

REPÚBLICA DE CUBA.  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS  
“CARLOS RAFAEL RODRÍGUEZ”  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**TÍTULO:** Anteproyecto y simulación de un sistema fotovoltaico conectado a la red para alimentar la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos.

**AUTOR:** Jorge Beltrán Marrero.

**TUTORES:** Dr.C. José P. Monteagudo Yanes.

Ing. Alexander Domínguez Piloto.

Cienfuegos, Junio 2018

“Año 60 de la Revolución”

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo constituye la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Cienfuegos, autorizando a que el mismo sea utilizado por el Centro de Estudio Superior para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de dicha institución.

---

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido revisado y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

---

Información Científico Técnico

Nombre y Apellidos. Firma.

---

Nombre y Apellidos. Firma.

---

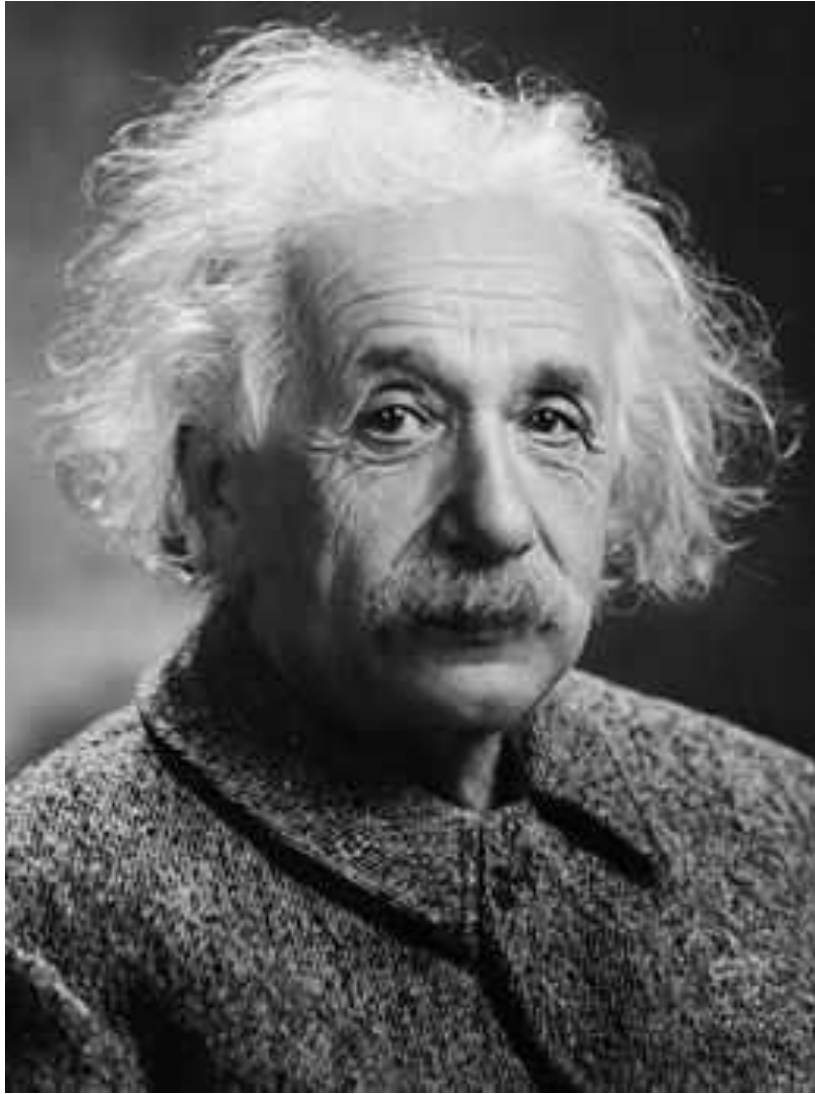
Firma del Tutor.

Vice Decano.

---

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.



*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor,  
la electricidad y la energía atómica: la voluntad".*

*Albert Einstein*

## *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 mis hermanas, a mis abuelos, a mis tíos y primos por estar siempre a mi lado ayudándome y alentándome a seguir hacia adelante.*

## *Agradecimientos*

*A mi tutor Dr.C. José P. Monteagudo Yanes por su colaboración, experiencia e interés presentado en la realización de este trabajo, muchas gracias por tus pertinentes consejos.*

*Agradezco a mis padres por permitirme vivir las experiencias que me han llevado a convertirme en una persona de bien, por su paciencia y entrega para ayudarme a alcanzar la meta que hoy cruzo.*

*A mis abuelos, por la preocupación.*

*A toda mi familia por todo su apoyo durante mis estudios y las enseñanzas de mi formación en la vida.*

*A mi co-tutor Ing. Alexander Domínguez Piloto por su valiosa ayuda en la elaboración del trabajo y por darme el honor de trabajar con él, gracias por tu amistad.*

*A mis suegros Alain y Cynthia por brindarme su cariño y estar siempre pendiente de mis estudios.*

*A mi novia Elizabeth por darme en todo momento su amor y cariño, ser mi amiga en las buenas y malas, por comprenderme y ayudarme en cada instante en el que lo he necesitado, tener paciencia conmigo y más que nada por haberla conocido. Gracias, mi amor.*

*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 mis amigos de todo momento, por ayudarme cuando lo he necesitado, y por compartir conmigo tantos momentos felices.*

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

## RESUMEN

---

La generación fotovoltaica conectada a la red se presenta hoy en día como una alternativa ventajosa desde el punto de vista ambiental frente a las fuentes convencionales de energía. El sistema energético de Cuba está basado fundamentalmente en el petróleo, por esta razón se realizan avances en el uso de estas tecnologías. El presente trabajo aborda el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a la red con el objetivo de reducir el consumo de electricidad generada con petróleo en la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos (DTCC) con sus componentes, permitiendo reducir los gastos que hoy se incurren por el pago de la factura eléctrica.

Para lograr los objetivos propuestos se realiza un estudio del material bibliográfico existente sobre el tema, analizando conceptos fundamentales, tipos de tecnologías, componentes fundamentales que integran el sistema fotovoltaico conectado a la red (SFVCR), formas de conexión a la red, ventajas y desventajas; además, se citan ejemplos puntuales de la utilización de esta tecnología, explicando la tecnología y forma de conexión a la red utilizadas por los mismos. Se presentan datos obtenidos sobre la carga de COPEXTEL, así como la caracterización energética de la misma. También se elabora una metodología de cálculo para que la instalación pueda cubrir el 100% de la carga del centro e inyectarle a la red el resto de la generación de energía, además se simula el sistema fotovoltaico utilizando el programa profesional PVsyst, comparando así ambos resultados para una mejor confiabilidad. Se realiza un estudio de oportunidades de ahorro desde el punto de vista económico y medioambiental del sistema propuesto previendo una futura implementación.

### **Palabras Claves:**

- Paneles solares
- Energía solar fotovoltaica
- Fuentes renovables

## SUMMARY

---

Photovoltaic generation connected to the grid is nowadays presented as an advantageous alternative from the environmental point of view compared to conventional sources of energy. The energy system in Cuba is based mainly on oil, for this reason advances are made in the use of these technologies. The present work deals with the design of a photovoltaic system connected to the network with the objective of reducing the consumption of electricity generated with oil in the Territorial Division COPEXTEL Cienfuegos with its components, allowing to reduce the expenses that are currently incurred by the payment of the invoice electric

To achieve the proposed objectives, a study of the existing bibliographic material on the subject is carried out, analyzing fundamental concepts, types of technologies, fundamental components that make up the SFVCR, forms of connection to the network, advantages and disadvantages; In addition, specific examples of the use of this technology are mentioned, explaining the technology and form of connection to the network used by them. Data obtained on the COPEXTEL load are presented, as well as the characterization of it. A calculation methodology is also carried out so that the installation can cover 100% of the center's load and inject the rest of the power generation into the network, in addition, the photovoltaic system is simulated using a professional program such as PVsyst, thus comparing both results for better reliability. Then an opportunity study is made from the economic and environmental point of view of the proposed system foreseeing a future implementation.

### **Keywords:**

- Solar panels
- Photovoltaic Solar Energy
- Renewable sources

# ÍNDICE

# Páginas

---

INTRODUCCIÓN.....	1
Problema científico.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO I. Estado actual, tendencias en el desarrollo y uso de los sistemas fotovoltaicos acoplado a la red.....	4
1.1. La energía renovable.....	5
1.1.1. La energía solar como fuente de energía renovable.....	6
1.2. La energía solar fotovoltaica.....	7
1.2.1. Historia.....	7
1.3. Componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red.....	8
1.3.1. Generador fotovoltaico.....	8
1.3.2. Inversor.....	12
1.3.3. Estructura de soporte de las placas.....	13
1.3.4. Caja general de protección.....	14
1.3.5. Puesta a tierra.....	14
1.3.6. Cableado de interconexión.....	14
1.3.7. Contadores.....	15
1.4. Fotovoltaica en edificación.....	16
1.5. Desarrollo de los sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.....	17
1.5.1. Previsión a largo plazo.....	20
1.6. Situación energética en Cuba.....	21



1.6.1. Energía solar fotovoltaica en Cuba.....	22
1.7. Casos exitosos de sistemas fotovoltaicos instalados en edificaciones.....	24
Conclusiones del capítulo I .....	28
<b>CAPÍTULO 2: Caracterización energética de la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos y dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico.....</b>	<b>1</b>
2.1. Caracterización de la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos.....	1
2.2. Revisión energética.....	2
2.2.1. Balance de energía.....	2
2.3. Metodología manual utilizada para el cálculo de sistemas fotovoltaicos.....	5
2.3.1. Censo de cargas.....	7
2.3.2. Selección de la fuente de energía renovable a utilizar en la DTCC para cubrir su demanda de energía eléctrica.....	11
2.3.3. Selección del módulo fotovoltaico.....	12
2.3.4. Selección del inversor.....	13
2.3.5. Definición del área para instalar el sistema fotovoltaico.....	14
2.3.6. Radiación solar en Cuba.....	14
2.3.7. Orientación de los paneles.....	16
2.3.8. Inclinação de los paneles.....	17
2.3.9. Distancia mínima entre filas de módulos.....	18
2.3.10. Cálculo del número de paneles fotovoltaicos.....	20
2.3.11. Cálculo del número de inversores.....	22
2.3.12. Generación del SFVCR.....	22
Conclusiones del capítulo II.....	25
<b>CAPÍTULO III. Simulación del sistema fotovoltaico conectado a la red.....</b>	<b>26</b>
3.1. Simulación del sistema fotovoltaico diseñado con el software PVsyst.....	26

3.2. Simulación del diseño realizado y análisis de los resultados. ....	31
3.3. Anclaje de los módulos fotovoltaicos.....	40
3.4. Resistencia de la superficie techada. ....	42
3.5. Mantenimiento del sistema fotovoltaico conectado a la red. ....	45
3.6. Medidas de protección. ....	47
Conclusiones del capítulo III. ....	50
CAPÍTULO IV. Evaluación económica del sistema fotovoltaico propuesto.....	51
4.1. Análisis y aporte medio ambiental. ....	51
4.2. Evaluación económica.....	52
4.2.1. Análisis preliminar para la valoración económica. ....	55
4.2.2. Análisis más detallado para la valoración económica.....	58
Conclusiones del capítulo IV.....	59
CONCLUSIONES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
Bibliografía.....	63
ANEXOS.....	67

# INTRODUCCIÓN

---

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 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 actualmente, 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 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 recrudescimiento de las medidas impuestas por el bloqueo económico, en un futuro cercano se incrementará el costo de este valioso recurso. En este sentido, con la Revolución Energética del 17 de enero del 2006, se impulsó un proceso que a posteriori permitiría mejorar el bienestar de la sociedad, el empleo racional y razonable de la energía, el desarrollo económico y la conservación y cuidado de medioambiente.

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. Todo el consumo mundial de energía se puede cubrir con el empleo de la energía solar en las diferentes variantes de su aprovechamiento. (Arrastía Avila, 2013)

La DTCC se declara a favor del uso de energías renovables e impulsa el proyecto de montaje de un pequeño parque fotovoltaico para suplir parte de su demanda, tecnología que brinda la posibilidad de una generación limpia y económicamente sostenible, acorde con las exigencias de la actualidad.

La Corporación COPEXTEL, S.A fue fundada el 27 de febrero de 1985, está posicionado en el mercado nacional y tiene presencia en el mercado exterior. Gestiona la innovación como fuente principal de crecimiento y sostenibilidad. La empresa tiene como misión comercializar soluciones tecnológicas integrales, bienes y servicios en Cuba y el exterior, de manera efectiva, con responsabilidad social y comprometida con la protección del medio ambiente. (Misión y visión, 2018)

### **Problema científico.**

El consumo eléctrico de la empresa COPEXTEL Cienfuegos representa más del 60% de sus portadores energéticos y es una de las mayores partidas de gastos, no disponiendo hasta el presente de una alternativa de suministro eléctrico de menor costo e impacto ambiental.

### **Hipótesis.**

El diseño de un sistema fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica a la sede central de la empresa COPEXTEL Cienfuegos debe mostrar una disminución del gasto económico de compra de la energía al Sistema Electroenergético Nacional y la reducción del impacto ambiental por la energía eléctrica dejada de consumir en la central termoeléctrica.

## **Objetivo general.**

Desarrollar el anteproyecto y simulación de factibilidad técnica económica de un sistema fotovoltaico conectado a la red en la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos.

## **Objetivos específicos.**

- Definir el estado actual y tendencias del uso de sistemas fotovoltaico para el suministro de energía eléctrica a edificaciones.
- Realizar el inventario de la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos desde el punto de vista energético.
- Desarrollar el cálculo técnico económico de las instalaciones fotovoltaicas.
- Elaborar simulación con el programa PVsyst y verificar ambos resultados.
- Evaluar económicamente la viabilidad del proyecto de ejecución y realizar el análisis beneficio costo.

## **CAPÍTULO I. Estado actual, tendencias en el desarrollo y uso de los sistemas fotovoltaicos acoplado a la red.**

---

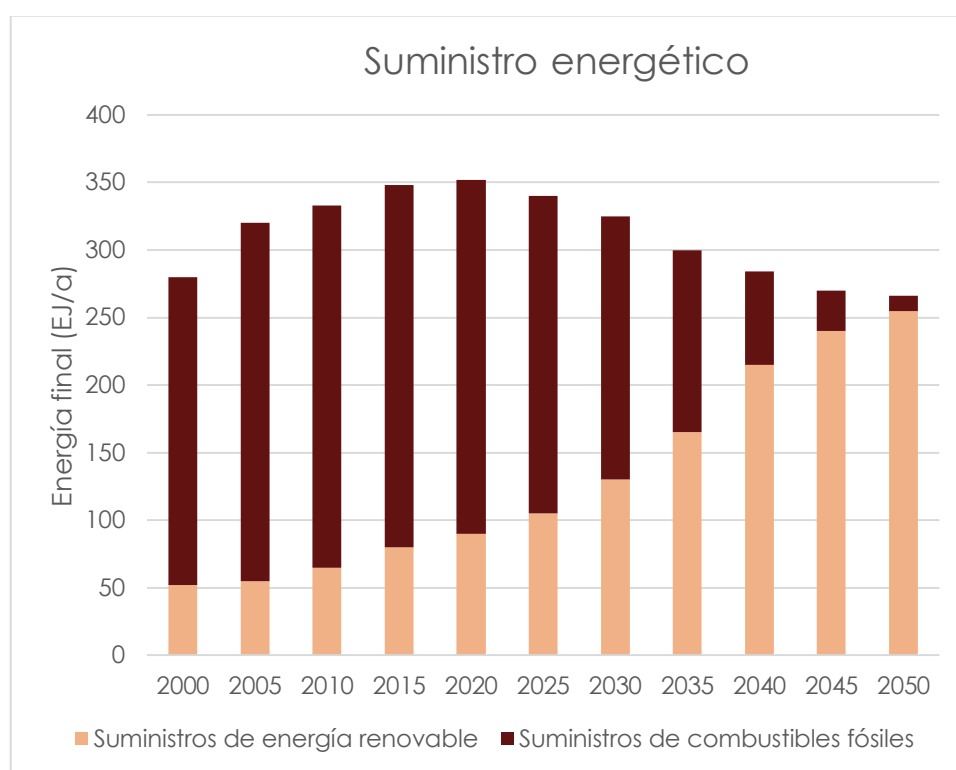
Desde hace ya un tiempo a ésta parte, el mundo se está viendo enfrentado a problemas energéticos, debido a la gran dependencia energética de la sociedad y su creciente consumo y al agotamiento de los combustibles fósiles como el petróleo, gas y carbón. El petróleo es utilizado como fuente directa de energía (motores de vehículos u otros), o bien para que a través de él se generen otras energías (eléctrica por ejemplo), este fenómeno irreversible ha sido denominado como “Crisis Energética”. Las razones pueden ser muchas: aumento del consumo de energía eléctrica debido al constante crecimiento, tanto del sector residencial, como del sector industrial, quienes son los que demandan la mayor cantidad de energía, aumento del parque automotriz, agotamiento de recursos naturales como el agua dulce, junto con el ya mencionado petróleo (Jeffries, y otros, 2011).

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, etc. 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. (Rodríguez, y otros, 2008)

Las repercusiones actuales en la disponibilidad y calidad de la energía atraviesan serias carencias, por lo que se exigen soluciones que se puedan aplicar técnicamente y que respondan a las exigencias del desarrollo sostenible. La utilización de las energías renovables durante las últimas décadas, ha demostrado que puede contribuir sustancialmente a favor de la solución de este problema por motivo de la estructura descentralizada de las energías renovables, sobre todo aquellas que usan de manera directa la radiación solar, la energía solar térmica y la fotovoltaica. Las tecnologías de

energía renovables presentan una alternativa económica y ambiental factible para la provisión de energía a las comunidades y para la expansión de la capacidad eléctrica instalada, adicionalmente estas tecnologías pueden disminuir la contaminación del medio ambiente, sin embargo existen barreras que dificultan un mayor desarrollo de este tipo de energía: la falta de conocimiento de las tecnologías y las capacidades institucional y técnica aún incipientes.

Cada una de las energías renovables con sus particularidades ha sufrido de un incremento en su utilización y se ha estimado un incremento mucho mayor para los venideros años como se puede evidenciar en la figura 1.1.

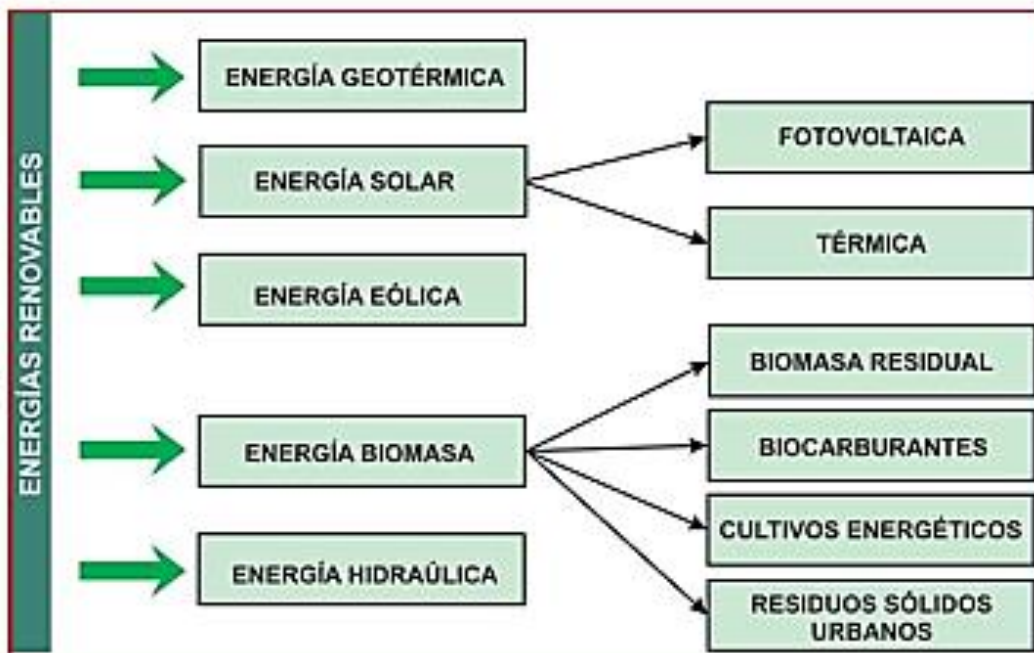


**Figura 1.1.** Suministro energético mundial (WWF, 2011).

## 1.1. La energía renovable.

La energía renovable es la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, undimotriz, la biomasa y los

biocarburantes. Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica (Serrano Méndez & Rubio Sarmiento, 2008).



**Figura 1.2.** Mapa conceptual de las fuentes de energía renovable.

(Serrano Méndez & Rubio Sarmiento, 2008)

### 1.1.1. La energía solar como fuente de energía renovable.

El fenómeno de la radiación solar permite obtener la energía del sol para ser aprovechada de distintas formas y por distintos dispositivos, como son:

- ❖ Energía fototérmica: Cuando la radiación solar es aprovechada para el calentamiento, de algún sistema que posteriormente permitirá la climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, entre otros. Actualmente existen diversas Centrales Solares Térmicas generando energía en el mundo, cuya base de funcionamiento es el uso indirecto de la energía solar (Cabó, 2014).
- ❖ Energía fotovoltaica: Cuando la radiación solar se aprovecha para la generación de electricidad a través del efecto fotovoltaico. El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos (Cabó, 2014).



## **1.2. La energía solar fotovoltaica.**

La energía solar fotovoltaica se obtiene por medio del proceso directo de transformación de la energía de la luz solar en energía eléctrica, mediante la utilización de un dispositivo electrónico denominado “célula fotovoltaica”. Esta conversión de energía se produce gracias al fenómeno físico conocido como “efecto fotoeléctrico” que tiene lugar en las células fotovoltaicas (Cabó, 2014).

La luz solar está compuesta por fotones, partículas energéticas que poseen distintas cantidades de energía, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar, cuando los fotones inciden sobre la célula fotovoltaica, pueden ser reflejados, absorbidos, o pasar a través de ella. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad. Esto ocurre cuando el valor de la energía del fotón supera el valor de la energía que une el electrón al núcleo.

### **1.2.1. Historia.**

El término fotovoltaico proviene del griego “phos”, que significa luz y “voltaico”, que proviene del campo de la electricidad, en honor al físico italiano Alejandro Volta. El término fotovoltaico se comenzó a usar en Inglaterra desde el año 1849. El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez en 1839 por el físico francés Becquerel, pero la primera célula solar no se construyó hasta 1883. Su autor fue Charles Fritts, quien recubrió una muestra de selenio semiconductor con un pan de oro para formar el empalme, este primitivo dispositivo presentaba una eficiencia de solo un 1 % (Peg Puig, 2012).

La era moderna de la tecnología de potencia solar no llegó hasta el año 1954 cuando los Laboratorios Bell descubrieron de manera accidental, que los semiconductores de silicio dopado con ciertas impurezas eran muy sensibles a la luz. Estos avances contribuyeron a la fabricación de la primera célula solar comercial con una conversión de la energía solar de aproximadamente el 6 %. La URSS lanzó su primer satélite espacial en el año 1957, y los EEUU un año después. La primera nave espacial que usó paneles solares fue el satélite norteamericano Vanguard 1, lanzado en marzo de 1958. Este hito generó un gran interés en la producción y lanzamiento de satélites geoestacionarios para el

desarrollo de las comunicaciones, en los que la energía provendría de un dispositivo de captación de la luz solar. Fue un desarrollo crucial que estimuló la investigación por parte de algunos gobiernos y que impulsó la mejora de los paneles solares.

En 1970 la primera célula solar con heteroestructura de arseniuro de galio (GaAs) y altamente eficiente se desarrolló en la extinta URSS por Zhorés Alfiórov y su equipo de investigación. La primera compañía que manufacturó paneles solares en cantidades industriales, a partir de uniones simples de GaAs, con una eficiencia de AM0 (Air Mass Zero) del 17 % fue la norteamericana ASEC (Applied Solar Energy Corporation). ASEC desarrolló la primera celda de doble unión para las naves espaciales usadas en los EEUU, con una eficiencia de un 20 % aproximadamente. Las uniones triples comienzan con eficiencias del orden del 24 % en el 2000, 26 % en el 2002, 28 % en el 2005, y han llegado, de manera corriente al 30 % en el 2007 (Peg Puig, 2012).

### **1.3. Componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red.**

#### **1.3.1. Generador fotovoltaico.**

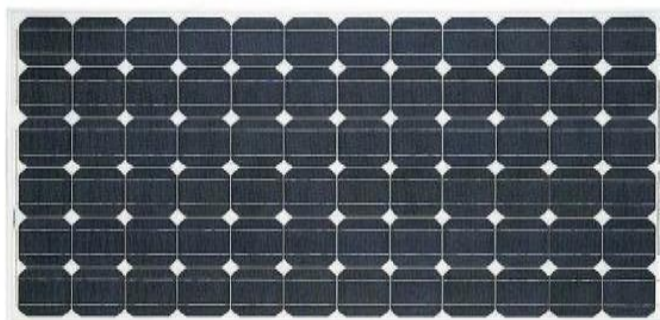
Una célula fotoeléctrica, también llamada celda, fotocélula o célula fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica (flujo de electrones libres) mediante el efecto fotoeléctrico, generando energía solar fotovoltaica. El aspecto de una celda fotovoltaica consiste en una lámina delgada, la cual está construida por un material semiconductor de cierto grado de pureza, cuando dicho material está expuesto a la luz solar, absorbe fotones de luz con suficiente energía para producir un salto de electrones. El silicio es el material semiconductor más importante para la conversión de energía solar en energía eléctrica. En su forma cristalina pura, este material presenta pocas cargas libres en su interior y una resistividad alta. Mediante un proceso llamado difusión se puede introducir pequeñas cantidades de otros elementos químicos, que permiten decrecer el valor inicial de resistividad y crear simultáneamente una región tipo P y una región tipo N, de modo de que se produce una unión P-N. Los principales componentes de la celda fotovoltaica son las capas adyacentes de materiales semiconductores tipo P y tipo N que se unen en una zona denominada junta o juntura (Carmona, 2010).

## Tipos de celdas solares fotovoltaicas.

Comercialmente se ofrecen diferentes tipos de células solares fotovoltaicas. Algunas son más conocidas y solicitadas por su mayor tiempo de existencia en el mercado.

- Mono-Cristalinas.

Estructura Mono-Cristalina fue la primera en ser fabricada, haciendo uso de la misma técnica que se usaba en la manufactura de los diodos y transistores. Son conocidas como cristalinas y abreviada como cSi. El proceso de fabricación de las planchas mono-cristalinas se cortan de un lingote mono-cristalino y éste requiere un alto consumo de energía eléctrica, alrededor de 1400 °C, esto es uno de los factores que elevan su costo en el mercado pero también son los de mayor eficiencia. El silicio utilizado debe ser de alta pureza y tener una estructura cristalina casi perfecta. Se reconoce a simple vista porque su superficie es uniforme y se nota como un espejo de color gris al exponerse al sol, como se aprecia en la figura 1.3 (Carmona, 2010).



**Figura 1.3.** Panel solar mono-cristalino. (Industria directa, 2011)

- Poli-Cristalinas.

La Estructura Poli-Cristalina (pSi) se obtiene de la fundición del silicio grado industrial el cual se vierte en moldes rectangulares de sección cuadrada dejándolo que se sienta, después de esto, se rebana el molde quedando en forma de planchas. Este proceso de obtener las planchas por medio del moldeo, hace que este tipo de procedimiento necesite menos energía y por lo tanto su costo de producción sea menor que las estructuras mono-cristalinas, con el agravante que no se logra la misma eficiencia, debido que en el proceso de moldeo se obtienen imperfecciones en la estructura cristalina. Se reconocen porque reflejan la luz solar en forma no uniforme y se observan las imperfecciones en el cristal

el cual tiene coloración azulada. La firma Kyocera ha llegado a fabricar células pSi con eficiencia de conversión del 15%. En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de panel solar poli-cristalino (Carmona, 2010).



**Figura 1.4.** Panel solar poli-cristalino. (Industria directa, 2011)

- Amorfos.

La Estructura Amorfa es el otro tipo conocido en el mercado, ellas no tienen estructura cristalina (a=sin, morfa=forma), lo que permite un abaratamiento en el costo y una más baja eficiencia que las otras dos estructuras (Carmona, 2010).

