ANTEPROYECTO DE SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO PARA CAYO CARENAS. VENTAJAS ENERGÉTICAS Y ECONÓMICAS

Por Dr. C. **José Pedro Monteagudo Yanes***, M. Sc. **Reinier Jiménez Borges**** y M. Sc. **Yoisdel Castillo Álvarez*****

* Facultad de Ingeniería. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos, Cuba.
https://orcid.org/0000-0001-7234-7853
E-mail: jpmyanes@ucf.edu.cu ; monteagudojpy@gmail.com
** Facultad de Ingeniería. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos, Cuba.
https://orcid.org/0000-0002-3430-0322
E-mail: rjborges@ucf.edu.cu; rjimenezborges@gmail.com
*** Universidad Tecnológica del Perú.
https://orcid.org/0000-0001-8105-6206
E-mail: c19773@utp.edu.pe

Resumen

El artículo aborda el anteproyecto de un sistema solar fotovoltaico para satisfacer las necesidades de energía eléctrica a los residentes en Cayo Carenas, islote ubicado en el seno de la bahía de Cienfuegos, Cuba. En la actualidad los requerimientos de energía eléctrica son cubiertos por una planta diésel de 10 kW de potencia para la generación eléctrica con un uso promedio de 9 horas/día y un consumo anual de combustible diésel cercano a los 10 000 litros. Por indicaciones de la entidad financiadora, el parque se concibe con una potencia de 16 kWp, utilizando módulos DSM 270, el inversor Sunny Tripower 25000T y baterías para el suministro eléctrico en horas nocturnas. Queda organizado con 60 paneles en 6 cadenas de 10 paneles cada una, dividida en 2 ramas. El parque ocupa un área máxima de 200 m2. La evaluación económica muestra una inversión inicial de 691 200,00 $ CUP (pesos cubanos), un VAN de 1 244 000 $ CUP; un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de cinco años y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 15 %, para una vida útil de 20 años, por lo que resulta una inversión atractiva.

Palabras clave: *sistema solar fotovoltaico; sistema fotovoltaico aislado; energía eléctrica, módulo fotovoltaico; inversor.*

PRELIMINARY PROJECT OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR SYSTEM FOR CAYO CARENAS. ENERGY AND ECONOMIC ADVANTAGES

Abstract

The article deals with the preliminary design of a solar photovoltaic system to meet the electricity needs of the residents of Cayo Carenas, an islet located in the bay of Cienfuegos, Cuba. At present, the electrical energy requirements are covered by a 10 kW diesel power plant for electricity generation with an average use of 9 hours/day and an annual consumption of diesel fuel close to 10 000 liters. According to the indications of the financing entity, the farm is designed with a power of 16 kWp, using DSM 270 modules, the Sunny Tripower 25000T inverter and batteries for power supply at night. It is organized with 60 panels in 6 strings of 10 panels each, divided into 2 branches. The park occupies a maximum area of 200m2. The economic evaluation shows an initial investment of 691,200.00 $ CUP (Cuban Pesos), an NPV of 1,244,000 $ CUP; an Investment Recovery Period (IRP) of 5 years and an Internal Rate of Return (IRR) of 15%, for a useful life of 20 years, making it an attractive investment.

Keywords: *solar photovoltaic system; isolated photovoltaic system; electric power, photovoltaic module; inverter.*

1. Introducción

El suministro de energía eléctrica a Cayo Carenas mediante una línea de transmisión eléctrica a través de la bahía de forma aérea o subacuática; es un proyecto económicamente inviable. Por ello, la decisión tomada hace unos años consistió en la instalación de una planta diésel de 10 kW de potencia para la generación eléctrica, con un consumo cercano a los 10 000 litros de combustible diésel al año, que una embarcación entrega mensualmente al cayo.

Los elevados precios del combustible diésel hoy obligan a considerar como posible solución el montaje de un sistema solar fotovoltaico aislado para el suministro de energía eléctrica (globalpetrolprices.com/Cuba/diesel_prices, 2021).

El número creciente de sistemas instalados por año, de acuerdo con Stolik (2019) muestra que es una tecnología segura y confiable con ritmos de crecimientos superiores al 40 % anual. Estos sistemas se instalan hoy en los más diversos sitios en países desarrollados, pasando desde las ubicaciones en zonas remotas, zonas residenciales entre otras (Ottavianelli *et al.*, 2013; Eyras *et al.*, 2016; Nogales *et al*., 2018).

