

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”
Facultad de Ingeniería Mecánica.



**Prefactibilidad técnico-económica de celdas
fotovoltaicas en las cubiertas del Hotel Pasacaballo.**

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Por:

Autor: Javier Antonio Figueredo López

Tutores: Dr.C Enrique Arturo Padrón Padrón

Dr.C. José P. Monteagudo Yanes.

Cienfuegos, 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Arturo Padrón Padrón por su colaboración, experiencia e interés presentado en la realización de este trabajo. Un agradecimiento especial a todo el claustro de maestros maravillosos que hemos tenido a lo largo de toda la carrera, por todo lo que nos han enseñado.

A todos y todas las personas que pusieron su granito de arena en la investigación y realización de la presente tesis.

En general a todas esas personas que hicieron posible este resultado.

DEDICATORIA

A mis padres, por la educación que me han dado, siendo ejemplos a seguir para mí, brindándome siempre su apoyo incondicional y guiarme por el camino correcto.

A mi hermana, a mis abuelos Mima y Pipo, a mis tíos Arminda y Omar y mi prima Laura, a mi querida novia, por estar siempre a mí lado ayudándome y alentándome a seguir adelante.

SINTESIS

El presente trabajo abordó el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red con el objetivo de reducir el consumo de electricidad en el Hotel Pasacaballos de Cienfuegos.

Para lograr los objetivos propuestos se realizó un estudio de prefactibilidad técnico-económico, consultando el material bibliográfico existente sobre el tema, analizando conceptos fundamentales, tipos de tecnologías, componentes que integran el sistema fotovoltaico conectado a la red, ventajas y desventajas; además, se citaron ejemplos puntuales de la utilización de esta tecnología. Con el desarrollo de este proyecto se demostró que es posible instalar 357 paneles solares de 270 Wp y 4 inversores de 25 kW, dando una potencia instalada total de 96,4 kWp en las áreas disponibles de las cubiertas del Hotel. Se simuló el sistema fotovoltaico utilizando el programa profesional PVsyst, resultando una generación de 150 496 kWh/año representando esta el 11,85 % de la energía consumida en un año, lo que representa un ahorro de 35 607 CUC. También se realizó un estudio económico previendo una futura implementación; el análisis medioambiental arrojó que con esta instalación se ahorran 35,51 t/año de combustible dejado de quemar para producir la misma cantidad de energía y 113,24 t/año de dióxido de carbono no emitido a la atmósfera.

Palabras Claves:

PANELES, ENERGÍA, FUENTES RENOVABLES, RADIACIÓN.

Summary

The present work dealt with the design of a photovoltaic system connected to the grid with the aim of reducing electricity consumption in the Pasacaballos Hotel in Cienfuegos.

To achieve the proposed objectives, a technical-economic pre-feasibility study was carried out, consulting the existing bibliographic material on the subject, analyzing fundamental concepts, types of technologies, components that make up the photovoltaic system connected to the network, advantages and disadvantages; in addition, specific examples of the use of this technology were cited. With the development of this project it was demonstrated that it is possible to install 357 solar panels of 270 Wp and 4 inverters of 25 kW, giving a total installed power of 96,4 kWp in the available areas of the Hotel roofs. The photovoltaic system was simulated using the professional PVsyst program, resulting in a generation of 150 496 kWh/year, representing 11,85% of the energy consumed in one year, which represents a saving of 35 607 CUC. An economic study was also carried out, anticipating a future implementation; the environmental analysis showed that this installation saves 35,51 t/year of fuel left to burn to produce the same amount of energy and 113,24 t/year of carbon dioxide not emitted into the atmosphere.

Key Words:

PANELS, ENERGY, RENEWABLE SOURCES, RADIATION.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
Capítulo I: Tendencias en el consumo energético mundial y nacional. Usos del sistema solar fotovoltaico.	12
1.1. Consumo energético mundial.....	12
1.2. Consumo energético en Cuba.....	15
1.3. Energía fotovoltaica en Cienfuegos	17
1.4. Sistema solar fotovoltaico.	18
1.4.1. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red	18
Capítulo II: Caracterización energética del Hotel Pasacaballos y dimensionamiento preliminar del sistema solar fotovoltaico.....	23
2.1. Caracterización del Hotel Pasacaballo.....	23
2.1.1. Característica constructiva del Hotel	24
2.1.2. Revisión Energética del Hotel Pasacaballo.	24
2.2. Definición de las áreas para el montaje del sistema fotovoltaico.	25
2.3. Radiación solar en Cuba.....	26
2.4. Caracterización de los vientos	27
2.5. Selección del módulo fotovoltaico.	28
2.6. Selección del soporte del módulo fotovoltaico	28
2.7. Orientación de los paneles.....	30
2.8. Inclinação de los paneles	30
2.9. Distancia mínima entre filas de los módulos fotovoltaicos	31
2.10. Selección del inversor	32
2.11. Cálculo del número de inversores.....	32
Capítulo III: Cálculos del sistema solar fotovoltaico. Resultados obtenidos en el software PVsyst.....	35
3.1. Información general del software.	35
3.2. Resumen de los datos para la simulación.....	35

3.3. Resultados de la simulación en el área uno.....	37
3.4. Resultados de la simulación en el área dos.	40
Capitulo IV: Análisis económico y medioambiental.	45
4.1. Evaluación económica.....	45
4.2. Análisis y aporte medio ambiental.	49
Conclusiones.....	53
Referencia Bibliográfica.	57

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En buena medida, la historia de los humanos está presidida por la búsqueda y el control de las fuentes de energía que alimentan a sus sociedades. Los cambios de una fuente a otra, generalmente provocados por el agotamiento de la anterior, han estado marcados por periodos de crisis, que no han ahorrado situaciones dramáticas. En la actualidad, el escenario está dominado por el previsible agotamiento de los combustibles fósiles, que constituyen el 80% de la base energética mundial, por fuertes discrepancias en torno al uso de la energía nuclear, que ha frustrado bastantes expectativas como consecuencia de accidentes y residuos; y por una creciente preocupación por el cambio climático asociado a las emisiones de dióxido de carbono (Laped, 2004).

Cada año, el Sol arroja sobre la Tierra cuatro mil veces más energías que la que se consume, lo que demuestra que esta fuente energética aún está infravalorada y sobre todo poco explotada en relación a sus posibilidades (Antony, Dürshner, & Remmers, 2005).

La energía solar se plantea como parte de una alternativa inagotable, respetuosa con el medio ambiente y de carácter democrático, en la medida en la que su fuente primaria está al alcance de todos por igual. El problema de su carestía, que se debe principalmente a las fuertes inversiones iniciales que requieren sus instalaciones. Pero las mencionadas dificultades del escenario energético actual hacen que, en términos relativos, y aun sin contemplar cambios tecnológicos revolucionarios, la energía solar resulte cada día más atractiva, como pone de manifiesto el fuerte y sostenido crecimiento de su mercado en los últimos años.

La optimización del consumo de energía eléctrica en Cuba ha sido una de las tareas fundamentales de la Revolución ya que no solo garantiza el incremento de la economía nacional, sino que propicia una mayor calidad de vida para nuestro pueblo. En los últimos años, ha surgido un creciente interés por aumentar la eficiencia en los procesos de generación, distribución y uso de la energía eléctrica, sobre todo si se tiene en cuenta que, con el desarrollo de las nuevas tecnologías, el aumento del precio de los barriles de petróleo y el recrudecimiento de las medidas impuestas por el bloqueo económico, en un

futuro cercano se incrementará el costo de este valioso recurso. Es interés del país diversificar la matriz energética.

En este sentido la dirección técnica de ISLAZUL tiene dentro de sus estrategias el uso de las fuentes renovables de energía a fin de disminuir los costos y aumentar la competitividad en el sector hotelero. Específicamente el presente trabajo está encaminado al estudio de perfectibilidad técnico-económica de la utilización de energía solar fotovoltaica en el Hotel Pasacaballo.

Problema de Investigación

El diseño y el estudio de perfectibilidad técnico-económica de un sistema de paneles fotovoltaicos ubicados en las cubiertas del hotel Pasacaballo puede generar parte de la energía de su consumo anual.

Objetivo general.

Realizar un estudio de perfectibilidad técnico-económica para la utilización de un sistema de paneles fotovoltaicos ubicados en las cubiertas del hotel Pasacaballo.

Objetivos específicos.

- Estudiar el estado del arte de los sistemas solar fotovoltaicos conectados a la red
- Medir las áreas techadas del hotel
- Seleccionar las áreas efectivas para el montaje del sistema solar fotovoltaico, sin que interfieran sombras u otros obstáculos
- Seleccionar los paneles a utilizar
- Seleccionar el inversor a emplear
- Simular el sistema fotovoltaico en el software PVsyst
- Evaluar económicamente la instalación fotovoltaica
- Calcular los beneficios para el medio ambiente

Hipótesis de la Investigación

Un sistema de paneles fotovoltaicos ubicados en las cubiertas del Hotel Pasacaballo pudiera generar parte de la energía eléctrica que consume dicho hotel en horas del día.

Capítulo I

Capítulo I: Tendencias en el consumo energético mundial y nacional. Usos del sistema solar fotovoltaico.

1.1. Consumo energético mundial.

Según datos del anuario estadístico-energético del 2019 a nivel mundial, la distribución del uso de las energías primarias se comparte tal y como se muestra en la figura 1.1.

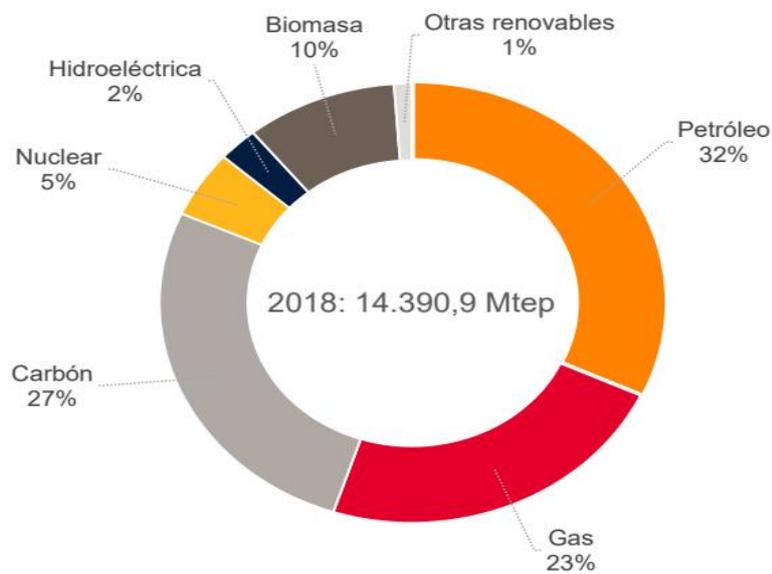


Figura 1.1. MIX de energía primaria. **Fuente:** (Anuario estadístico-energético , 2019).

Generación de electricidad por fuente:

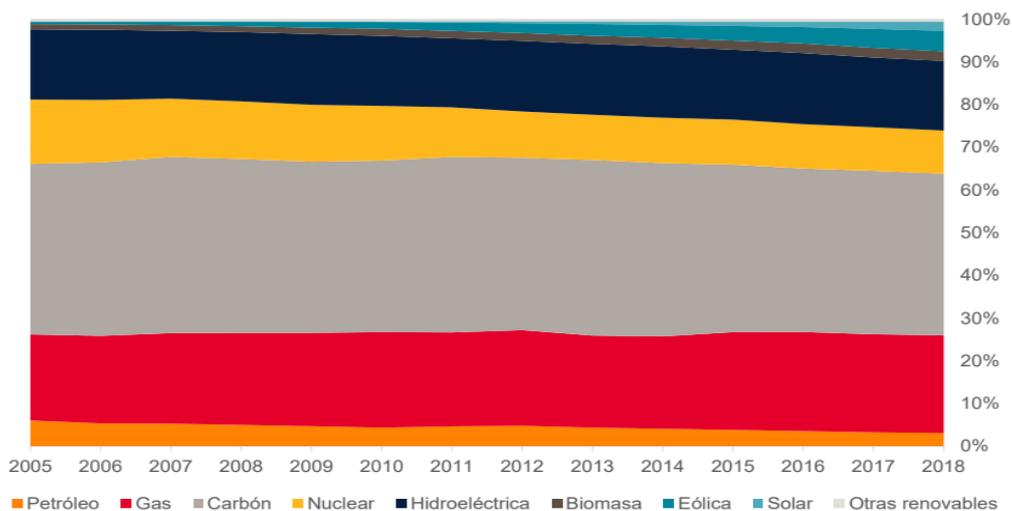


Figura 1.2. Generación de electricidad por fuente. **Fuente:** (Anuario estadístico-energético , 2019)

Como se muestra en la figura 1.3 las fuentes de energía fósil (carbón, gas, petróleo) comprenden 85,1 % de las energías primarias y 64,5 % de la electricidad; la mayor parte de la generación eléctrica mundial se basa en carbón y gas natural. (Stolik Novygrad, 2019)

Fuente	Primaria	Eléctrica
Carbón	27.6 %	38 %
Gas natural	23.3 %	23.1 %
Petróleo	34.2 %	3.4 %
Nuclear	4.4 %	10.3 %
Hidroenergía	6.8 %	15.9 %
Resto de las renovables	3.6 %	8.4 %

Figura 1.3. Por ciento de participación por fuentes en energías primarias y de electricidad en 2017. **Fuente:** (International Energy Agency (IEA), 2018).