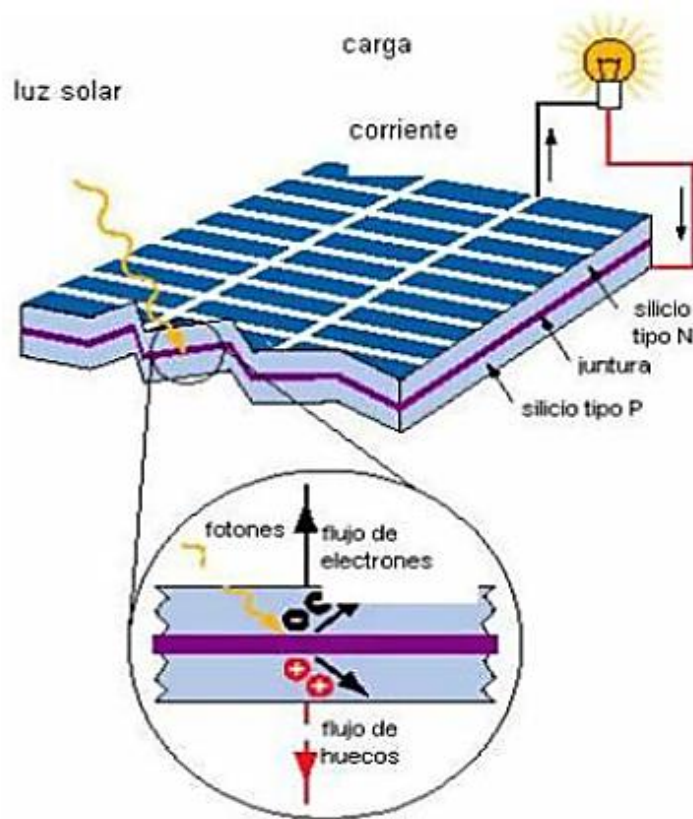


**Figura 1.5.** Panel solar amorfo. (Industria directa, 2011)

Un módulo es la interconexión de varias celdas solares y se emplean para proporcionar una potencia máxima a una tensión eléctrica determinada; es decir, para abastecer una zona de alto nivel de consumo energético es necesario utilizar un módulo fotovoltaico ya que una celda sería insuficiente (Carmona, 2010).

Los módulos se componen de los siguientes elementos como se muestra en la figura 1.6:

- Cubierta frontal.
- Material encapsulante.
- Celdas solares con sus conexiones eléctricas.
- Cubierta posterior.
- Marco.
- Metálico.



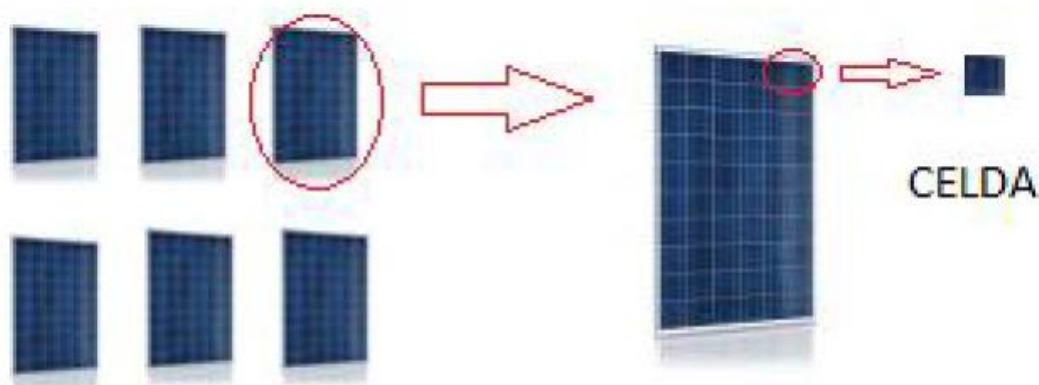
**Figura 1.6.** Estructura de un módulo solar de silicio.

Varios módulos ensamblados mecánicamente entre ellos forman el panel, por lo que un sistema fotovoltaico está formado por el conjunto de paneles fotovoltaicos, componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar y transformar la energía solar disponible, en energía eléctrica utilizable. Los sistemas fotovoltaicos generan electricidad a partir de la intensidad de la radiación solar, no del calor; por lo que el frío no representa ningún problema para el aprovechamiento. Los paneles fotovoltaicos

pueden ser conectados en serie, en paralelo o la combinación adecuada para obtener la corriente y tensión eléctrica necesaria para una determinada aplicación. Los módulos fotovoltaicos que forman el sistema fotovoltaico, están montados sobre una estructura mecánica capaz de sujetarlos y que está orientada para optimizar la radiación solar. La cantidad de energía producida por un sistema fotovoltaico varía durante el año en función de la radiación de la localidad y de la latitud de la misma (International, Solar Energy, 2010).

Finalmente, una vez que quedan claros los conceptos anteriores se puede definir que un generador fotovoltaico es la interconexión serie-paralelo de módulos fotovoltaicos dada su característica de fuente de potencia.

Todo lo mencionado anteriormente con respecto a los generadores se resume en el siguiente esquema:



**Figura 1.7.** Diagrama de composición de un generador fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia

### 1.3.2. Inversor.

El inversor o convertidor de un SFVCR tiene como misión principal, la conversión de corriente continua (CD) en corriente alterna (CA) en sincronía con la red eléctrica. Incorpora además, algunas funciones de control que influyen notablemente en el funcionamiento del sistema fotovoltaico como son: (Aguila, 2013)

- Seguimiento del punto de máxima potencia, optimizando el grado de aprovechamiento del generador fotovoltaico.

- Conexión o desconexión de la red en función de las condiciones de ésta y de la irradiancia incidente sobre el generador.
- Detección de pérdidas de aislamiento y medida de energía.

Además deben trabajar con el máximo rendimiento generando energía con una determinada calidad. Para un sistema fotovoltaico es necesario definir cuatro criterios que garanticen la calidad de dicho inversor, estos pueden ser: (Aguila, 2013)

1. Grado de aprovechamiento del generador fotovoltaico o seguimiento de su punto de máxima potencia.
2. Eficiencia de conversión o pérdidas introducidas por el inversor durante el proceso;
3. Calidad de la energía generada (emisión de armónicos, Factor de Potencia, generación de interferencias, entre otros).
4. Seguridad para personas, equipos y la red eléctrica.

Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada, que se debe adaptar al generador, la potencia máxima que puede proporcionar y la eficiencia. Esta última se define como la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega a la utilización (potencia de salida) y la potencia eléctrica que extrae del generador (potencia de entrada).

### **1.3.3. Estructura de soporte de las placas.**

El bastidor es el encargado de sujetar el panel solar, y muchas veces será un kit de montaje para instalarlo adecuadamente. En el caso de que no se suministrara en kit el instalador lo realizará de acuerdo a la normativa existente, además de tener en cuenta la fuerza del viento entre otras cosas. La estructura deberá soportar como mínimo una velocidad del viento de 150 km/h. Esta estructura es la que fijará la inclinación de los paneles solares (Aguila, 2013).

Hay varios tipos de estructuras: desde un simple poste que soporta 4 paneles solares, hasta grandes estructuras de vigas aptas para aguantar varias decenas de ellos.

#### **1.3.4. Caja general de protección.**

La caja general de protección es la encargada de salvaguardar toda la instalación eléctrica de un posible cortocircuito o punta de intensidad la cual afectaría a todos los componentes conectados a la red. Esta caja general de protección podrá llevar tanto protecciones térmicas como fusibles (Aguila, 2013).

#### **1.3.5. 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).

#### **1.3.6. 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.

Los cables utilizados tendrán una última capa de protección con un material resistente a la intemperie y la humedad, de tal forma que no le afecten internamente los agentes atmosféricos. Entre las conexiones eléctricas entre paneles usaremos siempre terminales. Los terminales de los paneles pueden ser bornes en la parte de atrás del panel o estar situados en una caja de terminales a la caja espalda del mismo. En el primer caso tendremos capuchones de goma para la protección de los terminales contra los agentes atmosféricos. La caja de terminales es una buena solución en el caso de que cumpla con el grado de protección IP.535. Es necesario también cuidar los sistemas de paso de los cables por muros y techos para evitar la entrada de agua en el interior. Las técnica y tendido para la fijación de los cables han de ser las habituales en una instalación convencional. Los conductores pueden ir bajo tubo al aire, en el primer caso puede ir empotrado o no. La sujeción se efectuará mediante bridas de sujeción, procurando no



someter un excesivo dobléz a los radios de curvatura. Los empalmes se realizarán con accesorios a tal efecto, usando cajas de derivación siempre que sea posible.

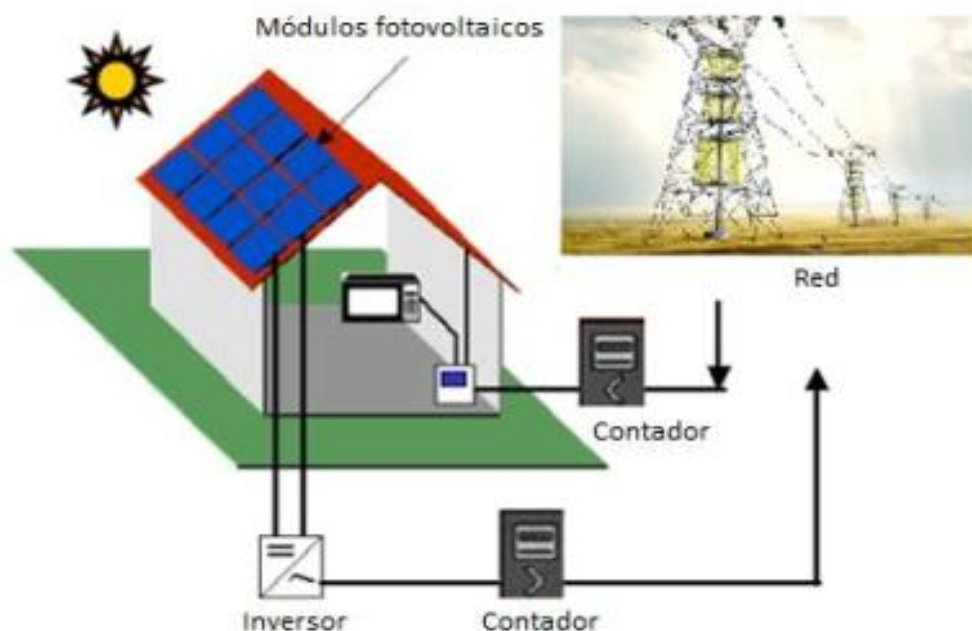
La conexión entre módulos será mediante cables del tipo Multi-contact para garantizar una rápida instalación con máxima fiabilidad y durabilidad de las conexiones.

Un buen cableado debería evitar grandes pérdidas de tensión y proveer una aislación eléctrica para reducir el riesgo de que ocurran accidentes si altas tensiones se hacen presentes en el sistema (Pérez, 2013).

### 1.3.7. Contadores.

El generador fotovoltaico necesita dos contadores ubicados entre el inversor y la red, uno para cuantificar la energía que se genera e inyecta a la red para su facturación, y otro para cuantificar el pequeño consumo del inversor fotovoltaico en ausencia de radiación solar, así como garantía para la compañía eléctrica de posibles consumos que el titular de la instalación pudiera hacer.

Todos estos elementos que integran en un sistema solar fotovoltaico conectado a la red, se pueden apreciar en la figura 1.8.



**Figura 1.8.** Componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. (Cecu Corporation, 2011)

El funcionamiento del sistema solar se realiza de forma completamente automática, tanto para su puesta en marcha como para su parada:

1. Al amanecer, los dispositivos de control del sistema miden la potencia disponible en el generador fotovoltaico. Una vez alcanzado el nivel mínimo de funcionamiento, el inversor arranca y comienza la generación de corriente.
2. Al anochecer, cuando se detecta un nivel de potencia del generador inferior al mínimo con el que puede funcionar, el equipo se desconecta hasta un nuevo amanecer (Cecu Corporation, 2011).

Con sistemas conectados a la red toda la energía producida se vierte a la misma, independientemente del consumo que se tenga, ya que este consumo se realiza a través de la conexión convencional que se tenía antes de la instalación de los paneles. En estos casos el usuario no percibe ningún cambio en el servicio eléctrico que recibe, manteniendo las mismas ventajas (seguridad de suministro) e inconvenientes (riesgo de eventuales cortes de luz), pero sabiendo que cada kW que produzca con los módulos fotovoltaicos es uno menos que se genera en las centrales (Cecu Corporation, 2011).

La energía excedente se vende a la empresa suministradora lo que reporta una compensación económica para el propietario de la instalación, que ha realizado una inversión inicial y ha de recuperarla. Normalmente, no sólo la recupera, sino que a partir de un tiempo determinado consigue obtener una serie de beneficios.

#### **1.4. Fotovoltaica en edificación.**

El diseño de un SFVCR en edificaciones frecuentemente es más complejo que el de un SFVCR sobre suelo. La integración del sistema fotovoltaico con el edificio exige tener en cuenta muchos factores que condicionan la ubicación y la configuración del generador. Así, la orientación e inclinación del generador ya no puede ser elegida para optimizar la producción energética, sino que las características propias del edificio y de los elementos que alberga obligan muy frecuentemente a optar por ángulos que difieren del óptimo. En este tipo de sistemas, el diseñador debe tomar las decisiones oportunas para aprovechar las sinergias entre edificio y sistema fotovoltaico, reduciendo las posibles interferencias entre uno y otro. Los SFVCR en edificación poseen grandes ventajas como son una

mayor cercanía entre el lugar de consumo y el de generación y su sencillo montaje, aprovechando al máximo la estructura del edificio, sin la necesidad de una obra ingenieril que requiera movimientos de tierra ni cimentación para el montaje de la estructura (Lamingueiro, 2013).

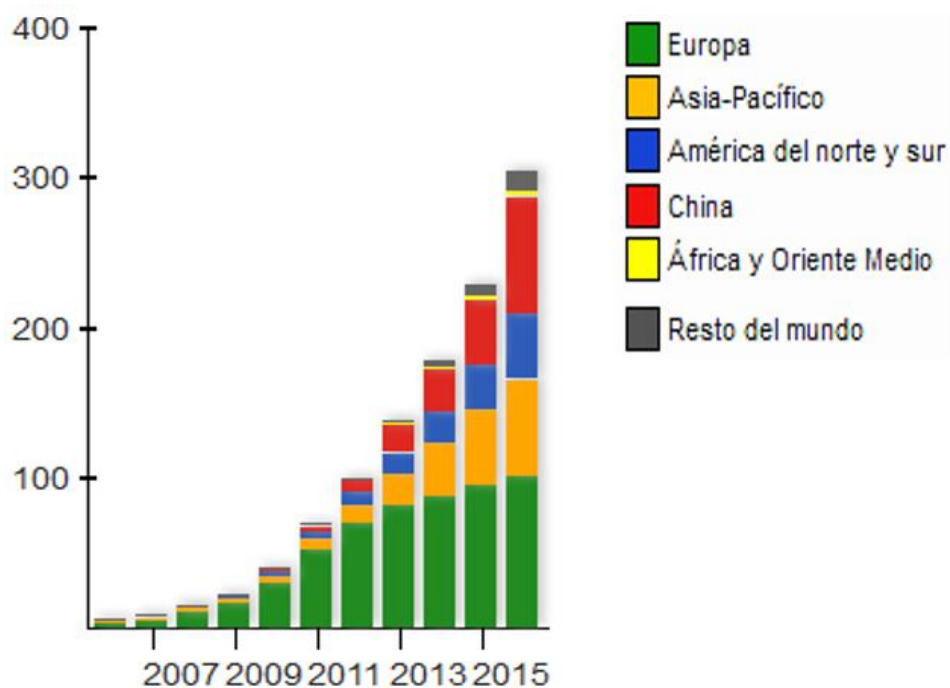
### **1.5. Desarrollo de los sistemas fotovoltaicos a nivel mundial.**

La energía solar fotovoltaica permite un gran número de aplicaciones, ya que puede suministrar energía en emplazamientos aislados de la red (viviendas aisladas, faros, postes SOS, bombeos, repetidores de telecomunicaciones, etc.) o mediante instalaciones conectadas a la red eléctrica, que pueden ser de pequeño tamaño (instalación en vivienda individual) o centrales de gran tamaño. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. Experimentalmente también han sido usados para dar energía a vehículos solares, por ejemplo en el World Solar Challenge a través de Australia. Muchos yates y vehículos terrestres los usan para cargar sus baterías de forma autónoma, lejos de la red eléctrica (Energía Solar, 2018).

Entre los años 2001 y 2016 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción fotovoltaica, duplicándose aproximadamente cada dos años. La potencia total fotovoltaica instalada en el mundo (conectada a red) ascendía a 16 gigavatios (GW) en 2008, 40 GW en 2010, 100 GW en 2012, 180 GW en 2014 y 300 GW en 2016. Si esta tendencia continúa, la energía fotovoltaica cubriría el 10 % del consumo energético mundial en 2018, alcanzando una producción aproximada de 2200 TWh, y podría llegar a proporcionar el 100 % de las necesidades energéticas actuales en torno al año 2027.

Históricamente, Estados Unidos lideró la instalación de energía fotovoltaica desde sus inicios hasta 1996, cuando su capacidad instalada alcanzaba los 77 MW, más que cualquier otro país hasta la fecha. En los años posteriores, fueron superados por Japón, que mantuvo el liderato hasta que a su vez Alemania la sobrepasó en 2005, manteniendo el liderato desde entonces. A comienzos de 2016, Alemania se aproximaba a los 40 GW instalados. Sin embargo, por esas fechas China, uno de los países donde la fotovoltaica está experimentando un crecimiento más vertiginoso superó a Alemania, convirtiéndose

desde entonces en el mayor productor de energía fotovoltaica del mundo. Se espera que multiplique su potencia instalada actual hasta los 150 GW en 2020. (Wikipedia, 2018)



**Figura 1.9.** Potencia fotovoltaica mundial instalada hasta 2016, en gigavatios (GW), expresada por región (Energía Solar, 2018).

La considerable potencia eléctrica instalada a partir del uso de la energía solar en Alemania ha protagonizado varios récords durante los últimos años; en mayo de 2012, por ejemplo, las plantas solares fotovoltaicas instaladas en el país produjeron 22 000 MWh en la hora del mediodía, durante dos días seguidos, lo que equivale a la potencia de generación de veinte centrales nucleares trabajando a plena capacidad. Un dato interesante es que aproximadamente el 90% de los paneles solares instalados en Alemania se encuentran situados sobre tejados. En junio de 2014, la fotovoltaica alemana volvió a batir récord al cubrir hasta el 50,6% de toda la demanda eléctrica durante un solo día, y superar el anterior récord de potencia instantánea de 24,24 GW. (Wikipedia, 2018)

La energía fotovoltaica se ha convertido en una de las mayores industrias de la República Popular China. El país asiático cuenta con unas 400 empresas fotovoltaicas, entre las que destacan Suntech y Yingli. En el 2014 produjo aproximadamente la mitad de los productos fotovoltaicos que se fabrican en el mundo. En el primer trimestre de 2015,

China instaló 5 GW fotovoltaicos, acumulando en sólo 3 meses la misma potencia fotovoltaica instalada por países como Francia o España en toda su historia. En el 2014, China esperaba contar con una potencia fotovoltaica de 100 GW para el 2020, cifra que al año siguiente fue actualizada hasta 150 GW, lo que significa la instalación de unos 20 GW anuales hasta finales de la década (Energía Solar, 2018).

La energía fotovoltaica en Japón, se ha expandido rápidamente desde la década de 1990. En el 2014, la potencia fotovoltaica instalada alcanzó en Japón su record histórico con 10 GW, comparados con los 7 GW instalados en 2013. A finales de 2014, la potencia total fotovoltaica instalada en el país se situaba en torno a los 23 GW, que contribuían aproximadamente en un 2,5% a la demanda eléctrica del país. Durante el verano de 2015, se informó que la producción fotovoltaica en Japón había cubierto en determinados momentos el 10 % de la demanda total nacional.

Estados Unidos es desde 2010 uno de los países con mayor actividad en el mercado fotovoltaico, cuenta con grandes empresas del sector, como First Solar o Solar City, así como numerosas plantas de conexión a red. A principios del 2015 Estados Unidos superó los 20 GW de potencia fotovoltaica instalada, suficiente para proporcionar electricidad a más de 4 millones de hogares (Energía Solar, 2018).

Italia se encuentra entre los primeros países productores de electricidad a partir de energía fotovoltaica, gracias al programa de incentivos llamado Conto Energía. El crecimiento ha sido exponencial en los últimos años: la potencia instalada se triplicó en el 2010 y se cuadruplicó en el 2011, llegando a producir en el 2012 el 5,6% de la energía total consumida en el país. A finales del 2014, la potencia total instalada se acercaba a los 19 GW, suponiendo una producción energética tan importante que varias centrales de gas operaban a mitad de su potencial durante el día. (Wikipedia, 2018)

La capacidad fotovoltaica en América Latina y el Caribe en el 2013 fue de 200 MW representando solo el 0.15 % de la capacidad mundial instalada, en el 2014 fue de 402 MW y 0.22% mientras que el pronóstico al 2019 es que se instale el 1.6 % de la capacidad mundial con 8000 MW. Para que se cumpla este programa sería indispensable varias proyecciones de trabajo, entre las que se encuentra la posible creación de una asociación fotovoltaica de América Latina y el Caribe que aunara a productores, científicos,

ingenieros, economistas, entre otros con el fin de promover el desarrollo y disminuir los precios, ya que en América Latina y el Caribe no se producen celdas industriales, tampoco se fabrican inversores ni otros elementos constructivos, de ahí el pobre nivel de instalaciones FV en la región (Energía Solar, 2018).

### **1.5.1. Previsión a largo plazo.**

La organización Photovoltaic Market Alliance (PVMA), un consorcio formado por varias entidades de investigación, calcula que la capacidad global estará entre los 444-630 GW en 2020. Un informe conjunto de esta organización y Greenpeace publicado en 2010 muestra que para el año 2030, un total de 1845 GW fotovoltaicos podrían generar aproximadamente 2646 TWh/año de electricidad en todo el mundo. Combinado con medidas de eficiencia energética, esta cifra representaría cubrir el consumo de casi un 10 % de la población mundial. Para el año 2050, se estima que más del 20 % de la electricidad mundial podría ser cubierto por la energía fotovoltaica.

Para el año 2085 se espera que se abandone la producción de energía eléctrica a partir de centrales térmicas que funcionan con carbón, que las plantas nucleares y las que generan a partir de combustibles contaminantes desaparezcan al año 2100. Quedando así una generación limpia basada en energías renovables como lo indica la figura 1.10. (Domigo Torres, 2010)

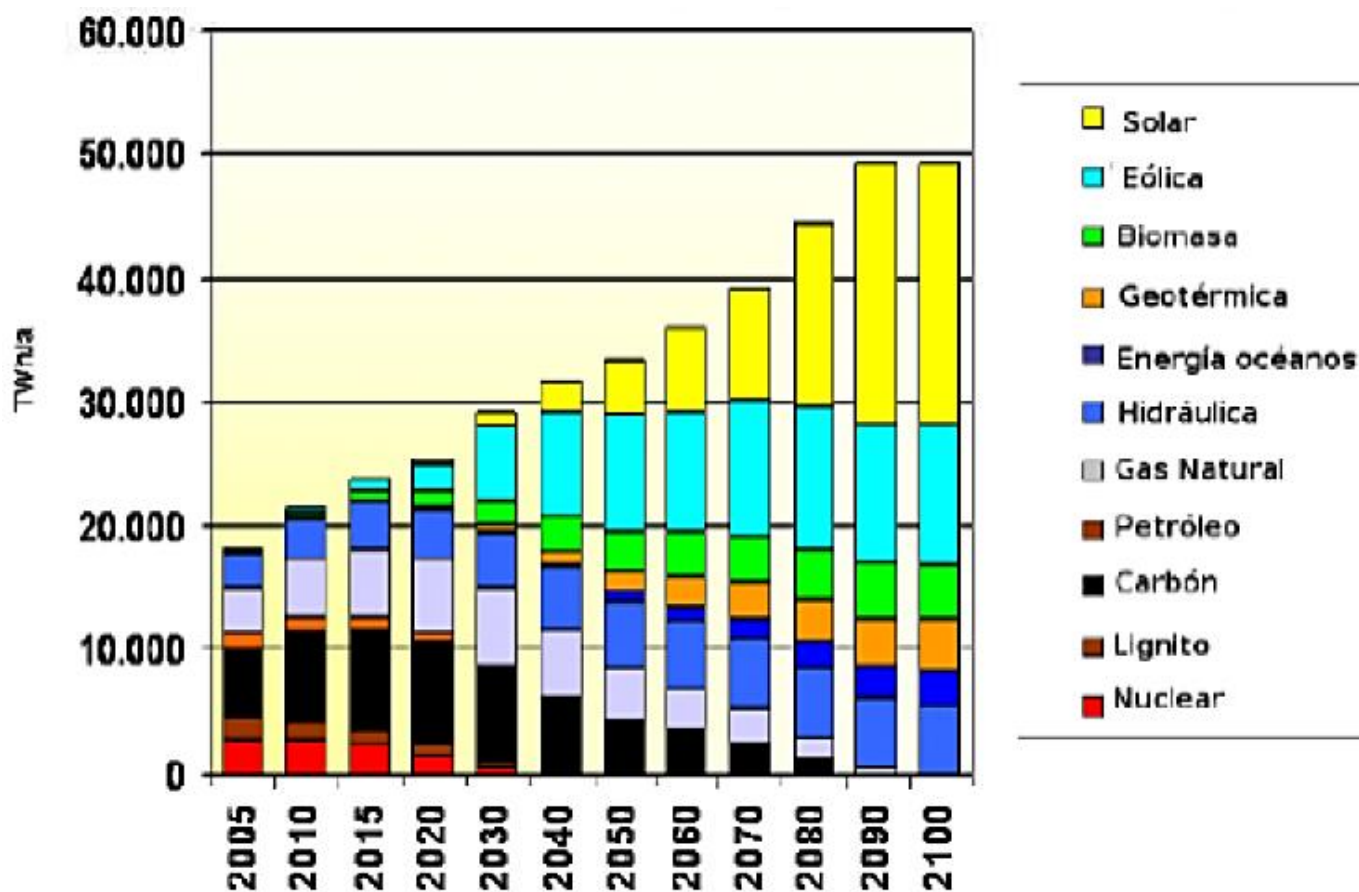


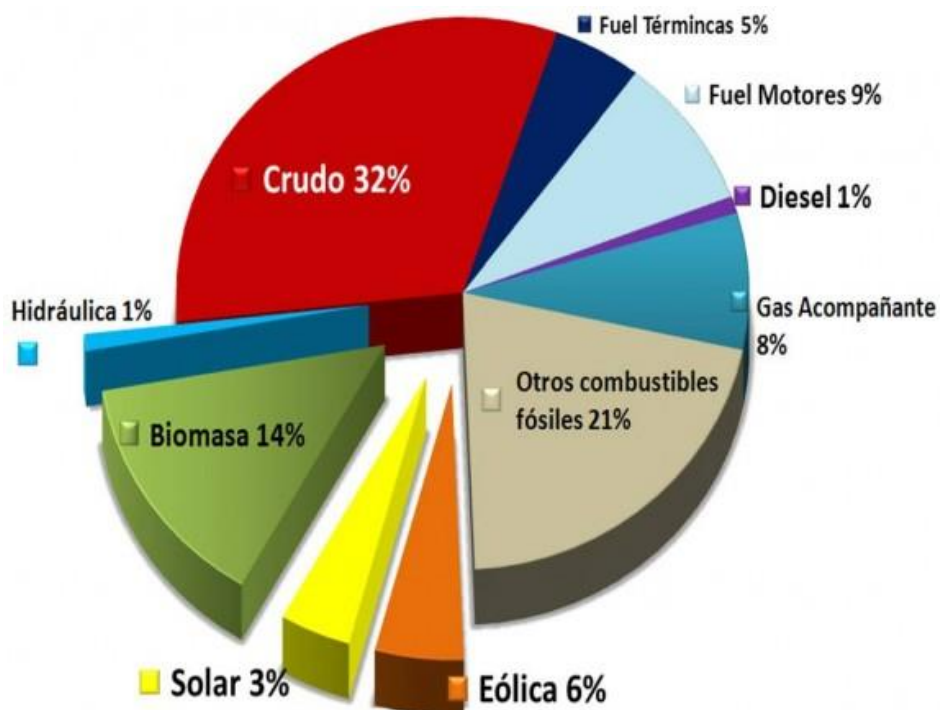
Figura 1.10. Generación de electricidad hasta 2100 a nivel mundial. (Domigo Torres, 2010)

## 1.6. Situación energética en Cuba.

Hoy la realidad del entorno en Cuba muestra un incremento de las necesidades energéticas, impulsadas por el desarrollo tecnológico y económico de la sociedad. Uno de los grandes problemas de la humanidad es su dependencia de los combustibles fósiles, ya que provocan un fuerte impacto ambiental además de diversos cambios en el ámbito económico.

El reto está en conseguir que las energías alternativas y renovables vayan sustituyendo paulatinamente a los combustibles fósiles tradicionales. La principal ventaja de las energías renovables es la de su menor impacto ambiental, ya que, reducen el número de contaminantes a la atmósfera, además de su distribución territorial menos concentrada. Son fuente de energía continua e inagotable, por lo que son la alternativa del futuro. Se

trata de energías limpias, que se pueden utilizar de forma autogestionada, ya que permiten ser aprovechadas en el mismo lugar donde se producen.



