el futuro cercano, en el mundo se vislumbra una mayor automatización y robotización en la agricultura, un aumento en el uso de la energía eléctrica con la reducción de combustibles fósiles, y una mejora en el almacenamiento de energía. Este escenario anticipa una agricultura más sostenible, con la disminución del uso de químicos gracias a la intervención de robots alimentados por energía solar, promoviendo la eficiencia económica y la transparencia en toda la cadena de producción (Agronet MinAgricultura, 2022).

En el caso de Cuba, la agricultura no es uno de los mayores consumidores de energía, sin embargo, es importante abaratar costos y tanto para el sector estatal como para los pequeños agricultores, es importante reducir los consumos energéticos para hacer más competitivos sus productos. Uno de las tareas más intensivas energéticamente en la agricultura es el riego, para lo cual se consumen grandes cantidades de energía para el bombeo de agua, ya sea electricidad o diésel para aquellos equipos accionados por motores de combustión. Una tendencia es a incrementar el uso de fuentes renovables para satisfacer los diferentes servicios energéticos (PL (Prensa Latina), 2022).

Empleo de las FREs en la agricultura

Una parte importante de la atención del sector agrícola se centra en las oportunidades que el sector energético ofrece a la agricultura como productores de energías renovables, fundamentalmente de la biomasa. Es de suma importancia que este sector potencie el empleo de las diferentes fuentes renovables de energía (solar, eólica,

hidráulica y geotérmica). El uso de FRE en la agricultura, al igual que en otros sectores tiene múltiples ventajas entre las que se pueden mencionar:

1. Reducción de Costos: El uso de energía renovable puede reducir los costos operativos a largo plazo de las explotaciones agrícolas al disminuir la dependencia de combustibles fósiles y la red eléctrica tradicional.
2. Sostenibilidad Ambiental: El empleo de fuentes renovables reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a la sostenibilidad ambiental.
3. Mayor Autonomía: Los sistemas de energía renovable permiten a los agricultores ser más autónomos y no depender tanto de la infraestructura eléctrica externa.
4. Acceso en Zonas Remotas: En áreas rurales o remotas, donde el acceso a la red eléctrica es limitado, las fuentes de energía renovable pueden brindar una solución energética confiable (Rodríguez et al., 2022).

Dentro de las FRE, una de las tendencias es a disminuir la dependencia de energía a partir de las empresas suministradoras de electricidad debido a presiones ambientales, económicas y muchas veces, por dificultades de acceso a las líneas de transmisión y distribución en sitios remotos. Con este fin se ha incrementado el uso de la energía solar fotovoltaica.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la literatura consultada se muestran ejemplos de cálculo que brindan la metodología a seguir cuando se quiere diseñar un sistema fotovoltaico conectado a red (Gómez, 2021), (Becerra, 2018), (Domínguez et al., 2019), para ello se debe:

1. Identificar el área disponible en la empresa que pueden emplearse para el montaje de paneles fotovoltaicos.
2. Calcular los subarreglos del Sistema Solar Fotovoltaico (SSFV) a partir del uso de paneles fotovoltaicos de producción nacional e inversores disponibles.
3. Realizar el análisis económico de la propuesta.
4. La propuesta de una instalación fotovoltaica para esta empresa, aunque se destina al autoconsumo, será un sistema conectado a red por lo que los excedentes de energía se entregarán al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), vendiéndose la energía al precio establecido.

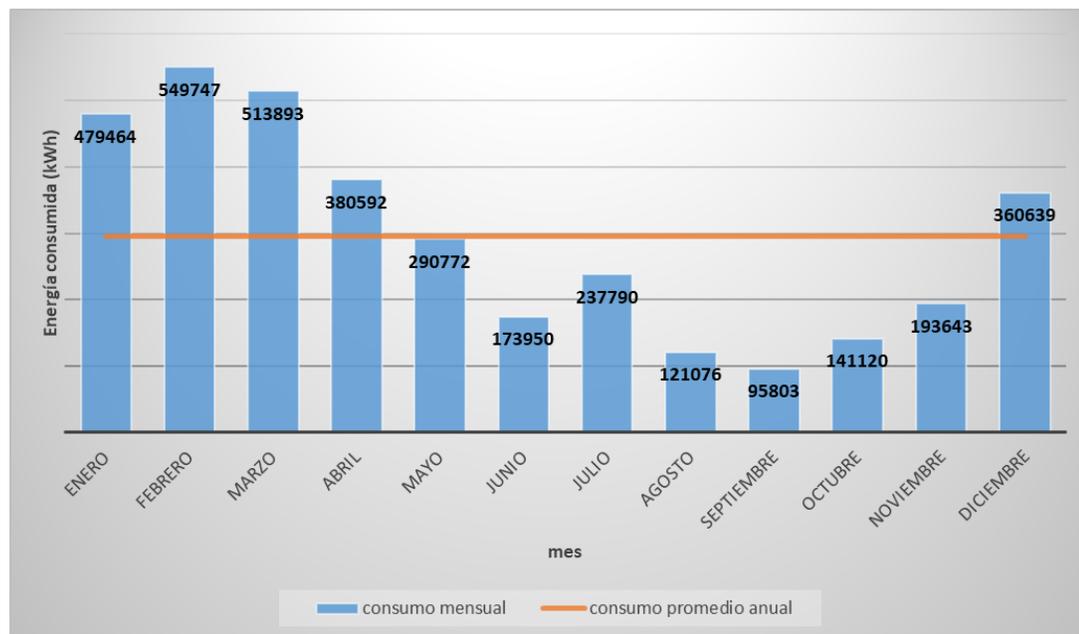
Algunos de los beneficios que esta inversión supone para la empresa son:

- Mayor independencia energética.
- Reducción de costos de energía anuales tanto por la reducción en el consumo como por los ingresos obtenidos de la venta de energía.
- Mejora de su imagen corporativa por el hecho de fomentar energías limpias.
- Contribuir a la reducción de las pérdidas en la distribución de energía al descentralizar la generación de energía.

La Empresa Agropecuaria Horquita tiene como objeto social la producción de viandas, hortalizas, granos, frutales, leche, carne y servicios agropecuarios para satisfacer las necesidades del mercado nacional y en divisa. Para cumplir con su objeto social, la empresa cuenta con un fondo de tierra de aproximadamente 22902.57 ha, de las cuales, 8558.69 ha están dedicadas a los cultivos varios.

La entidad agropecuaria objeto de estudio tuvo un consumo de energía eléctrica de 3538,5 MWh en el año 2022, según datos obtenidos en consulta con la empresa. Los estados de consumos mensuales de energía eléctrica del año 2022, están dados en la figura 1. El valor medio del consumo de energía eléctrica mensual es de 294 874 kWh, mostrado con la línea horizontal continua de color naranja oscuro.

Fig 1. Consumo mensual de energía eléctrica de la entidad en 2022.



Fuente: Elaboración propia.

Una solución para paliar el elevado consumo de electricidad y cumplir así con su misión de producir con eficiencia económica y mitigando su afectación al medio ambiente, es precisamente el uso de fuentes renovables de energía como la solar fotovoltaica, aprovechando el marco legal establecido en el país.

La principal justificación de este trabajo es investigar el ahorro económico que supone para esta empresa la construcción de la planta fotovoltaica, así como estudiar una propuesta que puede contribuir a dar cumplimiento a la política estatal de fomento de fuentes renovables de energía para el incremento de su participación en la matriz energética nacional, según se establece en el Decreto-Ley No. 345 “Del Desarrollo de las Fuentes Renovables y el Uso Eficiente de la Energía”. En el proyecto realizado se recoge el diseño preliminar de una instalación fotovoltaica conectada a red a través del sistema de suministro eléctrico industrial. Esta instalación tiene una potencia total de 273 kWp y está destinada para el autoconsumo.

La instalación fotovoltaica propuesta, está constituida por 1014 módulos fotovoltaicos de células de silicio policristalino, considerando el número máximo de paneles posible a colocar en el área seleccionada.

La energía eléctrica producida por la Instalación Fotovoltaica es de aproximadamente 1 MWh/día. Esta energía se inyectará en la red trifásica de baja tensión haciendo uso de 13 inversores centrales. Los módulos fotovoltaicos en cuestión se ubicarán sobre el terreno en estructuras típicas.

Los inversores deben estar ubicados en el interior de un local construido al efecto y se conectarán al sistema de suministro eléctrico de baja tensión. Los inversores deben ser capaces de regular el factor de potencia para no afectar a la empresa con penalizaciones por bajo factor de potencia.

Se requiere tener en cuenta en el proyecto definitivo la necesidad de cambiar el sistema de medición de energía montando un metro contador bidireccional.

Aunque en algún momento del día, debido al consumo del área que normalmente se encuentra conectada a la misma acometida del generador fotovoltaico, se pudiera estar entregando energía a la red, en este estudio preliminar no se considera la venta de energía a la red eléctrica, solo se balancea la potencia generada con la consumida totalmente por todas las dependencias de la empresa.

Área disponible para la instalación fotovoltaica.

La instalación se pretende realizar en el área de un terreno adjunto a la sede administrativa de la empresa que tiene unas dimensiones de 90m x 30m. La ubicación cardinal de la empresa queda dada en la figura 2 donde se aprecia también el terreno disponible y sus dimensiones.

Fig 2. Vista satelital del terreno disponible.



Fuente: Elaboración propia.

Cálculos básicos del sistema de generación fotovoltaica.

El terreno seleccionado tiene un área de 2700 m². Las dimensiones y orientación se muestran en la figura 2. El montaje de los paneles se hará con orientación al sur, lo que se corresponde con una inclinación de las filas de paneles de 30° con relación al eje longitudinal del terreno.

Los módulos fotovoltaicos son los equipos encargados de producir, a través de una radiación solar incidente en ellos, una energía eléctrica en forma de corriente continua (CC). El módulo fotovoltaico elegido para este proyecto es de dimensiones 1650x990x40mm y con una potencia de 270 Wp. Siguiendo el proceso de cálculo, y considerando una disposición de montaje de los paneles en filas orientadas al sur (azimut 0) y con un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal (β) igual la latitud del lugar (para este caso se considera $\beta=22^\circ$), se calculó la distancia mínima entre paneles para evitar el sombreado. Se toma como distancia mínima 2m para mayor disponibilidad de acceso para labores de instalación y mantenimiento.