El consumo eléctrico mundial se caracteriza por grandes diferencias entre los países; solo Estados Unidos, desde hace mucho tiempo, consume alrededor de 25 % del total mundial. Los países desarrollados consumen ochenta veces más que los subdesarrollados. (Stolik Novygrad, 2019)

El mundo se está viendo enfrentado a problemas energéticos, debido a la gran dependencia energética de la sociedad y su creciente consumo y al agotamiento de los combustibles fósiles. Frente a esta crisis ha surgido la necesidad de aprovechar de mejor forma los recursos energéticos disponibles, para esto se están diseñando dispositivos eléctricos y electrónicos de uso eficiente de la energía, se han realizado campañas que permitan crear conciencia en los usuarios. Por otro lado, se han ideado formas de aprovechar distintos tipos de energías naturales con el propósito de convertirlas en energía eléctrica, las que además cuentan con la ventaja de ser renovables, dentro de estas se encuentran, por ejemplo: la energía solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, biomasa, etc.

La energía solar está tomando impulso en grandes países como la India y los EE.UU., lo que predice un gran salto en la escena global. En los últimos años, los gobiernos de todo el mundo han aplicado medidas para fomentar el desarrollo de la energía solar en sus países, tanto a nivel doméstico como a nivel de red (utilizando incentivos de diversa índole). Sea cual sea el método, hay muchos

datos prometedores que sugieren que la energía solar va a ser un activo importante en la generación eléctrica a nivel mundial. (ecoinventos, 2018)

Un factor importante es la reducción de los costes de esta tecnología, cayendo un 73% entre 2010 y 2017 debido a la voluntad y el compromiso con la lucha contra el cambio climático, además, las energías renovables son vistas como la mejor solución para una población mundial que exige un acceso asequible a la electricidad al tiempo que una transición hacia un modelo más sostenible basado en las energías renovables. (Amador, 2018)

La instalación de grandes centrales fotovoltaicas en el mundo sigue en aumento tanto en número como en potencia instalada. Hay una instalación en la India que produce 1 000 MW. Sin embargo, en la actualidad se están construyendo centrales solares fotovoltaicas todavía mayores. En este sentido los países que lideran la producción de energía solar fotovoltaica son China (130,4 GW), Estados Unidos (85,3 GW) y Japón (63,3 GW).

De las principales instalaciones solares fotovoltaicas en el mundo se destacan:

El parque fotovoltaico Krnool Ultra Mega Solar se encuentra en la India. Ya es la planta fotovoltaica más grande del mundo, superando los 850 MW de la Longyangxia Solar Park en China. El parque ocupa una superficie de 2 400 hectáreas y está compuesto por más de 4 millones de paneles solares. Cada uno de estos paneles fotovoltaicos tiene una capacidad de 315 vatios. De este modo, la central fotovoltaica consigue generar alrededor de 8 GWh al día.

La planta solar de Longyangxia, situada en la provincia de Qinghai, en China. Utiliza la tecnología mixta hidro-solar. De este modo, se trata de la planta solar fotovoltaica más grande del mundo utilizando esta tecnología. Esta central eléctrica ocupa un total de 9,16 kilómetros cuadrados. Recientemente, China activó la planta solar flotante más grande del mundo.

Ejemplos de avances realizados con tecnología solar son:

El Solar Impulse 2 (Figura 1.4), un avión que dio la vuelta al mundo impulsado únicamente mediante energía solar fotovoltaica.

En Samoa hay una Isla entera que funciona con energía Solar y en la India, tienen un aeropuerto que cuya única fuente de energía es la fotovoltaica.



Figura 1.4. Avión Solar Impulse 2. **Fuente:** Google

1.2. Consumo energético en Cuba

La mayor de las Antillas se caracteriza por tener una radiación solar promedio de alrededor de más de 5 kWh/m² /día, por lo que al año se tiene por cada m² de superficie 1 825 kWh/m², con una variabilidad aproximada de $\pm 10\%$ a lo largo y ancho de la isla, aspecto muy positivo, a diferencia de otras latitudes mayores. La componente directa de la radiación está entre un 65% y 80%, siendo la componente difusa relativamente alta (Díaz Santos, Santos Fuentesfría, & Castro Fernández, 2017).

En el territorio cubano, se recibe una radiación solar equivalente a 50 millones de toneladas de petróleo cada día. O sea, la radiación solar que recibe Cuba en un solo día es mayor, en su valor energético, que todo el petróleo que se consume durante cinco años. Dicho de otra forma: en Cuba se recibe 1 800 veces más energía solar que el petróleo que consume. (del Moral Pelier & Sarmiento Sera, 2006).

Cuba es uno de los países del mundo que produce la mayor parte de su generación eléctrica quemando combustibles fósiles, con mayor proporción de petróleo crudo.

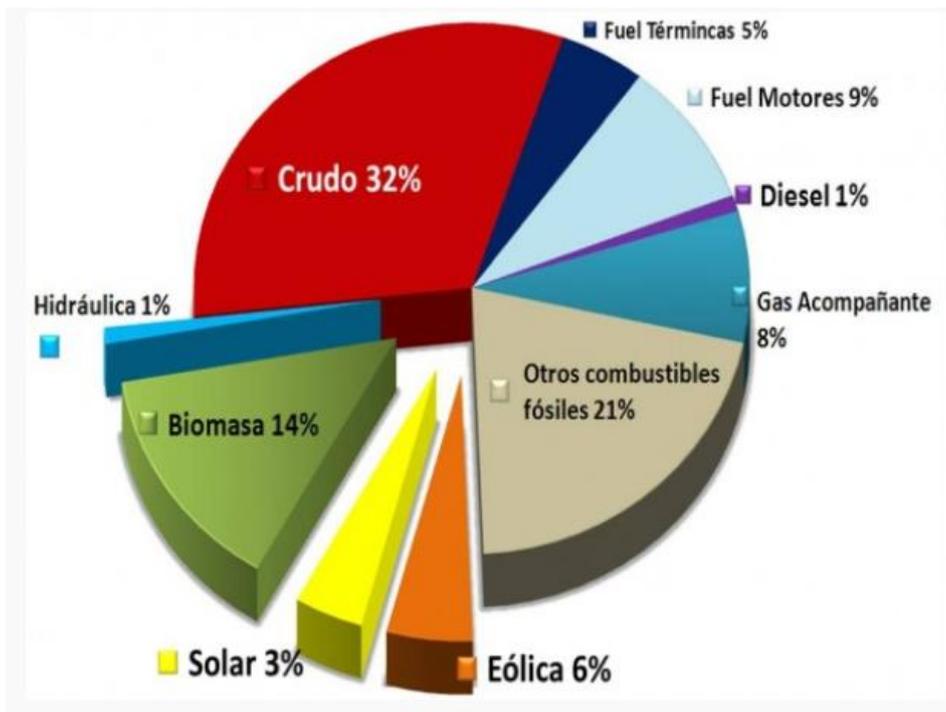


Figura 1.5. Generación eléctrica en Cuba. **Fuente:** (Cubadebate, 2019)

En el año 1992 se planteó textualmente: «Para no crear falsas expectativas, es importante recalcar que Cuba seguirá dependiendo, por muchos años, del petróleo para generar la mayor parte de la energía eléctrica que consume, es un verdadero lastre... De lo que se trata es de acortar, al máximo posible, ese número de años, paulatina y sostenidamente. El problema planteado es sumamente serio y se tratará, dentro de la mayor brevedad posible, argumentar los elementos que sustentan esta proposición». Hoy esta cita mantiene el argumento con plena vigencia. (Stolik, 1992)

Por aquella época, hace 25 años, la energía fotovoltaica tenía un alto costo, poca confianza y muchos detractores de ella. No obstante, con el transcurso del tiempo, se continuó actualizando y proponiendo variantes de programas de fotovoltaica para Cuba. Pasaron los años y hoy ha cambiado el escenario de criterios a favor de la fotovoltaica; desaparecieron casi todos los detractores y pesimistas de esta energía. La realidad ha demostrado que la energía fotovoltaica ha tenido un desarrollo espectacular, los costos han disminuido en forma casi increíble; lo mismo acontece con el aumento de la producción y las instalaciones de fotovoltaica a nivel mundial; los pronósticos se han venido constantemente sobrecumpliendo, por lo que la fotovoltaica llegó para quedarse.

1.3. Energía fotovoltaica en Cienfuegos

La provincia de Cienfuegos es pionera en la construcción y puesta en funcionamiento de las Centrales Eléctricas Fotovoltaicas (CEFV) en nuestro país (Radio Rebelde, 2019). En el año 2013 se realizó la construcción de la primera CEFV en el País, Cantarrana, llegando a tener en el territorio 6 CEFV al cierre del año 2018:

- CEFV Cantarrana (2,6 MWp)
- CEFV de Cruces (3 MWp)
- CEFV de Palmira (3,6 MWp)
- CEFV El Pino (2,2 MWp)
- CEFV Yaguaramas (5 MWp)
- CEFV Aguada (2,2 MWp)

Hoy la provincia cuenta con una potencia instalada en CEFV de 18,6 MWp, dichas CEFV generaron aproximadamente el 3,7 % del total de la energía que se consumió en la provincia, en el año 2019.

En el año 2019 se generó con 28 639,8 MWh contribuyendo a un ahorro de 8 431,6 t de combustible y dejándose de emitir a la atmósfera 24 515,7 t de CO₂.

En la tabla 1.1, se resumen todas las CEFV instaladas hasta la actualidad en Cienfuegos, y las principales características de ellas.

Tabla 1.1. CEFV en Cienfuegos. **Fuente:** Elaboración propia

Instalación	Total Paneles	Capacidad de los paneles (Wp)	Total de Inversores	Capacidad de cada inversor (kW)
Aguada	8800	265	4	500
Cruces	12000	250	3	900
El Pino	8800	250	2	1100
Palmira	14400	250	3	1100
Yaguarama	19440	260	10	500
Total	63440			

1.4. Sistema solar fotovoltaico.

El uso de sistemas fotovoltaicos para generación de electricidad es una práctica cada vez más común en el ámbito internacional. Durante los últimos 30 años el desarrollo tecnológico en este campo ha permitido una reducción de 95 % en el costo de los módulos fotovoltaicos comerciales, a la par de un incremento cercano al 200% en su eficiencia. (González, Jiménez, & Lagunas, 2003)

Según el tipo de instalación, de forma muy general, se puede distinguir entre instalaciones fotovoltaicas conectadas a red e instalaciones fotovoltaicas aisladas de red.

Las instalaciones fotovoltaicas aisladas pueden contar o no con sistemas de acumulación o baterías. Los sistemas sin acumulación habitualmente son bombeos directos. Las baterías en un 90% corresponden a las estacionarias del tipo Plomo-Ácido, que con un mantenimiento adecuado se adaptan perfectamente a los sistemas de generación. Se puede esta energía como tal o después transformarla a corriente alterna mediante un inversor.

1.4.1. Sistema solar fotovoltaico conectado a la red

Las instalaciones de energía solar fotovoltaica conectadas a la red eléctrica son instalaciones donde la energía generada se vierte directamente a la red eléctrica. Este tipo de instalación de energía solar funciona como si fuera una central de producción de electricidad. El consumo de electricidad es independiente de la energía generada por los paneles solares. (Solar E. , s.f.).

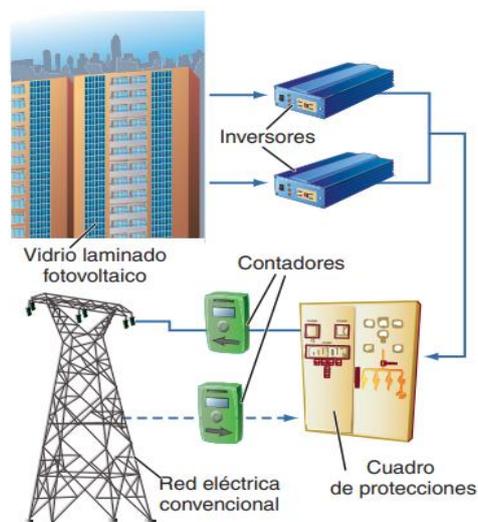


Figura 1.6. Instalación conectada a la red eléctrica. **Fuente:** (Solar E. , s.f.)