**Figura 1.11.** Matriz energética de Cuba. (Observatorio critico Cuba, 2018)

### 1.6.1. Energía solar fotovoltaica en Cuba.

A partir de la desaparición de la Unión Soviética y la intensificación del bloqueo impuesto por EEUU, Cuba ha realizado grandes esfuerzos para conseguir su suministro energético. Entre sus planes incluyó la intensificación de la utilización de energía solar, ya que el territorio cubano recibe muy altos niveles de radiación solar durante todos los días del año. Se estima que, como promedio anual, cada metro cuadrado del territorio nacional recibe una cantidad de energía solar igual a 5 kWh/día, equivalentes a medio litro de petróleo diario, ello crea las mejores condiciones para la instalación de sistemas para la conversión de la energía solar fotovoltaica y térmica. Se realizaron instalaciones fundamentalmente en zonas de difícil acceso donde no llega el SEN; por ejemplo, en consultorios del médico de la familia, hospitales rurales, círculos sociales, salas de televisión y escuelas.



Como base del Sistema de Atención Primaria a la población surgió hace algunos años el plan del “Médico de la Familia”, el que se ha extendido hasta lugares montañosos de difícil acceso, carente de energía eléctrica. A muchos de estos lugares no es posible llevar la electricidad con el SEN, dándole la solución más viable, económica y ambientalmente con la utilización de paneles solares. Hasta Febrero de 1999 se habían electrificado en el país 246 consultorios con sistemas fotovoltaicos y estaban pendientes 160. A partir de los primeros meses del año 2000 se fueron incrementando progresivamente dichas instalaciones hasta su total completamiento. Al finalizar el año 2001, el 100% de los consultorios del médico de la familia que lo requerían fueron electrificados con sistemas fotovoltaicos, más de 400. (Madruga, 2014)

En el programa audiovisual se concluyó la etapa de electrificación de más de 2067 escuelas ubicadas en lugares intrincados de zonas rurales, donde 123 tuvieron solución mediante el SEN y algunas mini hidroeléctricas y las restantes 1094 a través de las instalaciones de paneles solares que transforman la energía solar en energía eléctrica para la alimentación de televisores y videos, sustento material de dicho programa. Toda una obra de profunda justicia social, donde ni un solo escolar cubano quedó al margen de esta nueva tecnología aplicada al sistema educacional. Hasta octubre de 2015 los paneles fotovoltaicos conectados a la red han generado un total de 23459,7 MWh. Solo durante el año 2015 esta energía ahorró al país un total de 6334 toneladas de combustibles aproximadamente y ha dejado de emitir 18767 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, según datos del Instituto de Hidroenergía Nacional, entidad encargada de fomentar dicha práctica en Cuba. (Chávez, 2012)

El programa cubano de desarrollo de las FRE al 2030 contempla duplicar el producto interno bruto sin aumentar la dependencia energética ni la contaminación ambiental y se pronostica en esa fecha una capacidad instalada de energía fotovoltaica de 700 MW. (Chávez, 2012)

## 1.7. Casos exitosos de sistemas fotovoltaicos instalados en edificaciones.

El Hospital de Granada, España tiene instalado un sistema fotovoltaico conectado a la red con una potencia de 15,7 kWp. Este sistema genera anualmente 21,78 kWh lo que proporciona un ahorro económico. (Solartex, 2018)



**Figura 1.12.** Hospital de Granada, España. (Solartex, 2018)

El Sanyo Solar Ark, es un edificio con una arquitectura fotovoltaica en Japón de 315 metros de largo, 37 de alto, con formas curvas, elegantes y rotundas a la vez, muy al estilo japonés, un edificio puente, un cuadrado curvo y gigante forrado de 5000 paneles fotovoltaicos. Se construyó en el 2005 para la exposición universal de Aichi, como un icono de lo que puede conseguir la arquitectura integrada con las tecnologías productoras de energías renovables. (Solar ark, 2018)



**Figura 1.13.** Arquitectura fotovoltaica en Japón, Sanyo Solar Ark. (Solar ark, 2018)

El Palmenhouse Munich, Alemania contiene paneles solares policristalinos opacos 360 unidades de 75 Wp. Tiene una capacidad instalada de 27 kWp. (Wiki Arquitectura, 2018)



**Figura 1.14.** El Palmenhouse Munich, Alemania. (Wiki Arquitectura, 2018)

El Hospital Regional San José del Carmen, Chile tiene instalado 200 paneles solares fotovoltaicos por el Gobierno a través del Ministerio de Energía, y que le permitirán ahorrar más de 6 millones 100 mil pesos al principal centro de Salud de Atacama. (Energía Limpia, 2018)



**Figura 1.15.** Hospital Regional San José del Carmen, Chile. (Energía Limpia, 2018)

En el año 2006 se aprobó un plan de energía renovable en España que incentiva a las construcciones hotelería y turismo incluir dentro de sus edificaciones la implementación de energías limpias. En 2014 NH Hoteles Group aprobó el Plan de Eficiencia Energética 2014– 2018 por valor de 31 millones de euros. Con el propósito de implementar sistemas solares en su cadena hotelera y obtener un 25% de la energía utilizada en sus hoteles a partir de estas energías renovables. El sistema de energía solar cuenta con 4 500 m<sup>2</sup> placas solares que generan alrededor de 3 975 051 kW de potencia en los 36 hoteles que hacen parte de la compañía. Toda la energía proviene de renovables reduciendo en 66% su huella de carbono cumpliendo con uno de los objetivos estratégicos que está dentro de las políticas internas de la cadena hotelera. NH Hotel Group recibió en 2014 el Premio Europeo de Medio Ambiente (Medio ambiente, 2018)



**Figura 1.16.** NH Hoteles Group, España. (Medio ambiente, 2018)

La energía solar fotovoltaica cuenta con innumerables ventajas y desventajas:

**Ventajas:**

- Proviene de una fuente energética inagotable, el Sol.
- No contamina, no produce emisiones de CO<sub>2</sub> u otros gases.
- No precisa de un suministro exterior, no consume combustible, ni necesita presencia de otros recursos como el agua o el viento.
- La mayor producción coincide con las horas de mayor consumo.
- Las instalaciones son fácilmente modulables, con lo que se puede aumentar o reducir la potencia instalada fácilmente según las necesidades.
- Las plantas apenas requieren mantenimiento y tienen un riesgo de avería muy bajo.
- Los módulos gozan de una larga vida.
- Los sistemas resisten condiciones climáticas extremas: granizo, viento, frío...
- Es un sistema de aprovechamiento de energía idóneo para zonas donde el tendido eléctrico no llega o es difícil y costoso su traslado (Turrini, 2007).

### **Desventajas:**

- Limitaciones presupuestarias en cuanto a la capacidad que se puede instalar.
- El tiempo de instalación de una planta eléctrica de combustible es menor que el de un sistema fotovoltaico.
- La disponibilidad de energía es variable y depende de las condiciones atmosféricas.
- La eficiencia de los paneles fotovoltaicos es relativamente bajo (14%-25%) comparado con otras fuentes de energía renovable. (Turrini, 2007)

### **Conclusiones del capítulo I**

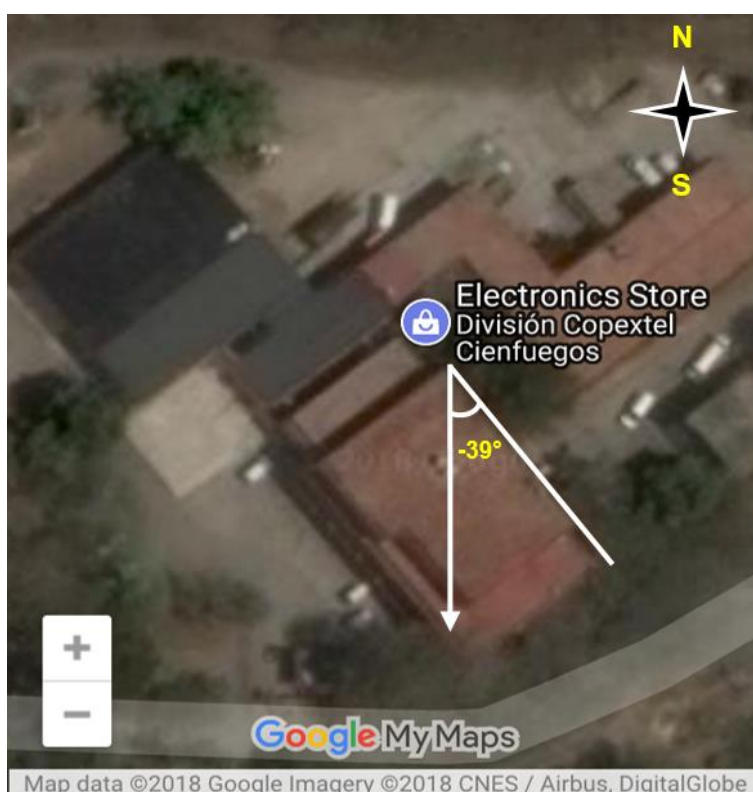
1. Las Energías Renovables constituyen una alternativa para satisfacer el crecimiento de la demanda energética dado el agotamiento de los combustibles fósiles.
2. Es la energía fotovoltaica la de más rápido crecimiento entre las fuentes renovables, entre los años 2006 y 2016 el crecimiento de la producción fotovoltaica ha sido exponencial, duplicándose aproximadamente cada dos años.
3. Es China el país de más rápido crecimiento en la producción y uso de la energía fotovoltaica, cuenta en la actualidad con unas 400 empresas fotovoltaicas, produce aproximadamente la mitad de los productos fotovoltaicos del mundo y en el primer trimestre de 2015 instaló 5 GW fotovoltaicos equivalente a la potencia fotovoltaica instalada por Francia o España en toda su historia.
4. Las energías renovables tienen un elevado crecimiento en los últimos años y se espera que para el año 2100 sean las únicas productoras de energía eléctrica en el mundo.
5. En Cuba la energía solar representa solo el 3% de sus portadores energéticos, por lo que en el año 2030 pronostica una capacidad instalada de energía fotovoltaica de 700 MW

## CAPÍTULO 2: Caracterización energética de la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos y dimensionamiento preliminar del sistema fotovoltaico.

---

### 2.1. Caracterización de la División Territorial COPEXTEL Cienfuegos.

La Corporación COPEXTEL, S.A cuenta con divisiones en cada provincia del país, una de estas divisiones es la División Territorial Cienfuegos, la cual se encuentra ubicada en las coordenadas 22°9'43,58" N y 80°26'43,49" W, con dirección calle 63, km 3 Pueblo Griffo, Cienfuegos.



**Figura 2.1.** Vista satelital de la DTCC. Fuente: Elaboración propia.

Esta división se caracteriza por ser una organización flexible y profesional, con un capital humano motivado y comprometido con sus clientes, la organización y la sociedad. (Valdivia, 2016) Su objeto social es:

- Ejecutar las operaciones de comercio exterior relacionadas con la exportación e importación de bienes y servicios, según nomenclatura aprobada por el Ministerio del Comercio Exterior y la Inversión Extranjera.
- Comercializar y arrendar productos no alimenticios, tanto importados como adquiridos en el mercado nacional.
- Brindar servicios de diseño, proyectos, integración, instalación y puesta en marcha, de consultoría, capacitación, de asistencia técnica y servicios técnicos de revisión y diagnóstico, así como de reparación y mantenimiento de los equipos y sistemas tecnológicos que se comercializan.
- Producir, ensamblar y comercializar bienes como complemento a los proyectos que realizan.

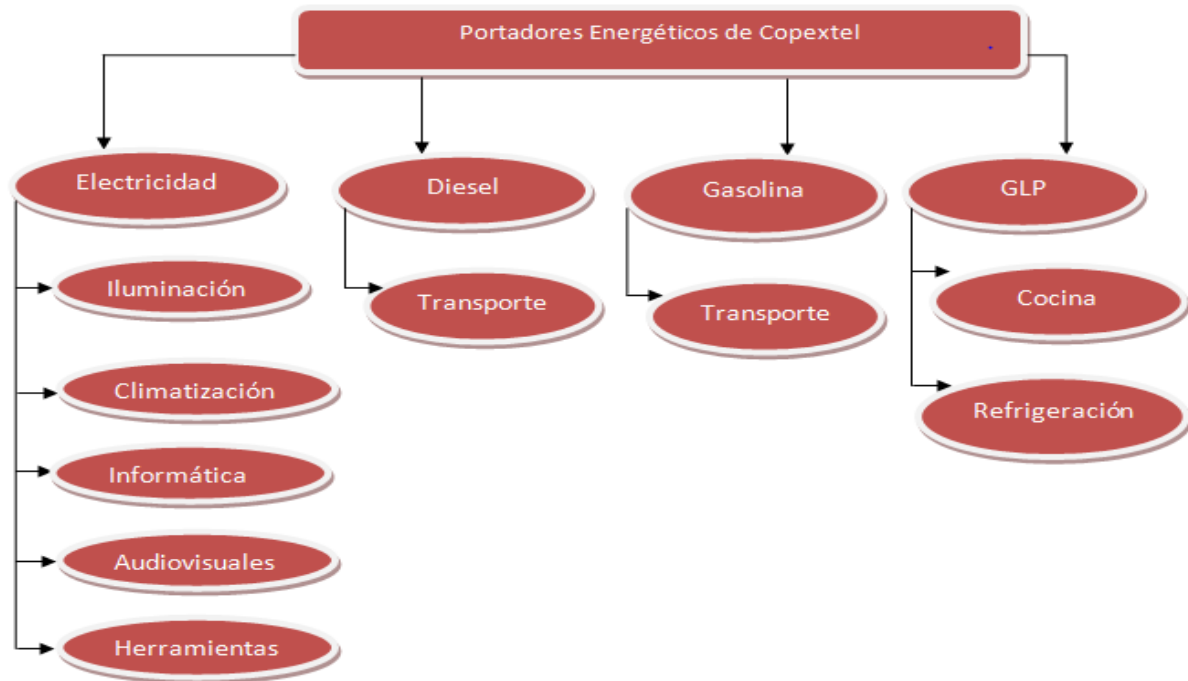
## **2.2. Revisión energética.**

En este requisito se identifican, analizan y comparan los usos significativos de la energía, el personal asociado a estos usos, los requisitos legales y otros que se suscriban relacionados con los usos y consumos de energía. Se realiza la revisión energética y se establece la línea de base energética, el indicador de desempeño energético, los objetivos energéticos, metas energéticas y planes de acción para la gestión de la energía.

### **2.2.1. Balance de energía.**

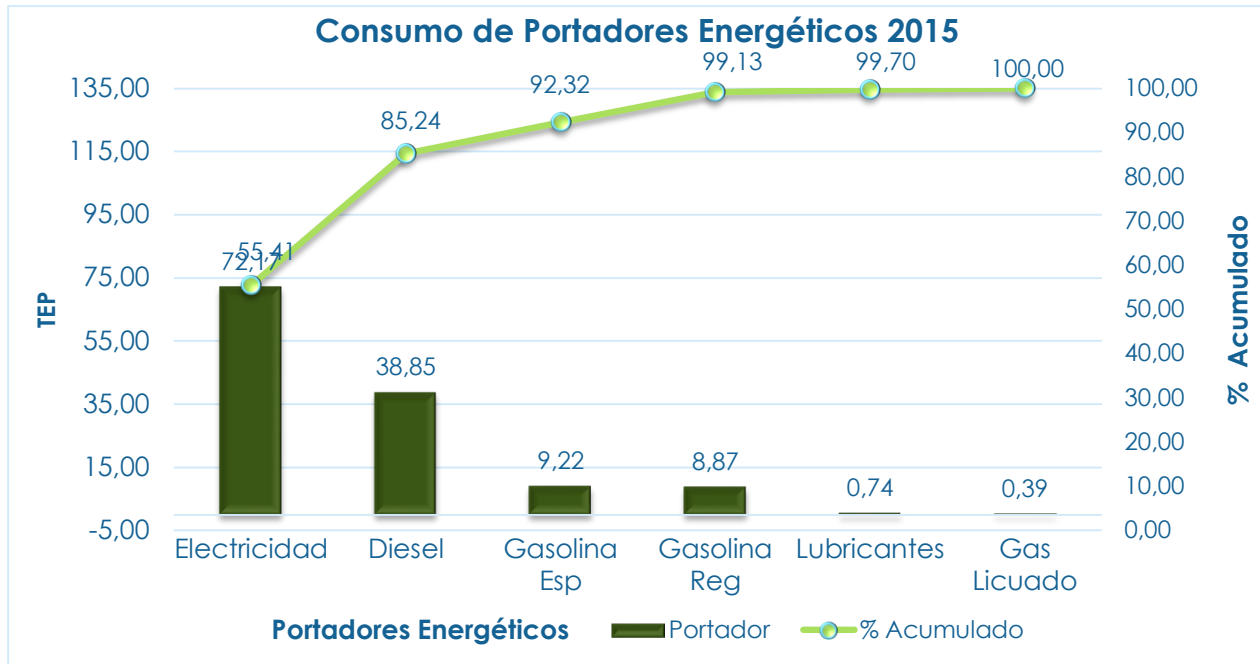
La institución satisface sus necesidades energéticas con el uso de cuatro portadores energéticos: electricidad, diésel, gasolina y gas licuado. En la figura 2.3 se muestra un diagrama de bloque con el uso final de cada uno de estos portadores dentro de la empresa (Valdivia, 2016).



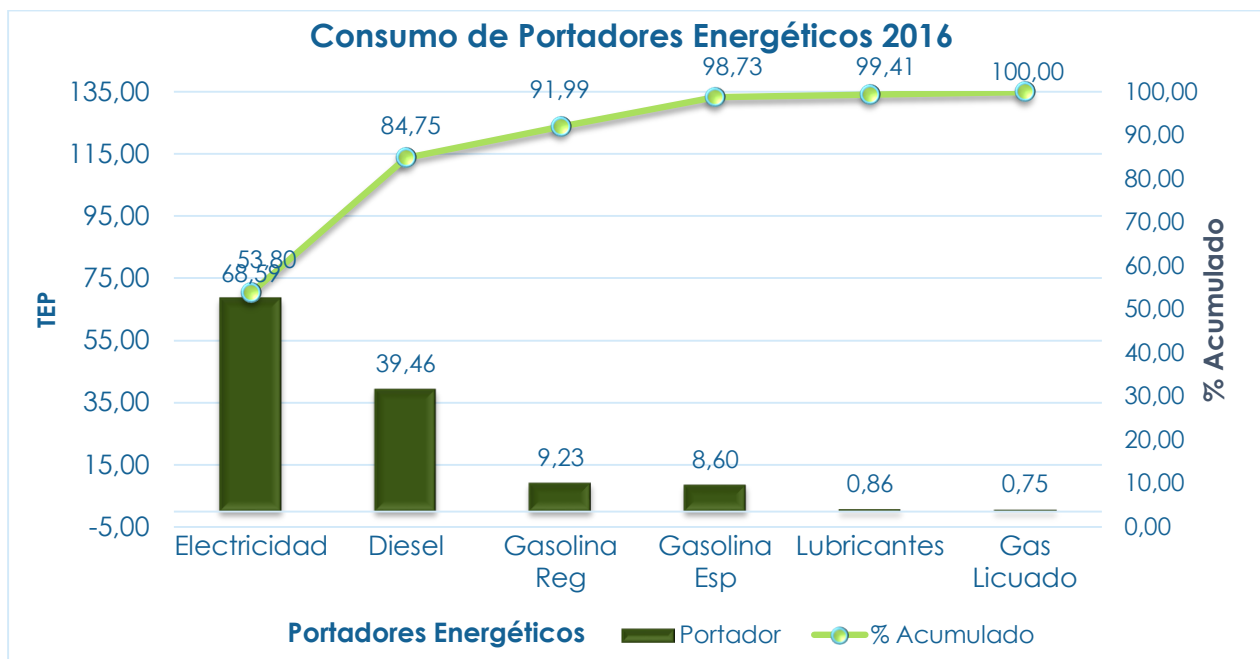


**Figura 2.2.** Diagrama de bloques del uso de los portadores energéticos en Copextel (Valdivia, 2016).

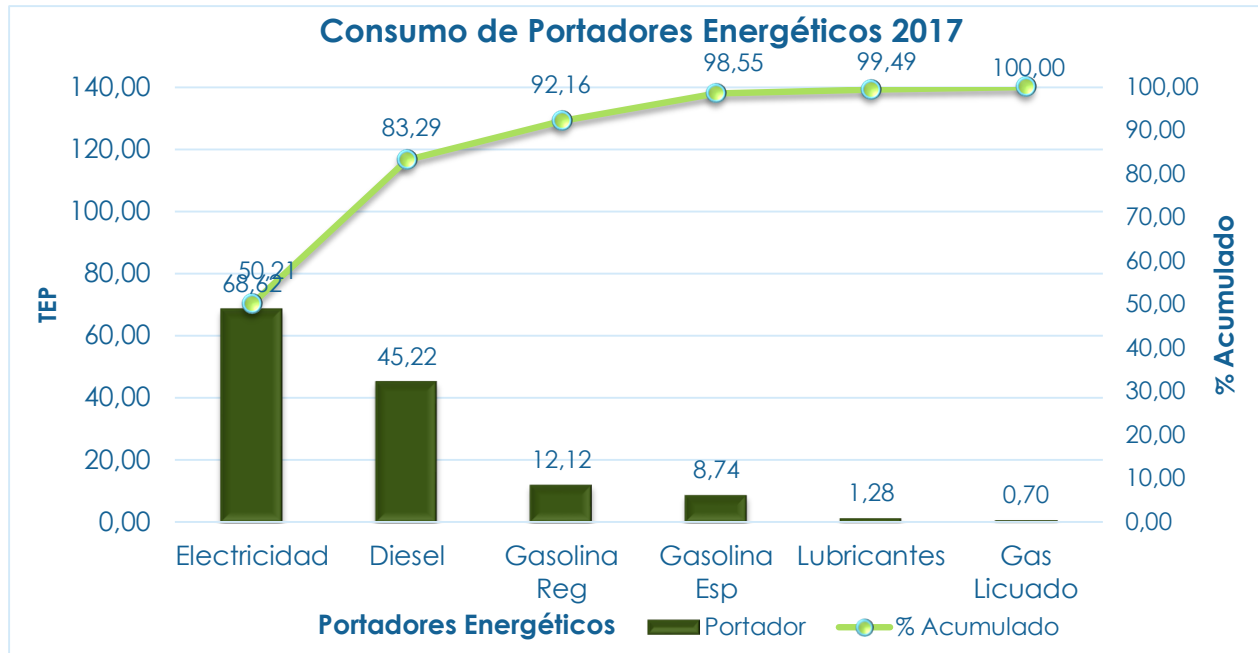
A partir de los datos acumulativos de los consumos de energía de Copextel, correspondientes a los años 2015 – 2017, se pasa a la construcción de un Diagrama de Pareto donde se analizará el portador energético de mayor importancia en dicha identidad, además de su influencia cuantitativa.



**Figura 2.3.** Consumo de los portadores energéticos en el año 2015. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.4.** Consumo de los portadores energéticos en el año 2016. Fuente: Elaboración propia.

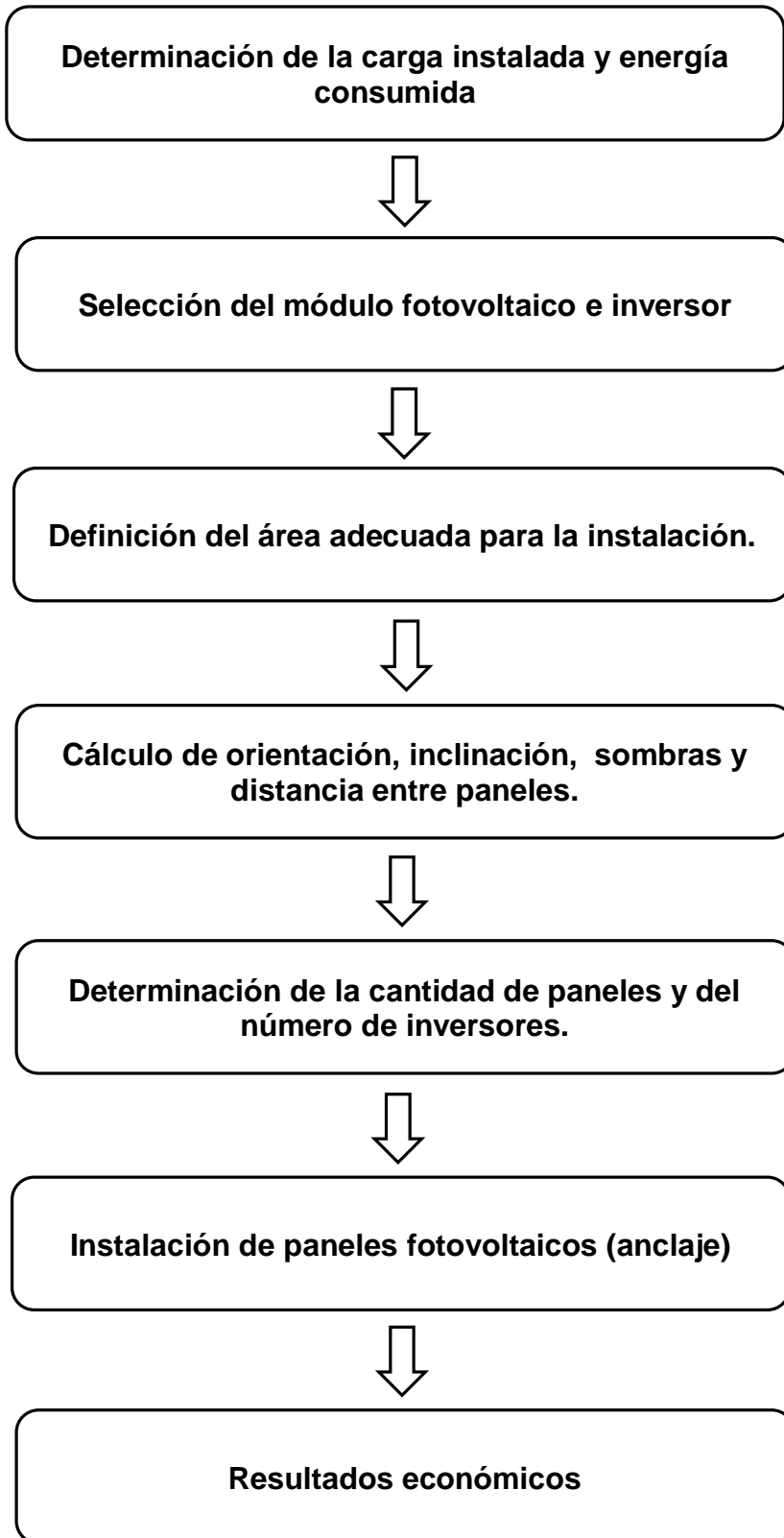


**Figura 2.5.** Consumo de los portadores energéticos en el año 2017. Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en los diagramas de Pareto de los años 2015-2017, el portador energético más importante es la electricidad, por su elevado registro. Este hecho tiene un impacto en la economía de la entidad debido a los grandes pagos cada año.

### **2.3. Metodología manual utilizada para el cálculo de sistemas fotovoltaicos.**

Para el cálculo, diseño e instalación del sistema fotovoltaico se requiere seguir los pasos del diagrama de flujo que se muestra a continuación (Loeza, Ramiro, & Tenorio, 2012).



### 2.3.1. Censo de cargas.

Para la realización del censo de carga en la empresa, se hizo el levantamiento general de los equipos instalados en las diferentes áreas de la empresa. Con los datos de chapa y entrevista a los trabajadores, se determinó las cantidades de equipos en uso; las horas estimadas de servicio y con ellos el consumo de energía. El propósito principal de este censo de cargas es conocer la demanda eléctrica total de todos los equipos pertenecientes a la institución y lo que representan en porcentaje de energía eléctrica por áreas del total para un previo análisis de facturación eléctrica del centro.

En la tabla 2.1, 2.2 y 2.3 se muestran los valores de cargas eléctricas instaladas en la edificación y su consumo.