Sobre la base de la distancia mínima entre paneles se tiene que el número máximo de paneles (N) que se pueden instalar en el área seleccionada es de N=1014 paneles para una potencia total instalada en el parque (P_{inst}), calculada por la ecuación (1) como:

$$P_{inst} = N * \frac{P_n}{1000} = 1014 * \frac{270W}{1000} = 273 kWp \quad (1)$$

Donde P_n es la potencia máxima a STC del panel fotovoltaico, para este caso 270 Wp.

El estimado de la generación de energía diaria, considerando un factor de 0,654 que tiene en cuenta el rendimiento y suciedad de los paneles y con una cantidad de hora solar pico (HSP) para Cienfuegos de 5,6 horas según la ecuación (2) es de:

$$E = 0,654 * HSP * P_{inst} = 0,654 * \frac{5,6h}{día} * 273kWp = 999,83kWh/día \approx 1MWh/día \quad (2)$$

Dimensionamiento del inversor

Los fabricantes exigen que la potencia del inversor esté en el rango de 1 a 1,1 la potencia del arreglo, siendo la potencia nominal del inversor la potencia de salida por el lado de corriente alterna.

La potencia del inversor por el lado de corriente directa ($P_{nom DC}$) debe estar dentro del rango de $\pm 20\%$ de la potencia del arreglo fotovoltaico (P_{PV}), como se expresa por la ecuación (3):

$$0,8 < P_{nomDC} < 1,2 * P_{PV} \quad (3)$$

La relación por cociente entre la potencia nominal del arreglo fotovoltaico y la potencia nominal del inversor se conoce como factor de dimensionamiento del inversor (c_{inv}) y da una medida del nivel de utilización del inversor. Este factor varía típicamente entre 0,83 y 1,25 y se calcula según la ecuación (4) como:

$$c_{inv} = \frac{P_{PV}}{P_{nomAC}} \quad (4)$$

Para garantizar que el inversor incorpore los puntos de MPP de las curvas I-V del arreglo fotovoltaico es necesario tener en cuenta que el rango de voltaje de operación del inversor debe ser ajustado por las curvas I-V del arreglo fotovoltaico de manera que:

-El voltaje mínimo de operación del arreglo (a temperatura de operación máxima de los módulos, 60°C predeterminada en el software PVsyst) debe ser superior al voltaje mínimo de operación del inversor.

-El voltaje máximo de operación del arreglo (a temperatura de operación mínima de los módulos, 20°C predeterminada en el PVsyst) tiene que ser inferior al voltaje máximo de operación del inversor.

-El máximo voltaje absoluto del arreglo (voltaje de circuito abierto a la temperatura mínima, V_{oc} a -10°C predeterminado en el PVsyst) tiene que ser inferior al voltaje de entrada máximo absoluto del inversor.

Para el caso de este estudio se seleccionó un inversor de 20 kW con dos entradas MPPT.

Número de paneles en una cadena

Máximo número de paneles por cadena

El primer límite se define por la mínima temperatura en invierno (se considera -10°C). Si el inversor se desconecta en un día de invierno (por ejemplo, si hay una falla en la red), cuando se vuelva a conectar de nuevo, el voltaje de circuito abierto del arreglo puede ser muy elevado. Este alto voltaje puede dañar al inversor, por lo tanto, el voltaje de circuito abierto del arreglo a la temperatura mínima debe ser menor que el máximo voltaje de entrada del inversor. Es decir, el máximo número de módulos conectados en serie en una cadena se determina por la ecuación (5) como el cociente del máximo voltaje de entrada del inversor y el voltaje de circuito abierto del módulo a -10°C:

$$Paneles_serie_{max} = \frac{V_{max(INV)}}{V_{oc(panel - 10^{\circ}C)}} \quad Paneles_serie_{max} = \frac{V_{max(INV)}}{V_{oc(panel - 10^{\circ}C)}} \quad (5)$$

El voltaje de circuito abierto del panel a -10°C se calcula a partir del coeficiente de temperatura (V_{oc}) $\Delta V = -0.30537\%/^{\circ}\text{C}$, aplicando la ecuación (6):

$$V_{oc(\text{panel}+10^{\circ}\text{C})} = \left(1 - 35^{\circ}\text{C} \cdot \frac{\Delta V}{100}\right) \cdot V_{oc(\text{STC})} = \left(1 - 35^{\circ}\text{C} \cdot \left(\frac{-0.30537}{100}\right)\right) \cdot 38 = 42 \text{ V} \quad (6)$$

Por lo tanto, calculando por la ecuación (7) se tiene que el máximo número de paneles conectados en serie es:

$$\text{Paneles_serie}_{\max} = \frac{V_{\max(\text{INV})}}{V_{oc(\text{panel}-10^{\circ}\text{C})}} = \frac{800 \text{ V}}{42 \text{ V}} = 19 \text{ paneles} \quad (7)$$