Cuba es favorecida por el sol recibiendo 5 kWh/m² equivalentes a ½ kg de petróleo en días soleados a lo largo de todo el año. Es por ello que hoy los sistemas de generación eléctrica por sistemas solares fotovoltaicos aislados son una realidad (Energìas Renovables, 2024). El 95 % del territorio nacional está electrificado, manteniendo alrededor de 350 consultorios médicos en zonas remotas con sistemas solares fotovoltaicos de 400 Watts a 425 Watts para el suministro de energía eléctrica a lámparas, equipos de radio, refrigeradores para la conservación de vacunas y medicamentos, televisores, electrocardiógrafos y otros equipos con un adecuado comportamiento. Además, se han iniciado los trabajos para la electrificación de 2200 escuelas en zonas rurales remotas (Energìas Renovables, 2024), existiendo experiencias en la evaluación y simulación de dichos sistemas para diferentes condiciones (Hernández Morales *et al.*, 2020; Rodríguez Chávez *et al.*, 2023; Borges *et al.*, 2022). En la actualidad existen numerosas herramientas computacionales aplicadas a la evaluación de los sistemas solares fotovoltaicos, cada una con sus alcances y limitaciones (Iturralde *et al.*, 2022; Iturralde *et al.*, 2024; Monteagudo-Yanes & Jiménez-Borges, 2023; Álvarez *et al.*, 2022). Sin embargo, el poder desarrollar de manera analítica el dimensionamiento de un Sistema Solar Fotovoltaico (SSFV) posibilita a técnicos de organizaciones y otro tipo de personal las vías para hacerlo cuando no se poseen softwares similares. La evaluación de la factibilidad energética y económica de este anteproyecto, permite considerarlo como una posible solución para el suministro de energía eléctrica al lugar.

2. Materiales y métodos

Como punto de partida del estudio, se encuentra la posibilidad de estudiar la utilización de las Fuentes Renovables de Energía (FRE) en la comunidad de Cayo Carenas, pequeño islote situado en el interior y muy próximo a la entrada de la bahía de Cienfuegos. Esto con el objetivo de reducir los consumos de combustibles fósiles utilizados hoy en una planta diésel destinada al suministro de energía eléctrica a la comunidad de residentes en el lugar y poder garantizar el servicio eléctrico las 24 horas del día. De las posibles fuentes renovables a utilizar se consideró que la de mayor facilidad para la instalación y puesta en funcionamiento es la energía solar fotovoltaica.

2.1 Características del sitio

Cayo Carenas, es el único islote habitado en medio de la Bahía de Cienfuegos en la República de Cuba (ver figura 1). Tiene una longitud máxima de 700 m y un ancho máximo de 250 m, ocupando un área cercana a 25 hectáreas. La altura de tierra como valor medio es de 10 m sobre el nivel de mar. Posee una veintena de viviendas donde residen unas 29 personas. La actividad económica fundamental es la pesca y en él se encuentra un importante sitio arqueológico aborigen de agricultores ceramistas (Periódico Trabajadores, 2021).

El islote satisface sus necesidades energéticas por medio de un grupo electrógeno de 10 kW de potencia. La instalación funciona un máximo de 9 hora/día y está prevista para un suministro de energía de 90 kWh/día.

Fig. 1. Vista del islote Cayo Carenas en la provincia de Cienfuegos. Fuente (Periódico Trabajadores, 2021).

2.2 Características del módulo solar fotovoltaico e inversor

En el momento de la realización del estudio, el módulo solar fotovoltaico disponible era el DSM 270 producido por la Empresa de Componentes Electrónicos "Ernesto Che Guevara" ubicada en la provincia de Pinar del Rio. Cuba. Se decidió usar dicho módulo y los parámetros técnicos están dados en la tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del módulo DSM 270

Especificaciones técnicas	
Celda	Celda Solar de Silicio Multicristalino 156.75x 156.75 (mm)
No. de celdas y conexiones	60 (6X10)
Dimensiones del módulo	1650x990x40 (mm)
Cubierta frontal	Vidrio templado
Material del marco	Aleación de aluminio anodizado
Peso	18,1 kg
Características eléctricas	
Modelo	DSM-270
Voltaje a circuito abierto (Voc) [V]	38,0
Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp) [V]	32,1
Corriente de corto circuito (Isc) [A]	9,11
Corriente en el punto de máxima potencia (Imp) [A]	8,42
Potencia máxima a STC (Pm) [Wp]	270
Tolerancia [%]	±3
STC: 1000 W/m2, 250C, AM 1.5	

Los datos técnicos del inversor a utilizar están dados en la tabla 2 y han sido suministrados por la filial en Cienfuegos de la Empresa Copextel S.A.