**Tabla 2.1.** Resumen de carga y energía del primer piso. Fuente: Elaboración propia.

Local	Potencia Nominal por equipos(kW)	Consumo(kWh día)	Consumo(kWh mensual)
Facturación Electrodoméstica	4,69	26,71	587,62
Facturación	20,39	121,55	2 674,1
Fincopex	7,24	46,71	1 027,62
Garantía Comercial	3,06	17,55	386,1
Gong	2,64	63,44	1 903,2
Ofimática Jefe de Taller	5,76	33,16	729,51
Recursos Humanos	4,73	31,47	692,34
Servicios Técnicos Electrodomésticos	19,29	110,43	2 429,46
Servicios Técnicos Especializados	7,14	42,51	935,22
ShowRoom	56,41	295,41	6 499,02
Taller Audio y Luces	7,97	42,57	936,54
Taller eléctrico	4,57	31,29	688,38
Taller ofimática 1	21,15	116,79	2 569,38
Taller ofimática 2	20,27	107,88	2 373,36
Transporte	6,16	34,13	750,86
Total	191,5	1 121,6	26 578,4

**Tabla 2.2.** Resumen de carga y energía del segundo piso. Fuente: Elaboración propia.

Local	Potencia Nominal por equipos(kW)	Consumo(kWh día)	Consumo(kWh mensual)
Aseguramiento	7,02	41,59	914,98
Contabilidad	21,305	116,83	2 570,26
Control Interno	3,61	21,33	469,26
Depósito	3,43	27,92	614,24
Dirección Económica	35,05	146,74	3 228,28
Dpto. Jurídico	6,26	34,55	760,1
Dpto. Informática	11,73	76,77	1 688,94
Gerencia Comercial	9,28	32,25	709,5
Gerencia General	8,07	45,71	1 005,62
Gerencia Logística	4,03	21,78	479,16
Gong(Publicidad)	11,82	63,18	1 601,16
Salón de Reuniones	3,951	8,98	197,56
Secretaría Dirección	4,408	25,64	564,08
Servidor	11,92	283,29	8 498,7
Total	141,88	946,58	23 302,37

**Tabla 2.3.** Resumen de carga y energía del tercer piso. Fuente: Elaboración propia.

Local	Potencia Nominal por equipos(kW)	Consumo(kWh día)	Consumo(kWh mensual)
STI Pac	6,7	38,64	850,08
Jefe Taller Pac	6,19	32,24	709,28
Redes	18,87	101,51	2 233,22
Leatiendo	3,29	24,29	534,38
Seguridad y protección	4,36	24,69	543,18
Gerencia STI	6,38	43,24	951,28
Teatro	—	—	211,78
Total	45,79	296,86	6 742,7

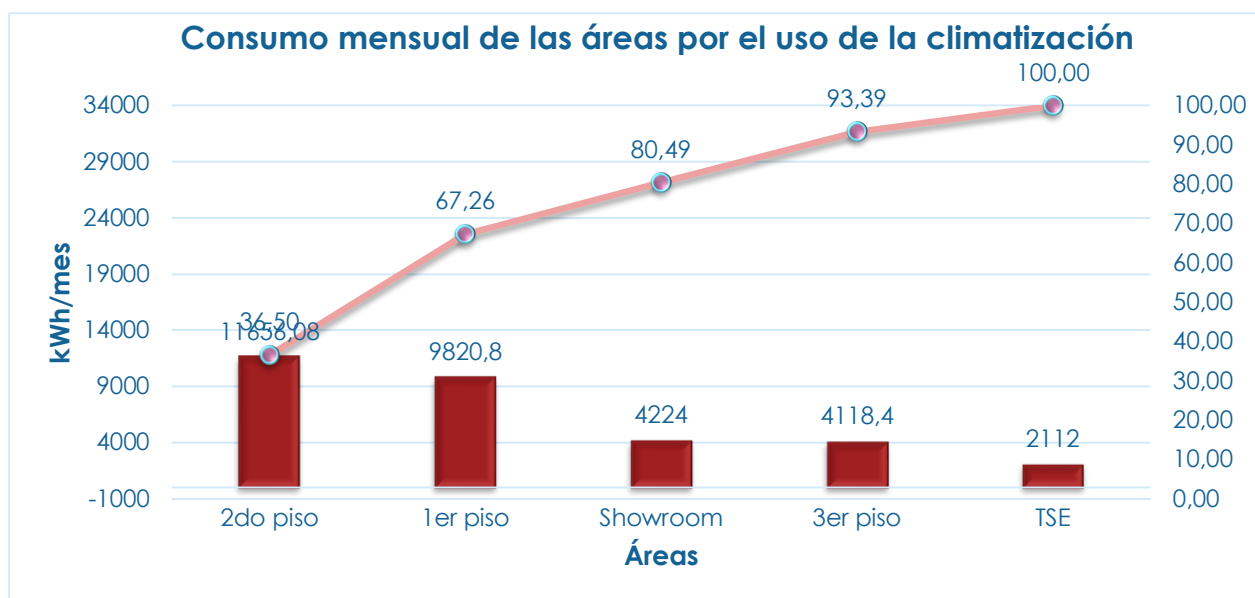
Sumando el consumo diario total de cada piso ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ) se obtiene la carga total del centro diariamente.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 1121,6 + 946,58 + 296,86 = 2365,04 \text{ kWh}$$

Sumando el consumo mensual total de cada piso ( $E_1, E_2, E_3$ ) se obtiene la carga total del centro mensualmente.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = 26578,4 + 23302,37 + 6742,7 = 56623,47 \text{ kWh}$$

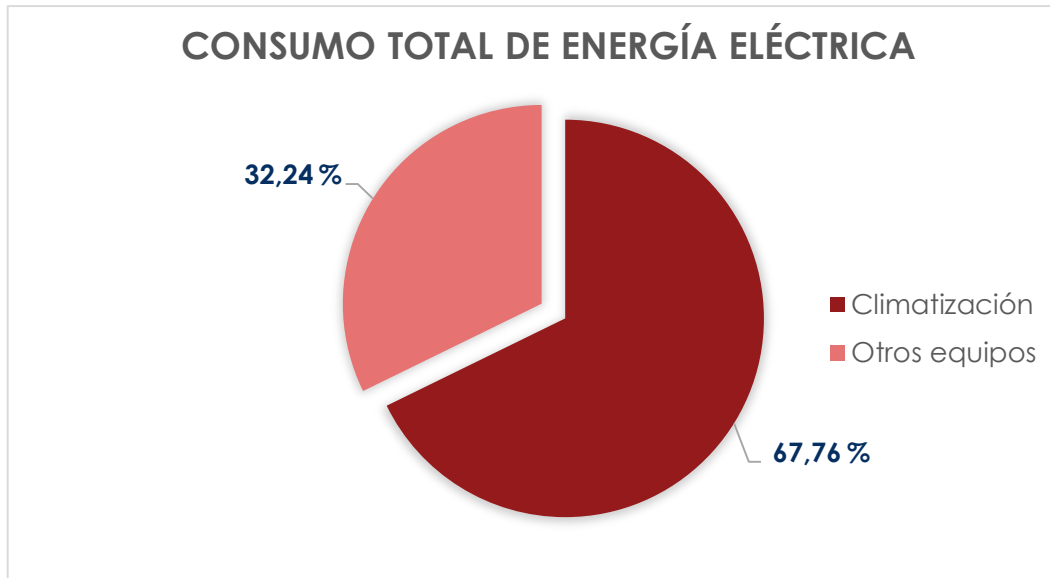
La figura 2.6 representa el consumo mensual de las áreas por el uso de los equipos de climatización de la empresa.



**Figura 2.6.** Consumo mensual de los equipos de climatización. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar el área de mayor impacto por el uso del clima es el 2<sup>do</sup> piso con un consumo de 11 656,08 kWh/mes.

La figura 2.7 muestra el consumo de climatización con respecto al total consumido en la empresa, representando esta el 67,76 % aproximadamente del consumo total, de aquí el nivel de importancia que representa el establecimiento de medidas de ahorro enfocadas a la reducción del consumo de energía de estos equipos.

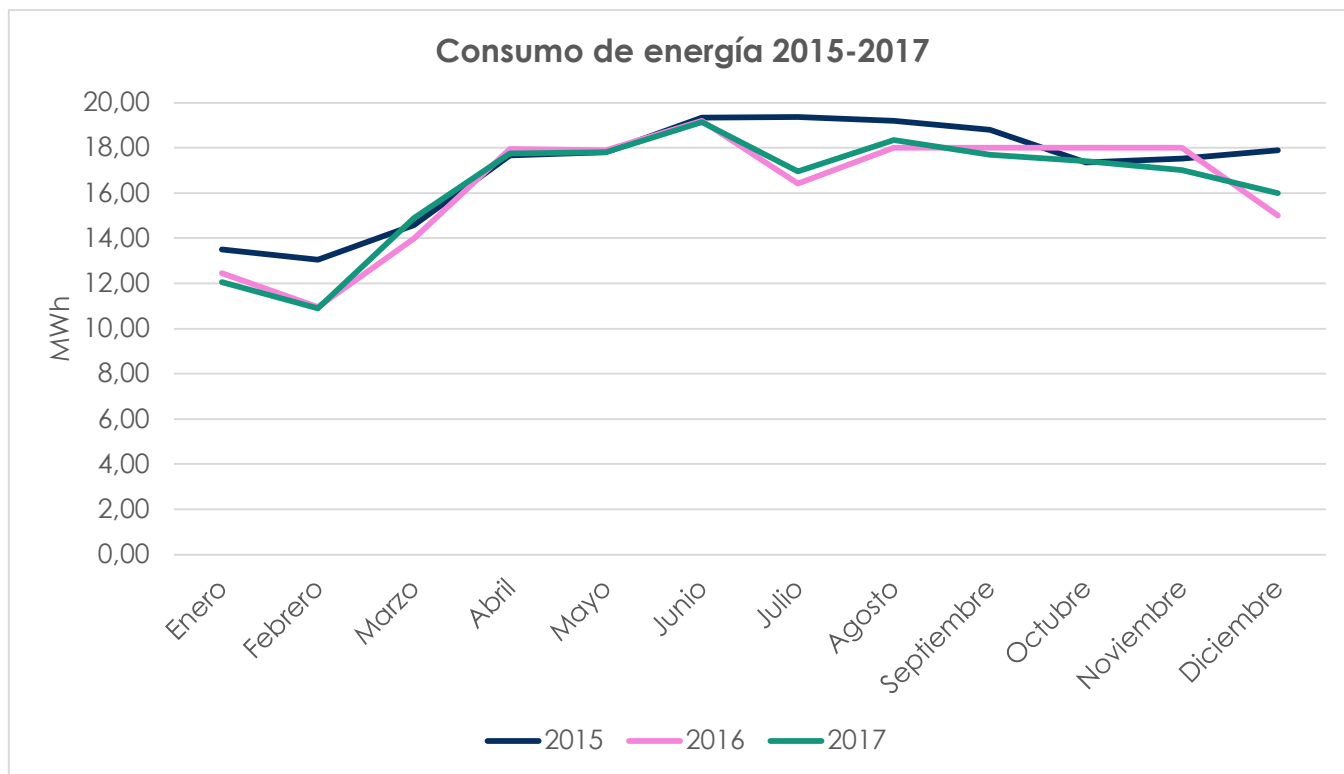


**Figura 2.7.** Estructura de consumo de energía eléctrica en la empresa.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.8 se puede apreciar la demanda de COPEXTEL, se encuentra en el rango entre 10-20 MWh en los años 2015-2017. El valor promedio mensual de la DTCC es de 16 MWh/mes. Este consumo real dio origen a través de la facturación de energía eléctrica de COPEXTEL que se encuentra en el anexo 5.





**Figura 2.8.** Consumo de energía eléctrica durante los años 2015, 2016 y 2017.

### 2.3.2. Selección de la fuente de energía renovable a utilizar en la DTCC para cubrir su demanda de energía eléctrica.

Para la selección de la fuente de energía renovable idónea a utilizar en la DTCC se tendrá en consideración fundamentalmente el área en que se encuentra posicionada, así como sus características constructivas y sitios cercanos. En la entidad se hace imposible la utilización la energía geotérmica, biomasa o hidráulica, pues no se cuenta con grandes embalses, reservas de biomasa o energía geotérmica cercana a la misma. Teniendo en cuenta lo dicho con anterioridad solo nos quedaría la energía eólica, marítima y solar por considerar para la generación de corriente eléctrica (Domínguez, 2016).

La división se encuentra bastante próxima a una zona costera de la bahía de Cienfuegos. A pesar de esto la zona mencionada con anterioridad no cuenta con flujo de corrientes por las características de la propia bahía y tampoco cuenta con un oleaje significativo por lo que la implementación de esta tecnología es poco idónea. Otra de las alternativas a considerar es la energía eólica. En el área de la entidad los vientos son de una potencia

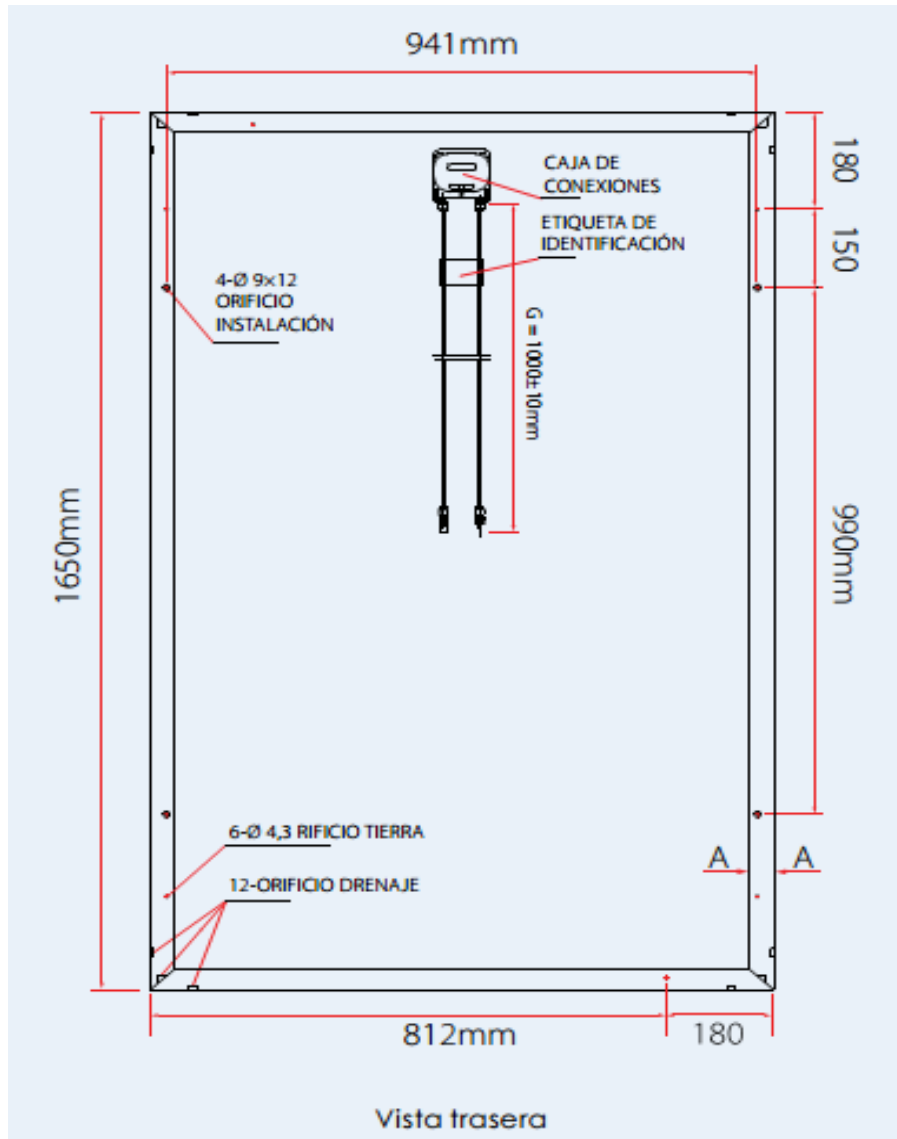
de 97,9 W/m<sup>2</sup> aproximadamente. Además cabe destacar que la presencia de brisas es escasa en los alrededores de la DTCC por lo que finalmente no se considera idóneo la utilización de este tipo de energía renovable para cubrir la demanda eléctrica de esta empresa.

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas es que se decide realizar el estudio para la implementación de un parque de paneles fotovoltaicos dado que esta solo requiere de la incidencia de los rayos solares. Además se saca provecho de las características constructivas de la entidad, ya que la misma cuenta con una considerable área de azoteas, la cual se encuentra totalmente en desuso y sobre el 95 % de la misma incide el sol durante todo el día. (Domínguez, 2016)

### **2.3.3. Selección del módulo fotovoltaico.**

De acuerdo a lo que se establece en los Lineamientos Económicos y Sociales del Estado y la Revolución aprobados en el VI Congreso del Partido y refrendados en la Asamblea Nacional del Poder Popular de Cuba, los diseños de las centrales y sistemas a partir del uso de fuentes renovables de energía, deben buscar lo más posible la integración de la industria nacional al producto final. Por tal razón, el módulo fotovoltaico que se empleará en el proyecto es el DSM-250, 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.

Este módulo está compuesto por 60 celdas solares del formato (156 mm x 156 mm), con dimensiones incluyendo el marco de 1 650 x 992 x 35 mm conectadas en serie-paralelo; es capaz de entregar una potencia de 250 Wp con una tolerancia de  $\pm 3\%$ , bajo condiciones estándar de radiación (STC: 1 000W/m<sup>2</sup>, temperatura de los módulo  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , masa de aire AM 1,5). El DSM-250, en su punto de máxima potencia, genera a la tensión 30.5 V de corriente directa (CD). En el anexo 1 se pueden apreciar otros datos específicos de este módulo y en la figura 2.9 se muestran las dimensiones del módulo fotovoltaico DSM- 250.



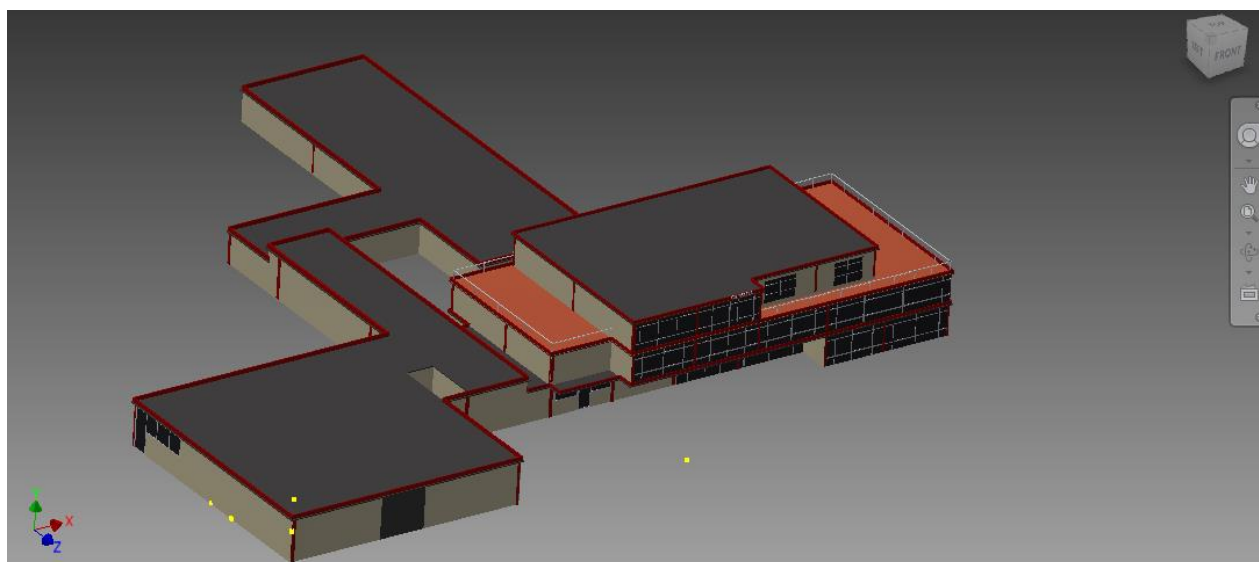
**Figura 2.9.** Módulo fotovoltaico DSM-250 (Iván, 2017).

#### **2.3.4. 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) como también se le conoce, por su confiabilidad. Las especificaciones técnicas del inversor se muestran en el anexo 2.

### 2.3.5. Definición del área para instalar el sistema fotovoltaico.

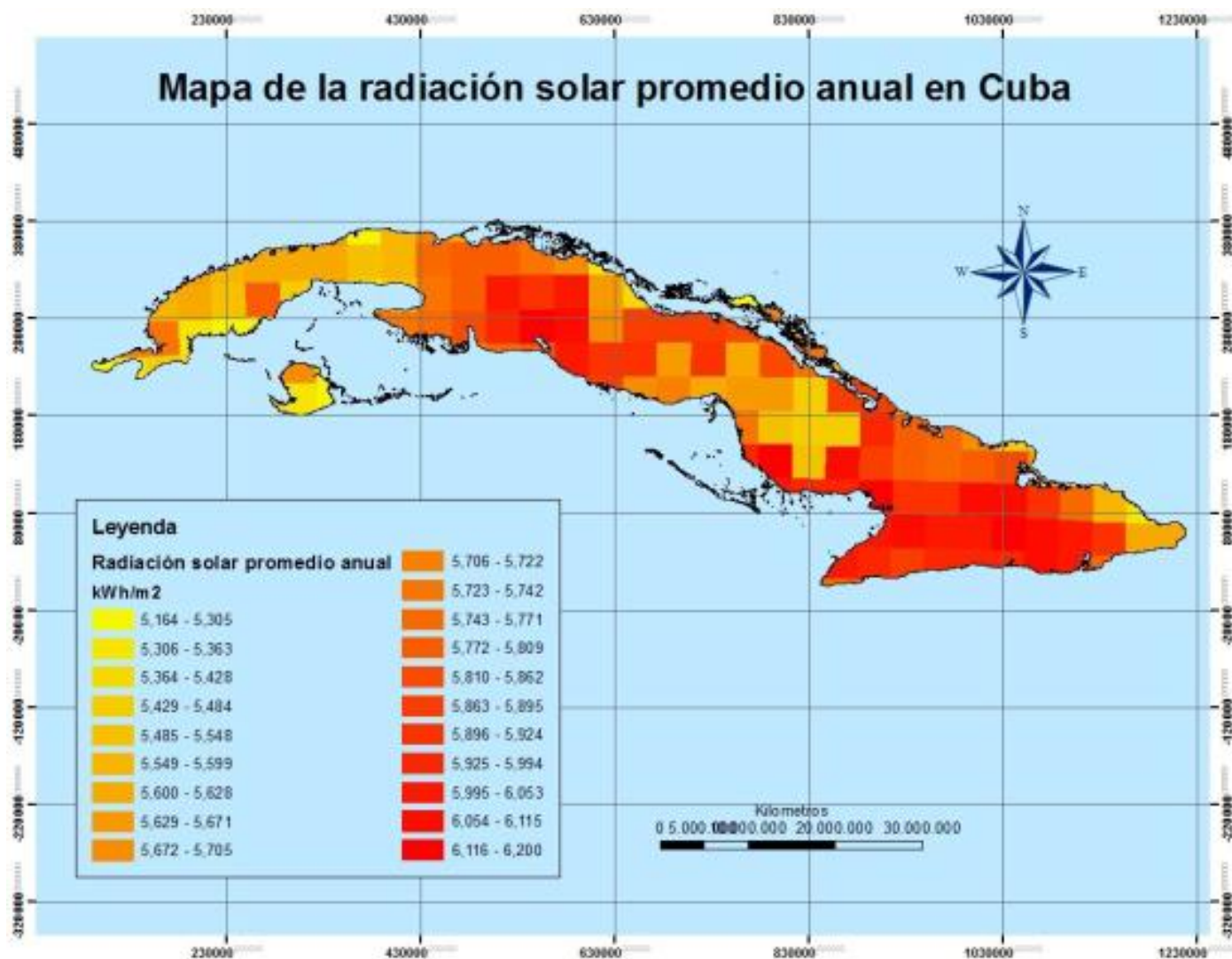
Para la instalación del sistema fotovoltaico es necesario analizar el área disponible con la que cuenta la edificación. Este sistema se instalará en toda el área de color gris oscuro, como lo muestra la figura 2.10, la misma cuenta con una superficie de 1600,8 m<sup>2</sup>.



**Figura 2.10.** Vista en 3D de la DTCC. Inventor (Fuente: elaboración propia)

### 2.3.6. 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/m<sup>2</sup> día, por lo que al año tendremos que a cada m<sup>2</sup> de superficie pueden llegar más de 1825 kWh/m<sup>2</sup> 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, lo que enriquece el espectro solar en las longitudes de onda del azul. La figura 2.11 muestra cómo se distribuye la radiación solar en Cuba (Radiación Solar, 2006).



**Figura 2.11.** Radiación solar promedio anual en Cuba (Radiación Solar, 2006).

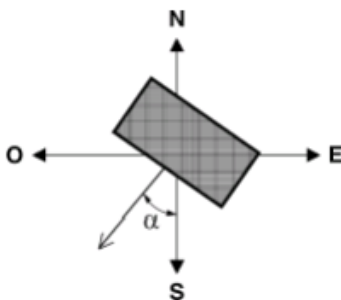
Por las condiciones climatológicas de Cuba, su ubicación y características, es frecuente que en las tardes exista una mayor probabilidad de nublados que en horas de la mañana, trayendo como consecuencia que la incidencia solar disminuya en horas de la tarde.

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. (Radiación Solar, 2006)

Teniendo en cuenta que Cuba consta de un valor de irradiación solar con grandes posibilidades de explotación, es importante tener en cuenta para la realización de cualquier proyecto relacionado con la energía solar fotovoltaica, los parámetros necesarios para alcanzar un mayor aprovechamiento de la instalación, dentro de los cuales se encuentra la selección del ángulo óptimo de inclinación.

### 2.3.7. Orientación de los paneles.

A la hora de diseñar este tipo de instalaciones solares, es muy 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 vamos 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. La orientación se define por el ángulo llamado azimut  $\alpha$ , que es el ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar. Los valores típicos son  $0^\circ$  para los módulos al sur,  $-90^\circ$  para módulos orientados al este y  $+90^\circ$  para módulos orientados al oeste.



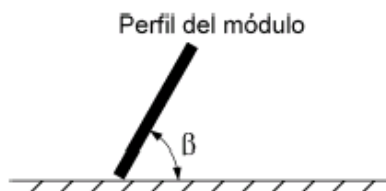
**Figura 2.12.** Representación del ángulo azimut.

Con la ayuda del programa Google My Maps obtuvimos la orientación de COPEXTEL, como se demuestra en la figura 2.1. Para hallar la orientación óptima de los paneles solares debe considerarse la ubicación de los mismos, en este caso, la generación de los paneles para un mejor aprovechamiento será  $\alpha = -39^\circ$ .

Gracias al programa PVSYST esta propuesta es mejor debido a que van a ver pérdidas nada más de 3,2% de generación, y por la otra situación, si  $\alpha = 0^\circ$  van a disminuir los paneles y habrá menos producción de energía.

### 2.3.8. 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  $\beta$ , que es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal. Su valor es  $0^\circ$  para módulos horizontales y  $90^\circ$  para módulos verticales.



**Figura 2.13.** Inclinación de los módulos.

Los resultados de investigaciones experimentales desarrolladas por el Centro de Investigación de Energía Solar (CIES) en Cuba, corroboran que la no observancia de la adecuada inclinación de los paneles fotovoltaicos, procurando la mayor perpendicularidad posible a los rayos solares, puede afectar entre 5 y 10% la eficiencia en la captación de la radiación y la conversión eléctrica. Este aspecto ha sido abordado por varios autores internacionales, llegándose a conclusiones similares. (Rodríguez Gámez & Antonio Vázquez, 2012).

La energía captada por el módulo está en dependencia, entre otros factores, de su inclinación con respecto a los rayos solares; se recomienda un ángulo de inclinación igual a la latitud del sitio de instalación, lo que favorece la máxima captación de energía durante todo el año. En la tabla 2.4 se muestran los resultados del estudio realizado sobre el impacto en la captación de la radiación solar y conversión energética, según diferentes grados de la inclinación de los paneles para la latitud de la provincia de Cienfuegos.

**Tabla 2.4.** Resultados sobre la captación y conversión energéticas de las celdas fotovoltaicas a diferentes ángulos de inclinación. (Rodríguez Gámez & Antonio Vázquez, 2012)

<b>Grados de inclinación de los paneles</b>							
5°	10°	15°	22°	25°	30°	35°	40°
Pérdidas en la captación de energía, Wh/m <sup>2</sup>			Inclinación adecuada para la provincia de Cienfuegos	Pérdidas en la captación de energía, Wh/m <sup>2</sup>			
-176	-59	-18		-23	-63	-103	-143
Pérdidas de conversión energética, kWh/kWp				Pérdidas de conversión energética, kWh/kWp			
-32,4	-11,4	-5,0		-6,4	-17,4	-28,5	-39,6

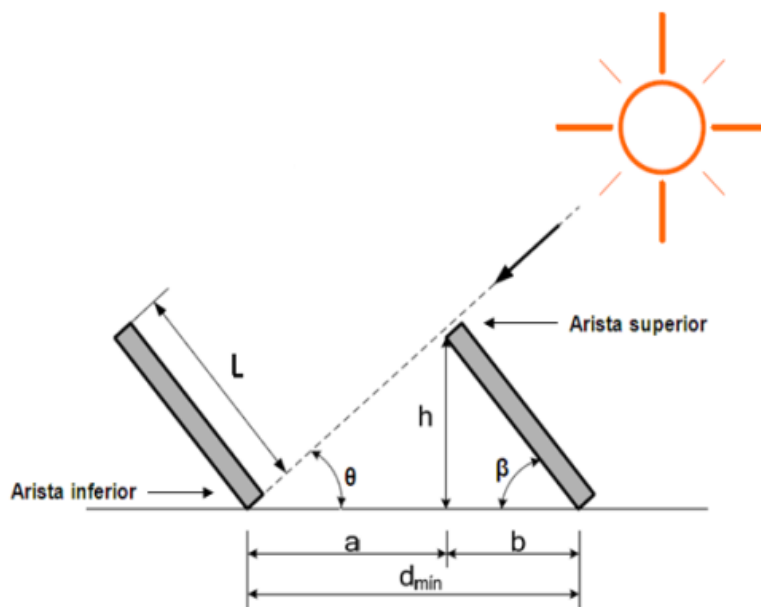
Los resultados demuestran que la inclinación idónea de los paneles fotovoltaicos para la provincia Cienfuegos corresponde con los 22°, y aunque las cifras por sí solas pueden parecer insignificantes, cuando se tiene en cuenta la potencia instalada y se calcula el tiempo de vida útil para el que están diseñados estos sistemas, ello puede representar pérdidas económicas de consideración.