Mínimo número de paneles en una cadena

Se selecciona de manera que el voltaje en la cadena, a máxima temperatura en el verano, no caiga por debajo del voltaje MPP mínimo del inversor, ya que el inversor no podría entregar la máxima potencia del arreglo y en el peor de los casos desconectarse. Por esta razón, el sistema debe ser dimensionado de manera que el mínimo número de módulos en serie en una cadena se derive del cociente entre el voltaje mínimo de entrada del inversor en el MPP y el voltaje del módulo en el MPP a 70°C , como se expresa en la ecuación (8):

$$\text{Paneles_serie}_{\min} = \frac{V_{\text{MPP}(\text{INV})}}{V_{\text{MPP}(\text{panel } 70^{\circ}\text{C})}} \text{Paneles_serie}_{\min} = \frac{V_{\text{MPP}(\text{INV})}}{V_{\text{MPP}(\text{panel } 70^{\circ}\text{C})}} \quad (8)$$

El voltaje MPP del panel a 70°C , se puede calcular a partir de la ecuación (9) con las condiciones STC tomando el coeficiente de temperatura (V_{mp}) de $\Delta V = -0.41004\%/^{\circ}\text{C}$, como sigue:

$$V_{\text{MPP}(\text{módulo } 70^{\circ}\text{C})} = \left(1 + 45^{\circ}\text{C} \cdot \frac{\Delta V}{100}\right) \cdot V_{\text{MPP}(\text{STC})} = V_{\text{MPP}(\text{módulo } 70^{\circ}\text{C})} = \left(1 + 45^{\circ}\text{C} \cdot \frac{\Delta V}{100}\right) \cdot V_{\text{MPP}(\text{STC})} =$$

$$\left(1 + 45^{\circ}\text{C} \cdot \frac{-0.41004}{100}\right) \cdot 32.1 = 26.17 \left(1 + 45^{\circ}\text{C} \cdot \frac{-0.41004}{100}\right) \cdot 32.1 = 26.17 \quad (9)$$

Por lo tanto, el mínimo número de paneles conectados en serie, calculado por la ecuación (10) es:

$$\text{Paneles_serie}_{\min} = \frac{V_{\text{MPP}(\text{INV})}}{V_{\text{MPP}(\text{panel } 70^{\circ}\text{C})}} = \frac{350 \text{ V}}{26.17 \text{ V}} = 13.37 \quad (10)$$

O sea, el mínimo número es 13 paneles. Es decir, se pueden conectar en serie entre 13 y 19 paneles para cumplir con los requerimientos de tensión del inversor.

Número de cadenas

Para completar el dimensionamiento, se debe asegurar que la corriente máxima del arreglo fotovoltaico no exceda la corriente máxima de entrada del inversor que para el inversor seleccionado es 62 A. El máximo número de cadenas es igual al cociente entre la corriente de entrada DC máxima permitida del inversor y la máxima corriente de la cadena como se expresa por la ecuación (11):

$$N_{\text{string}} = \frac{I_{\max \text{ INV}}}{I_{n \text{ string}}} = \frac{62 \text{ A}}{9.11 \text{ A}} = 6.8 N_{\text{string}} = \frac{I_{\max \text{ INV}}}{I_{n \text{ string}}} = \frac{62 \text{ A}}{9.11 \text{ A}} = 6.8 \quad (11)$$

Entonces se pueden conectar en paralelo hasta 6 cadenas en un inversor.

Se fija el número de paneles en serie en 13 paneles por cadena y entonces se tiene que el número total de cadenas para este caso es $1014/13=78$ cadenas. Como se calculó anteriormente, el tipo de inversor seleccionado para este tipo de panel solo admite 6 cadenas en paralelo, por lo tanto, el número de inversores, por la ecuación (12) será:

$$No. inversores = \frac{78 \text{ cadenas}}{6 \text{ cadenas/inversor}} = 13 \text{ inversores} \quad (12)$$

Estos inversores poseen 2 entradas MPPT por lo que se conectan 3 cadenas a cada entrada.

Finalmente, la instalación se compone de 1014 paneles conectados en 78 cadenas de 13 paneles cada una y 13 inversores, con una potencia FV instalada de 273 kWp.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cálculos para la simulación se fundamentan en los valores de irradiación solar mensuales (tanto global como difusa) que determina el software para la localidad que se define.

En este caso las coordenadas que se suministraron coinciden con la comunidad de Horquita, es decir, Lat. 22, 2021° N y Long. -80, 7719° W, y una altitud de 18 m con los datos meteorológicos que se muestran en la figura 4. La simulación se realizó bajo las mismas condiciones de diseño que se plantearon anteriormente, es decir, 1014 módulos fotovoltaicos dispuestos en 78 cadenas de 13 módulos conectados en serie cada una y todos orientados al sur y con inclinación de 22°.

Fig 4. Parámetros del sitio geográfico a analizar dados por el software PVSyst.