Dada las dimensiones del módulo DSM 270 se procede al cálculo básico del sistema solar fotovoltaico. El proceso de cálculo y los resultados están dados en la tabla 2. Para el desarrollo de los cálculos se hizo uso de la figura 2.

Tabla 2. Datos técnicos generales del inversor *Sunny Tripower* 25000TL

Entrada de CC	
Potencia de CC máxima a cos $\phi = 1$	25 550 (W)
Tensión de entrada máxima	1000 (V)
Rango de tensión del MPP	De 390 a 800 (V)
Corriente de cortocircuito máxima por string*	43 (A)
Corriente inversa máxima en la planta durante un máximo de 1 s	0 (A)
Número de entradas del MPP independientes	2
Strings por entrada del MPP	3
Categoría de sobretensión según IEC 62109-1	II
Salida de CA	
Potencia asignada a 230 V, 50 Hz	25 000 (W)
Potencia aparente de CA máxima	25 000 (VA)
Tensión de red asignada	230 (V)
Tensión nominal de CA	220 / 230 / 240 (V)
Rango de tensión de CA*	De 180 a 280 (V)
Corriente nominal de CA a 230 V	36 ,2 (A)
Corriente de salida máxima	36 ,2 (A)
Corriente de salida máxima en caso de fallo	50 (A)

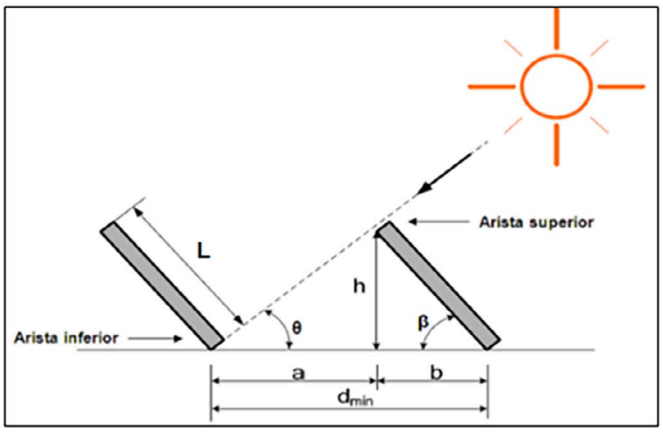

Fig. 2. Distancia entre paneles y ángulos de inclinación respecto a la posición del sol (Díaz, Castro, Santos, & Vilaragut, 2018).

3. Resultados

La secuencia para el cálculo del sistema solar fotovoltaico agrupa elementos de cálculos tomados de varios autores como Escoda (Salvador Escoda S.A., 2018); curso de capacitación de la Unesco (UNESCO, 2003) y esta última revisada, corregida y aumentada por Monteagudo y Jiménez (Monteagudo & Jiménez, 2019).

El método de cálculo, las ecuaciones usadas y los resultados obtenidos, son dados en la tabla 3.

La distribución aproximada y dimensiones del pequeño parque solar fotovoltaico están dados en la figura 3.

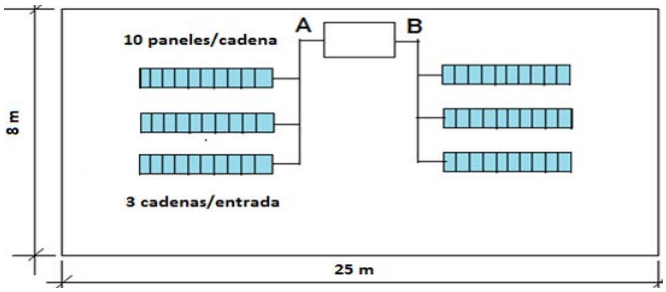

Fig. 3. Distribución de cadenas y paneles en propuesta del parque solar fotovoltaico de Cayo Carena (Fuente: Autores).