La inclinación de los paneles también contribuye a evitar que en su superficie se depositen basuras, hojas de árboles, pedazos de papel o nylon, yerba seca y otros materiales que pueden provocar sombreado parcial de los módulos. Esto resulta de importancia si se tiene en cuenta que ello puede hacer surgir puntos calientes, causa directa en la reducción de eficiencia energética del sistema, requiriéndose mantener la observación constante de este parámetro y su solución rápida.

### **2.3.9. Distancia mínima entre filas de módulos.**

En este apartado se calculará la distancia mínima de separación entre las distintas filas de módulos solares que componen el generador fotovoltaico para que no se produzcan sombras de unos módulos sobre otros. En la figura 2.14 se muestran todas las medidas que se deben tener en cuenta:





**Figura 2.14.** Distancia mínima entre aristas de paneles (Loaeza, Ramiro, & Tenorio, 2012).

Donde:

$D_{\min}$ : Distancia mínima entre aristas de paneles para evitar sombras, m.

L: Longitud del panel (columna de módulos en paralelo), m.

h: Altura solar al medio día, m.

$\beta$ : Grado de inclinación del panel respecto a la horizontal, °.

$\theta$ : Ángulo de la sombra respecto a la horizontal, °.

a: Distancia de la arista superior de un panel a la arista inferior del otro respecto a la horizontal, m.

b: Distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo respecto a la horizontal, m.

Cada panel fotovoltaico tiene una longitud (L) de 3,3 m, ya que está formado por dos módulos, uno encima de otro, por sus extremidades más largas, como se exponen en el anexo 4. Una vez obtenido el grado de inclinación del panel y la longitud del panel, se calcula la altura solar al mediodía mediante la ecuación 2.1.

$$h = \sin \beta * L = \sin 22^{\circ} * 3,3 = 1,24 \text{ m}$$

Ec. 2.1

Con los mismos datos se calcula la distancia (b) en la ecuación 2.2.

$$b = \cos \beta * L = \cos 22^\circ * 3,3 = 3,06 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Considerando el ángulo de inclinación del panel y los ángulos rectos que se forman, se complementan los demás ángulos y se determina que el ángulo  $\theta$  es de  $68^\circ$ . Enseguida se calcula la distancia (a), utilizando como dato la altura (h) y el ángulo  $\theta$  en la ecuación 2.3.

$$a = \frac{h}{\tan \theta} = \frac{1,24}{\tan 68^\circ} = 0,5 \text{ m} \quad \text{Ec. 2.3}$$

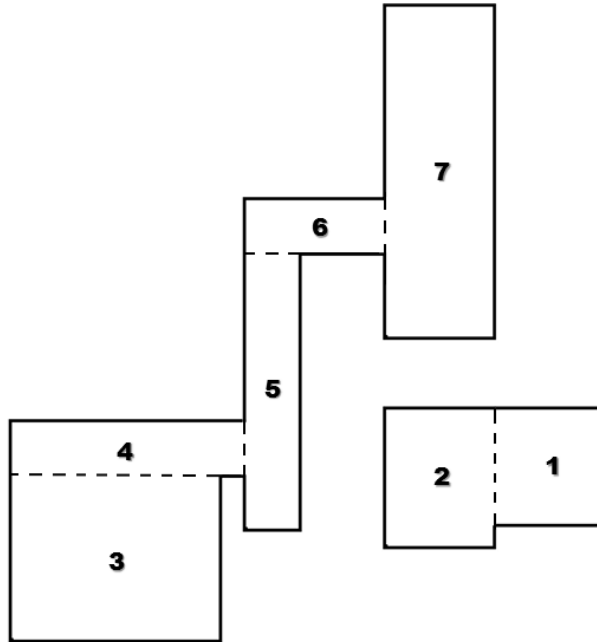
Por último se suma la distancia (a) más la distancia (b) para obtener la distancia mínima entre aristas de paneles, para evitar la sombra sobre otro panel.

$$d_{\text{mín}} = a + b = 0,5 + 3,06 = 3,56 \text{ m}$$

Por lo que la distancia entre las aristas inferiores tiene que ser igual o mayor a 3,56 m.

#### **2.3.10. Cálculo del número de paneles fotovoltaicos.**

Para realizar este estudio, se dividen las áreas de las azoteas de manera que resulten formas rectangulares, para así aprovechar toda la superficie suministrando una mayor energía al centro. En la figura 2.15 se ven representadas las áreas disponibles para la instalación.



**Figura 2.15.** Áreas disponibles donde se instalarán los paneles. Fuente: Elaboración propia

Una vez calculada la separación mínima que debe haber entre filas de paneles ( $d_{\min}$ ), se podrá calcular el número de estas que se podrán colocar sobre el área útil de las azoteas, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Número máximo de filas de paneles} = \frac{\text{Ancho de la edificación}}{\text{Distancia entre paneles}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Conocidas las dimensiones de los paneles solares y el área máxima a ocupar, en cada fila podrán colocarse el número determinado por la siguiente expresión:

$$\text{Número máximo de paneles por fila} = \frac{\text{Largo de la edificación}}{\text{Ancho del panel}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

En la tabla 2.5 se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 2.5.** Acomodo de paneles instalados. Fuente: Elaboración propia

Áreas	Dimensión (m)	Número de filas	Paneles por fila	Total de paneles
1	12 x 12,8	3	12	36
2	12 x 15,2	3	15	45
3	22,8 x 18	6	18	108
4	25,3 x 6	7	6	42
5	6 x 36	1	36	36
6	15,1 x 6	4	6	24
7	12 x 36	3	36	108
Total				399

Obtenido el número máximo de paneles por fila y la cantidad de filas que se pueden instalar en el área útil de las azoteas se obtiene un valor de 399 paneles, que sería un total de 798 módulos fotovoltaicos.

### 2.3.11. Cálculo del número de inversores.

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

$$\text{Número de inversores} = \frac{kWp}{P_{\text{inversor}}} = \frac{199,5}{25} \approx 8 \text{ inversores} \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

Número de inversores: cantidad de inversores.

$P_{\text{inversor}}$ : Potencia del inversor.

### 2.3.12. Generación del SFVCR.

Para el análisis de generación del sistema fotovoltaico se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Irradiación: 5,1 kWh/m<sup>2</sup> día
- Temperatura: 25 °C

- Potencia máxima fotovoltaica: 199,5 kWp
- Coeficiente de disminución de P vs t del módulo: -0,43 %/°C
  - NOCT del módulo fotovoltaico: 45 °C
- Eficiencia del inversor inyección a red fotovoltaica: 98,3 %
- Eficiencia general del sistema: 90%

Conociendo que:

$$E_G = P_{FV} * G_{dm}(\alpha, \beta) * n_{pmp} * n_{inv} * n_g \quad Ec. 2.12$$

Donde:

$$n_{pmp} = 1 - T_k(W_p) * \left[ T_{amb} - 25 + \left( \frac{NOCT - 20}{800} \right) * S \right] \quad Ec. 2.13$$

y

$$S = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta) * 1000}{5 \text{ hrs/día}} \quad Ec. 2.14$$

Donde:

$P_{FV}$ : Potencia nominal del arreglo fotovoltaico bajo STC (Estándar Test Conditions), W.

$G_{dm}(\alpha, \beta)$ : Irradiación recibida en la superficie del arreglo fotovoltaico, inclinación  $\beta$  y azimut  $\alpha$ , en kWh/m<sup>2</sup> día.

$n_{pmp}$ : eficiencia del punto de máxima potencia del arreglo fotovoltaico por trabajar fuera de las STC.

$n_{inv}$ : Eficiencia del inversor de inyección a red.

$n_g$ : Eficiencia general del sistema, esta tiene en cuenta las pérdidas asociadas fundamentalmente a caídas de tensiones en los cables, tolerancia, dispersión de parámetros entre módulos y dispersión angular espectral.

$T_k(W_p)$ : Coeficiente de reducción de potencia del módulo fotovoltaico con la temperatura.

$T_{amb}$ : Temperatura ambiente, °C.

NOCT: Temperatura nominal de operación del módulo fotovoltaico, °C.

S: Irradiación, en W/m<sup>2</sup>.

En la tabla 2.8 tenemos los resultados correspondientes a las ecuaciones planteadas:

**Tabla 2.8.** Resultados de la generación del sistema fotovoltaico.

S (W/m <sup>2</sup> )	$n_{pmp}$	E <sub>G</sub> (kWh/día)	E <sub>G</sub> (kWh/mes)	E <sub>G</sub> (kWh/año)
1120	0,84	756,12	22 683,5	275 983,8

Un sistema fotovoltaico conectado a la red está formado por un conjunto de elementos que deben cumplir ciertos requisitos para suministrarle energía a la carga. Este sistema debe ser capaz de permitir un intercambio energético entre la carga y la red eléctrica, es decir, cuando el consumo sea menor que lo generado por el sistema fotovoltaico, este debe entregarle energía a la red y si se consume más de lo que se genera el sistema debe ser capaz de extraer energía de la red.

**Tabla 2.7.** Resumen de la metodología de cálculo utilizada para el SFVCR.

Cuadro resumen	
Demanda real de la DTCC	16 000 kWh/mensual
Orientación del panel solar	-39°
Inclinación del panel solar	22°
Distancia mínima entre paneles	3,56 m
Área disponible del SFVCR	1 600,8 m <sup>2</sup>
Cantidad de módulos a instalar	798
Número de inversores	8

## Conclusiones del capítulo II.

1. El área de la azotea de la DTCC que será ocupada por los paneles fotovoltaicos es de 1600,8 m<sup>2</sup>.
2. Los paneles fotovoltaicos se orientaron 39° al este y se inclinaron 22° respecto a la horizontal para lograr obtener una mayor generación de energía eléctrica.
3. Se propone instalar 798 módulos fotovoltaicos del tipo DSM-250 en toda el área de las azoteas.
4. Se propuso escoger ocho inversores para la el sistema fotovoltaico de modelo Sunny Tripower 25000TL.
5. El sistema fotovoltaico propone generar 22,7 MWh/mes, sobrepasando los 16 MWh/mes consumido por la empresa, convirtiéndose en energía excedente.

## CAPÍTULO III. Simulación del sistema fotovoltaico conectado a la red.

### 3.1. Simulación del sistema fotovoltaico diseñado con el software PVsyst.

PVsyst es una herramienta diseñada para el desarrollo de simulaciones acerca de instalaciones fotovoltaicas, ya sean aisladas, conectadas a red, así como algunas aplicaciones específicas como son el bombeo de agua entre otras.

En la figura 3.1 se puede apreciar la pantalla de inicio, en la cual se puede apreciar con claridad sus potencialidades.



Figura 3.1. Portada de inicio del PVsyst. (Mermoud, 2016).

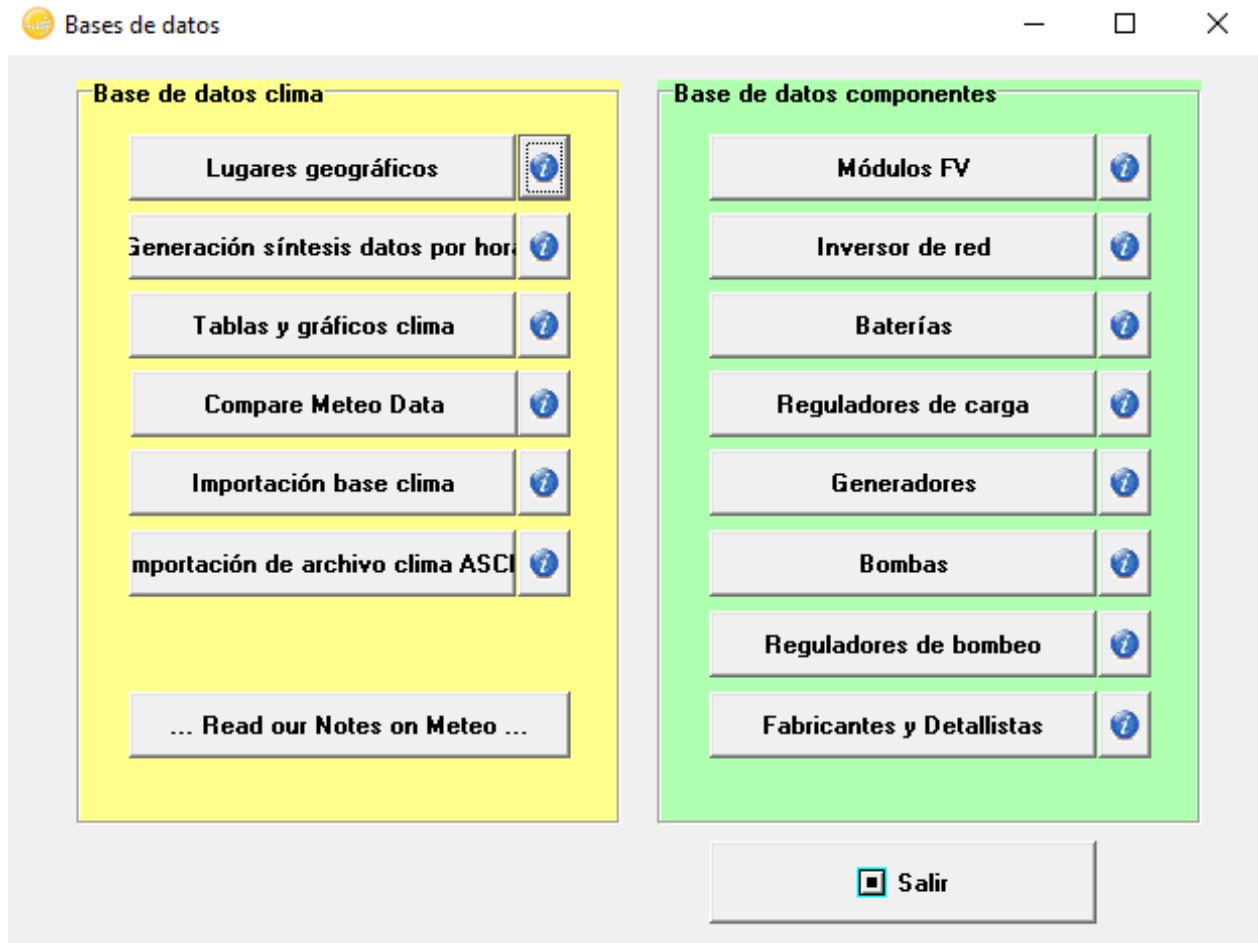


En esta portada de inicio se pueden seleccionar las cuatro opciones que aparecen, las que serán descritas a continuación:

1. Pre-dimensionado: permite realizar un análisis sencillo sin componentes reales para evaluar las dimensiones que podrá tener el sistema, evaluaciones rápidas de la producción del sistema calculadas utilizando valores mensuales.
2. Diseño del Proyecto: Permite realizar un estudio y un análisis completo del proyecto en cuestión, con cálculos precisos de la generación del sistema utilizando simulaciones detalladas por horas, meses, años además de poder estudiar diferentes variantes de sistemas y comparar entre cada una de ellas, también efectúa estudios de pérdidas totales del sistema, así como perfiles de sombreado en 3D y evalúa económicamente el sistema con valores reales de sus componentes y con sus precios.
3. Bases de datos: Es la encargada de administrar datos climatológicos y componentes. Entre estos datos de clima se encuentran los archivos mensuales, generación de datos sintéticos y análisis de verificación de archivos por hora. En base de datos de componentes se localizan los módulos FV, inversores, baterías, bombas, controladores, generadores, etc.
4. Herramientas: En esta opción están las herramientas didácticas (geometría solar, optimización de la orientación, comportamiento eléctrico de campos FV con sombreado) y análisis de datos reales medidos.

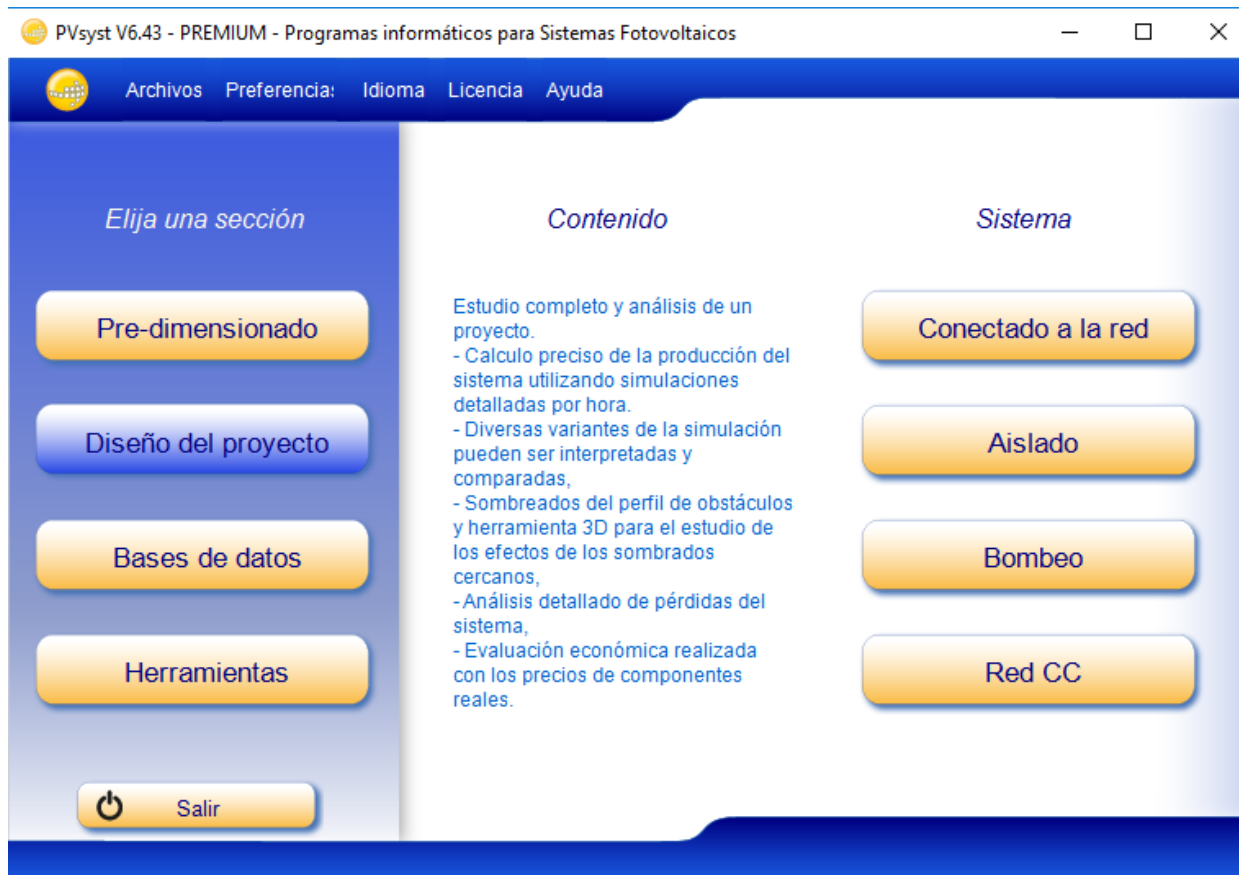
Dicha base de datos es muy abierta para su utilización, permitiendo incluir dentro de ella algunos datos que no se encuentren en el programa. Para este proyecto se le anexaron a esta base datos, los parámetros técnicos de los módulos de producción nacional para los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, así como los datos meteorológicos de Cienfuegos obtenidos en el proyecto.

Este software dispone además de varias bases de datos como son: la de los componentes que agrupan los módulos; inversores; generadores; acumuladores; entre otros, así como la colección de datos meteorológicos de gran parte del mundo y por último la de los datos medidos, según se puede apreciar en la figura 3.2.



**Figura 3.2.** Base de datos disponible (Mermoud, 2016).

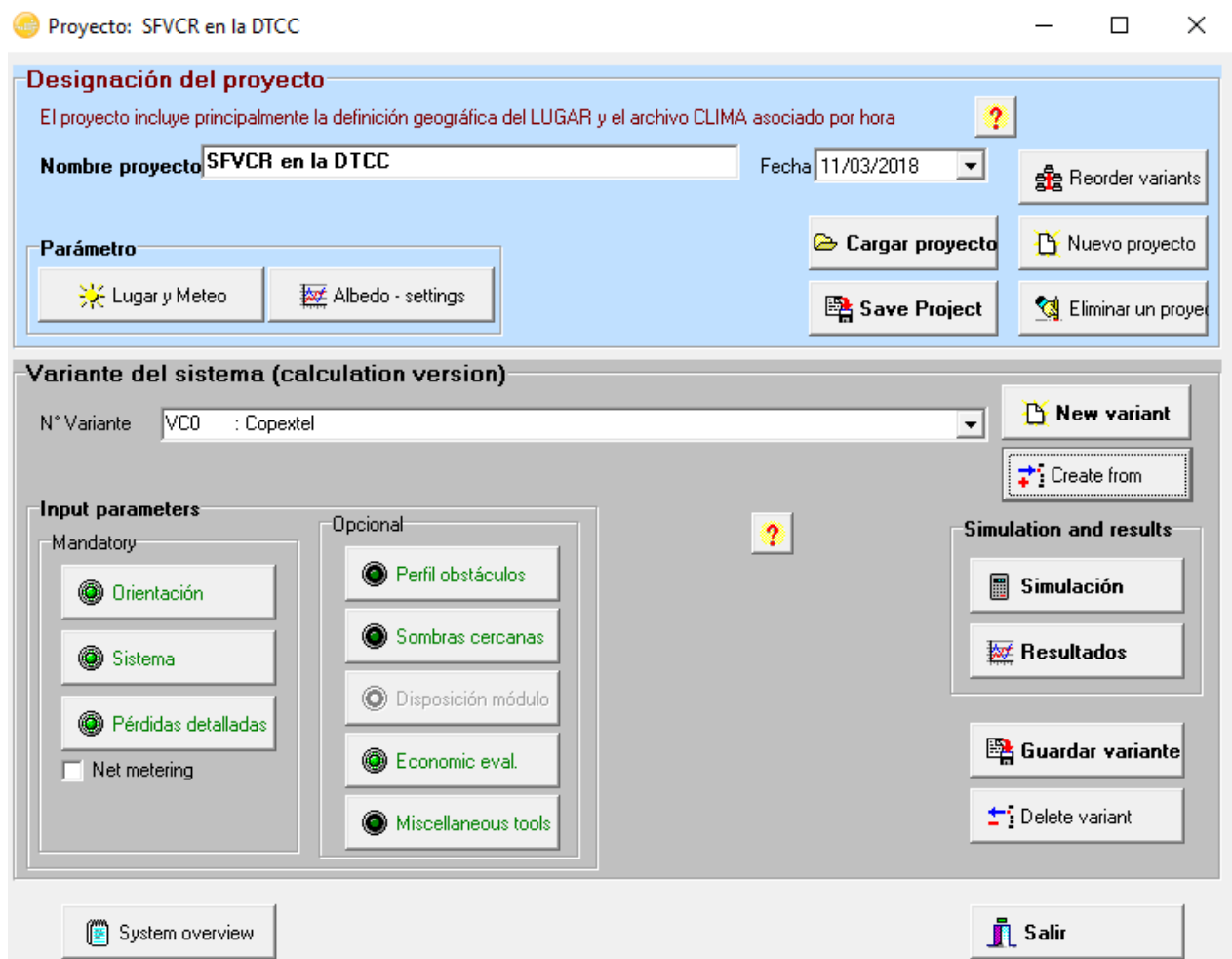
En este trabajo se seleccionó la opción número 2 (Diseño del proyecto), por todas las prestaciones que esta ofrece, además de ser mucho más confiable que el pre-dimensionado. Cuando se selecciona el diseño del sistema aparecen otras opciones, pues aquí se elige (Conectado a la red) como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3.** Portada con la opción 2 para el Proyecto de COPEXTEL (Mermoud, 2016).

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.

En la simulación de la instalación el programa permite determinar todo tipo de características y parámetros de la instalación, como son los módulos, su disposición, las posibles sombras que puedan obstaculizar la radiación solar. Para llegar al momento de la simulación, se debe presentar un proyecto y ejecutar un grupo de pasos como se observa en la figura 3.4:



**Figura 3.4.** Presentación para ejecutar la simulación completa (Mermoud, 2016).

Los pasos a seguir para realizar la simulación son los siguientes:

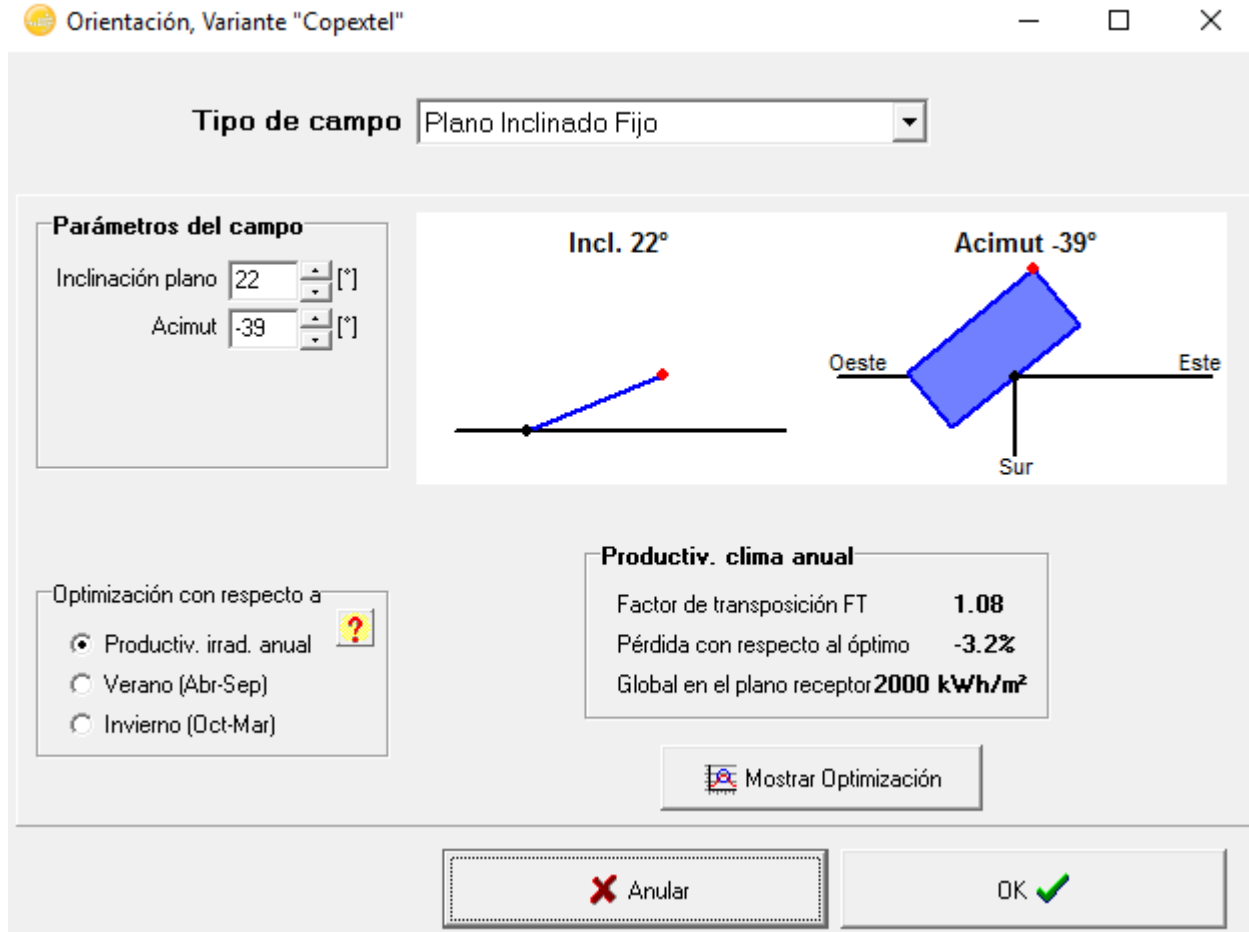
1. Rellenar un formulario y escoger los datos meteorológicos a utilizar.
2. Colocar la orientación que deben tener los paneles fotovoltaicos, así como la estructura de soporte de los mismos.
3. Especificar el perfil de obstáculos.
4. Definir las sombras más cercanas.
5. Diseño del sistema en su conjunto, o sea seleccionar los módulos, los inversores y el tipo de conexión de los mismos.
6. Declarar todas las pérdidas detalladas de la instalación.
7. Simulación del sistema que se acaba de diseñarse.
8. Evaluar económicamente el proyecto.