	Irradiación horizontal global kWh/m ² /mes	Irradiación difusa horizontal kWh/m ² /mes	Temperatura °C
Enero	123.4	39.4	21.1
Febrero	133.3	41.4	22.3
Marzo	169.6	55.5	23.8
Abril	185.4	60.6	25.3
Mayo	183.8	71.9	25.9
Junio	168.3	72.9	26.3
Julio	184.1	72.9	26.3
Agosto	175.5	68.8	26.4
Septiembre	150.0	60.6	26.1
Octubre	140.7	51.8	25.0
Noviembre	119.7	41.1	23.5
Diciembre	114.7	37.8	21.8
Año	1848.5	674.7	24.5

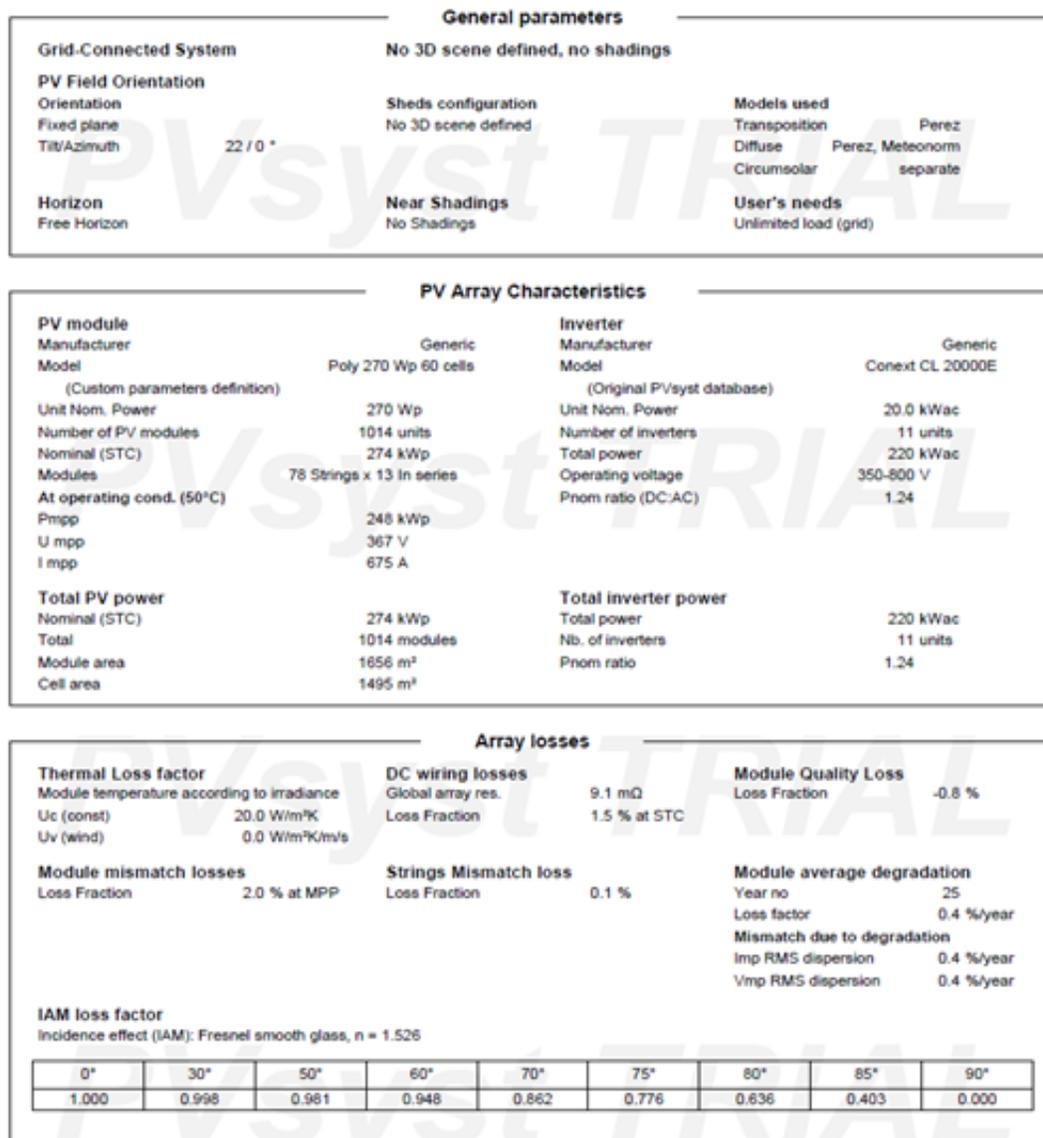
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5 se muestran los parámetros generales del sistema, las características del arreglo y las pérdidas. Se considera una vida útil de 25 años y una degradación lineal de los paneles de 0,4% anual.

Una vez realizada la simulación se tienen los resultados principales y el balance de los resultados en la Figura 6. Se puede apreciar el perfil de generación de energía mensual, comprobando que normalmente se genera cerca de 30 MWh/mes. Los meses de menor generación se corresponden con los meses de menor irradiancia.