1.4.1.1. Componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red

Dentro de una instalación solar fotovoltaica existe varios dispositivos o equipos que se deben dimensionar para que sea posible la transformación de la radiación solar en energía eléctrica que se inyecta a la red:

- **Paneles solares.**

Los paneles solares o módulos fotovoltaicos están formados por la interconexión de células solares encapsuladas entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie, son las encargadas de captar la energía procedente del sol en forma de radiación solar y transformarla en energía eléctrica por el efecto fotovoltaico.

El material más comúnmente usado en la fabricación de los módulos fotovoltaicos es el silicio; la eficiencia típica de estos módulos en condiciones estándar de irradiancia y temperatura (i.e., 1 000 W/m², 25°C, AM 1.5) se encuentra entre 15 y 18% para silicio monocristalino, entre 12 y 14 %, para silicio policristalino; y entre 5 y 7 % para los de silicio amorfo.

En la figura 1.7. se observa los elementos que conforman un panel solar fotovoltaico.



Figura 1.7. Elementos de un panel fotovoltaico. **Fuente:** (Blanco Sardinero, 2018).

- **Estructura Soporte.**

Los módulos fotovoltaicos se colocarán sobre la denominada estructura soporte, dicha estructura soporte deberá cumplir las especificaciones de diseño de la instalación (orientación y ángulo de inclinación).

Ésta estructura soporte deberá resistir el peso de los módulos fotovoltaicos y las sobrecargas del viento (como mínimo velocidad del viento de 150 km/h) o inclemencias del tiempo, así como las posibles dilataciones térmicas provocadas por aumentos de temperatura en diferentes estaciones del año.

- **Inversor.**

Los paneles solares fotovoltaicos generan potencia a partir de la radiación solar que captan, esta potencia eléctrica no es alterna sino continua con unos valores de tensión y corriente continua que depende de la disposición de los paneles. El inversor es el equipo electrónico que permite inyectar en la red eléctrica comercial la energía producida por el generador fotovoltaico. Su función principal es convertir la corriente continua procedente de los paneles fotovoltaicos en corriente alterna.

Las instalaciones fotovoltaicas tienen un elevado costo y no pueden permitirse fallos e imprudencias en la explotación de estas instalaciones, por este motivo los inversores deben tener un alto rendimiento y fiabilidad. El rendimiento de los inversores oscila entre el 90% y el 97%, dicho rendimiento depende de la variación de la potencia de la instalación, por lo que se intentará que el inversor trabaje con potencias cercanas o iguales a la nominal, puesto que, si la potencia de entrada al inversor procedente de los paneles fotovoltaicos varía, el rendimiento disminuye. (Blanco Sardinero, 2018).

- **Protecciones.**

Además de las protecciones integradas en el inversor, es necesario equipar la instalación con protecciones adicionales que protejan tanto la seguridad de la instalación y equipos como la seguridad de las personas responsables de su funcionamiento y mantenimiento.

- **Puesta a tierra.**

La puesta a tierra de la instalación es muy importante ya que delimita la tensión que pueda presentarse en un momento dado en las masas metálicas de los componentes, asegurando la actuación de las protecciones y eliminando el riesgo que supone el mal funcionamiento o avería de alguno de los equipos. (Pérez, 2013)

- **Cableado de interconexión.**

Es el encargado de conectar los distintos paneles solares con las cajas de interconexión y con otra instrumentación. Este cableado de paneles se realizará con materiales de alta calidad para que se asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie. El cableado evidentemente tendrá que cumplir con el reglamento técnico de baja tensión. Las conexiones, cables, equipos y demás elementos tendrán que tener el grado de protección IP.535, concepto que se define en la norma UNE 20-234.

Conclusiones parciales.

- El vertiginoso desarrollo tecnológico aparejado de los incrementos de los costos de las fuentes de energía convencionales, así como la inclusión de los costos al medio ambiente conllevan a que cada día sean más atractivas la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía.
- Cuba tiene el propósito y la necesidad de diversificar su matriz energética, con una meta de alcanzar el 24 % de energía renovable antes del 2030.
- La provincia de Cienfuegos es primeriza en la generación de energía fotovoltaica, actualmente cuenta con cinco CEFV con una capacidad instalada de 18,6 MWp.
- En el 2019 las CEFV de Cienfuegos generaron el 3,7 % de la energía consumida en la provincia.

Capitulo II

Capítulo II: Caracterización energética del Hotel Pasacaballos y dimensionamiento preliminar del sistema solar fotovoltaico.

2.1. Caracterización del Hotel Pasacaballo

El Hotel Pasacaballo perteneciente al Grupo Empresarial Hotelero Islazul SA, se encuentra ubicado en las coordenadas $22^{\circ}03'45,2''N$ y $80^{\circ}27'31,9''W$ a la entrada de la Bahía de Cienfuegos, a solo 5 km de la playa de Rancho Luna y justo al frente de la Fortaleza de Nuestra Señora de los Ángeles de Jagua.

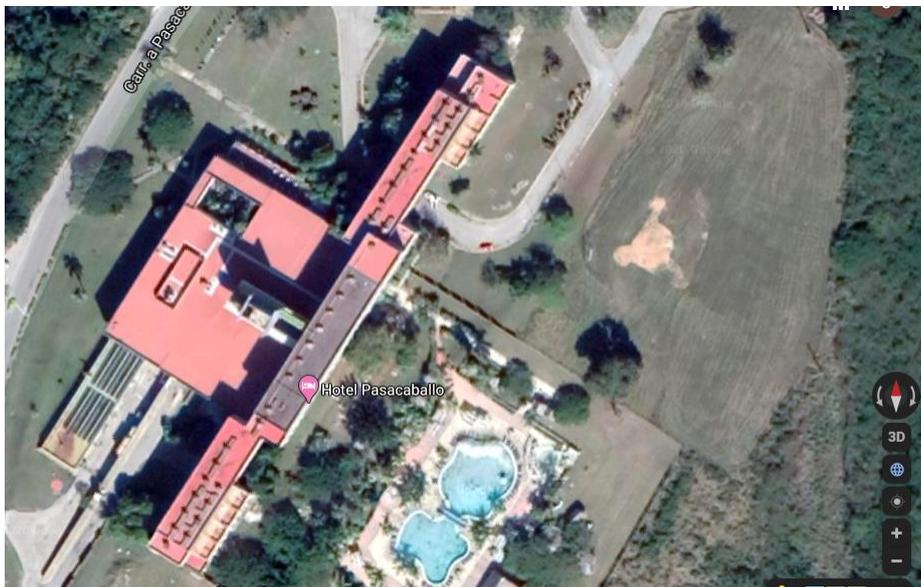


Figura 2.1. Vista satelital del Hotel Pasacaballo. **Fuente:** Google Maps

El hotel ofrece un servicio personalizado, caracterizado por la amabilidad y la rapidez de respuesta, brindándole al visitante un lugar tranquilo y acogedor de descanso, en un ambiente natural alejado de la urbe. Para este propósito cuenta con 188 habitaciones, de ellas 36 habitaciones triples y 152 dobles (10 con cama matrimonial). Todas las habitaciones están climatizadas, poseen televisión satelital, caja de seguridad, servicio telefónico, baño privado, agua fría y caliente las 24 horas. Otros servicios que ofrece son la venta de tarjetas telefónicas, WIFI, alquiler de cajas de seguridad, cambio de moneda y servicios médicos las 24 horas.

2.1.1. Característica constructiva del Hotel

El tipo de edificación del Hotel Pasacaballo de Cienfuegos corresponde al tipo “Girón” muy común en la zona central y oriental del país, este tipo de edificación está compuesto esencialmente por una estructura de esqueleto de hormigón con paredes del mismo material. Las estructuras de piso y cubierta están constituidas por losas doble “T” apoyadas sobre vigas. Estas losas están diseñadas para resistir su peso propio más una sobrecarga de relleno y piso de 200 kg/m² y la carga de utilización, existen losas para cargas de utilización de 300, 400 y 600 kg/m². (Marin, Whitmarsh, Calderón, Taboas, & Gutierrez, 1986). EL peso de los paneles junto con la estructura de soporte es de 8 kg/m², lo que es un peso insignificante comparado con el peso de las losas, por lo que se puede afirmar que la edificación resistirá las cargas que tributará el sistema de paneles solares.

2.1.2. Revisión Energética del Hotel Pasacaballo.

En la siguiente tabla 2.1. se muestra el consumo y costo de la energía eléctrica en el Hotel. Mediante estos datos facilitados por la directiva del Hotel, se aprecia la cantidad de dinero que gasta solo en energía eléctrica por lo cual el montaje del sistema solar fotovoltaico ayudará considerablemente en este aspecto. Se toma como muestra de consumo y costo por concepto de energía eléctrica solo el año 2019, ya que el Hotel en el paso del tiempo se le han hecho renovaciones y ha sufrido cambios tecnológicos.

Tabla 2.1. Consumo y gasto de energía eléctrica en el 2019. **Fuente:**

Elaboración propia

	Consumo (kWh)	Gasto (CUC)
Ene.	73 413	13 705,5
Feb.	76 665	13 941,2
Mar.	98 155	18 002,6
Abr.	109 383	19 840
May.	124 389	22 384,3
Jun.	141 204	24 627,7
Jul.	146 859	26 830
Ago.	151 084	27 030,8
Sep.	116 215	20 877,9

Oct.	74 342	14 049,6
Nov.	71 591	13 616,7
Dic.	86 282	16 024,7
TOTAL	1 269 582	230 931

2.2. Definición de las áreas para el montaje del sistema fotovoltaico.

Para la instalación del sistema fotovoltaico se tuvo en cuenta aquellas áreas de las cubiertas del hotel en las cuales no incidieran sombras a lo largo del día y no existieran obstáculos como tuberías de agua, conductos de ventilación u otros obstáculos que entorpecieran en el montaje del sistema fotovoltaico. Las áreas seleccionadas se muestran en la figura 2.2.



Figura 2.2. Vista satelital de las áreas en estudio. **Fuente:** Google Maps

El área número uno dispone de 1 112,45 m² en los cuales se pudo ocupar un total de 247 paneles fotovoltaicos y el área dos que dispone de 465,82 m² se pudo ocupar con un total de 110 paneles solares para un total entre las dos áreas de 357 paneles fotovoltaicos.

La cantidad de paneles fotovoltaicos dichos a ocupar por las áreas disponibles se pudo conocer gracias a la utilización del programa de diseño gráfico y

modelado en tres dimensiones (3D) SketchUp 2018. En la figura 2.3. capturada de dicho programa se observan las áreas ya ocupadas con los paneles fotovoltaicos.

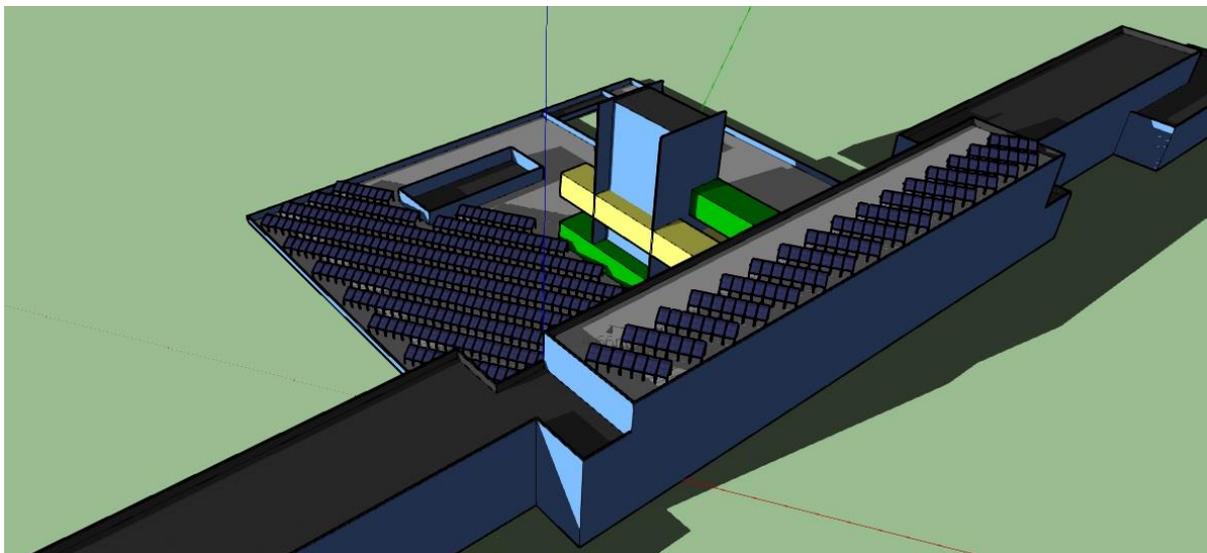


Figura 2.3. Diseño en 3D del sistema solar fotovoltaico del Hotel Pasacaballo.