Tabla 3. Secuencia del cálculo del sistema solar fotovoltaico de cayo Carenas. Fuente: (UNESCO, 2003) (Salvador Escoda S.A., 2018); (Monteagudo & Jiménez, 2019)

Nº	Parámetro (Unidad)	Ecuación	Magnitud	Observaciones
1	Selección del panel fotovoltaico.	(sin ecuación) (s/e)	Tabla 1	Recomendación del fabricante. Cuba. Dimensiones en la tabla 1
2	Ángulo de inclinación del panel (β	s/e	Figura 1	El ángulo (β)=Latitud del lugar. Para Cienfuegos β=22°. La Unión Eléctrica en Cuba considera β=15°. En los cálculos se usó β=22°. (Díaz, Castro, Santos, & Vilaragut, 2018)
3	Cálculo de la componente de la altura (h) del panel (m)	h = L* sen β	0,62	
4	Cálculo de la distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo medido horizontalmente. (b) (m)	b= L*cos β	1,53	
5	Cálculo del ángulo de incidencia del rayo solar respecto a tierra (β (Grados)	θ=180-90-β	68°	
6	Cálculo distancia entre borde superior panel anterior y borde inferior panel posterior (a) (m)	a= h/tg. θ	0,25	Se toma de 0,5 m. Sirve de pasillo para limpieza y mantenimiento
7	Cálculo de la distancia mínima entre paneles (dmin) (m)	dmin= a+b	1,78	Se considerará dmin=2,00 m para el montaje del sistema
8	Potencia instalada en el parque (Pinst) (kWp)	(s/e) Es dato para el cálculo	16	Potencia solicitada por directivos para la instalación
9	Cálculo del número máximo de paneles	N=[Pinst/(Pn/1000)]+1	59,25 (60)	Pn.- Potencia nominal del panel FV. (270 W/panel).
11	Cálculo de la energía generada. (Eu.) Energía útil generada (kWh/día)	Eu=0,654*HSP*Pn*N	59,33	Eu. - Energía útil generada (kWh/día); 0,654. Factor (rendimientos y suciedad); HSP. - Hora Solar Pico. (Cienfuegos 5,6); Pn.- Potencia nominal del panel. (kW/panel) N.- Número de paneles
12	Cálculo de la potencia instalada. (Pinst.) (KWp)	Pinst.=N*(Pn/1000)	16,2 kWp	Para el cálculo se toma 16 kWp
13	Cálculo de la Potencia del Inversor. (PI) (kW)	PI = (80-120) %* Pinst.	12,8 -19,2 kW	Se selecciona el inversor Sunny Tripower 25000TL. Sus parámetros técnicos están dados en la tabla 2
14	Nº módulos de la cadena (Nm)	Nm = Vmax. Inv./Volt. Abierto módulo Nm=1000/38=26	25	
15	Nº módulos mínimos de la cadena (Nmm)	Nmm=Volt min. Inv./Volt. Punto máx. Pot. a máx. temp. Nmm= 150/32.1=4.67	5	
16	Nº cadena conectada al inversor. (Nc)	Nc=Imax. Inv/Inom cadena Nc=33/8,42= 3,91	3	Se considera el valor de 3 por el número de cadenas por entrada establecidas por el fabricante. Ver Tabla 3
17	Cálculo del número de inversores.	Nº de Inversores=Pot. Demandada/Pot. Inversor Nº de inv.= 16/25=0,64	0,64	Inversor a usar el Sunny Tripower 25000TL.Ver tabla 2

3.1. Evaluación económica

La evaluación económica realizada es solo para una propuesta aproximada previa, tomando en consideración los precios dados en la bibliografía existente al respecto y reflejada en los pasos del cálculo económico.

El costo del sistema solar fotovoltaico, considerando en ello el panel, inversores y otros equipos necesarios está dado por Stolik (Stolik, 2019). Se toma como criterio de costo del sistema solar fotovoltaico un valor medio alto de 1800,00 $USD/kWp. Para una potencia de 16 kWp, el costo de la inversión será de 28 800,00 $USD, equivalente al cambio monetario en la fecha del trabajo de 24 $CUP/$USD a 691 200,00 $CUP. Este será el monto de la inversión inicial a realizar. Toda la evaluación será realizada en CUP.