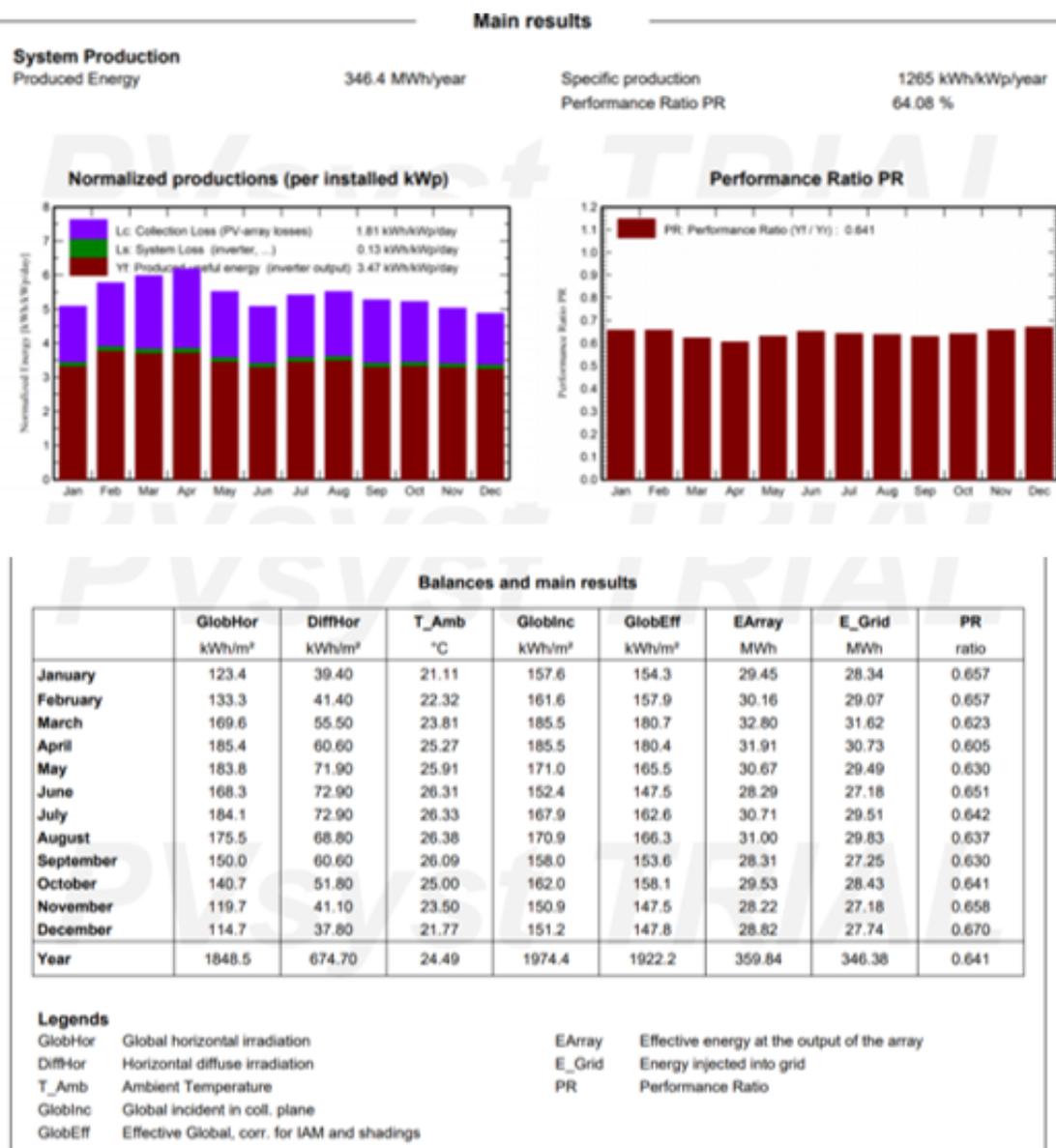
Es importante tener en cuenta que se tiene un nivel de pérdidas en la conversión del orden del 41% con relación a la capacidad nominal del campo en condiciones STC, siendo las más relevantes las pérdidas por degradación de los módulos que ascienden a 9,8% y las debidas por la temperatura que son 10,94%.

Fig 5. Parámetros generales para la simulación.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 6. Balance de los resultados principales.



Fuente: Elaboración propia.

Factibilidad económica

Una vez comprobada la factibilidad técnica de la propuesta, que es capaz de suministrar aproximadamente 30 MWh/mes, se procede a realizar un análisis de factibilidad económica considerando como beneficios el monto de la energía dejada de consumir. Para el análisis se utiliza el método de flujo de caja descontado y se calcula el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

Para este análisis es necesario obtener los indicadores económicos que caracterizan al proyecto conociendo:

- El ahorro económico anual asociado a la reducción del consumo de energía eléctrica de la empresa desde la red.

- El desembolso inicial, lo que se corresponde con el presupuesto de la instalación. Es decir, el dinero necesario para construir y poner en marcha la instalación.

Cálculo del ahorro anual

Para el cálculo del ahorro anual se considera que la energía producida por el parque se deja de consumir en la empresa y el ahorro monetario anual correspondiente se calcula por la ecuación (13) como:

$$\text{Ahorro} = \text{Energía anual producida} * \text{Precio del kWh} \quad (\text{CUP}) \quad (13)$$

La energía anual producida según la simulación del sistema es de 346,4 MWh/año. Según la tarifa aplicada a la empresa, el precio del kWh en el horario del día es de 1,85 CUP/kWh. Por lo tanto, de acuerdo con la ecuación (14), el ahorro económico por energía dejada de consumir se calcula como:

$$\text{Ahorro} = 346.4 \text{ MWh} * 1000 * 1,85 \frac{\text{CUP}}{\text{kWh}} = 640\ 840 \text{ CUP} \quad (14)$$