Fuente: Elaboración propia

2.3. Radiación solar en Cuba

La mayor de las Antillas se caracteriza por tener una buena radiación solar promedio de alrededor de más de 5 kWh/m² día, por lo que al año se tendrá que a cada m² de superficie pueden llegar más de 1 825 kWh/m² al año, con una variabilidad aproximada de $\pm 10\%$ a lo largo y ancho de la isla, aspecto muy positivo, a diferencia de otras latitudes mayores. La componente directa de la radiación está entre un 65% y 80%, siendo la componente difusa relativamente alta. (Solar R. , 2006)

En el territorio cubano, con un poco más de 110 mil kilómetros cuadrados (sin contar los mares adyacentes), se recibe una radiación solar equivalente a 50 millones de toneladas de petróleo cada día. O sea, la radiación solar que recibe Cuba en un solo día es mayor, en su valor energético, que todo el petróleo que se consume durante cinco años. Dicho de otra forma: En Cuba se recibe 1 800 veces más energía solar que el petróleo que consume. (Beltran Marrero, 2018)

2.4. Caracterización de los vientos.

Como la instalación de los paneles fotovoltaicos estará situada sobre la edificación y esta estará sometida a la fuerza de los vientos es necesario conocer como es el comportamiento en magnitud y dirección de estos en la región.

Los estudios realizados por el Centro Meteorológico de Cienfuegos muestran los valores y tendencias de los vientos a partir de las llamadas rosas de los vientos, ejemplo de ello es la figura 2.4 que muestra el resumen del comportamiento de los vientos en el año 2019.

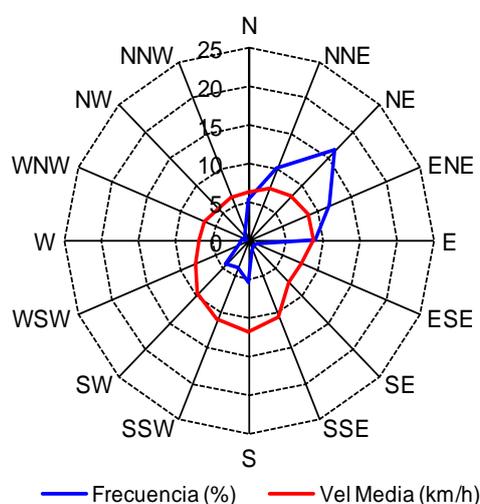


Figura 2.4. Rosa de vientos anual de Cienfuegos. **Fuente:** (Centro de Meteorología Cienfuegos, 2019)

El comportamiento del viento en la zona costera de Cienfuegos está influenciado por la interrelación del flujo Alisios predominante sobre todo el territorio nacional y la acción de los vientos locales como las brisas marinas. Esto hace que prácticamente durante todo el año el viento predominante sea del SW – NE como se aprecia en la figura 2.4. En cuanto a la rapidez media del viento, en Cienfuegos las medias mensuales apenas superan los 11 km/h. Las mayores velocidades medias se registran en los meses del período poco lluvioso, generalmente asociado al efecto de los anticiclones continentales migratorios que siguen a los sistemas frontales. Por su parte los mínimos en los valores medios de la velocidad del viento se reportan en los meses del período lluvioso del año.

Las mayores velocidades del viento reportadas en la provincia están asociadas en su mayoría con fenómenos meteorológicos peligrosos como las Tormentas Locales Severas y los Ciclones Tropicales, todos ellos frecuentes desde mayo hasta noviembre que las velocidades de los vientos pueden variar entre 76 a 177 km/h. (Centro de Meteorología Cienfuegos, 2019)

2.5. Selección del módulo fotovoltaico.

Los diseños de las centrales y sistemas a partir del uso de las fuentes renovables de energía deben buscar la integración de la industria nacional al producto final. Además, en la política económica del país se aboga por la reducción de las importaciones. Por tales razones, el módulo fotovoltaico que se empleará en el proyecto es el DSM-270, producido por la Empresa de Componentes Electrónicos Ernesto Che Guevara ubicada en la carretera al Aeropuerto Álvaro Barba km 2 ½, Pinar del Río, Cuba.

El módulo fotovoltaico DSM-270 está compuesto por 60 celdas solares de formato 156,75mm x 156,75mm, con dimensiones incluyendo el marco de 1 650 x 990 x 40 mm conectados en serie-paralelo. El mismo es capaz de entregar una potencia de 270 Wp con una tolerancia de $\pm 3\%$, bajo condiciones estándar de radiación (STC: 1 000 W/m², temperatura de los módulos T=25 °C, masa de aire AM 1,5). El DSM-270, en su punto de máxima potencia, genera a la tensión 32,1 V de corriente directa.

2.6. Selección del soporte del módulo fotovoltaico

Son varios los fabricantes de soportes para módulos fotovoltaicos como Isofix, Conergy, Solarpower entre otras. Estos fabricantes se especializan en estructuras para instalaciones de energía solar fotovoltaica en cualquier tipo de suelo o tejado y adaptables a toda clase de módulos.

Desde hace más de 10 años, Conergy es fabricante y distribuidor de estructuras para instalaciones de energía solar fotovoltaica. Su experiencia en este sector le convierte en uno de los fabricantes líder del mercado europeo. Una de las principales características de las estructuras Conergy es que tiene un manejo sencillo y son muy fáciles de montar, lo que hace que se minimice el tiempo de montaje. Están fabricadas en aluminio y acero inoxidable, lo que garantiza su máxima durabilidad. Su alto grado de resistencia a la corrosión garantiza una

larga vida útil y permite su total reciclaje. Sus estructuras tienen una carga al viento de 130 km/h. (Conergy, 2010).



Figura 2.5. Soporte SolarFamulus. **Fuente:** (Conergy, 2010)

La experiencia de Isofix en el sector de la fijación, le ha permitido desarrollar un sistema completo de soportación para el sector de la Energía Fotovoltaica. Todos los soportes han sido ensayados por Applus contra la presión dinámica del viento (hasta 176 km/h.) (Isofix, 2011)



Figura 2.6. Soporte para módulos fotovoltaicos de Isofix. **Fuente:** (Isofix, 2011)

2.7. Orientación de los paneles

A la hora de diseñar este tipo de instalaciones solares, es importante decidir la orientación de los paneles ya que interesará que los paneles capturen la mayor cantidad de radiación solar posible. Esta orientación puede ser impuesta por el emplazamiento donde se va a instalar los paneles, como es el caso de tejados con una cierta orientación, o libre si la ubicación lo permite, como extensiones de terreno llanas.

En el caso nuestro en particular con la ayuda del programa SketchUp 2018 y una imagen capturada del programa Google Maps se pudo determinar que la construcción del Hotel Pasacaballo se encuentra a $32,4^\circ$ de inclinación con respecto al Sur. Lo que permitió orientar correctamente hacia el Sur los paneles fotovoltaicos.

2.8. Inclinación de los paneles

Un punto importante para el diseño de estas instalaciones fotovoltaicas, es la inclinación que deben tener los módulos para la captación de la mayor cantidad de radiación solar. La inclinación de los módulos solares se define mediante el ángulo de inclinación β , que es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal.

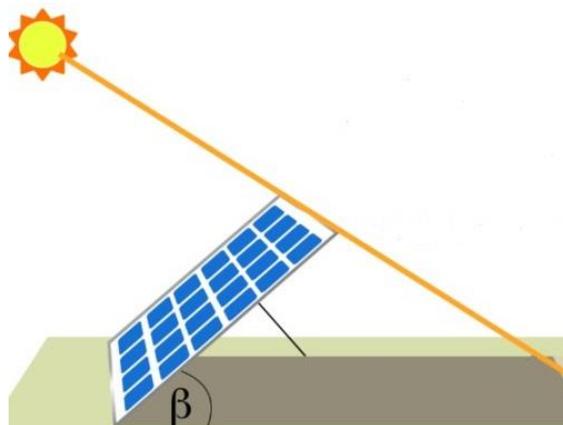


Figura 2.7. Inclinación de los módulos fotovoltaicos. **Fuente:** Google

El efecto de la selección de un ángulo de inclinación óptimo es equivalente a una modificación del ángulo de incidencia de la radiación solar; para lograr la máxima captación de la radiación solar. El ángulo óptimo de un sistema fotovoltaico debe coincidir con la latitud del lugar, resultado ya presentado anteriormente por otros

autores (Duffie y Beckman, 1996; B rriz y  lvarez, 2004, Gunerhan y Hepbasli, 2007; Shariah et al., 2002; Cheng et al., 2005; Cheng et al., 2009, Righini y Grossi Gallegos, 2011)

Teniendo en cuenta el resultado ya presentado por los autores mencionados, el ángulo óptimo a utilizar es de 22  para la provincia de Cienfuegos.

2.9. Distancia mínima entre filas de los módulos fotovoltaicos

Para el cálculo de la distancia mínima entre filas de los paneles fotovoltaicos se utilizó el programa ya antes mencionado, SketchUp 2018, ya que este cuenta con una herramienta muy completa de simulación de sombras respecto a la trayectoria del Sol con opción de configurar el huso horario correspondiente a la posición y la variación de las horas según la fecha específica que el usuario elija, en el caso de este estudio se configur  para un huso horario UTC -05:00 correspondiente a Cuba. Se seleccionó la fecha del 21 de diciembre del 2020 a las 17:00 (5 de la tarde) ya que es en esta fecha donde se alcanza la sombra más crítica es decir la de mayor prolongación, a causa del solsticio de invierno donde el sol se inclina más hacia el sur. Una vez evitada esta sombra, en ninguna fecha del año los paneles solares serán sombreados.

En la figura 2.8. se observa la distancia mínima entre las filas de los paneles solares que es de 4,66 m, pero por el diseño de las bases de los paneles solares esa distancia se pudo acortar a 1,90 m.

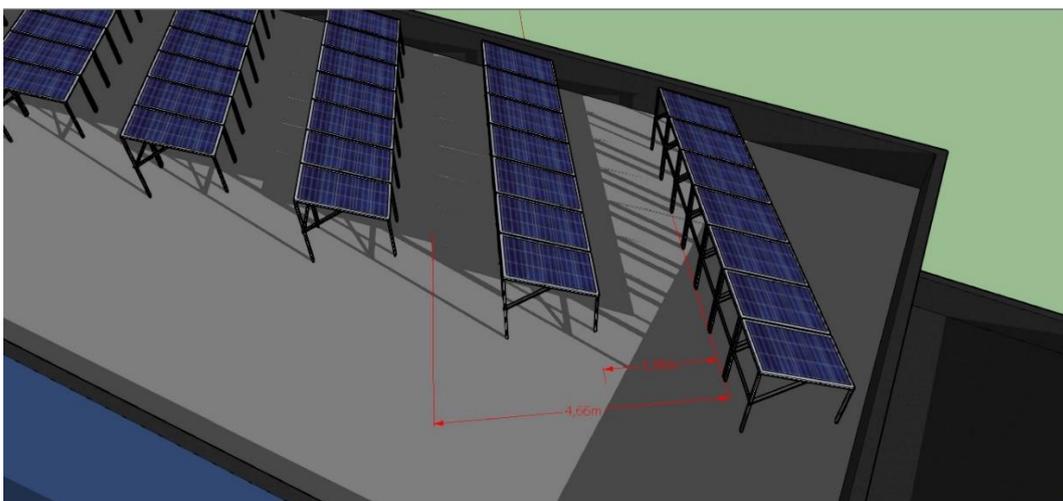


Figura 2.8. Diseño y cálculo de la distancia mínima entre filas de los paneles solares. **Fuente:** elaboración propia

2.10. Selección del inversor

El inversor escogido para la instalación es el Sunny Tripower 25000TL de 25 kW de potencia nominal, adecuado para el arreglo serie-paralelo (string configuration). Se toman estos módulos por su confiabilidad y ser diseñados para sistemas conectados a la red. Además, la capacidad de estos inversores permite realizar arreglos medianos, esto facilita el proceso de mantenimiento al no tener que descontar grandes porciones del parque para reparaciones o mantenimientos del mismo. Además de ser los inversores más asequibles para el mercado cubano y de uso comprobado en parques fotovoltaicos ya instalados en el país y en la provincia.



Figura 2.9. Inversor Sunny Tripower 25000TL. **Fuente:** Google

2.11. Cálculo del número de inversores.

La cantidad de inversores que hacen falta para cada área se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\text{numero de inversores} = \frac{\text{kWp}}{P_{\text{inversor}}} \quad \text{Ec.2.1}$$

Donde:

P_{inversor} : Potencia del inversor.

kWp: Potencia pico instalada

Para el área uno donde se pudo instalar 66,69 kWp hacen falta 3 inversores; para el área dos de 29,7 kWp hace falta 1 inversor.