Para la formación del precio de costo del sistema solar fotovoltaico de 1800,00 $USD/kWp se tomaron en consideración criterios de (Europe-solar, 2021) que plantean:

Costo de las baterías:

- Para baterías de Plomo 200 $USD/kWh
- Para baterías de Litio 450 $USD/kWh – 500 $USD/kWh

En opinión de especialistas y del sitio citado, las baterías de plomo con mantenimiento adecuado pueden operar de 10 a 15 años y tienen un menor valor inicial. Las baterías de Litio para operar en un clima como el existente en el cayo necesitan además de climatización, lo cual encarecería el sistema.

Los costos de los SSFV sin batería se encuentran en el rango de 900 $USD/kWp -1000 $USD/kWp (Europe-solar, 2021).

Para los ingresos del proyecto se consideró:

- El ahorro de combustible al no usar el grupo electrógeno.
- El cobro de la energía eléctrica suministrada a los usuarios.

Los ingresos por concepto de ahorro de combustible están dados en la ecuación 1.

$$G_{comb} = E_{gelec} * 365\ dia/año * g_{esp\ gelec} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

$E_{gelec.}$.- Energía eléctrica generada por el grupo electrógeno.

$g_{esp\ glec}$.- Consumo específico del grupo electrógeno. Se consideró el valor correspondiente a uno de los equipos más modernos (0,236 kg/kWh) al no tener el valor real del equipo en funcionamiento.

Sustituyendo valores en la ecuación 1

$$G_{comb} = \frac{90 \cancel{kWh}}{\cancel{día}} * 365 \frac{\cancel{día}}{año} * \frac{0{,}236 kg}{\cancel{kWh}} = 7\ 752{,}6 \frac{kg}{año}$$

Considerando el valor de la densidad del diésel ($\rho_{diésel}$) de 850 kg/m³ el flujo volumétrico de diésel es de 9120,0 litros/año.

El valor del litro de diésel para Cuba dado en la página web del sitio (globalpetrolprices.com/Cuba/diesel_prices, 2021) es:

1 litro = 1 $ USD; 0,831 €

El ingreso por ahorro de combustible en CUP es:

Ingreso ahorro diésel = 9120,0 ~~litros~~*1 ~~$USD~~/~~litro~~* 24 $CUP~~/$USD~~ = 218 880,00 $CUP

Los ingresos por concepto de pago de energía eléctrica de los usuarios se calcularon tomando como base el precio de 0,85 $ CUP/kWh, correspondiente a un consumo medio facturado de 200 kWh/mes, lo que equivale al pago de 170 $ CUP/mes. Por este concepto el pago anual del total de usuarios será de 34 680,00 $ CUP/año.

El ingreso total por ambos conceptos es de:

Ingresos totales anuales = 218 880,00 + 34 680,00 = 253 560 ($CUP)

La evaluación económica considerando las cuestiones antes expuestas queda representada en la figura 4.

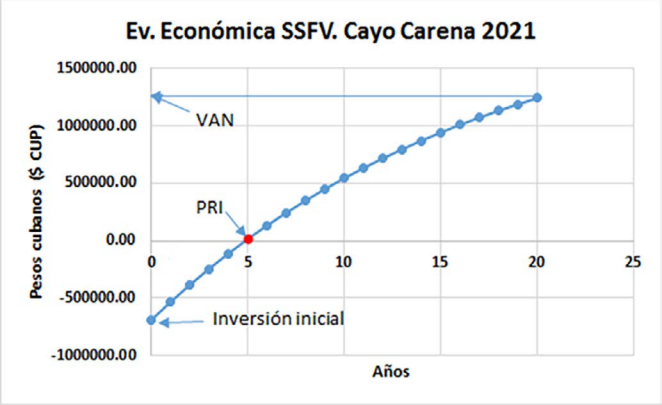

Fig. 4. Resumen de la evaluación económica.