Costo inicial de la inversión

Para calcular los indicadores económicos del proyecto, es necesario determinar la inversión inicial. Para ello es necesario determinar el coste tanto de material como de instalación para todos los equipos que componen la instalación. Se toma como referencia ofertas del mercado internacional para paneles policristalinos de 270 Wp con precios de 0,23 USD/W. Si se considera según Stolik (2019) que los costos soft (hard soft más montaje y otros) representan aproximadamente 50% de los costos totales, es decir, un monto similar al costo de los paneles, entonces se puede tomar para el análisis preliminar un costo capital total de 0.46 USD/Wp (460 USD/kWp). Con la tasa de cambio vigente de 24 CUP/USD el monto de la inversión inicial para este parque de 273 kWp se calcula por la ecuación (15) como:

$$\text{Inversión capital} = 460 \frac{\text{USD}}{\text{kWp}} * 24 \frac{\text{CUP}}{\text{USD}} * 273 \text{ kWp} = 3\ 013\ 920 \text{ CUP} \quad (15)$$

Análisis económico

El objetivo de este apartado es determinar la rentabilidad del proyecto, así como el tiempo de retorno de la inversión. La rentabilidad del proyecto se evaluará en base a los indicadores económicos de Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

Para la obtención de estos dos indicadores es necesario conocer todas las entradas y salidas de capital en el proyecto. En nuestro caso particular las entradas se corresponden con el beneficio asociado a la reducción del consumo de energía. Por otro lado, las salidas de capital son el desembolso inicial para el año 0 y los costes asociados al mantenimiento y operación de la instalación para el resto de años que en este caso se desprecia.

Los datos de partida para el análisis económico son los siguientes:

Impuesto sobre la ganancia: 0% (El apartado tercero de la Resolución 238/2023 establece: Eximir al sector estatal y las formas de gestión no estatal que ejecutan proyectos de generación de electricidad con fuentes renovables de energía, del pago del impuesto sobre utilidades durante el período de recuperación de la inversión por un plazo de hasta ocho (8) años).

Tasa de inflación: 7%

Tasa de descuento: 15%

Margen de riesgo: 3%

El VPN representa el valor presente de un proyecto cuyos flujos de caja se obtendrán en un futuro. Es decir, este indicador tiene en cuenta la depreciación futura del dinero refiriendo todo el capital generado en los años del proyecto

a dinero actual (año 0). Es una medida de los beneficios que genera el proyecto, cuando su valor es positivo indica que el proyecto produce ganancias; que serán mayores cuanto mayor sea este. El VPN se calcula por la ecuación (16) como sigue:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{(\text{Flujos de caja})_t}{(1+D)^t} - \text{Inversión capital} \quad (16)$$

Donde D es la tasa de descuento, que permite considerar la depreciación del dinero a lo largo del tiempo, esta se fijará en un 15 %. Por otro lado, t representa cada uno de los años para los que se realiza el sumatorio, en nuestro caso se considerará una amortización de 25 años, luego n=25.

En cuanto a la TIR, esta se corresponde con la tasa de descuento que hace que el VAN se anule. Es una medida de la rentabilidad del proyecto y sirve para comparar posibles proyectos. La TIR mide la viabilidad del proyecto en el caso de tener que recurrir a un préstamo bancario, al interés efectivo del préstamo concedido. Si la TIR coincide con el interés del préstamo bancario, los beneficios del proyecto sólo alcanzarán para cubrir el préstamo concedido por el banco.

Por último, se calculará también el tiempo de retorno de la inversión o Payback, este es el tiempo que hace que los flujos de caja acumulados iguallen a la inversión inicial. El análisis económico se realizó en una hoja de cálculo electrónica de Microsoft Excel. Un resumen de los datos de rentabilidad de la inversión se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del análisis económico.

Costo de la Inversión	3 013 920.00 CUP
Ahorro anual de energía	346 400 kWh/año
Ahorro monetario por energía	640 840 CUP/año
VPN	1 706 752 CUP
TIR	4 %
PRI (Años)	8 años

Fuente: Elaboración propia.

Para este proyecto, un VPN de 1 706 752 CUP con una tasa de descuento del 15% es un indicador positivo. Esto muestra que, incluso aplicando una tasa de descuento relativamente alta, el proyecto todavía genera un valor presente neto positivo, lo que sugiere una posible viabilidad financiera. Sin embargo, es importante analizar el impacto de la TIR del 4% en comparación con la tasa de descuento del 15% lo que indica que el proyecto podría no cumplir con las expectativas de rendimiento en relación con el costo de oportunidad de los fondos.

Una TIR menor que la tasa de descuento sugiere precaución y puede indicar que hay proyectos alternativos más atractivos. Por esta razón, se puede plantear que este valor de la TIR relativamente baja indica que podría haber preocupaciones sobre su rentabilidad en comparación con el costo de oportunidad de los fondos. Es crucial evaluar cuidadosamente estos resultados en el contexto de la empresa y las condiciones del mercado y tener en cuenta cualquier riesgo adicional que pueda afectar la viabilidad a largo plazo del proyecto.