Conclusiones parciales.

- El hotel Pasacaballo como promedio consume una energía eléctrica de 1 269 582 kWh/año, representando un costo de 230 931 CUC
- El área techada disponible es de 1 578 m², lo que permite organizar la ubicación de 357 paneles fotovoltaicos
- Para la estructura civil del hotel el peso de los paneles solares y sus soportes es insignificante, del orden de 25 veces menor que la losa de techo más ligera.
- Las velocidades promedio de vientos en la provincia de Cienfuegos no superan los 11 km/h, solo alcanzando velocidades registradas de 177 km/h en temporada ciclónica. Las estructuras de soportes para los paneles soportan velocidades hasta 175 km/h. En caso de ciclones de categoría 4 o 5 se debe proceder al desmontaje de los paneles con antelación.
- Los paneles se orientan hacia el Sur con una inclinación con respecto a la horizontal de 22° y con una distancia mínima entre filas de 1,90 m.
- Por cuestiones de mercado se seleccionó el panel solar fotovoltaico DSM-270 y el inversor SMA Sunny Tripower 25000TL de 25 kW.

Capitulo III

Capítulo III: Cálculos del sistema solar fotovoltaico. Resultados obtenidos en el software PVsyst.

3.1. Información general del software.

El software "PVsyst" versión 6.4.3 desarrollado en la Universidad de Ginebra, es un potente programa informático de uso gratuito, que permite realizar el diseño, simulación y análisis de datos de una instalación fotovoltaica; posee una amplia base de datos de los principales componentes usados en una instalación del mercado internacional y por si eso no fuera suficiente se pueden añadir nuevos. Entre las ventajas con las que cuenta el programa hay que destacar que posee una base meteorológica que permite dimensionar la instalación en función de su ubicación, calcular la inclinación y orientación óptima, y un diseño en 3D que permite visualizar el sombreado y calcular las pérdidas y producción de energía, ya que simula la orientación del sol. (PVsyst, 2019)

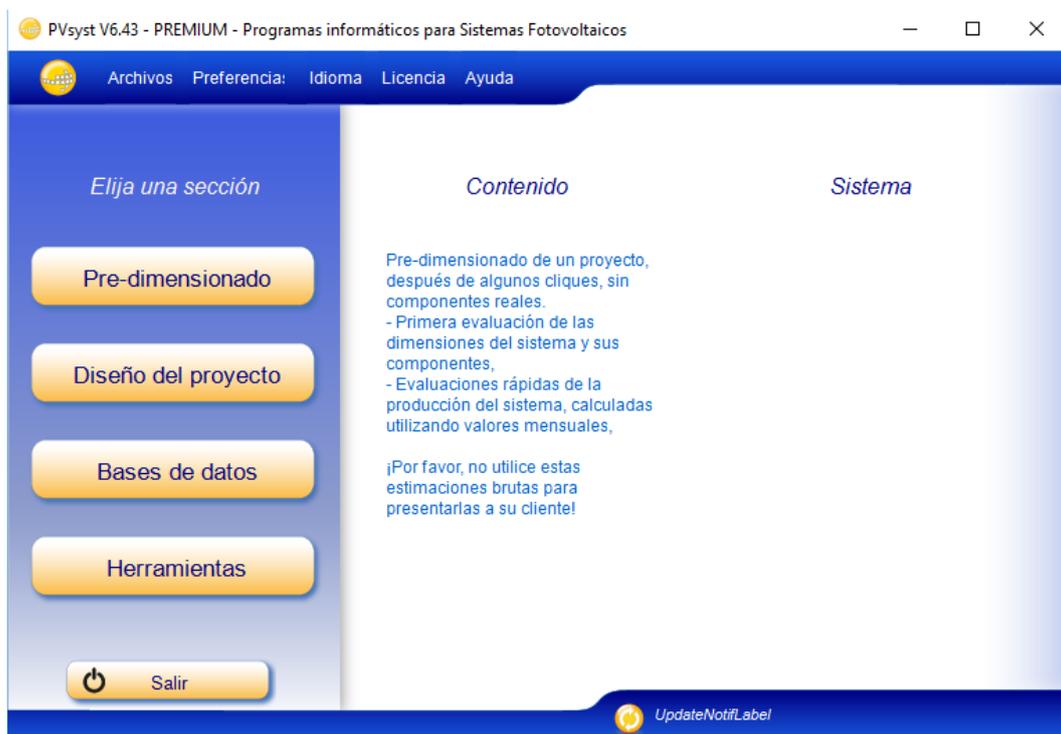


Figura 3.1. Portada de inicio del PVsyst. **Fuente:** Elaboración propia.

3.2. Resumen de los datos para la simulación

Para realizar la simulación del sistema fotovoltaico, se debe partir de las condiciones concretas de la instalación y la producción eléctrica que se puede

esperar, entre otros muchos parámetros de interés. Como primer parámetro es la ubicación geográfica y meteorológica del proyecto: se desarrolla en el Hotel Pasacaballo de la provincia de Cienfuegos, se encuentra situado a una latitud de 22,06° N y de longitud 80,46° W a una altitud de 23 m y los datos climatológicos fueron obtenidos de una síntesis de datos de la Base de Satélites de la NASA-SEE. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros usados para la simulación del sistema fotovoltaico del área uno (techo del comedor) y en la tabla 3.2 los del área dos (techo del 6to piso).

Tabla 3.1. Sistema Fotovoltaico del área 1. **Fuente:** Elaboración propia.

Orientación	
Inclinación	22°
Acimut	0
Características de generador FV.	
Modelo del panel FV	DSM 270
Número total de paneles	247
Potencia	270 Wp
Características de Inversor.	
Modelo	Sunny Tripower 25000TI-30
Rango de tensión de trabajo	390-800 V
Potencia nominal unitaria	25 kW
Número de inversores	3

Tabla 3.2. Sistema Fotovoltaico del área 2. **Fuente:** Elaboración propia.

Orientación	
Inclinación	22°
Acimut	0
Características de generador FV.	
Modelo del panel FV	DSM 270
Número total de paneles	110
Potencia	270 Wp
Características de Inversor.	
Modelo	Sunny Tripower 25000TI-30
Rango de tensión de trabajo	390-800 V

Potencia nominal unitaria	25 kW
Número de inversores	1

3.3. Resultados de la simulación en el área uno.

La configuración serie-paralelo queda dada por la simulación de manera que se tiene 13 cadenas en paralelo y 19 en series, esto es correspondiente al valor de tensión de entrada del inversor de 390-800 V ya que los paneles en serie suman un voltaje nominal de 609 V y las 13 cadenas dan un amperaje máximo de 109,5 A, pero al tener 3 inversores se divide y da 36,5 A correspondiendo a los valores de I_{max} del inversor de 33-43 A.

La figura 3.2, muestra las pérdidas globales asociadas al sistema. Las de los paneles FV es de 0,78 kWh/kWp/día, mientras que la del sistema electrónico de potencia son 0,08 kWh/kWp/día, para una producción de energía útil de 4,28 kWh/kWp/día.

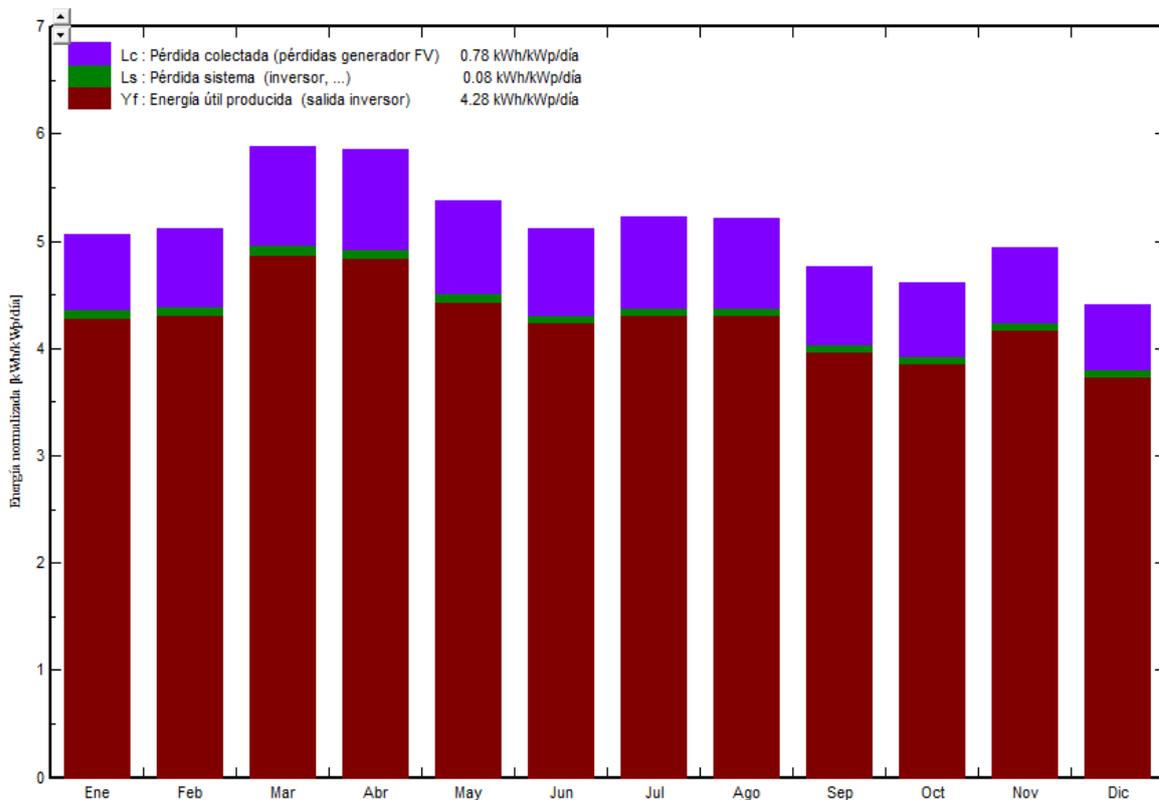


Figura 3.2. Producciones normalizadas en kWp. **Fuente:** (PVsyst, 2019)

La figura 3.3, muestra cómo se comporta la tensión del generador (trazo de color rojo) en correspondencia con el comportamiento de la irradiación global

horizontal (trazo de color verde) durante el día. Se aprecia que aproximadamente la irradiación solar aparece durante 11 horas del día, en sus inicios aproximadamente de 7:00 a 7:30 am los paneles no consiguen levantar su voltaje por encima del valor umbral. Entre las 7:30 y las 8:00 am ya la cadena de paneles solares sobrepasa el voltaje de 390 V requeridos por el inversor para que comience entregar energía a la red eléctrica. Desde las 8:00 hasta las 18:00 horas se mantiene generando energía con un voltaje casi constante de más de 560 V. Con la disposición de esta simulación se obtienen los valores de tensión a determinadas horas según el valor de irradiación, por ejemplo: a la 1 de la tarde, la tensión es aproximadamente 567 V con una irradiación aproximada de 195 W/m².

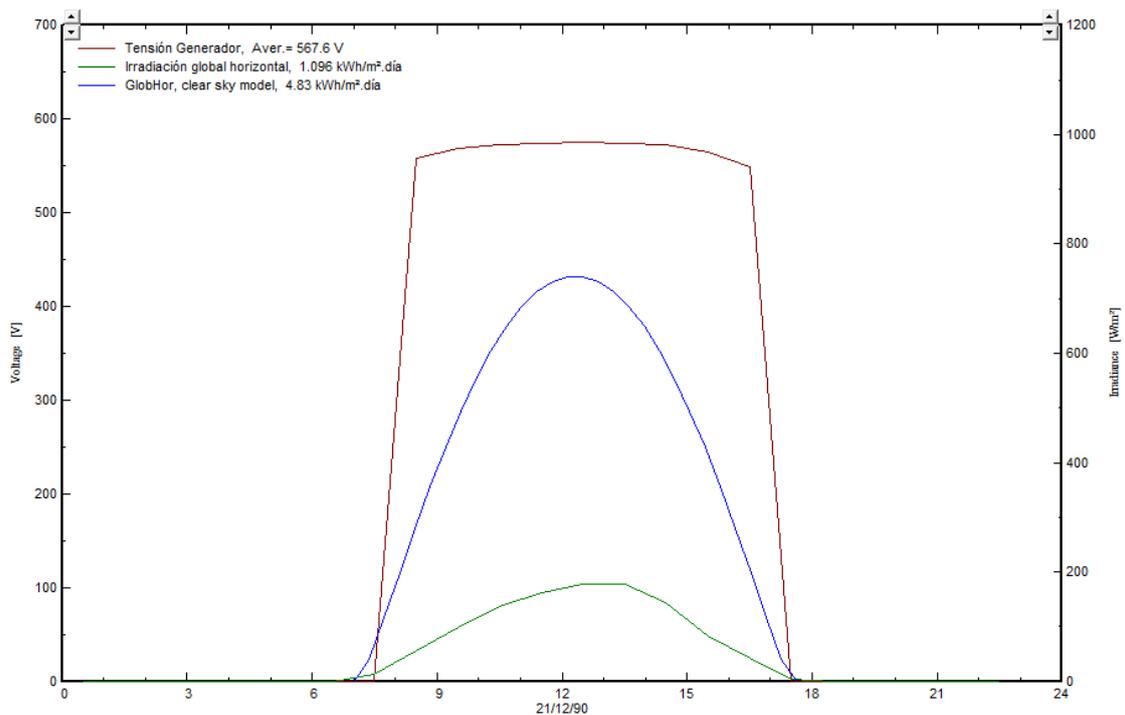


Figura 3.3. Relación tensión-irradiación. **Fuente:** (PVsyst, 2019)

La figura 3.4, muestra cómo se comporta la corriente del generador (trazo de color rojo) en correspondencia con el comportamiento de la irradiación global horizontal (trazo de color verde) durante el día. A diferencia del comportamiento del voltaje la corriente del generador tiene un comportamiento casi proporcional a la irradiación solar.

