

# Trabajo de Diploma

para optar por el título de

## Ingeniero Eléctrico

**Título: Propuesta de aprovechamiento de la energía solar para el suministro eléctrico del edificio administrativo de la EMNI**

**Autor: Daniel Garcell Rodríguez**

**Tutor: M.Sc. Manuel Fidel Matos Elías**

Moa, Junio del 2014  
“Año 56 de la Revolución”



**Resumen:**

Debido a la necesidad de buscar alternativas que permitan una disminución del consumo de energía se presenta el diseño de un sistema fotovoltaico conectado a red en la EMNI, donde a partir de los datos del consumo y el área disponible en el edificio administrativo de la EMNI se calculó el potencial fotovoltaico estableciendo las normas del centro de investigaciones de energía solar en Cuba para este tipo de sistema.

De acuerdo al sistema fotovoltaico propuesto se obtiene un sistema de generación de 60 kW pico, el cual trabajará sincronizado a la red, formado por 252 módulos fotovoltaicos de 245 W cada uno y 4 inversores trifásicos de 15 kW por inversor.

El sistema propuesto tendrá una generación anual de 78134,6 kW/año, y un ahorro de 15626,92 \$/año. Si se comparara con una central de igual característica que trabaje con combustibles fósiles, se estima una reducción de 55798 kg de CO<sub>2</sub> al año (0,7 kg de CO<sub>2</sub> por cada kWh generado). Por lo que se concluyó que el sistema permite disminuir las facturaciones de electricidad de la entidad, demostrando su viabilidad técnica.

**Summary:**

Due to the necessity of looking for alternative that allow a decrease of the energy consumption the design it is presented from a connected photovoltaic system to net in the EMNI, where starting from the data of the consumption and the available area in the administrative building of the EMNI the photovoltaic potential was calculated establishing the norms of the center of investigations of solar energy in Cuba for this type of system.

According to the proposed photovoltaic system a system of generation of 60 kW pick is obtained, which will work synchronized to the net, formed by 252 photovoltaic modules of 245 W each one and 4 investors of three phases of 15 kW for investor.

The proposed system will have an annual generation of 78134,6 kW/year, and a saving of 15626,92 \$/ year. If it was compared with a characteristic equal power station that works with fossil fuels, he/she is considered a reduction of 55798 kg from CO<sub>2</sub> to year (0,7 kg of CO<sub>2</sub> for each generated kWh). For what you concluded that the system allows to diminish the billings of electricity of the entity, demonstrating its technical viability.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LOS GENERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS .....	6
Introducción al capítulo.....	6
1.1. Breve reseña histórica de las celdas fotovoltaicas .....	6
1.1.1. <i>Aplicaciones más frecuentes de los sistemas fotovoltaicos</i> .....	6
1.1.2. <i>Desarrollo de los generadores solares fotovoltaicos en el mundo y en Cuba</i> .....	7
1.2. Generadores solares fotovoltaicos .....	8
1.2.1. <i>Tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos</i> .....	8
1.2.2. <i>Elementos fundamentales que componen un sistema fotovoltaico conectado a red</i> .....	10
1.2.3. <i>Células solares fotovoltaicas</i> .....	11
1.3. Energía solar .....	13
1.4. Estructura física de los módulos fotovoltaicos.....	17
1.5. Ubicación de los paneles según su orientación e inclinación .....	17
1.6. Número de módulos fotovoltaicos requeridos .....	19
1.7. Sistema de generación.....	19
Conclusiones del capítulo.....	20
CAPÍTULO 2. NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA EL CÁLCULO DE UN GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED APLICADO AL EDIFICIO ADMINISTRATIVO DE LA EMNI.....	21
Introducción al capítulo.....	21
2.1. Normas de calidad establecidas para componentes de sistema fotovoltaicos.....	21
2.2. Determinación del consumo energético de los equipos eléctricos en el edificio administrativo.....	23
2.3. Especificaciones técnicas para los generadores fotovoltaicos conectados a red.....	24
Conclusiones del capítulo.....	39
CAPÍTULO 3. RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL.....	40
Introducción al capítulo.....	40
3.1. Propuesta del generador solar fotovoltaico .....	40
3.2. Valoración económica .....	43