### **3.2. Simulación del diseño realizado y análisis de los resultados.**

A continuación se muestra una breve descripción de los parámetros de entrada para la simulación del sistema fotovoltaico propuesto para Copextel, siguiendo cada uno de los pasos mostrados anteriormente.

Se elaboró el formulario del proyecto y los datos meteorológicos a utilizar, que se obtuvieron.

Para la orientación de los paneles se ha considerado la bibliografía consultada sobre el tema, donde se señala que Cuba está ubicada geográficamente en el hemisferio norte, es recomendable usar la orientación sur, el azimut  $-39^\circ$  y un ángulo de inclinación igual a la latitud del lugar, para Cienfuegos de  $22^\circ$ . La estructura de soporte se escoge del tipo plano inclinado fijo, ya que las estructuras de seguimiento solar resultan muy costosas y poco efectivas con las condiciones de la radiación difusa en Cuba. En la figura 3.5 se pueden apreciar estos parámetros.



**Figura 3.5.** Orientación de los paneles solares (Mermoud, 2016).

En este paso no se tuvo en cuenta la incidencia de sombra por parte de algunos obstáculos, ya que durante la evaluación del plano superior del centro, la superficie de los materiales (los tanques de agua) no constituye causantes de efectos en este sentido.

Los estudios realizados recomiendan el control del sombreado por parte de los árboles aledaños mediante la poda controlada.

Para determinar la potencia pico posible a instalar en relación con la disponibilidad del espacio, se utilizó la siguiente ecuación.

$$P_{ppi} = \frac{A_d}{A_n \text{ kWp}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde:

P<sub>ppi</sub>: Potencia pico posible a instalar, kWp.

Ad: Área disponible, m<sup>2</sup>.

An kWp: Área necesaria para instalar un kWp, kWp/m<sup>2</sup>.

Conociendo que para la instalación en superficie techada de 1 kWp de tecnología fotovoltaica se necesita como mínimo 11 m<sup>2</sup> de superficie disponible y que en el centro existen 1600,8 m<sup>2</sup> de áreas que pueden ser utilizadas, se puede definir que la potencia pico posible a instalar es de 145,52 kWp.

Los módulos seleccionados para la realización de la simulación son los ya mencionados DSM-250 de producción nacional. El inversor escogido para la instalación es el Sunny Tripower 25000TL de 25 kW de potencia nominal. En la figura 3.6 se muestra el reporte que ofrece la herramienta, sobre la definición del sistema.

Definición de un sistema red, Variante "Copextel"

---

### Configuración global sistema

N° de tipos de sub-campos:

### Resumen sistema global

N° de módulos	575	Potencia nominal FV	144 kWp
Superficie módulos	941 m <sup>2</sup>	Potencia máxima FV	136 kW/dc
N° de inversores	5	Potencia nominal CA	125 kW/ac

---

Generador FV

#### Sub-array name and Orientation

Name:

Orient: **Plano Inclinado Fijo**

Tilt: 22°  
Azimuth: -39°

#### Ayuda al Dimensionado

No Sizing    Entrar Pnom deseada:  kWp.

... o superficie disponible:  m<sup>2</sup>

---

#### Selección del módulo FV

Disponibles actualmente: Módulos aprox. necesarios: **582**

Tensiones de dimensionado: V<sub>m</sub> 26.0 V  
V<sub>oc</sub> (-10°C) 42.4 V

Use Optimizer

---

#### Selección del inversor

Disponibles actualmente:  50 Hz  
 60 Hz

N° de inversores:   Tensión Funciona.: 390-800 V    Pglobal inversor: 125 kW/ac  
Tensión máx de entrada: 1000 V    **Inversor con 2 MPPT**

Utilice característica m

---

#### Diseño del generador FV

N° de módulos y cadenas

Mód. en serie:   entre 15 y 23

N° de cadenas:   entre 22 y 25

Perdida sobrecarg: 0.1 %    Pérd. sobrecarg:

Relación Pnom: 1.15

**N° módulos: 575    Superficie: 941 m<sup>2</sup>**

Cond. de funcionamiento

V<sub>mpp</sub> (60°C): 598 V  
V<sub>mpp</sub> (20°C): 728 V  
V<sub>oc</sub> (-10°C): 976 V

Irradiancia plano: 1000 W/m<sup>2</sup>

I<sub>mpp</sub> (STC): 204 A    P<sub>máx</sub> en funcionamiento: 128 kW  
I<sub>sc</sub> (STC): 217 A    en 1000 W/m<sup>2</sup> y 50°C)

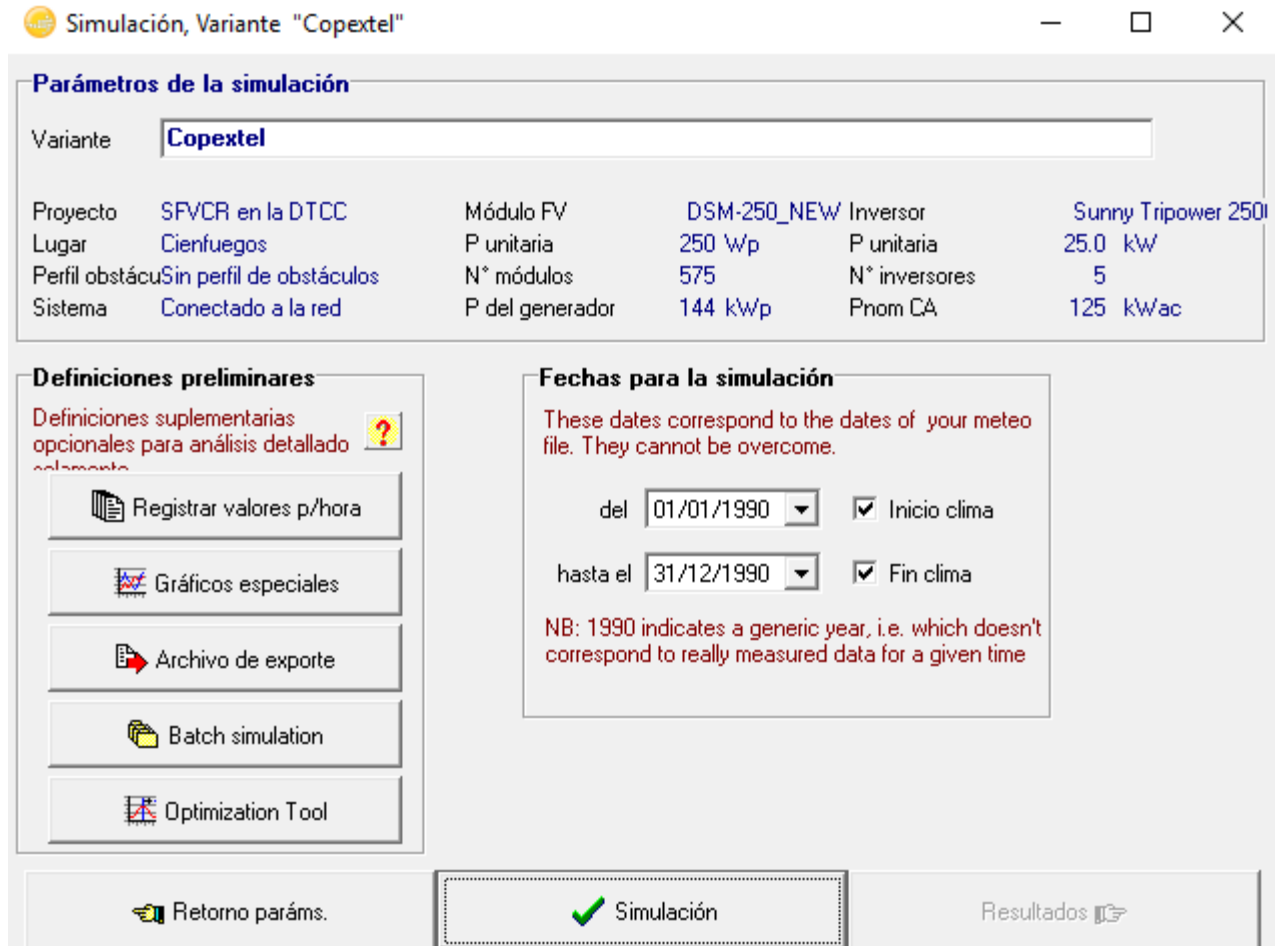
I<sub>sc</sub> (en STC): 214 A    **Potencia nom gener. (STC) 144 kWp**

---

**Figura 3.6.** Definición del sistema a utilizar en el PVsyst (Mermoud, 2016).

Después de analizar y corregir el diseño en cada uno de estos pasos, se realiza la simulación. A continuación se muestra la pantalla para la simulación en la figura 3.7.

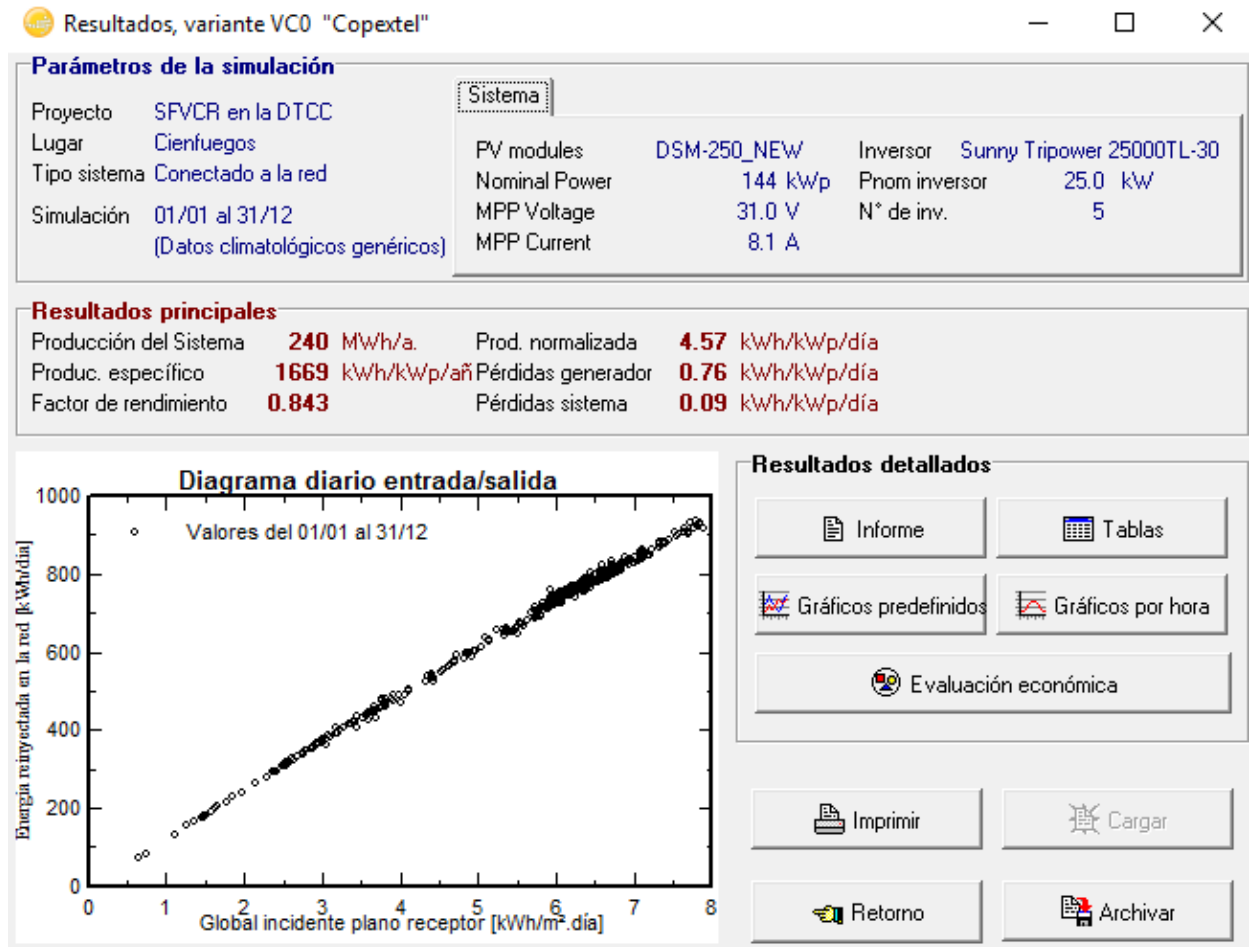




**Figura 3.7.** Portada de inicio de la simulación (Mermoud, 2016).

En la figura 3.8 se exponen los principales resultados de la simulación como son:

1. Producción del sistema en MWh al año.
2. La productividad específica para un año de operación del sistema.
3. El factor de rendimiento.
4. Los principales datos del sistema diseñado.
5. Las pérdidas tanto del generador como del sistema.



**Figura 3.8.** Principales resultados de la simulación (Mermoud, 2016).

Dentro de las potencialidades del software, en el acápite de los resultados detallados se puede obtener un informe completo de la simulación e incluso introduciendo los valores en costo se puede obtener una evaluación económica del diseño. Esta característica no se utilizó en el diseño del programa, por requerir de otro tipo de estudio donde se necesita mayor integralidad y extensión de datos.

En la figura 3.9 se muestra la primera página del informe, que se genera a partir de los resultados de la simulación.

PVSYST V6.43		08/05/18	Página 1/4		
<b>Sistema Conectado a la Red: Parámetros de la simulación</b>					
<b>Proyecto :</b>	<b>SFVCR en la DTCC</b>				
<b>Lugar geográfico</b>	<b>Cienfuegos</b>	<b>País</b>	<b>Cuba</b>		
<b>Ubicación</b>	Latitud	22.2°N	Longitud	80.4°W	
Hora definido como	Hora Legal	Huso hor. UT-5	Altitud	1 m	
Albedo	0.20				
<b>Datos climatológicos:</b>	<b>Cienfuegos</b>	MeteoNorm 7.1 - Síntesis			
<b>Variante de simulación : Copextel</b>					
	Fecha de simulación	08/05/18 17h41			
<b>Parámetros de la simulación</b>					
<b>Orientación Plano Receptor</b>	Inclinación	22°	Acimut	-39°	
<b>Modelos empleados</b>	Transposición	Perez	Difuso	Perez, Meteonorm	
<b>Perfil obstáculos</b>	Sin perfil de obstáculos				
<b>Sombras cercanas</b>	Sin sombreado				
<b>Características generador FV</b>					
<b>Módulo FV</b>	Si-poly	Modelo	<b>DSM-250_NEW</b>		
Custom parameters definition		Fabricante	Cuba		
Número de módulos FV		En serie	23 módulos	En paralelo	25 cadenas
N° total de módulos FV		N° módulos	575	Pnom unitaria	250 Wp
Potencia global generador		Nominal (STC)	<b>144 kWp</b>	En cond. funciona.	128 kWp (50°C)
Caract. funcionamiento del generador (50°C)		V mpp	631 V	I mpp	204 A
Superficie total		Superficie módulos	<b>941 m<sup>2</sup></b>		
<b>Inversor</b>		Modelo	<b>Sunny Tripower 25000TL-30</b>		
Original PVsyst database		Fabricante	SMA		
Características		Tensión Funciona.	390-800 V	Pnom unitaria	25.0 kWac
Banco de inversores		N° de inversores	5 unidades	Potencia total	125 kWac
<b>Factores de pérdida Generador FV</b>					
Factor de pérdidas térmicas		Uc (const)	29.0 W/m <sup>2</sup> K	Uv (viento)	0.0 W/m <sup>2</sup> K / m/s
Pérdida Óhmica en el Cableado	Res. global generador	29 mOhm	Fracción de Pérdidas	0.8 % en STC	
Pérdida Calidad Módulo			Fracción de Pérdidas	1.5 %	
Pérdidas Mismatch Módulos			Fracción de Pérdidas	1.0 % en MPP	
Efecto de incidencia, parametrización ASHRAE	IAM =	1 - bo (1/cos i - 1)	Parám. bo	0.05	
<b>Necesidades de los usuarios :</b> Carga ilimitada (red)					

Traducción sin garantía, Sólo el texto inglés está garantizado.

**Figura 3.9.** Primera página del informe (Mermoud, 2016).

En esta primera página del informe se aprecia toda la información del proyecto con sus componentes generales y sus datos más importantes. Además se describe el proyecto desde el punto de vista técnico-informativo.

A su vez brinda información en la segunda página mostrando los valores meteorológicos según la base de datos que se utilice para el diseño, como está expuesto en las primeras cuatro columnas de la tabla 3.1, en la siguiente columna se presenta la energía efectiva a la salida del generador fotovoltaico, mientras que la columna siguiente ofrece una información relacionada con la energía producida por el arreglo fotovoltaico, que llegaría al sistema o red eléctrica en cuestión si no hubiera consumo, que es una de las opciones que pertenece a las “necesidades de los usuarios”.

**Tabla 3.1.** Datos principales de la segunda página del informe (Mermoud, 2016).

**Copextel**  
**Balances y resultados principales**

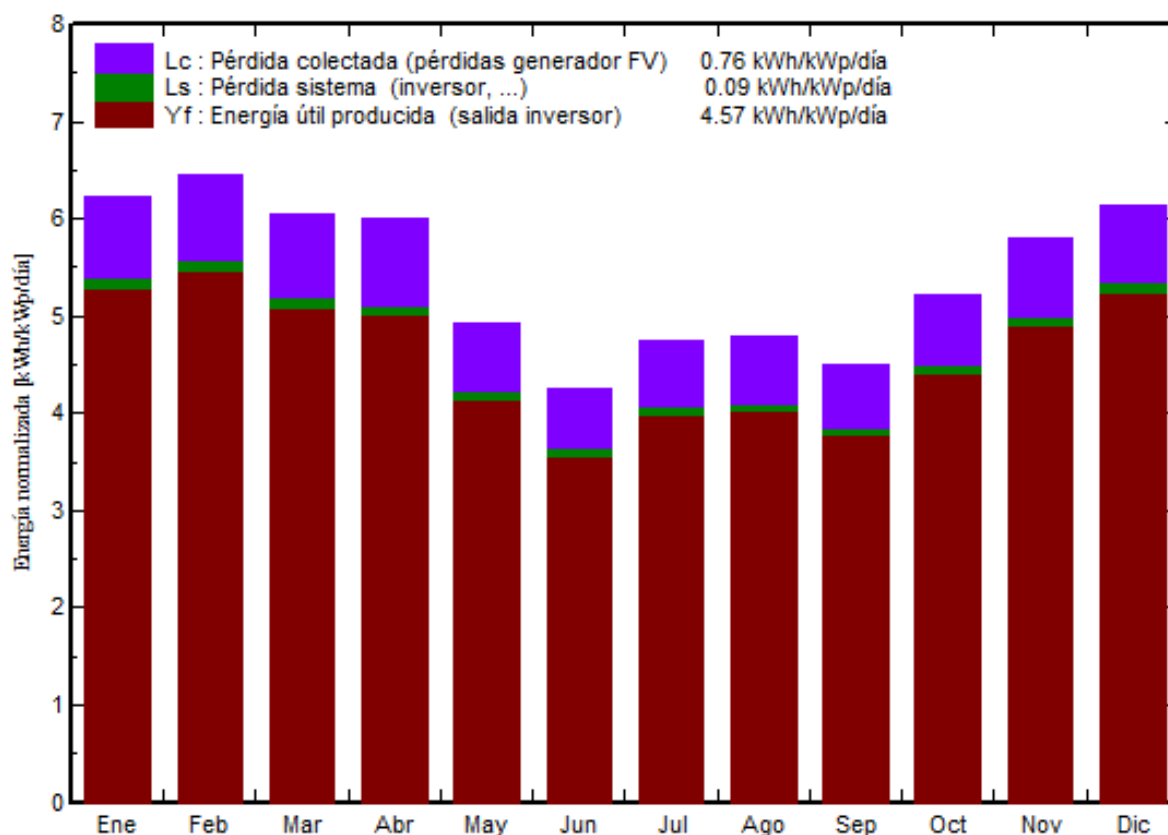
	<b>GlobHor</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>T Amb</b> °C	<b>GlobInc</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>GlobEff</b> kWh/m <sup>2</sup>	<b>EArray</b> MWh	<b>E_Grid</b> MWh	<b>EffArrR</b> %	<b>EffSysR</b> %
<b>Enero</b>	159.7	21.10	193.0	188.3	24.09	23.60	13.26	13.00
<b>Febrero</b>	157.1	22.30	180.7	175.9	22.44	22.00	13.19	12.93
<b>Marzo</b>	176.7	23.80	187.6	182.6	23.15	22.70	13.11	12.85
<b>Abril</b>	181.5	25.20	180.2	175.4	22.06	21.62	13.01	12.75
<b>Mayo</b>	160.0	25.90	153.0	148.3	18.84	18.47	13.08	12.83
<b>Junio</b>	136.5	26.30	127.5	123.1	15.69	15.38	13.08	12.81
<b>Julio</b>	159.3	26.30	147.5	142.5	18.16	17.80	13.08	12.82
<b>Agosto</b>	153.5	26.30	148.7	144.1	18.28	17.92	13.06	12.81
<b>Septiembre</b>	133.8	26.00	135.0	131.0	16.62	16.29	13.07	12.81
<b>Octubre</b>	145.7	25.00	161.9	157.4	20.03	19.64	13.15	12.89
<b>Noviembre</b>	144.9	23.50	173.9	168.9	21.59	21.17	13.19	12.94
<b>Diciembre</b>	151.6	21.70	190.6	185.8	23.83	23.37	13.28	13.02
<b>Año</b>	1860.3	24.46	1979.7	1923.4	244.77	239.95	13.14	12.88

Leyendas:	GlobHor	Irradiación global horizontal	EArray	Energía efectiva en la salida del generador
	T Amb	Temperatura Ambiente	E_Grid	Energía reinyectada en la red
	GlobInc	Global incidente plano receptor	EffArrR	Eficiencia Esal campo/superficie bruta
	GlobEff	Global efectivo, corr. para IAM y sombreados	EffSysR	Eficiencia Esal sistema/superficie bruta

Como se puede observar en la figura 3.10, se especifica el diagrama de producción normalizada por meses, apreciándose que los de menor generación son los meses de junio, julio, agosto y septiembre, por lo que resulta importante formularnos la siguiente

pregunta. ¿Por qué son estos los meses de menor generación, si en realidad es donde más temperatura y sensación térmica existe en el año? Pues la respuesta podemos encontrarla en la ubicación geográfica de Cuba, situada en la zona tropical del planeta y a partir del mes de mayo comienza el período lluvioso, por lo que la mayoría de las veces los días son nublados y a partir de las 10:00 am comienza una rápida condensación formándose grandes extensiones nubosas que difunden la radiación solar. Al principio de junio comienza la temporada ciclónica en el país, incrementando el riesgo de impactos de fenómenos hidrometeorológicos extremos. El mes de julio es un mes muy caluroso, donde la temperatura de los componentes fotovoltaicos aumenta, especialmente de los módulos provocando una disminución de la eficiencia de conversión energética del sistema.

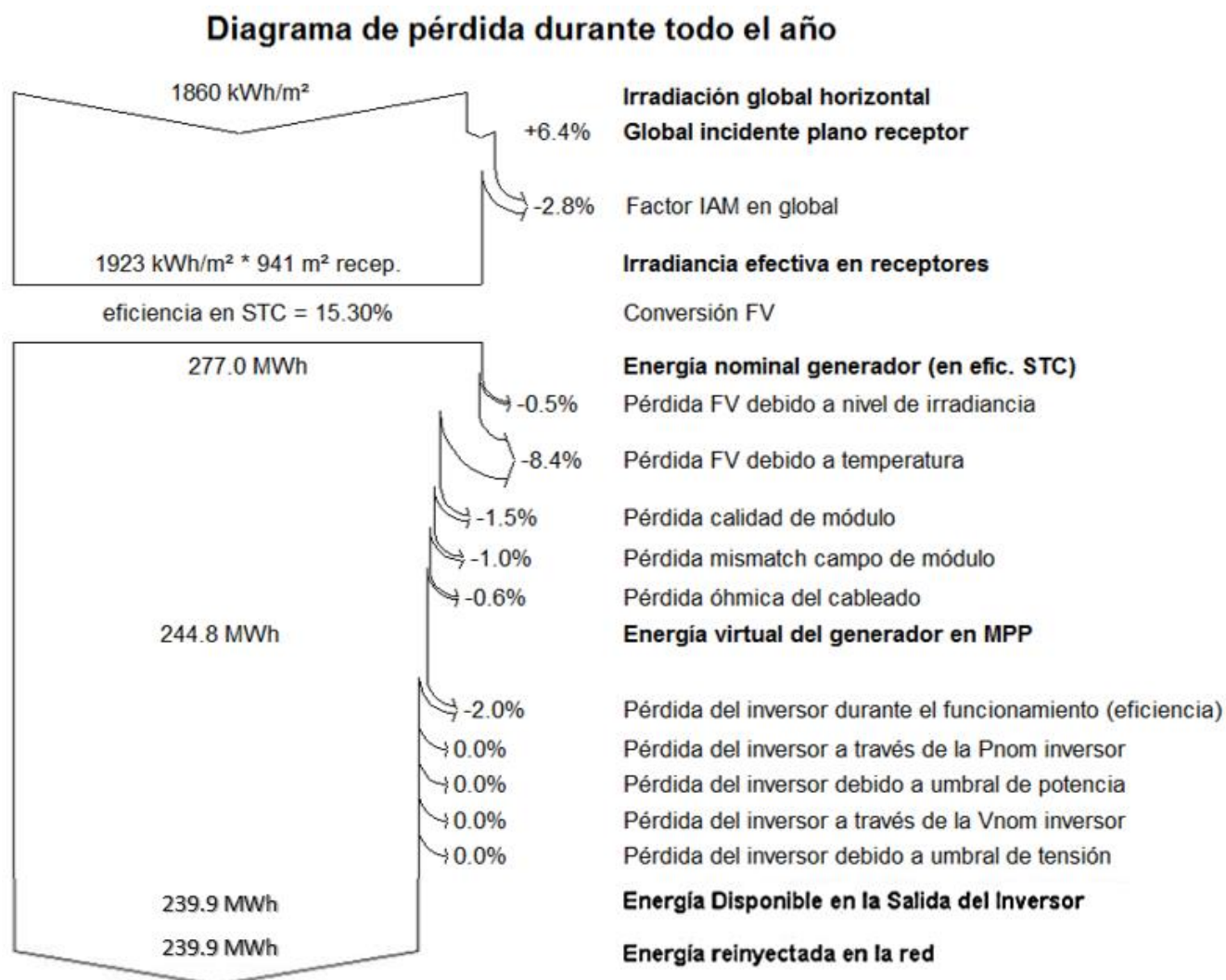
### Producciones normalizadas (por kWp instalado): Potencia nominal 144 kWp



**Figura 3.10.** Diagrama de la producción normalizada por meses (Mermoud, 2016).

En la figura 3.11 se aprecia de forma detallada el desglose de las pérdidas existentes en el arreglo fotovoltaico, disminuyendo de un valor inicial de energía de 277 MWh, a unos

239,9 MWh aproximadamente, con pérdidas de alrededor de unos 37,1 MWh, representando el 13,4 % por año.



**Figura 3.11.** Pérdidas previstas del sistema. Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. Anclaje de los módulos fotovoltaicos.

La instalación se hará sobre la superficie del techo del edificio, por lo que se considera adecuado utilizar una estructura liviana. La estructura fija es altamente resistente, estable para el diseño y dimensionado de la estructura que soporta los módulos fotovoltaicos teniendo en cuenta todas las sobrecargas, tanto las reales por el peso de la misma estructura, así como las consideradas por condiciones meteorológicas.

La estructura que se utilizará en el proyecto cuenta con mesas de producción nacional de dos patas delanteras y dos traseras, y se fabrican con perfiles laminados en caliente como se muestra en la figura 3.12. Las patas traseras son las que se montan en el lado norte por lo que son de mayor tamaño y las patas delanteras y traseras se unen con unas piezas llamadas cargueros. La pieza que une todos los cargueros se denomina larguero y se encuentra en la parte de la estructura que soporta los paneles, en esta pieza se colocan las presillas de sujeción de los paneles.



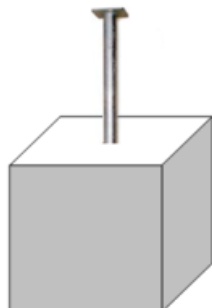
**Figura 3.12.** Estructura para el módulo fotovoltaico.