De 7:00 a 7:30 am los paneles no consiguen entregar corriente y por ende tampoco energía a la red eléctrica. Entre las 7:30 y las 8:00 am ya la cadena de paneles solares comienza a entregar energía a la red eléctrica y aproximadamente a la una de la tarde alcanza su valor máximo de 18 A, que implicaría una potencia generada de 10,4 kW.

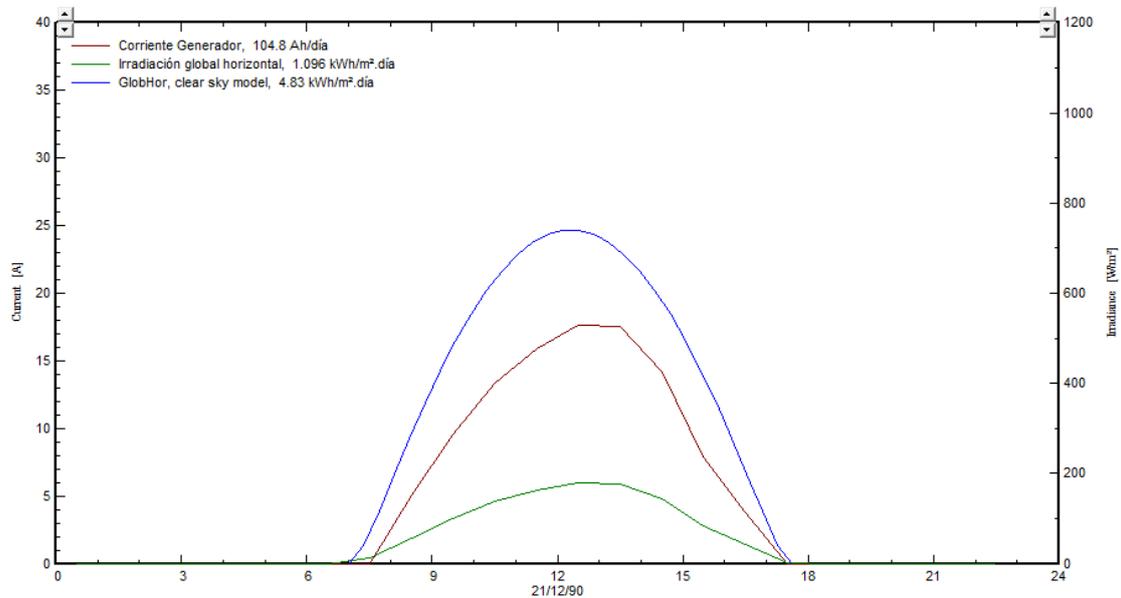


Figura 3.4. Relación corriente-irradiación. **Fuente:** (PVsyst, 2019)

En la figura 3.5 se aprecia de forma detallada el desglose de las pérdidas de energía anuales existentes en el arreglo fotovoltaico, la generación bruta es de 121,6 MWh y a la salida se obtienen 104,1 MWh aproximadamente, con pérdidas de alrededor de 17,5 MWh, representando el 14,39 %.

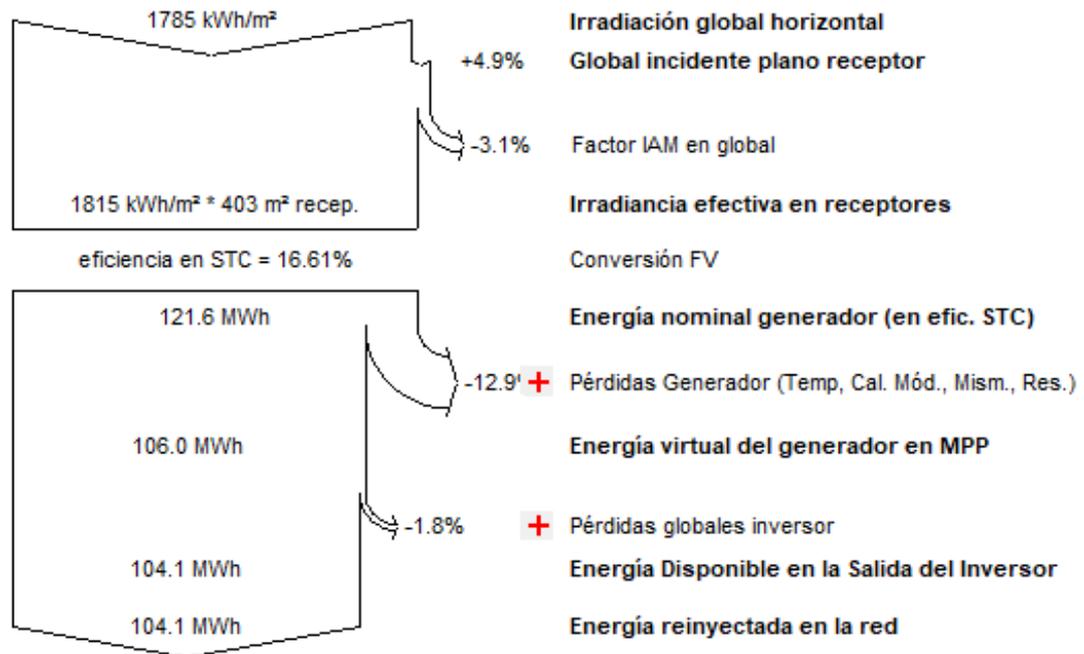


Figura 3.5. Diagrama de pérdidas prevista para el sistema. **Fuente:** (PVsyst, 2019).

3.4. Resultados de la simulación en el área dos.

La configuración serie-paralelo queda dada por la simulación de manera que se obtienen 5 cadenas en paralelo y 22 en series, esto es correspondiente al valor de tensión de entrada del inversor de 390-800 V ya que los paneles en serie suman un voltaje nominal de 706 V y las 5 cadenas dan un amperaje máximo de 42,1 A, correspondiendo a los valores de I_{max} del inversor de 33-43 A.

La figura 3.6, muestra las pérdidas globales asociadas al sistema. Las de los paneles FV es de 0,78 kWh/kWp/día, mientras que la del sistema electrónico de potencia son 0,07 kWh/kWp/día, para una producción de energía útil de 4,28 kWh/kWp/día.

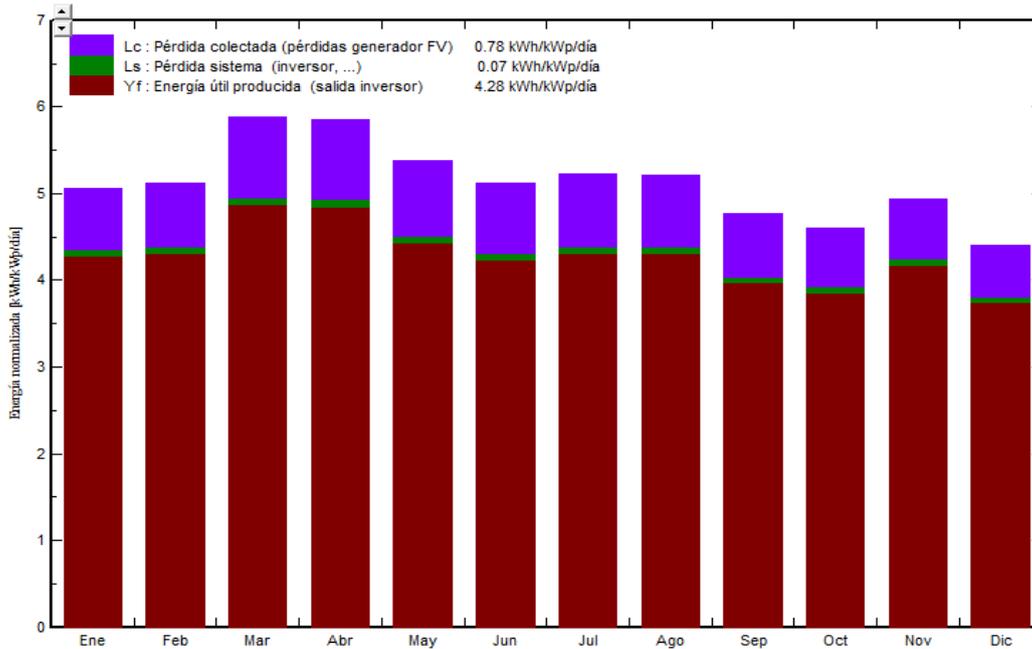


Figura 3.6. Producciones normalizadas en kWp. Fuente: (PVsyst, 2019)

La figura 3.7, muestra cómo se comporta la tensión del generador (trazo de color rojo) en correspondencia con el comportamiento de la irradiación global horizontal (trazo de color verde) durante el día. Se aprecia que aproximadamente la irradiación solar aparece durante 11 horas del día, en sus inicios aproximadamente de 7:00 a 7:30 am los paneles no consiguen levantar su voltaje por encima del valor umbral. Entre las 7:30 y las 8:00 am ya la cadena de paneles solares sobrepasa el voltaje de 390 V requeridos por el inversor para que comience entregar energía a la red eléctrica. Desde las 8:00 hasta las 18:00 horas se mantiene generando energía con un voltaje casi constante de más de 650 V. Con la disposición de esta simulación se obtienen los valores de tensión a determinadas horas según el valor de irradiación, por ejemplo: a la 1 de la tarde, la tensión es aproximadamente 657 V con una irradiación aproximada de 195 W/m².

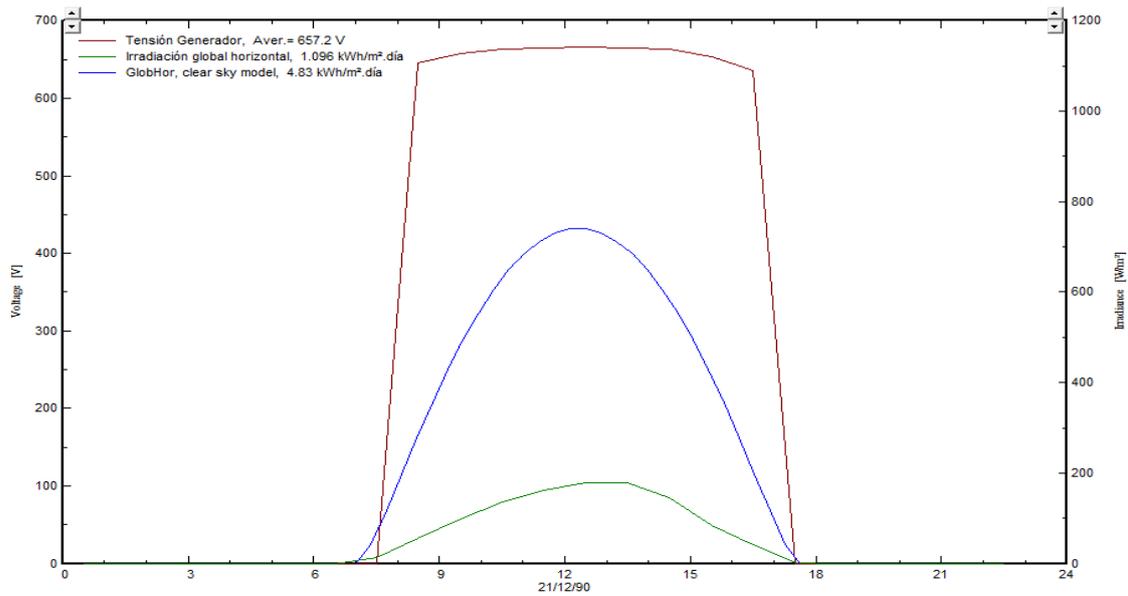


Figura 3.7. Relación tensión-irradiación. **Fuente:** (PVsyst, 2019)

La figura 3.8, muestra cómo se comporta la corriente del generador (trazo de color rojo) en correspondencia con el comportamiento de la irradiación global horizontal (trazo de color verde) durante el día. A diferencia del comportamiento del voltaje la corriente del generador tiene un comportamiento casi proporcional a la irradiación solar. De 7:00 a 7:30 am los paneles no consiguen entregar corriente y por ende tampoco energía a la red eléctrica. Entre las 7:30 y las 8:00 am ya la cadena de paneles solares comienza a entregar energía a la red eléctrica y aproximadamente a la una de la tarde alcanza su valor máximo de 7 A, que implicaría una potencia generada de 4,6 kW.