Disminución de emisiones

Entre los beneficios y ventajas ambientales que reporta la tecnología fotovoltaica podemos señalar las siguientes: no emite ruido en su funcionamiento; no tiene partes móviles; no necesita ser abastecida; no emite gases contaminantes en su etapa de explotación y; en caso de ser instalada en la cubierta de una edificación puede reducir la transferencia de calor hacia el interior, beneficiando la climatización de los locales y con ello el ahorro de energía por parte del equipamiento de clima. Estas características la convierten en una valiosa solución tecnológica reductiva de impactos ambientales. Cuando se consideran las pérdidas asociadas al sistema de generación y suministro energético centralizado, se puede afirmar que, por cada kWh de energía fotovoltaica suministrada en el modo distribuido de conexión directa a la red de baja tensión del edificio, se puede ahorrar más de 1 kWh de electricidad generada con fósiles, por lo que puede tener un valor agregado de reducción de impactos ambientales. Conociendo la productividad energética

de la central fotovoltaica que se propone, se puede estimar que en un año de generación la energía dejada de consumir se traduce en una reducción de gases de efecto invernadero asociados a la generación de energía con combustible fósil. Considerando un índice de emisiones para el CO₂ de 0,7 kg/ kWh se tiene un estimado de CO₂ que se dejaría de emitir, calculado por la ecuación (17) como:

$$346\ 400 \cdot 0,7 = 242\ 480 \frac{\text{kg}}{\text{año}} = 242,5 \frac{\text{t}}{\text{año}} \quad (17)$$

CONCLUSIONES

En el sector agropecuario se aprecia una tendencia creciente al uso de fuentes renovables de energía, especialmente de la energía solar fotovoltaica, debido a las ventajas que ofrece y especialmente a la disminución de costos e impacto ambiental.

Una muestra de ello es el ahorro potencial que se consigue con el empleo de estos sistemas lo que se demostró con la propuesta de un sistema fotovoltaico conectado a red, para la Empresa Agropecuaria Horquita de la provincia de Cienfuegos. El generador propuesto tiene una capacidad de 273 kWp, a partir de 1014 paneles de 270 Wp conectados a 13 inversores de 20 kW estimando que pueda proveer a esta empresa de 1 MWh/día aproximadamente.

La producción energética potencial del sistema diseñado se verificó mediante simulación con el software profesional PVSyst 7.1 comprobando que podrá generar 346 400 kWh/año aproximadamente, lo que representa una disminución en la facturación de energía de 640 840 CUP/año. Queda demostrado que para las condiciones actuales de Cuba este tipo de solución es viable económicamente con un VPN de 1 706 752 CUP y un periodo de recuperación de 8 años.

Por otro lado, en este caso existe un beneficio ambiental por la reducción potencial de emisiones de 242,5 t de CO₂/año. Esto constituye un beneficio adicional de esta propuesta coadyuvando a la mitigación del impacto ambiental asociado a la producción y uso de la energía eléctrica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agronet MinAgricultura. (10 de noviembre de 2022). *Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario Colombiano*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/El-futuro-de-la-Energ%C3%ADa-en-Agricultura.aspx>

Álvarez, P. E. (2020). *Energía y Cambio Climático*. Real Academia de Ingeniería. https://issuu.com/raing/docs/energ_a_y_cambio_clim_tico_format

Becerra, F. (2018). *Diseño de una central fotovoltaica de 50 MW conectada a red en la provincia de Badajoz*. Trabajo Fin de Máster Inédito, Universidad de Sevilla, Sevilla. <https://idus.us.es/handle/11441/85994>

Domínguez, A., Jaúregui, S., & Beltran, J. (2019). Sistema fotovoltaico conectado a la red para alimentar la división territorial Copextel Cienfuegos. Anteproyecto y Simulación. *CentroAzúcar*, 46(4). http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/14

Fraga, I., Gómez, M. A., Gómez, J. R., & Zaid, G. (2023). Predicción de la generación fotovoltaica usando Deep Learning. *Revista Universidad y Sociedad*, 15(S1), 266-275. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/3718>

Gómez, J. R. (2021). Instalación de sistema fotovoltaico en un almacén de cítrico en el puerto de Cienfuegos, Cuba. *LADEE*, 2(1), 33-43. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8487253>

Gómez, M. A., Gómez, J. R., Lorenzo, J. V., Fonte, R., & García, Z. (2021). Pronóstico de la generación eléctrica de sistemas fotovoltaicos. Un inicio en Cuba desde la universidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(1), 253-265. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000100253

PL (Prensa Latina). (22 de agosto de 2022). Electricidad y Agricultura como fórmula significativa en Cuba. Granma.

Rodríguez, f., Ruíz, A., & Valiente, D. (2022). Apuntes sobre energía fotovoltaica. Alicante, España: Universidad Miguel Hernández. <https://library.pit.edu/proquest/EBC30293467>

Stolik, D. (2019). Energía fotovoltaica para Cuba. Cubasolar. <https://isbn.cloud/9789597113591/energia-fotovoltaica-para-cuba/>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores

Intelectual, metodológico y aplicativo: Julio R. Gómez Sarduy; Isidro Fraga Hurtado

Análisis formal y curación de datos: Zaid García Sánchez; Yulier Ortuño Borroto