Todas las piezas que conforman la mesa son unidas a través de tornillos, los cuales son apretados fuertemente para evitar el movimiento de los elementos y son de materiales resistentes a la corrosión.



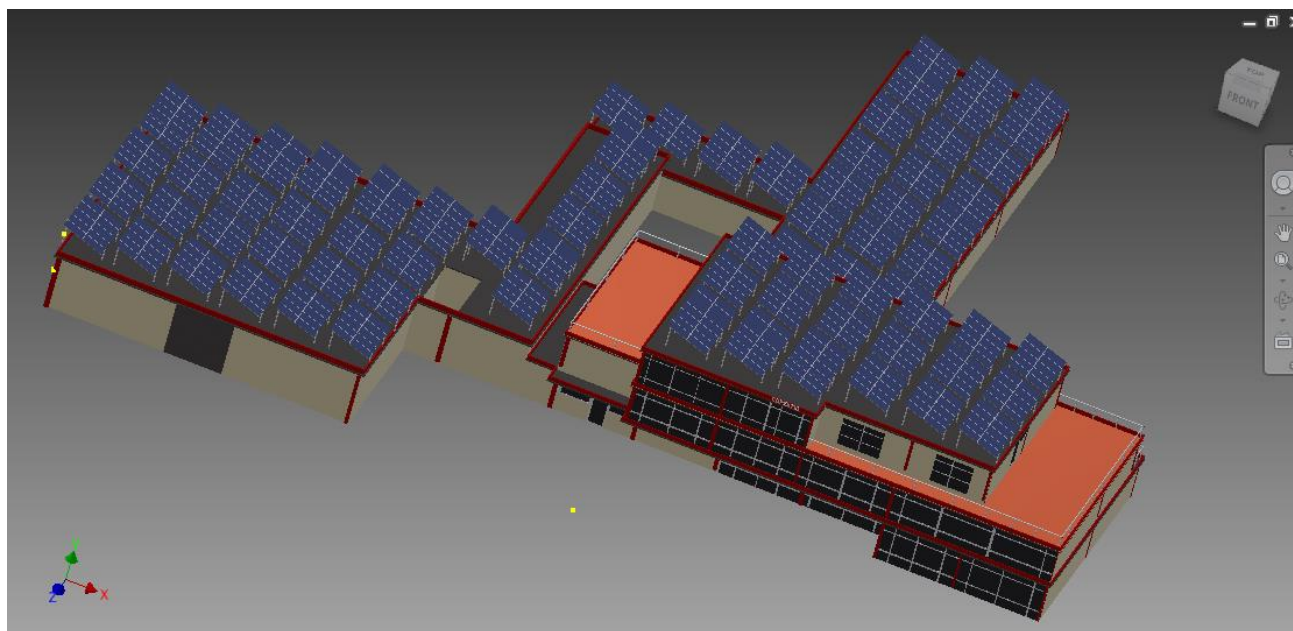
**Figura 3.13.** Tornillos empleados para la sujeción de la mesa.

Para el anclaje de las estructuras se realizan bases de hormigón sobre el techo del edificio para cada punto de apoyo de la estructura, y luego estas son fijadas con expansionadores como se muestra en la figura 3.14.



**Figura 3.14.** Base de hormigón.

En la figura 3.15 se muestra la distribución de los paneles sobre el techo del edificio.



**Figura 3.15.** Distribución de los paneles solares sobre la azotea.

### **3.4. Resistencia de la superficie techada.**

La instalación del sistema fotovoltaico en la superficie techada de Copextel supone agregar a la estructura del edificio aproximadamente un total de 575 módulos fotovoltaicos, siendo el peso de 20 kg por módulo. La estructura de los paneles, incluyendo las bases de hormigón pesa 110 kg cada uno y agregándole los 10 módulos



fotovoltaicos tendrá un peso de 310 kg. De acuerdo con la cantidad de paneles que se instalarán en la azotea se llega a la conclusión de que tendrá un peso total aproximado de 17 825 kg, este peso estaría distribuido por toda el área al equivalente de 11,14 kg/m<sup>2</sup>.

El tipo de edificación de la DTCC es del Sistema Constructivo Girón que 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 apoyadas sobre vigas. Estas losas están diseñadas para resistir su peso propio, un relleno y piso de 200 kg/m<sup>2</sup> y la carga de utilización. Existen losas para cargas de utilización de 300, 400 y 600 kg/m<sup>2</sup> (Marin, Whitmarsh, Calderón, Taboas, & Gutierrez, 1986).

Las cargas permanentes son las cargas que están actuando siempre en los elementos, las cargas de uso o de utilización son las cargas de acuerdo a las funciones que tenga el local y pueden ser de larga y corta duración.

Del catálogo surtido de elementos típicos del Sistema Constructivo Girón se obtiene las cargas permanentes que son de 533 Kg/m<sup>2</sup> y el peso propio de la losa de 2380 Kg, distribuyendo esta carga por el área se conoce que el peso propio por área de la losa es de 288,48 Kg/m<sup>2</sup> (Marin, Whitmarsh, Calderón, Taboas, & Gutierrez, 1986).

Teóricamente las losas resistirán la sumatoria de cargas, como se aprecia en la ecuación 3.2:

$$\text{Losas} = Pp + Cp + Cu \quad \text{Ec. 3.2}$$

$$\text{Losas} = 288,48 + 533 + 100 = 921,48 \text{ kg/m}^2$$

Donde:

Pp: Peso propio de la losa, kg/m<sup>2</sup>.

Cp: Carga permanente que soporta, kg/m<sup>2</sup>.

Cu: Carga de uso que soporta, kg/m<sup>2</sup>.

La carga permanente está compuesta por el peso del enrajonado en cubierta, el peso del mortero de nivelación y asiento y el peso de la manta impermeabilizante, datos que se obtienen de la Norma Cubana (NC 283:2003: Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño), obteniéndose en la

tabla 3.2 el valor de esta carga permanente (Ministerio de la Construcción; Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echevarría” ; Universidad Central de las Villas; Instituto Nacional de las Viviendas (CTVU) , 2003).

**Tabla 3.2.** Tabla de cargas permanentes (Ministerio de la Construcción; Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echevarría” ; Universidad Central de las Villas; Instituto Nacional de las Viviendas (CTVU) , 2003).

	Densidad	Espesor	Valor total de la carga (Kg/m <sup>2</sup> )
Enrajonado	18 Kg/m <sup>2</sup> /cm	15 cm	270
Mortero de nivelación y asiento	2000 Kg/m <sup>3</sup>	2,5 cm	50
Manta impermeable	7 Kg/m <sup>2</sup>		7
<b>Total</b>			<b>327</b>

Para conocer la carga real actuando sobre las losas se realiza la sumatoria del peso propio, la carga permanente y la carga de uso:

$$Losas = Pp + Cp + Cu = 288,48 + 327 + 100 = 715,48 \text{ kg/m}^2$$

Este valor es el que están resistiendo las losas en la actualidad.

Colocando los paneles solares que tienen un peso igual a 11,14 Kg/m<sup>2</sup> y que van a estar permanentemente actuando sobre las losas, la carga permanente será igual a 338,14 Kg/m<sup>2</sup>, lo que al incluir en la ecuación 3.2 resulta:

$$Losas = 288,48 + 338,14 + 100 = 726,62 \text{ kg/m}^2$$

Comparando este valor con el valor de carga que podrán resistir las losas:

726,62 Kg/m<sup>2</sup> < 921,48 Kg/m<sup>2</sup>, lo que implica que las losas son capaces de resistir la carga que tributan los paneles solares.

### **3.5. Mantenimiento del sistema fotovoltaico conectado a la red.**

Para tener un control óptimo general del SFCR y de las tareas particulares a realizar, la forma de hacerlas y reportes de operación a llenar, se deben de llevar a cabo tres tipos principales de mantenimiento:

- 1) Mantenimiento Preventivo.
- 2) Mantenimiento Correctivo.
- 3) Mantenimiento Predictivo.

#### **Mantenimiento Preventivo.**

Tiene por objeto prevenir el funcionamiento ineficiente de un sistema, manteniendo las mismas condiciones óptimas que existían en su puesta en marcha inicial y minimizando el riesgo de aparición de averías. Las operaciones relativas al mantenimiento preventivo de la instalación se realizarán siguiendo un esquema realizado previamente con todas las tareas asignadas, donde para mayor comodidad se pueden ver reflejadas en una tabla donde se indicará la tarea a realizar y su periodicidad en el tiempo. En todo mantenimiento preventivo se debe de prestar una atención mayor a aquellos equipos e instalaciones que hubieran sido objeto de un mayor número de incidencias según el registro de historial que se lleve. ´

Dos aspectos a tener en cuenta son por asegurar que ningún obstáculo haga sombra sobre los módulos y mantener limpios los módulos donde normalmente la lluvia se encarga de realizar la limpieza de los mismos.

Las tareas a realizar son:

- a) Inspección visual de residuos.
- b) Limpieza de paneles.
- c) Inspección del cableado de los paneles.
- d) Control de las características eléctricas del módulo.
- e) Inspección de la estructura metálica.
- f) Efecto sombra.

Se debe realizar el mantenimiento en las siguientes partes:

- Cajas de agrupamiento.
- Cuadros eléctricos.
- Canalización y cableado.
- Sistema de puesta a tierra.
- Medición de la resistividad de los suelos.
- Mantenimiento del inversor de conexión a red.
- Mantenimiento del área.

Estas tareas de mantenimiento se deben realizar al menos una vez al año.

### **Mantenimiento Correctivo.**

Se conoce como mantenimiento correctivo a toda operación de reparación de averías o defectos que puedan surgir en la instalación fotovoltaica. Normalmente se puede subsanar la situación con el reemplazo de los elementos dañados, aunque otras veces es necesaria una reparación y debe de realizarse por personal especializado. En este tipo de mantenimiento es fundamental el tiempo de respuesta, teniendo en cuenta que el tiempo perdido en la reparación repercute en la producción del sistema fotovoltaico. Un punto fundamental en el mantenimiento correctivo es la pronta detección de la falla, por el método o recurso disponible que sea. Luego de detectada la falla el siguiente paso es ubicarlo dentro del sistema fotovoltaico; se debe de tener controlado los stock de repuestos, de esta manera se determinará el tipo de falla, la urgencia de la misma, el motivo de la avería, el personal técnico encargado de solucionarlo y el material necesario cuando se presentan las fallas y se requiere hacer un análisis.

### **Mantenimiento Predictivo.**

Los trabajos de mantenimiento predictivo del sistema fotovoltaico consistirán en la atención diaria a las contingencias. Las actividades a realizar serán, controlar las operaciones de arranque y paro de los sistemas, inversores, la vigilancia y supervisión de la adecuada operación de producción, el análisis de las señales, alarmas y parámetros de la planta fotovoltaica como corrientes, tensiones, potencias; y la adecuada intervención para evitar averías graves. Actualmente, la mayoría de fabricantes de inversores y de aplicaciones ofrecen productos que registran, comparan y analizan

parámetros que permiten garantizar el funcionamiento correcto de la instalación. A este sistema de registro de datos y comunicación con los equipos se le conoce como monitorización. Algunos de los datos que estos sistemas deben registrar y controlar, son la tensión, intensidad de corriente y potencia.

### **3.6. Medidas de protección.**

La idea de la sencillez y poco complicado desde el punto de vista tecnológico de las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red y la viabilidad demostrada sobre el empleo de estos sistemas en sitios remotos, puede inducir la idea que estas instalaciones no exigen una atención sistemática y que incluso pueden operar en un régimen de trabajo desatendidas; pero existen factores que pueden indicar lo contrario y que requieran medidas especiales de atención, vigilancia técnica y protección desde el punto de vista físico.

Se debe considerar que esta es una instalación, que durante las horas del día genera riesgos asociados a la electricidad, que pueden manifestarse en graves consecuencias para la salud y la vida de personas y animales, motivados por causas diversas vinculadas a accidentes tecnológicos, desastres naturales o negligencias de las personas.

Estos razonamientos esenciales y otros que pueden estar vinculados con factores culturales propios del territorio, deben ser analizados cuidadosamente a la hora de valorar la manera de atención operacional del sistema.

#### **Protección eléctrica del panel fotovoltaico.**

Los módulos fotovoltaicos suministran Corriente Directa. Este tipo de Corriente al circular en caso de accidente por el cuerpo humano, causa un daño mayor que el que podría causar la corriente alterna, ya que esta última no forma los dipolos orientados en las moléculas de las sustancias polares como el agua, de la cual está compuesto aproximadamente más del setenta por ciento del cuerpo humano.

Por esta razón para evitar accidentes mortales durante la instalación de los módulos fotovoltaicos o por incorrecta manipulación de personas ajenas, se recomienda extremar

las medidas en ese sentido, dotando a los operadores de guante y otros aditamentos de protección.

### **Protección contra cortocircuito.**

En toda instalación eléctrica siempre existe la posibilidad de cortocircuito. La experiencia práctica indica que debe prestarse especial atención a la polaridad en la conexión, la sujeción de los conductores debe hacerse guardando las medidas de seguridad necesarias, colocar fusibles de protección bien calculados y usar cuchillas de interrupción para aislar circuitos.

### **Protección contra riesgos de descargas eléctricas y puesta a tierra.**

El riesgo de impactos de tormentas eléctricas en el territorio, va a estar influenciado por las características típicas del clima tropical cubano, pudiendo ocurrir durante todo el año y en cualquier hora del día, no obstante durante el periodo lluvioso (153 días, de Junio a Octubre) este riesgo es más elevado.

Para la protección frente a rayos y descargas eléctricas de alta tensión, se puede utilizar un pararrayos no radiactivo. La experiencia indica que esta es una protección que no puede obviarse, ya que algunas de las averías más importantes en los sistemas fotovoltaicos conectados a red, se han producido por descargas atmosféricas, siendo la parte más vulnerable la electrónica de potencia, es decir, los inversores que pueden afectarse por la inducción de la descarga, aun cuando el rayo no haya caído encima de la instalación.

Estas puestas a tierra se pueden complementar con interruptores diferenciales, que acusan las fugas de corriente, desconectándose en caso de que esto ocurra y evitando el riesgo de un contacto peligroso. La estructura metálica de los módulos se debe poner a tierra mediante una toma. La puesta a tierra se puede hacer de electrodos simples (picas, placas), o anillas o mayas (cables o pletinas soterradas horizontalmente).

### **Protección contra la influencia de factores ambientales.**

Los riesgos asociados a las condiciones ambientales, pueden responder a condiciones locales relacionadas con la humedad y la contaminación ambiental de la zona donde se encuentra enclavada la instalación.

A excepción los módulos, los demás componentes del sistema deben estar protegidos contra las lluvias, el polvo, la radiación y la humedad. Estos factores pueden provocar corrosión y deterioro, que pueden evitarse con medidas sencillas adoptadas de manera puntual. Estos riesgos al igual que los anteriores, deben ser estudiados desde la etapa de preinversión, previendo y desarrollando las medidas encaminadas a su reducción o erradicación. La limpieza sistemática de la superficie de los módulos puede constituir una importante medida.

### **Protección contra los efectos de la corrosión.**

Del total de los materiales que conforman un sistema fotovoltaico conectado a la red, más del 60 % son de procedencia metálica y en dependencia de su composición (ferrosa y no ferrosa) pueden ofrecer más o menos resistencia a los efectos de la corrosión.

En el caso de COPEXTEL la humedad relativa del ambiente, la composición química del aire y del agua que entra en contacto con la estructura metálica de la instalación, así como su exposición por tiempos prolongados a estos elementos, pueden desencadenar procesos acelerados de corrosión de las estructuras. La estabilidad física y operacional del sistema, dependen en una importante medida del estado técnico de las estructuras metálicas que lo soportan.

Dentro de las medidas que deben preverse para reducir los procesos corrosivos de las estructuras metálicas se encuentran las siguientes:

- a)** Control de la humedad de la superficie mediante el mantenimiento de un buen estado técnico de los drenajes.
- b)** Evitar la acumulación de agua en el área de la instalación.
- c)** Mantener pintadas con pintura anticorrosiva la estructura metálica de la instalación.
- d)** Mantener un chequeo sistemático de la corrosión sobre la estructura metálica, concentrando los esfuerzos principales en las partes que se encuentran más cercanas del suelo o en contacto con él.

### **Conclusiones del capítulo III.**

1. La simulación del SFVCR confirma que los datos obtenidos en el cálculo convencional son correctos y que permiten ofrecer a la empresa el sistema solar fotovoltaico a instalar para satisfacer sus necesidades energéticas.
2. El SFVCR diseñado consta de 575 módulos fotovoltaicos, con una capacidad de generación de 240 MWh/año que satisface las necesidades de la empresa de 200 MWh/año de consumo eléctrico.
3. La simulación muestra que los meses de menor generación son junio, julio, agosto y septiembre, dada la ubicación geográfica de Cuba, situada en la zona tropical del planeta donde a partir del mes de mayo comienza el período lluvioso, la mayoría de los días son nublados y a partir de las 10:00 am comienza una rápida condensación formándose grandes extensiones nubosas que difunden la radiación solar.
4. La estructura que se utilizará en el proyecto es de producción nacional, cuenta con 10 módulos cada una y se fija con bases de hormigón cada pata.
5. El Sistema Constructivo Girón de la DTCC resiste la carga que tributan los paneles solares ya que la carga de estos más las losas es de 726,62 Kg/m<sup>2</sup> y la carga máxima permitida por la edificación es de 921,48 Kg/m<sup>2</sup>.



## CAPÍTULO IV. Evaluación económica del sistema fotovoltaico propuesto.

---

En este epígrafe se hace un análisis económico y medio ambiental para determinar los beneficios totales que tendrá la DTCC después de ser instalado el sistema fotovoltaico.

### 4.1. Análisis y aporte medio ambiental.

Después de diseñar y simular el sistema fotovoltaico resulta conveniente analizar y apreciar los beneficios económicos y ambientales que aporta esta instalación, ya que en la actualidad se habla de muchos problemas vinculados al efecto del uso de los combustibles fósiles y en especial los que se encuentran vinculados con el perfil de la generación de energía.

Este aspecto de gran importancia ha permitido el auge de las tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica, debido 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 en la matriz energética nacional tiene gran importancia dada la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

Si se analiza el problema desde el punto de vista energético (eléctrico), como por ejemplo, la cantidad de combustible dejado de quemar para producir la misma cantidad de energía, se calcula mediante la ecuación 4.1:

$$\text{Combustible ahorrado} = \frac{E * g}{1000} \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$\text{Combustible ahorrado} = \frac{240\,000 * 0,236}{1000} = 56,64 \text{ t/año}$$

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.

Considerando los esfuerzos que actualmente se dedican a nivel internacional y nacional, para atenuar el uso de los combustibles fósiles y mitigar de esta manera los efectos de la contaminación ambiental, resulta de interés valorar la importancia de la penetración de esta tecnología en la matriz energética nacional, dada la reducción de CO<sub>2</sub> que la misma puede representar en la gestión energética. Por tanto, a partir del combustible ahorrado se busca la cantidad de CO<sub>2</sub> dejado de emitir a la atmósfera en t/año por la ecuación 4.2:

$$CO_2 \text{ no emitido} = \frac{\text{Combustible ahorrado} * k}{\rho} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$CO_2 \text{ no emitido} = \frac{56,64 * 3,119}{0,9781} = 180,62 \text{ t/año}$$

Donde:

K: coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO<sub>2</sub> 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.

Esta información permite estimar que la instalación del sistema fotovoltaico en COPEXTEL, puede evitar que se emita a la atmósfera el equivalente a 180,62 toneladas de CO<sub>2</sub> en un año y aproximadamente 4515,5 toneladas de CO<sub>2</sub> durante el ciclo de vida útil de la instalación.

## 4.2. Evaluación económica.

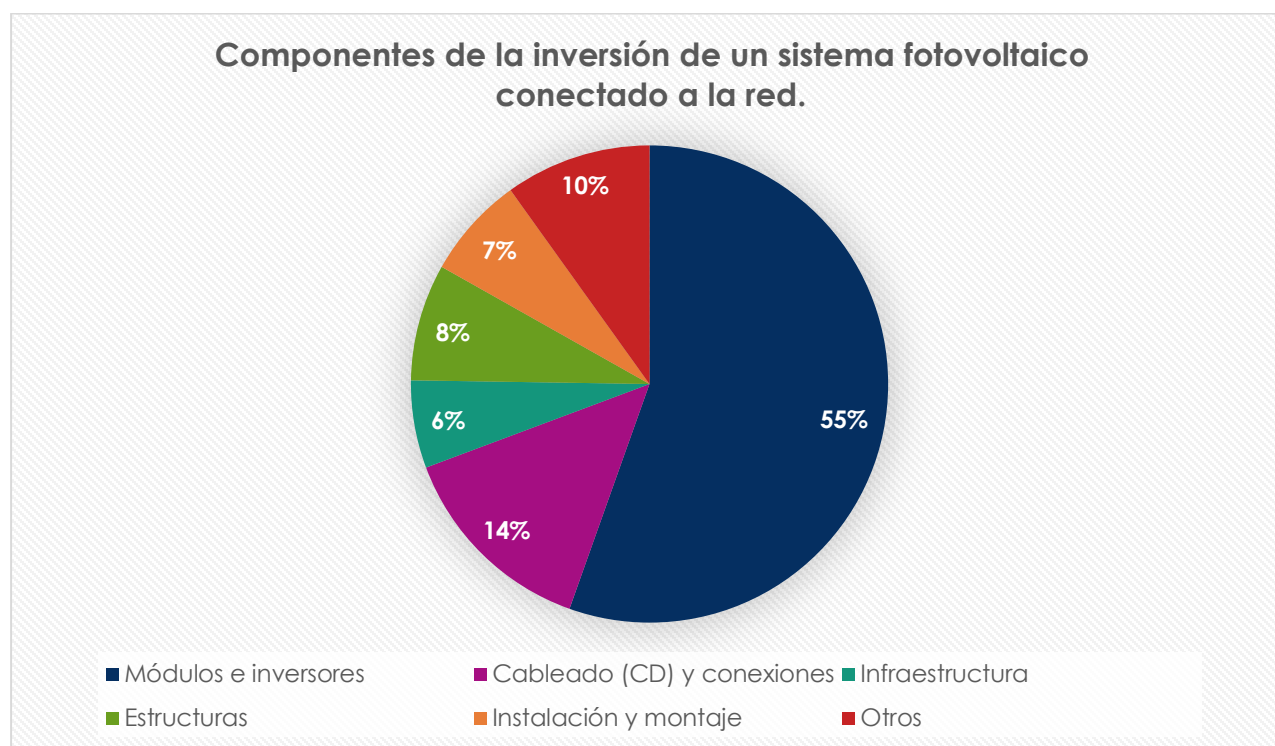
Actualmente en el mercado internacional de la energía, no suelen considerarse los costos vinculados a las externalidades en el precio de kWh y en este escenario la mayoría de las tecnologías que aprovechan las fuentes renovables lucen incompetentes, ante las formas tecnológicas y los métodos tradicionales de producir y comercializar la electricidad.

En todo proyecto el análisis económico resulta de gran interés, en este caso el análisis del costo de la unidad en energética comercializable, debe romper con el tradicional

sofisma económico que se aleja de reflejar los gastos y consecuencias reales que implican la utilización de los combustibles fósiles en la producción energética.

Se trata de emprender un reto que integre todos los gastos asociados al ciclo de vida de la tecnología desde su adquisición, implantación, operación y la reversibilidad de sus impactos, que asocie al precio de la unidad de energía producida los costos del combustible, los gastos asociados a su operación, mantenimiento y reparación, así como los gastos que son necesarios incurrir por conceptos de reducción y mitigación de impactos ambientales.

En la figura 4.1 se muestra de forma detallada la relación existente entre los costos de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico conectado a la red, tomando como referencia los datos ofrecidos por la empresa cubana EcoSol Energía, siendo esta la entidad comercial cubana Líder en el Suministro y Aplicación de Tecnologías y Productos de Avanzada para alcanzar soluciones Energéticas Eficientes.



**Figura 4.1.** Por ciento de los costos de inversión de un SFVCR según EcoSol Energía (Román, 2017).

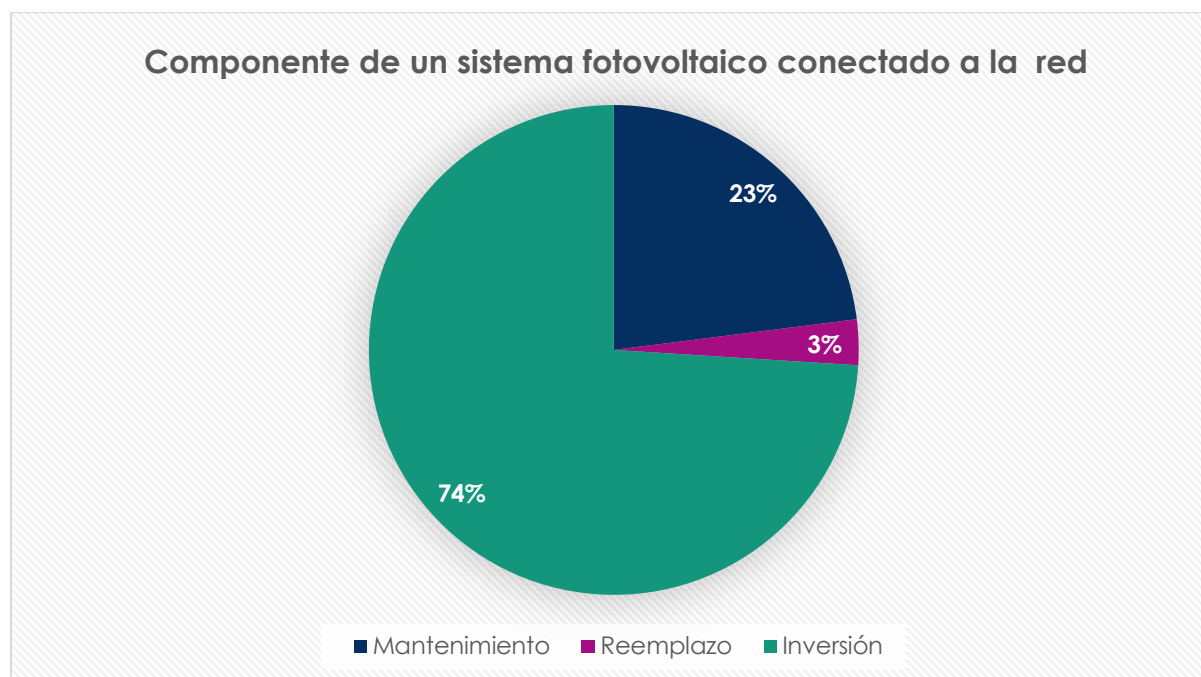
En la tabla 4.1 se muestran los costos aproximados de la instalación diseñada, teniendo en cuenta experiencias anteriores de inversiones fotovoltaicas en Cuba (Dr. C. Stolik, 2014).

**Tabla 4.1.** Costos aproximados en la inversión de la instalación. Fuente: elaboración propia.

	Especificaciones	Cantidad	Precio	Porcentaje (%)	Importe (CUC)
Módulo	250 Wp	575	\$0,62 / Wp	55	89 280
Inversor	25 550 W	5	\$0,15 / Wp		21 600
Estructura	-	57	-	8	16 200
Infraestructura	-	-	-	6	12 100
Cables	-	-	-	14	28 300
Obra civil	-	-	-	7	15 000
Otros	-	-	-	10	20 160
Costo de inversión	-	-	-	100	<b>202 700</b>

Para los sistemas fotovoltaicos los costos en que se incurren para generar energía eléctrica se pueden clasificar en costos iniciales o de capital y otros costos de funcionamiento que se presentan posteriormente en el tiempo. Al primer grupo pertenecen todos los costos en equipos e instalaciones, así como todas las inversiones que hay que hacer para tener un sistema con capacidad de suministrar energía. Pero para obtener energía durante el tiempo de vida útil es necesario el mantenimiento del sistema de generación (limpieza de módulos fotovoltaicos, materiales de instalación, entre otros) y disponer de fondo para hacer reemplazos de partes que se deterioran debido al vencimiento del período de su vida útil. El módulo fotovoltaico es solo una componente del sistema fotovoltaico completo, compuesto por inversores, estructuras metálicas, cableado, montaje, infraestructura, O-M (operación – mantenimiento), costos de capital, entre otros, cuyos costos parciales aportan también al costo final del sistemas fotovoltaicos.

Ahora es necesario presentar esta ficha que se basará en los componentes del SFVCR de forma detallada según EcoSol como se muestra en la figura 4.2:



**Figura 4.2.** Componente de un SFVCR según Ecosol (Román, 2017).

En la tabla 4.2 se muestra el costo aproximado de la instalación, teniendo en cuenta las especificaciones del diagrama anterior.