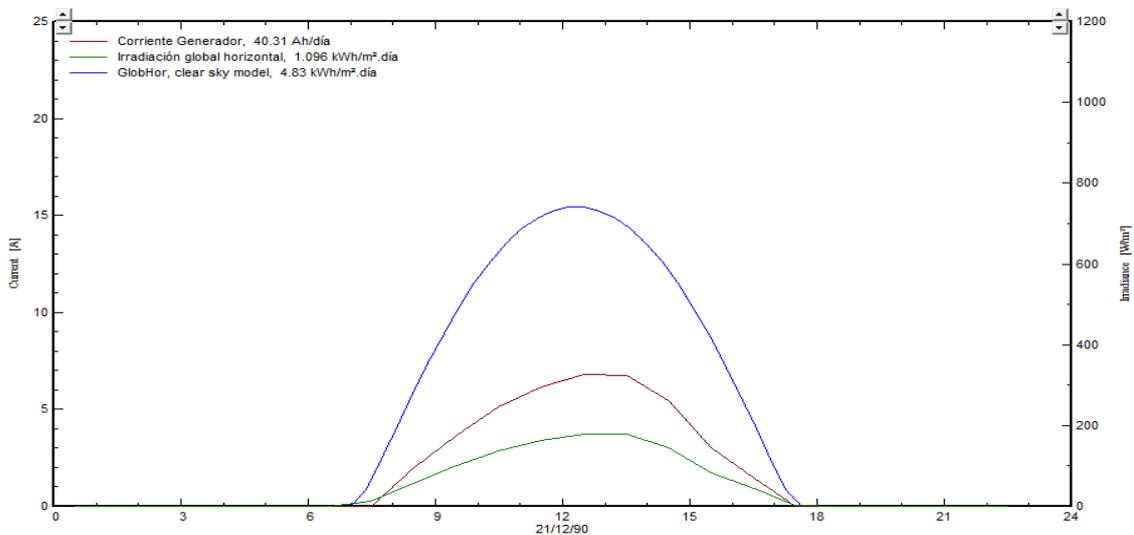


Figura 3.8. Relación corriente-irradiación. **Fuente:** (PVsyst, 2019)

En la figura 3.9 se aprecia de forma detallada el desglose de las pérdidas de energía anuales existentes en el arreglo fotovoltaico, la generación bruta es de 54 175 kWh y a la salida se obtienen 46 395 kWh aproximadamente, con pérdidas de alrededor de 7 780 kWh, representando el 14,36 % por año.

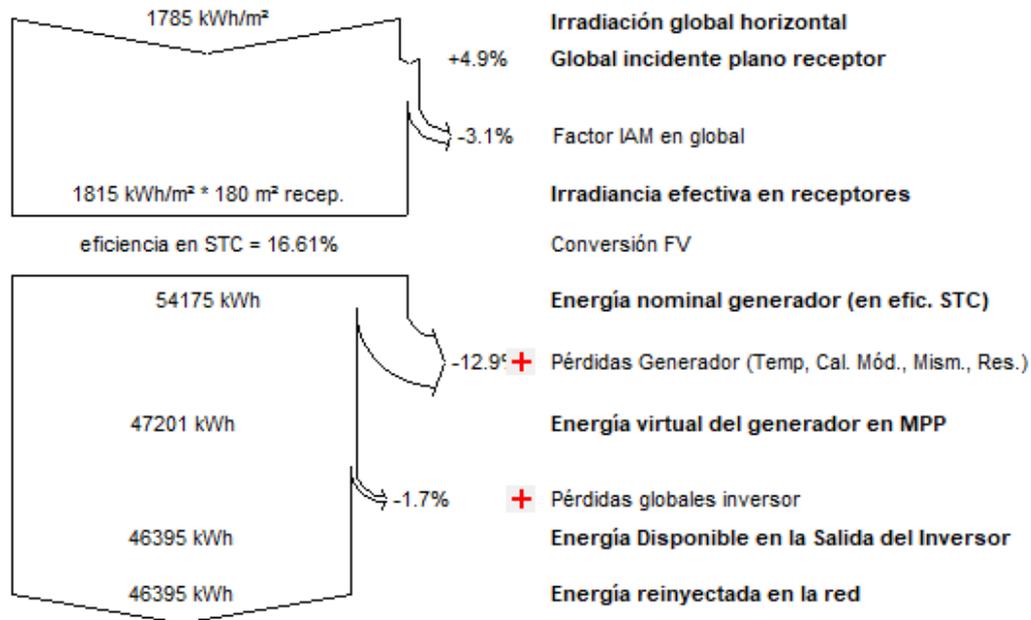


Figura 3.9. Diagrama de pérdidas de energía prevista para el sistema en todo un año. **Fuente:** (PVsyst, 2019).

La energía total generada entre las dos áreas de paneles solares es de 150 496 kWh/año representando esta el 11,85 % de la energía consumida en un año por el hotel, lo que representa un ahorro de 35 607,4 CUC.

Conclusiones parciales

- La simulación del sistema fotovoltaico brinda como resultado las cantidades de energía eléctrica generadas en los distintos meses del año. Resaltando como la mayor generación en marzo y abril; y de menor generación los meses de octubre y diciembre.
- La energía total generada es de 150 496 kWh/año representando esta el 11,85 % de la energía consumida en un año por el hotel.
- La instalación de 96,4 kWp en las cubiertas del hotel Pasacaballo produce un ahorro de **35 607,4 cuc/año** por concepto de energía eléctrica dejada de pagar.

Capitulo IV

Capítulo IV: Análisis económico y medioambiental.

Existen muchos métodos para la evaluación de proyectos, aunque los más difundidos en la actualidad, y los más confiables, son aquellos que toman en consideración la variación del valor del dinero en el tiempo al analizar los beneficios y costos esperados durante la vida útil del equipamiento.

Un administrador energético debe encontrar y seleccionar el método adecuado para realizar el análisis económico de un proyecto de inversión, de forma tal de lograr una presentación atractiva del mismo y la aprobación del financiamiento requerido para su implementación, en caso de que resulte no solo económicamente factible, sino atractivo y superior a otras alternativas de inversión. Como se dice "...el amor al gerente de una empresa le entra, en primer lugar, con el "lenguaje del dinero". (CEEMA, 2006).

4.1. Evaluación económica

Para la realización de la evaluación económica se tendrán en consideración valores dados por Stolik (Stolik Novygrad, Energía Fotovoltaica para Cuba, 2019), estos valores son un aproximado de todos los gastos asociados a la instalación de la tecnología fotovoltaica en cuanto a: paneles, mesas de fijación e inversores. Se tendrá en consideración los siguientes factores como: el impuesto del banco (Banco Central de Cuba, 2012), inflación (Banco Central de Cuba, 2018), tasa de descuento y el periodo de vida útil de los paneles, para así poder conocer de forma más certera el periodo de tiempo en que se recuperará la inversión y las ganancias que traerá consigo.

Para el cálculo aproximado del costo de la inversión se usó los dos valores dados por Stolik (Stolik Novygrad, Energía fotovoltaica para Cuba , 2019) donde el costo mínimo por kWp es de \$ 1 130 y el máximo de \$ 2 230. Obteniendo:

- Costo min. del sistema solar fotovoltaico: \$ 108 921
- Costo máx. del sistema solar fotovoltaico: \$ 214 950

Para la determinación del ingreso en el año se tiene que la capacidad de generación y entrega de energía del sistema solar fotovoltaico es de 150 496 kWh/año y conociendo la tarifa B1 eléctrica del (Ministerio de finanzas y precios,

Unión Eléctrica, 2019) para el Hotel que es de 0,2366 \$/kWh, se puede determinar el ingreso monetario por la siguiente ecuación:

$$\text{Ingreso} = 150\,496 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} * 0,2366 \frac{\$}{\text{kWh}} = 35\,607,4 \frac{\$}{\text{año}} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Se tomará como gastos de mantenimiento y salarios al responsable del cuidado del sistema fotovoltaico como el 15 % de los ingresos, siendo de \$ 5 341,1.

El valor presente neto de los flujos de caja proyectados para todos los años durante el período de evaluación del proyecto. Es una medida de las ganancias que puede reportar el proyecto, siendo positivo si el saldo entre beneficios y gastos es favorable, y negativo en caso contrario. Se determina como:

$$VPN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1 + D)^i} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

K_0 - Inversión o capital inicial.

FC_i - Flujo de caja en el año i .

D - Tasa de descuento real utilizada.

De forma general, el flujo de caja se puede calcular como:

$$FC_i = (I_i - G_i - Dep) \cdot (1 - t/100) + Dep \quad \text{Ec.4.3}$$

Donde:

I - Ingresos en el año i , \$

G - Gastos en el año i , \$.

T - Tasa de impuestos sobre ganancia, %.

Dep - Depreciación del equipamiento o amortización de la inversión, \$.

En el concepto depreciación deben tenerse en cuenta dos elementos, uno es la pérdida de valor del activo fijo por el uso del mismo y la obsolescencia tecnológica; el otro es el tratamiento de la depreciación en el mecanismo contable de la empresa. La depreciación se toma en cuenta como un costo anual que debe deducirse anualmente de las utilidades generadas, y que influye en los pagos anuales por impuestos.

Existen varios métodos para determinar la depreciación, aunque la más común es considerarla lineal:

$$Dep = \frac{K_0}{n} \quad \text{Ec.4.4}$$

Toda la información precedente es introducida en el programa Excel a fin de facilitar el desarrollo de los cálculos. Primero se realizarán los cálculos correspondientes tomando el valor de costo mínimo del sistema solar fotovoltaico.

En la figura 4.1 se muestran los datos iniciales y resultado de los cálculos durante un periodo de 25 años.

N°	Datos iniciales	0	1	2	3	...	23	24	25
1	Ingresos (I), \$		35607,4	35607,4	35607,4	...	35607,4	35607,4	35607,4
2	Gastos (G), \$		5341,1	5341,1	5341,1	...	5341,1	5341,1	5341,1
3	Costo inversión (K ₀)	108921				...			
4	Tasa de descuento (r), %		8	8	8	...	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	...	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	...	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	...	35	35	35
8	Vida útil estimada, años		25	25	25	...	25	25	25
N°	Resultados								
9	Año	0	1	2	3	...	23	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		4356,84	4356,84	4356,84	...	4356,84	4356,84	4356,84
11	Flujo de caja (Fc), \$		21197,989	21197,989	21197,989	...	21197,989	21197,989	21197,989
12	Tasa de descuento real (R)		0,028571429	0,028571429	0,028571429	...	0,028571429	0,028571429	0,028571429
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0,058571429	0,058571429	0,058571429	...	0,058571429	0,058571429	0,058571429
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0,944669366	0,892400211	0,843023141	...	0,270044998	0,255103237	0,240988213
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		20025,09082	18917,08985	17870,39527	...	5724,41089	5407,675605	5108,465484
16	Flujo descontado acumulado (Fda), VPN, \$	-108921	-88895,90918	-69978,81933	-52108,42406	...	155262,0409	160669,7165	165778,182

Figura 4.1. Datos iniciales y resultado de los cálculos económicos para un costo mínimos. **Fuente:** Elaboración propia.

La figura 4.2 muestra el Valor Presente Neto (VPN) vs años de vida útil de los paneles, permite conocer las ganancias que puede reportar el proyecto, siendo positivo si el saldo entre beneficios y gastos es favorable, negativo en caso contrario y el tiempo de recuperación de la inversión.