4. Conclusiones

El sistema solar fotovoltaico dimensionado para Cayo Carenas presenta una potencia instalada de 16 kW con una capacidad anual de generación de energía de 21 600,00 kWh. Para dicho sistema es seleccionado el módulo DSM 270 de producción nacional y el inversor Sunny Tripower 25000TL dada las facilidades comerciales de las empresas suministradoras nacionales.

Dicho sistema cuenta con 60 paneles en 6 cadenas de 10 paneles cada una dividida en 2 ramas con dimensiones máximas de 25 por 8 m para un área total de 200 m². Con esta propuesta se puede prescindir del suministro de 9 120,0 litros/año de combustible diésel a Cayo Carena lo que representa a los precios actuales un gasto de 218 880,00 $CUP/año.

El suministro de energía eléctrica a los habitantes del cayo, debe aportar a la Unión Eléctrica un ingreso anual de 34 680,00 $ CUP por pago del servicio eléctrico. La evaluación económica para el sistema resulta atractiva y muestra

una inversión inicial de 691 200,00 $ CUP; un VAN de 1 244 000 $ CUP; un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de 5 años y una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 15%, para una vida útil de 20 años.

5. Referencias bibliográficas

Álvarez González, A. L., Iturralde Carrera, L. A., Jiménez Borges, R., Monteagudo Yanes, J. P., & Gómez Muñoz, M. (2022). Potencialidades de generación fotovoltaica sobre cubiertas de edificaciones en una instalación hotelera. Revista Universidad y Sociedad, 14(3), 565-573.

Borges, R. J., González, A. L. Á., & Yanes, J. P. M. (2022). Ventajas de la generación fotovoltaica en el Parque Tecnológico Universitario. Eco Solar, (80), 18-23.

Colectivo de autores- Bajo la redacciòn de Borroto, A., & Monteagudo, J. (2006). *Gestión y Economía Energètica*. Cienfuegos: Universo Sur.

Díaz, R., Castro, M., Santos, A., & Vilaragut, M. (2018). Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica. *Revista de Ingeniería Energética, 2018, vol. 39, n. 3, septiembre /diciembre.*, 146-156 .

Empresa Comandante Ernesto Guevara. Pinar del Rio. (2024).

Energìas Renovables. (7 de 2 de 2024). *https://www energìas renovables.com*. Obtenido de https://www energías renovables.com

Europe-solar. (17 de 5 de 2021). *Europe-solar*. Obtenido de Europe-solar store: www.europe-solar store.com

globalpetrolprices.com/Cuba/diesel_prices. (2021, 05 13). globalpetrolprices.com. Retrieved from globalpetrolprices.com/Cuba/diesel_prices: https://es.globalpetrolprices.com/Cuba/diesel_prices/

IRENA. (2015). IRENA Renovable Cost Database. --.

Monteagudo, J., & Jiménez, R. (2019). *Dimensionamiento de Sistema Solar Fotovoltaico.* Cienfuegos. Cuba. : CEEMA. Facultad de Ingeniería Universidad de Cienfuegos.

Periódico Trabajadores. (29 de Enero de 2021). *https://www.trabajadores-cu/*. Obtenido de https://www.trabajadores.cu/20210129/cayo-carenas-la-llave-de-la-bahia-de-cienfuegos-fotos/

PVsyst Professional. (-- de -- de 2022). *PVsyst Professional*. Obtenido de ---: https://PVsyst Professional.com

Salvador Escoda S.A. (2018). *Libro Blanco de las Energìas Renovables*. Ediciòn 18,1. Barcelona: Salvador Escoda. Disponible en www.salvadorescoda.com.

Stolik, D. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba*. La Habana: Ed. Cubasolar. ISBN: 978-959-7113-59-1.

Unesco . (2003). *Curso de entrenamiento en energía solar.* Puerto Ayora Galápagos: Unesco.

Unesco. (2003).

Wikipedia.org. (-- de -- de 2023). *https://es.wikipedia.org/wiki/Cayo_Carenas*. Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Cayo_Carenas.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de los autores: José Pedro Monteagudo Yanes. Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción-borrador original y Redacción-revisión y edición; Reinier Jiménez Borges. Investigación, Metodología, Supervisión, Redacción-revisión y edición. Yoisdel Castillo Álvarez. Curación de datos, Redacción-revisión y edición.

Recibido: 12 de diciembre de 2024
Aceptado: 30 de diciembre de 2024