**Tabla 4.2.** Costo aproximado de la instalación. Fuente: elaboración propia.

	Porcentaje (%)	Importe (CUC)
Costo de inversión	74	202 700
Costo de operación y mantenimiento.	23	63 000
Costo de reemplazo	3	8 300
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>274 000</b>

#### 4.2.1. Análisis preliminar para la valoración económica.

La vida útil del SFVCR es de 25 años y según los fabricantes los módulos tiene una degradación de su potencial nominal, 10% en 20 años y 20% en 25 años por lo que es

posible realizar el cálculo de la generación de energía eléctrica durante estos años a partir de la ecuación 4.3.

$$GE \% = \frac{\# m * P * T * Dp * T_{año}}{1000} \quad Ec. 4.3$$

$$GE 90\% = \frac{575 * 250 * 1\,669 * 0,9 * 20}{1000} = 4\,318\,537,5 \text{ kWh}$$

$$GE 80\% = \frac{575 * 250 * 1\,669 * 0,8 * 5}{1000} = 959\,675 \text{ kWh}$$

Donde:

GE 90%: Potencia de salida de los módulos fotovoltaicos mantenida en 90 %.

GE 80%: Potencia de salida de los módulos fotovoltaicos mantenida en 80 %.

GET: Generación eléctrica del SFVCR durante su vida útil, kWh.

# m: Cantidad de módulos fotovoltaicos.

P: Potencia de los módulos fotovoltaicos, Wp.

T: Tiempo característico esperado o productividad específica, kWh/kWp/año.

Dp %: Decrecimiento de la potencia del módulo fotovoltaico durante el período de vida útil.

T año: Período de año de vida útil del sistema.

El SFVCR genera durante su vida útil 5 278 212,5 kWh y con esto se realiza el análisis para conocer el costo del kWh generado ( $Costo_{kWhG}$ ) de la instalación, mediante la ecuación 4.4.

$$Costo_{kWhG} = \frac{(Costo_{inv.inic} + Costo_{mant} + Costo_{reemp})}{GE_T(kWh)} \quad Ec. 4.4$$

$$Costo_{kWhG} = \frac{(202\,700 + 63\,000 + 8\,300)}{5\,278\,212,5} = 0,05 \text{ CUC/kWh}$$

Para determinar la cantidad de energía entregada del campo fotovoltaico al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) se recurre a la ecuación 4.5.

Datos:

Capacidad de generación mensual (CGM): 20 MWh/mensual

Consumo de energía medio mensual (CEMM): 16 MWh/mensual

$$\text{Energía entregada al SEN} = \text{CGM} - \text{CEMM} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$\text{Energía entregada al SEN} = 20 \frac{\text{MWh}}{\text{mensual}} - 16 \frac{\text{MWh}}{\text{mensual}} = 4 \text{ MWh/mensual}$$

La energía eléctrica trae consigo un ingreso económico por la venta de energía. El valor medio del MWh entregado y dejado de consumir al SEN está definido por el documento de información de la UNE "Costos de MWh" con un valor de 116 CUC/MWh y 210 CUC/MWh respectivamente. En la ecuación 4.6 y 4.7 se demuestran los ingresos mensuales.

$$\text{Ingresos por ventas} = \text{Energía entregada al SEN} * \text{Valor entregado} \quad \text{Ec. 4.6}$$

$$\text{Ingresos por ventas} = 4 * 116 = 464 \text{ CUC/mensual}$$

$$\text{Ingresos por dejar de consumir del SEN} = \text{CEMM} * \text{Valor dejado de consumir} \quad \text{Ec. 4.7}$$

$$\text{Ingreso por dejar de consumir del SEN} = 16 * 210 = 3\,360 \text{ CUC/mensual}$$

$$\text{Ingreso anual} = (\text{Ingresos por ventas} + \text{Ingreso por dejar de consumir del SEN}) * \text{mes}$$

$$\text{Ingreso anual} = \left( 464 \frac{\text{CUC}}{\text{mensual}} + 3\,360 \frac{\text{CUC}}{\text{mensual}} \right) * 12 = 45\,888 \text{ CUC/año}$$

Es necesario un análisis beneficio costo para conocer la rentabilidad de la propuesta y el tiempo necesario para la recuperación del capital invertido. Se sabe que el SFVCR ofrece un ahorro de capital de 1 147 200 pesos en su período de vida útil y su costo total de la inversión para garantizar la operación durante 25 años será de 274 000 pesos, esto se analiza con la ecuación 4.8.

$$\text{Relación beneficio/costo} = \frac{\text{Ahorro capital}}{\text{Costo}} = \frac{1\,147\,200}{274\,000} = 4,2 \quad \text{Ec. 4.8}$$

Por lo que se justifica económicamente la inversión, ya que la relación beneficio costo es de 4,2.

El Período Simple de Recuperación de la Inversión (PSRI) se calcula mediante la ecuación 4.9.

$$PSRI = \frac{(Costo_{inv.inic} + Costo_{mant} + Costo_{reemp})}{Ganancia} \quad Ec. 4.9$$

$$PSRI = \frac{(202\ 700 + 63\ 000 + 8\ 300)}{45\ 888} = 6 \text{ años}$$

#### **4.2.2. Análisis más detallado para la valoración económica.**

Para conocer un análisis más preciso en la rentabilidad del proyecto se realiza un estudio de factibilidad basado en el cálculo del VAN, el TIR y el PRI.

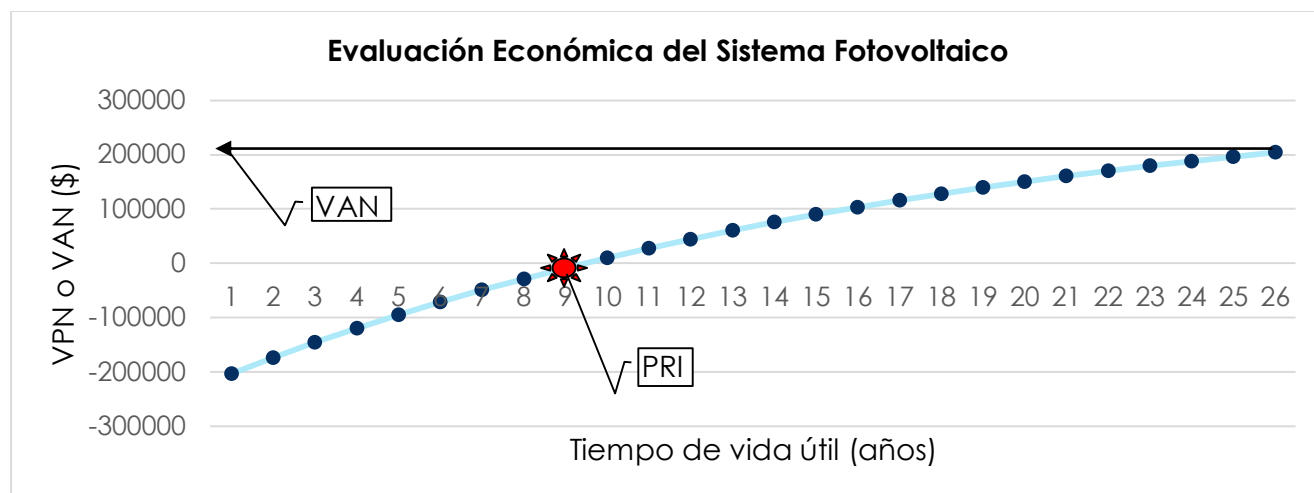
Valor actual neto (VAN): El VAN es la suma de los beneficios y costos de cada uno de los años de vida útil del proyecto, corregidos con una tasa de descuento que representa la variación del valor del dinero en cada año. El VAN proporciona el beneficio positivo o negativo al término de la vida de nuestro proyecto. Si este valor es positivo supondrá que el proyecto es rentable mientras que si el valor final es negativo no será aconsejable acometer el proyecto ya que este nos generará pérdidas.

Tasa interna de rendimiento (TIR): El TIR es la tasa de descuento que hace 0 la rentabilidad del proyecto. Por lo tanto, para calcularla se procederá a igualar el VAN a 0 y se hallará la tasa de descuento. El TIR representa el beneficio del proyecto en porcentaje a lo largo de su vida útil. En este caso no siempre que sea mayor a 0 será rentable, ya que habrá que tener en cuenta que el valor de nuestro dinero aumentaría un porcentaje cada año por el simple hecho de tenerlo. Esto hace que nuestro proyecto será rentable únicamente si el valor del TIR es superior al de  $r$ .

Período de recuperación de la inversión (PRI): Para finalizar el análisis financiero se calcula el período de recuperación de la inversión que nos indicará el tiempo que hay que esperar desde el inicio del proyecto hasta que los ingresos igualen a los costos iniciales del proyecto. Hallaremos el momento en el que se recupera la inversión inicial por completo y se empiezan a generar beneficios.



Estos cálculos fueron aplicados en el programa Microsoft Excel, ya que es una herramienta de trabajo especializada en gráficos y operaciones matemáticas. En el anexo 6 se dan a conocer los datos que se utilizaron para la confección del gráfico de la figura 4.3, la cual muestra cómo va aumentando el VAN mientras transcurre los 25 años de vida útil.



**Figura 4.3.** Valoración económica del sistema fotovoltaico propuesto (Fuente: Elaboración propia).

Esta recuperación se realiza considerando exclusivamente el ahorro económico por la venta de energía y la dejada de consumir. El proyecto será respaldado por la empresa en 9 años, y la vida útil de los paneles solares será de 25 años. Por tanto, este sistema fotovoltaico es una solución viable para la empresa de gran factibilidad técnica económica ya que apoya al suministro de energía eléctrica a la sede central de la empresa COPEXTEL Cienfuegos.

## Conclusiones del capítulo IV.

1. Se analizó el impacto ambiental, obteniéndose como resultado que la DTCC deja de emitir a la atmósfera 180,62 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, contribuyendo así al cuidado del medio ambiente.
2. Se ahorran 56,64 t/año de combustible, lo que significa un gran ahorro económico para el país.

3. El SFVCR tiene un costo de inversión de 202 700 CUC, un costo de operación y mantenimiento de 63 000 CUC y un costo de reemplazo de 8 300 CUC.
4. El SFVCR genera durante su vida útil 5 278 212,5 kWh y el kWh generado resulta de 0,05 CUC/kWh.
5. La instalación fotovoltaica ofrece un ahorro de capital de 1 147 200 CUC en su período de vida útil, recuperándose la inversión en 9 años.

## CONCLUSIONES

---

1. Las energías renovables tienen un elevado crecimiento en los últimos años y se espera que para el año 2100 sean las únicas productoras de energía eléctrica en el mundo.
2. Los paneles fotovoltaicos se orientaron  $39^{\circ}$  al este y se inclinaron  $22^{\circ}$  respecto a la horizontal para lograr obtener una mayor generación de energía eléctrica.
3. El parque fotovoltaico de la DTCC da la posibilidad de instalar 575 módulos fotovoltaicos, con una capacidad de generación de 20 MWh/mes, siendo utilizado por la empresa 16 MWh/mes y 4 MWh/mes es vendido al SEN.
4. Después de realizar el análisis económico se puede concluir que la propuesta de inversión resulta una alternativa rentable; en el término de nueve años se recupera la inversión inicial, el país percibirá anualmente un ahorro de 56,64 toneladas de combustible fuel y una disminución considerable de 180,62 toneladas de  $\text{CO}_2$  anualmente en la emisión de gases contaminantes.

## RECOMENDACIONES

---

1. Realizar estudios similares para el análisis de otros parques fotovoltaicos y su conexión a la red en el territorio nacional.
2. Analizar la posibilidad de repensar los parques con seguimiento solar, dados los cambios favorables en cuanto a costos y tecnologías que aceleradamente se están produciendo en el mundo.

## Bibliografía

---

- Aguila, A. (2013). *Instalación fotovoltaica conectada a la red*. Madrid.
- Arrastía Avila, M. A. (2013). *Energía: El invencible dios Sol*. La Habana: La Habana: Científico-Técnica.
- Cabó, D. (2014). *Fundamentos de la energía solar*. Madrid.
- Carmona, T. D. (2010). *Unidad 1. Componentes de una instalación solar fotovoltaica*.
- Cecu Corporation. (7 de mayo de 2011). Obtenido de <http://www.cecucorporation.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/htm/dossier/2%20fotovoltaica.htm> Mayo 2011.
- Chávez, I. (2012). *Desarrollo en Cuba de la energía solar fotovoltaica*. Obtenido de <http://www.cubasolar.com>
- Domigo Torres, L. (2010). *Desarrollo de un centro de pruebas de convertidores e inversores para un sistema fotovoltaico*. México: Instituto Tecnológico de Morelia.
- Domínguez, A. (2016). *Análisis de la factibilidad del uso de Energía Solar Fotovoltaica para cubrir la demanda de energía eléctrica de la DTCC*. Santa Clara: Universidad de Las Villas.
- Dr. C. Stolik, D. (2014). *Costo FV en Cuba*. La Habana: Universidad de La Habana.
- Energía Limpia. (2 de abril de 2018). Obtenido de <https://energialimpiaparatodos.com/2017/08/06/cambio-social-hosp-sostenibles-hoy/>
- Energía Solar. (10 de Abril de 2018). *La Energía Solar*. Obtenido de [www.energiasolar.com](http://www.energiasolar.com)
- Energías Renovables. (2 de abril de 2018). Obtenido de <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2009/03/27/hotel-con-energia-solar-en-china/>
- G.L.A., I., & Román, V. (2011). *Costos actuales de los módulos y sistemas fotovoltaicos*. I Taller de Fotovoltaica en Cuba. Universidad de La Habana.: EcoSol Energía.

Empresa Líder en el Suministro y Aplicación de Tecnologías y Productos de Avanzada para alcanzar soluciones Energéticas Eficientes y el Desarrollo de la Ingeniería asociada.

*Industria directa.* (abril de 2011). Obtenido de <http://www.directindustry.es>

International, Solar Energy. (2010). *Fotovoltaica. Manual de diseño e instalación.*

Iván, C. (2017). *Clases completas de energía solar fotovoltaica.* La Habana.

Jeffries, B., Denruyter, J. P., Singer, S., Gibbons, O., Hendrix, E., & Hiller, M. (2011). *El informe de la energía renovable.* Estados Unidos.

Lamingueiro, O. P. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica.* Madrid.

Loaeza, F. A., Ramiro, C., & Tenorio, J. C. (15 de febrero de 2012). *Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso en luminarias del edificio 3 de la ESIME Zacatenco.* México, D. F: INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS . Obtenido de [http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF05/es\\_IEA\\_ISF05\\_Contenidos/webseite\\_1\\_tipologia\\_y\\_dimensionado\\_de\\_los\\_sistemas\\_fotovoltaicos.html](http://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ISF/ISF05/es_IEA_ISF05_Contenidos/webseite_1_tipologia_y_dimensionado_de_los_sistemas_fotovoltaicos.html)

Luna Sainz, R. (2007). *Proyecto de fin de carrera “Diseño de planta solar fotovoltaica con conexión a red”.* Madrid: Universidad Pontificia Comillas “Escuela técnica superior de ingeniería” .

Madruga, E. (2014). *La Energización Rural en Cuba.* Cuba: cubasolar.

Marin, 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.

Medio ambiente. (2 de abril de 2018). Obtenido de <http://blog.nh-hoteles.es/medio-ambiente-2/la-energia-renovable-mueve-a-nh-hotel-group/>

Mermoud, D. A. (18 de marzo de 2016). *Estudio de Sistemas Fotovoltaicos.* Ginebra, Ginebra, Suiza.

Ministerio de la Construcción; Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echevarría” ; Universidad Central de las Villas; Instituto Nacional de las Viviendas (CTVU) .

- (2003). *Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño*. Ciudad de La Habana: Oficina Nacional de Normalización.
- (2018). *Misión y visión*. Cienfuegos: Dirección de organización. Dpto de estrategia y calidad.
- Observatorio crítico Cuba. (marzo de 2018). Obtenido de <https://observatoriocriticocuba.org>
- Peg Puig, M. J. (2012). *Solar Fotovoltaica*. Madrid: Energías renovables para todos.
- Pérez, J. C. (2013). *Sistema fotovoltaico conectado a la red para alimentar el Instituto Nacional de Investigaciones Económicas (INIE)*. La Habana: Ingeniería Eléctrica, ISPJAE.
- Prosperi, I. M. (2013). *Energía Solar Fotovoltaica*.
- Radiación Solar. (2006). *Ecosol*.
- Rodríguez Gámez, M., & Antonio Vázquez, M. V. (2012). *Evaluación y criterios para la instalación de 1 MWp de FV conectados a la red en Cantarrana, municipio y provincia de Cienfuegos*. La Habana: Archivo de datos digitales del CIPEL. 35 pp.
- Rodríguez, J. C., Izquierdo, G. P., Rodríguez, C. H., Falcón, P. U., Déniz, R. G., & Pérez, D. C. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. España.
- Román, I. G. (2017). *Costos actuales de los módulos y sistemas fotovoltaicos*. La Habana: Universidad de La Habana. EcoSol Energía.
- Salcedo, F. A., Carmona, C. R., & Caselin, J. C. (2012). *Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso en luminarias del edificio 3 de la ESIME Zacatenco*. México, D. F.
- Serrano Méndez, J. H., & Rubio Sarmiento, T. M. (2008). *Protección Ambiental y Producción Más Limpia*. Cuba: Agencia de Medio Ambiente,.
- Solar ark. (2 de abril de 2018). Obtenido de <https://inhabitat.com/solar-ark-worlds-most-stunning-solar-building/>

Solartex. (2 de abril de 2018). Obtenido de <http://www.vithas.es/Granada/Nuevo-hospital-vithas-salud>

Turrini, E. (2007). *El camino del Sol*. . La Habana: CUBASOLAR.

Valdivia, C. A. (2016). *Planificación energética de acuerdo a la norma cubana NC ISO 50001 en la Empresa COPEXTEL Cienfuegos*. Cienfuegos.

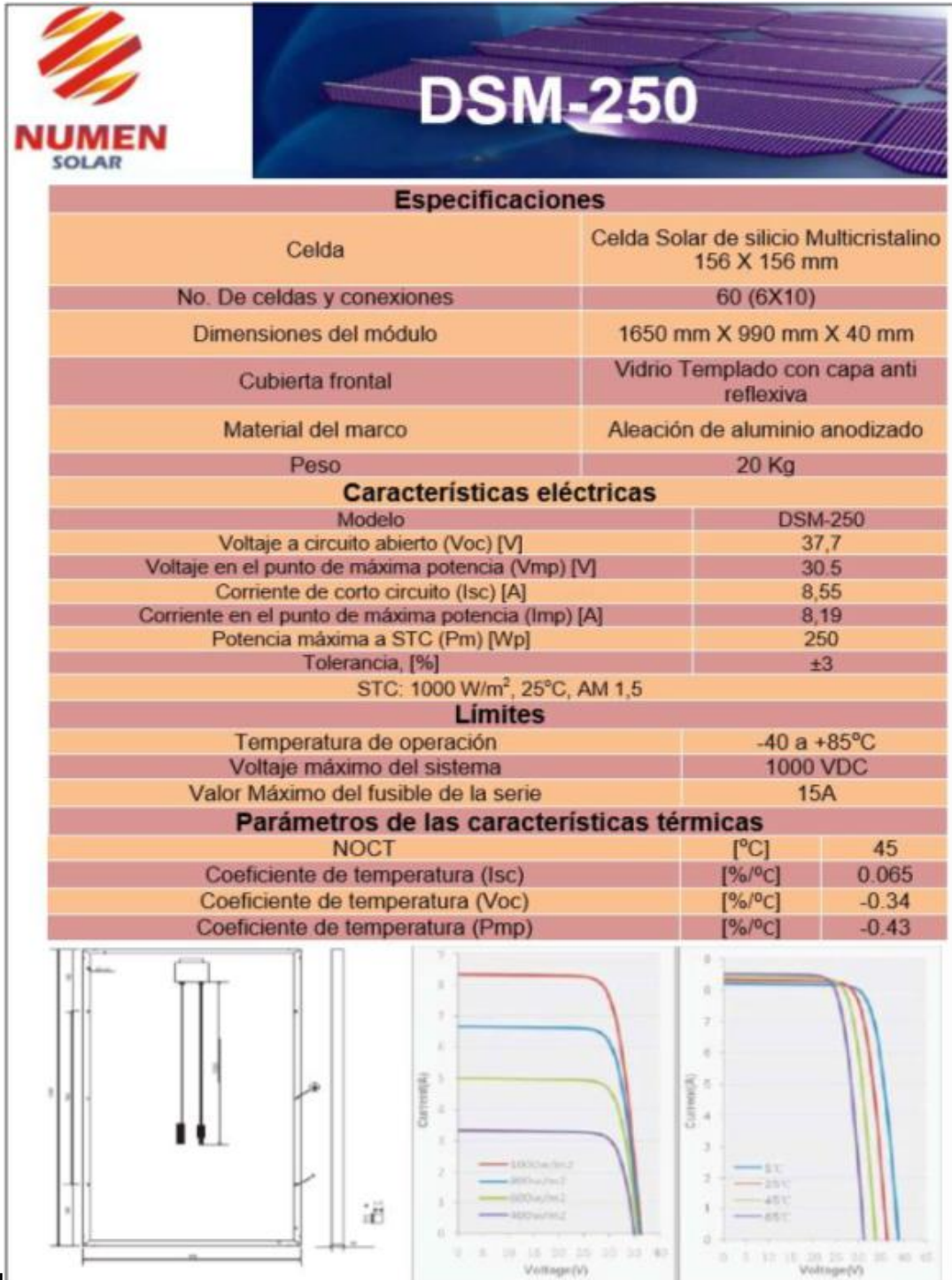
Wiki Arquitectura. (2 de abril de 2018). Obtenido de <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/bmw-welt/>

Wikipedia. (marzo de 2018). *Wikipedia*. Obtenido de [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_solar\\_fotovoltaica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica)



# ANEXOS

## Anexo 1: Datos técnicos del módulo empleado.



**Anexo 2: Datos técnicos del inversor Sunny Tripower 25000TL.**

Entrada de CC	
Potencia de CC máxima a $\cos \varphi = 1$	25550 W
Tensión de entrada máxima	1000 V
Rango de tensión del MPP	De 390 V a 800 V
Tensión asignada de entrada	600 V
Tensión de entrada mínima	150 V
Tensión de entrada de inicio	188 V
Corriente de entrada máxima, entrada A	33 A
Corriente de entrada máxima, entrada B	33 A
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	25000 W
Potencia aparente de CA máxima	25000 VA
Tensión de red asignada	230 V
Tensión nominal de CA	220 V / 230 V / 240 V
Rango de tensión de CA*	De 180 V 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
Coeficiente de distorsión de la corriente de salida con un coeficiente de distorsión de la tensión de CA < 2 % y una potencia de CA > 50 % de la potencia asignada	$\leq 3$ %
Frecuencia de red asignada	50 Hz
Frecuencia de red de CA*	50 Hz / 60 Hz

Rango de operación a una frecuencia de red de CA de 50 Hz	De 44 Hz a 55 Hz
Rango de operación a una frecuencia de red de CA de 60 Hz	De 54 Hz a 65 Hz
Factor de potencia con potencia asignada	1
Factor de desfase, ajustable	0 <sub>inductivo</sub> a 0 <sub>capacitivo</sub>
Fases de inyección	3
Fases de conexión	3
Categoría de sobretensión según IEC 62109-1	III
<b>Rendimiento</b>	
Rendimiento máximo, $\eta_{\text{máx}}$	98,3 %
Rendimiento europeo, $\eta_{\text{UE}}$	98,1 %
<b>Dispositivos de protección</b>	
Protección contra polaridad inversa (CC)	Diodo de cortocircuito
Punto de desconexión en el lado de entrada	Interruptor-seccionador de potencia de CC
Protección contra sobretensión de CC	Descargador de sobretensión del tipo II (opcional)
Resistencia al cortocircuito de CA	Regulación de corriente
Monitorización de la red	SMA Grid Guard 3
Protección máxima admisible	50 A
Monitorización de fallo a tierra	Monitorización de aislamiento: $R_{\text{iso}} > 250 \text{ k}\Omega$
Unidad de seguimiento de la corriente residual integrada	Disponible
<b>Datos generales</b>	
Anchura x altura x profundidad con interruptor seccionador de potencia de CC puesto	661 mm x 682 mm x 264 mm
Peso	61 kg
Longitud x anchura x altura del embalaje	780 mm x 380 mm x 790 mm
Peso de transporte	68 kg
Clase climática según IEC 60721-3-4	4 K4H

Categoría medioambiental	Al aire libre
Grado de suciedad fuera de la carcasa	3
Grado de suciedad dentro de la carcasa	2
Rango de temperatura de funcionamiento	De -25 °C a +60 °C
Valor máximo permitido de humedad relativa, sin condensación	100 %
Altitud de funcionamiento máxima sobre el nivel del mar	3000 m
Emisiones de ruido típicas	51 dB(A )
Potencia de disipación en el funcionamiento nocturno	1 W
Topología	Sin transformador
Sistema de refrigeración	SMA OptiCool
Tipo de protección electrónica según IEC 60529	IP65
Clase de protección según IEC 62109-1	I

### Anexo 3: Inversor Sunny Tripower 25000TL.



**Anexo 4: Paneles solares del modelo DSM-250.**

**Anexo 5: Factura de consumo de la DTCC.**

Meses	Consumo de energía eléctrica por año (MWh)		
	2015	2016	2017
Enero	13,50	12,44	12,06
Febrero	13,06	10,96	10,89
Marzo	14,58	13,98	14,89
Abril	17,67	17,95	17,75
Mayo	17,80	17,90	17,81
Junio	19,33	19,2	19,13
Julio	19,37	16,427	16,95
Agosto	19,20	18,000	18,35
Septiembre	18,80	18,000	17,70
Octubre	17,36	18,000	17,42
Noviembre	17,51	18,000	17,00
Diciembre	17,90	15,000	16,00

**Anexo 6: Evaluación económica del sistema fotovoltaico conectado a la red.**

Datos iniciales		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Ingresos (I), \$			45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888
Gastos (G), \$			2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Costo inversión (Ko)		202700								
Tasa de descuento (r), %			8	8	8	8	8	8	8	8
Tasa de inflación (f), %			5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Margen de riesgo, %			3	3	3	3	3	3	3	3
Tasa de impuesto (t), %			35	35	35	35	35	35	35	35
Vida útil estimada, años			25	25	25	25	25	25	25	25
Resultados										
Año		0	1	2	3	4	5	6	7	8
Depreciación (Dep), \$			8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108
Flujo de caja (Fc), \$			30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5
Tasa de descuento real (R)			0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Tasa de descuento real con margen (D)			0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Factor de descuento (Fdesc.)			0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,72	0,68	0,64
Flujo de caja descontado (Fd), \$			29161,494	27598,952	26120,136	24720,557	23395,972	22142,36	20955,921	19833,053
Flujo descontado acumulado (Fda), VPN,		-202700	-173538,51	-145939,55	-119819,42	-95098,861	-71702,89	-49560,529	-28604,609	-8771,5555
					TIR	15%				

**Anexo 6: Continuación.**

Datos iniciales		9	10	11	12	13	14	15	16	17
Ingresos (I), \$		45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888
Gastos (G), \$		2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Costo inversión (Ko)										
Tasa de descuento (r), %		8	8	8	8	8	8	8	8	8
Tasa de inflación (f), %		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Margen de riego, %		3	3	3	3	3	3	3	3	3
Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35	35	35	35	35	35
Vida útil estimada, años		25	25	25	25	25	25	25	25	25
Resultados										
Año		9	10	11	12	13	14	15	16	17
Depreciación (Dep), \$		8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108
Flujo de caja (Fc), \$		30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5
Tasa de descuento real (R)		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Tasa de descuento real con margen (D)		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Factor de descuento (Fdesc.)		0,61	0,58	0,55	0,52	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39
Flujo de caja descontado (Fd), \$		18770,351	17764,592	16812,723	15911,858	15059,263	14252,352	13488,678	12765,923	12081,895
Flujo descontado acumulado (Fda), VPN,		9998,7959	27763,388	44576,111	60487,969	75547,232	89799,585	103288,26	116054,19	128136,08

**Anexo 6: Continuación.**

Datos iniciales		18	19	20	21	22	23	24	25
Ingresos ( I ), \$		45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888	45888
Gastos (G), \$		2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850	2850
Costo inversión (Ko)									
Tasa de descuento (r) , %		8	8	8	8	8	8	8	8
Tasa de inflación (f), %		5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Margen de riesgo, %		3	3	3	3	3	3	3	3
Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35	35	35	35	35
Vida util estimada, años		25	25	25	25	25	25	25	25
Resultados									
Año		18	19	20	21	22	23	24	25
Depreciación (Dep), \$		8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108	8108
Flujo de caja (Fc), \$		30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5	30812,5
Tasa de descuento real (R)		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Tasa de descuento real con margen (D)		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Factor de descuento (Fdesc.)		0,37	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,27	0,25
Flujo de caja descontado (Fd), \$		11434,518	10821,83	10241,971	9693,1819	9173,7984	8682,2447	8217,0296	7776,7418
Flujo descontado acumulado (Fda),VPN,		139570,6	150392,43	160634,4	170327,58	179501,38	188183,62	196400,65	204177,39