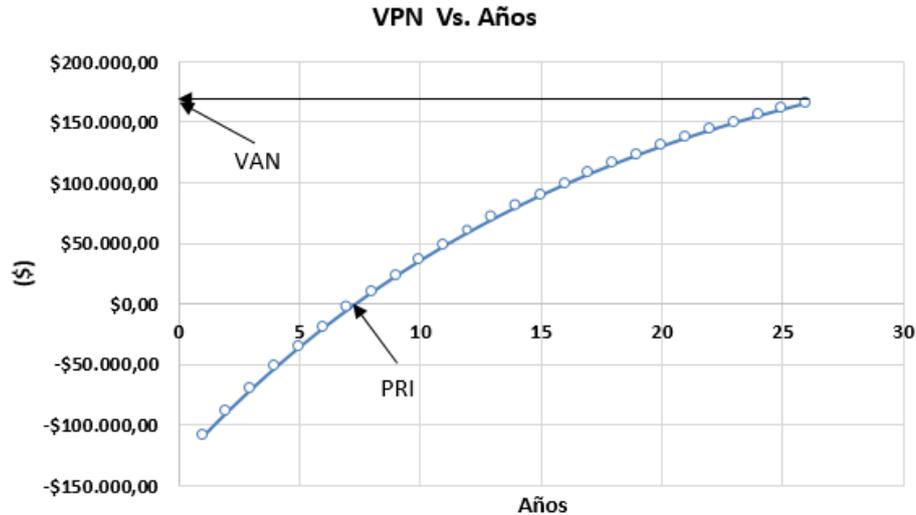


Figura 4.2. Grafico VPN Vs. Años. **Fuente:** Elaboración propia.

Se puede apreciar que el período de recuperación de la inversión (PRI) es de unos 7 años y que la inversión de \$ 108 921 en el año 2019 en el SSFV, debe propiciar un aumento del capital invertido que hace que su VPN alcance una magnitud de \$ 165 778,18

En la figura 4.3 se muestran los datos y resultados de los cálculos para el caso de los costos máximos del sistema solar fotovoltaico.

N°	Datos iniciales	0	1	2	3	...	23	24	25
1	Ingresos (I), \$		35607,4	35607,4	35607,4	...	35607,4	35607,4	35607,4
2	Gastos (G), \$		5341,1	5341,1	5341,1	...	5341,1	5341,1	5341,1
3	Costo inversión (K ₀)	214950				...			
4	Tasa de descuento (r), %		8	8	8	...	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	...	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	...	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	...	35	35	35
8	Vida útil estimada, años		25	25	25	...	25	25	25
N°	Resultados								
9	Año	0	1	2	3	...	23	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		8598	8598	8598	...	8598	8598	8598
11	Flujo de caja (Fc), \$		22682,395	22682,395	22682,395	...	22682,395	22682,395	22682,395
12	Tasa de descuento real (R)		0,028571429	0,028571429	0,028571429	...	0,02857143	0,02857143	0,02857143
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0,058571429	0,058571429	0,058571429	...	0,05857143	0,05857143	0,05857143
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0,944669366	0,892400211	0,843023141	...	0,270045	0,25510324	0,24098821
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		21427,3637	20241,77407	19121,78388	...	6125,26731	5786,35238	5466,18983
16	Flujo descontado acumulado (Fda), VPN, \$	-214950	-193522,636	-173280,862	-154159,078	...	67732,668	73519,0203	78985,2102

Figura 4.3. Datos iniciales y resultado de los cálculos económicos para un costo máximos. **Fuente:** Elaboración propia.

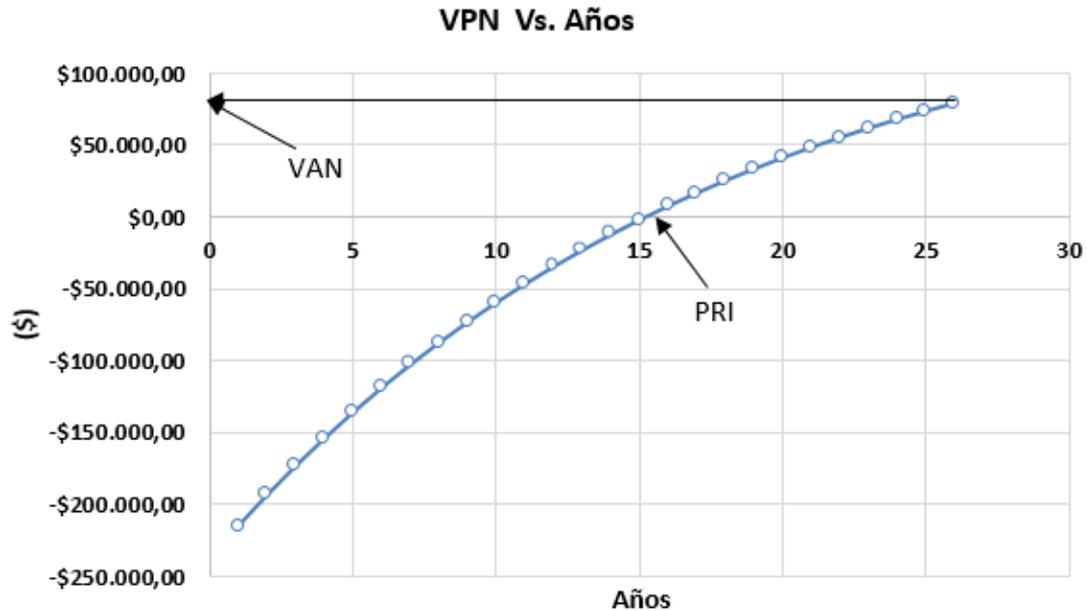


Figura 4.4. Grafico VPN Vs. Años. **Fuente:** Elaboración propia.

Como se observa en la gráfica, para una inversión máxima de \$ 214 950 el PRI es de unos 15 años y el VPN es de \$ 78 985. Lo que deja bien claro que no es factible la inversión en el sistema solar fotovoltaico si se debiera desembolsar una cantidad de dinero cerca o mayor que la del valor máximo calculado.

Comparando los resultados de las dos inversiones, se llega a la conclusión de buscar una inversión que se aleje de los costos máximos. La relación costo beneficio muestra que la más adecuada resulta la del costo mínimo. Ver ecuaciones 4.5 y 4.6.

Relación beneficio-costo para inversión de costo mínimo:

$$R_{b/c} = \frac{78\,9}{214\,950} = 1,5 \quad \text{Ec. 4.5}$$

Relación beneficio-costo para inversión de costo máximo:

$$R_{b/c} = \frac{165\,778,18}{108\,921} = 0,4 \quad \text{Ec. 4.6}$$

4.2. Análisis y aporte medio ambiental.

Este aspecto de gran importancia ya que, debido al auge de las tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica, en conjunto a los esfuerzos

que se han llevado a cabo tanto internacional como nacionalmente para la disminución del uso de los combustibles fósiles para producir energía eléctrica, los cuales tienen marcadas influencias negativas en la contaminación ambiental; la fomentación del uso de la tecnología fotovoltaica es una de las principales fuentes energética nacional que tiene gran importancia dada la reducción de emisiones de CO₂ hacia la atmósfera.

Analizando el problema en cuanto a combustible dejado de quemar para producir la misma cantidad de energía, este se puede calcular mediante la ecuación siguiente:

$$\text{Combustible ahorrado} = \frac{E * g}{1000} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$\text{Combustible ahorrado} = \frac{150\,496 * 0,236}{1000} = 35,51 \text{ t/año}$$

Donde:

- E: energía generada, kWh/año.
- g: es el consumo específico de combustible de los grupos electrógenos; se escoge la peor condición, o sea aquel que ahorrará menos y es igual a 236 g/kWh.

Por tanto, a partir del combustible ahorrado se puede obtener la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera en t/año.

$$CO_2 \text{ no emitido} = \frac{\text{Combustible ahorrado} * k}{\rho} \quad \text{Ec. 4.8}$$

$$CO_2 \text{ no emitido} = \frac{35,51 * 3,119}{0,9781} = 113,24 \text{ t/año}$$

Donde:

- K: coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO₂ no vertidas a la atmósfera y que es igual a 3,119 kg/l.
- ρ: densidad del combustible y es igual a 0,9781 kg/l.

Es necesario aclarar que este elemento no fue tomado en consideración desde el punto de vista económico, reducir la cantidad de toneladas de CO₂ tiene un costo que no ha sido tomado en consideración en esta evaluación económica

por no encontrar elementos económicos de evaluación en el marco jurídico cubano.

Conclusiones parciales

- Los costos de inversión del sistema de paneles fotovoltaicos, incluyendo todos sus accesorios, son muy variables dependiendo de las propias características de los mercados y los proveedores.
- Según Stolik, los valores para el cálculo de inversión de un sistema solar fotovoltaico están entre 1 130 y 2 230 \$/kWp.
- Considerando el valor mínimo la inversión se paga 7 años y tomando el valor máximo en 16 años.
- Con los 150 496 kWh/año se dejarán de emitir 113,24 t/año de CO₂

Conclusiones

Conclusiones.

- El vertiginoso desarrollo tecnológico aparejado de los incrementos de los costos de las fuentes de energía convencionales, así como la inclusión de los costos al medio ambiente conllevan a que cada día sean más atractivas la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables de energía.
- Cuba tiene el propósito y la necesidad de diversificar su matriz energética, con una meta de alcanzar el 24 % de energía renovable antes del 2030.
- El área techada disponible es de 1 578 m², lo que permite organizar la ubicación de 357 paneles fotovoltaicos y 4 inversores de 25 kW.
- Los paneles se orientan hacia el Sur con una inclinación con respecto a la horizontal de 22° y con una distancia mínima entre filas de 1,90 m.
- La energía total generada entre las dos áreas de paneles solares es de 150 496 kWh/año representando esta el 11,85 % de la energía consumida en un año por el hotel, lo que representa un ahorro de 35 607 CUC.
- Con los 150 496 kWh/año se dejarán de emitir 113,24 t/año de CO₂.

Recomendaciones

Recomendaciones.

- Realizar el análisis económico con una oferta de mercado real

Referencia Bibliografía.

Referencia Bibliográfica.

Amador, R. D. (2018). *Diseño y cálculo de una instalación fotovoltaica de 1mw conectada a red*. Sevilla, España .

Antony, F., Dürshner, C., & Remmers, K.-H. (2005). *Fotovoltaica para profesionales, diseño, instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas*. Alemania .

Anuario estadístico-energético . (2019). Recuperado de www.kabel.es.

Banco Central de Cuba. (2012). *Ley 113 artículo 97 de la Gaceta oficial No. 053*. La Habana,Cuba.

Banco Central de Cuba. (2018). *Circular 1/2017 del director general de tesorería*. La Habana, Cuba.

Beltran Marrero, J. (2018). *Anteproyecto y simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para alimentar la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos.(Trabajo de diploma)* Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos. Cuba

Blanco Sardinero, I. (2018). *Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial.(Proyecto de fin de carrera)*Universidad de Madrid. Madrid, España.

CEEMA. (2006). *Gestión y Economía Energética*. Cienfuegos. Cuba.

Centro de Meteorología Cienfuegos. (2019). *Comportamiento de los Vientos*. Cienfuegos. Cuba.

Conergy. (2010). *Catálogos de Estructuras Fotovoltaicas*. Recuperado de www.conergy.com.

Cubadebate. (2019). Recuperado de <http://www.cubadebate.cu>

del Moral Pelier, C. A., & Sarmiento Sera, A. (2006). *Influencia de la orientación de los colectores solares en la captación de energía*. *Revista Escolar*, 16

Díaz Santos, M., Santos Fuentefría, I., & Castro Fernández, D. (2017). *Influencia del ángulo de inclinación de los módulos solares en la generación de*

electricidad de una central fotovoltaica. Recuperado de
<https://www.researchgate.net/publication/317949936>

Ecoinventos. (2018). Recuperado de <https://ecoinventos.com/mayores-paises-productores-energia-solar-del-mundo/>

González, R., Jiménez, H., & Lagunas, J. (2003). *Sistemas fotovoltaicos conectados a la red*. Madrid, España

International Energy Agency (IEA). (2018). *Key world energy statistics*.

Isofix. (2011). *Catálogo General*. Recuperado de www.isofix.es.

Marín, I. c., Whitmarsh, A. I., Calderón, I. c., Taboas, A. M., & Gutierrez, I. c. (1986). *Sistema Constructivo Girón*. La Habana: Centro de Información de la Construcción.

Ministerio de finanzas y precios, Unión Eléctrica. (2019). *Manual de consumidores*. La Habana, Cuba.

Pérez, J. C. (2013). *Sistema fotovoltaico conectado a la red*. (Trabajo de Diploma) La Habana, Cuba.

PVsyst. (2019, abril 15). *Ingelibre*. Recuperado de <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/04/22/tutorial-pvsyst-base-de-datos-meteorologicos/>

Radio Rebelde. (2019). Recuperado de www.radiorebelde.cu

Solar, E. (s.f.). *Instalaciones de energía solar fotovoltaica conectadas a la red eléctrica*. Recuperado de <http://www.solar-energia.net>

Solar, R. (2006). *Ecosol*.

Stolik Novygrad, D. (2019). *Energía Fotovoltaica para Cuba*. La Habana, Cuba: CUBASOLAR.

Stolik Novygrad, D. (1992). *Cuando la única energía es el sol*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.