3.3. Impacto medioambiental .....	46
3.4. Impacto científico y tecnológico.....	46
Conclusiones del capítulo .....	46
CONCLUSIONES .....	48
RECOMENDACIONES .....	49
BIBLIOGRAFÍA .....	50
ANEXOS .....	52

---

## INTRODUCCIÓN

La luz solar es una fuente inagotable de energía a la cual todo el mundo tiene acceso, aprovechar su uso para diferentes fines como es el caso de la producción de energía eléctrica es un modo de preservar nuestro planeta y contribuir al desarrollo de la humanidad, pues consumimos a nivel mundial mucha energía eléctrica, principalmente en grandes fábricas como son las extractoras y procesadora de minerales que presentan largos procesos productivos.

El grupo empresarial del níquel (Cubaníquel) que pertenece al Ministerio de Energía y Minas (MINEM), en su dirección estratégica ha establecido las metas que debe alcanzar la organización dentro del entorno competitivo de esta industria en el mundo. La misión del grupo es convertir la industria cubana del níquel en un competidor líder a nivel internacional, mediante la diversificación de sus producciones, la alta eficiencia metalúrgica, la reducción de sus costos de producción y la alta productividad por hombre, maximizar los aportes a la caja central del estado y consolidarse como la tercera fuente de ingresos del país; para lo cual debe cumplir los planes de producción y exportación de níquel, cobalto y cromo, desarrollar investigaciones que permitan la creación de valores añadidos a nuestra producción y su incorporación al mercado mundial y satisfacer con un mínimo de costos los servicios productivos y no productivos.

La Empresa Mecánica del Níquel "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche" (EMNI), está adscripta al grupo empresarial Cubaníquel, esta es sinónimo de calidad y competencia en la industria metalmecánica de Cuba, su área es de 250 000 m<sup>2</sup> de los cuales 75 000 m<sup>2</sup> son instalaciones fabriles techadas, está situada en la ciudad de Moa, a 182 km de Holguín, 190 km de Santiago de Cuba y a 960 km de Ciudad de La Habana. Inaugurada en 1987, está integrada por varias unidades empresariales de base para la producción de estructuras metálicas, piezas fundidas y mecanizadas, reparaciones de equipamiento eléctrico industrial y de vehículos ligeros y camiones.

---

Lo antes mencionado supone un alto consumo de energía eléctrica, el cual se sustenta sobre la utilización de petróleo, para garantizar el proceso productivo de la empresa.

Por otra parte, a nivel mundial, la generación de energía eléctrica se ha convertido en un problema de primera necesidad, por lo que su utilización ha llevado a la humanidad al descubrimiento y posterior explotación de nuevas fuentes de energía. Partiendo de que la energía eléctrica es la base del desarrollo humano, es vital asegurar que siempre esté disponible para todos y que esta no constituya un problema para el medio ambiente, pues las principales fuentes de materias primas en la actualidad para su generación son los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral, etc.) y los minerales radioactivos (uranio, etc.). Los primeros; altos contaminantes del medio ambiente por la emanación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera terrestre producto de la combustión de los mismo, además de que son fuentes no renovables, y en los últimos, su aspecto más importante es el riesgo que representa para la salud humana y para el entorno de forma general si existiera la exposición directa al mismo por cualquier tipo de situación.

A través de la historia, la búsqueda de otras fuentes de materias primas se ha vuelto una necesidad primordial para asegurar la paz mundial, la protección del medio ambiente, además de la búsqueda de una mayor independencia de las actuales fuentes de materias primas para la generación de energía eléctrica.

Las energías renovables prometen ser las más cercanas y seguras fuentes de energías del futuro, donde las principales que el mundo conoce y que están disponibles para su explotación son la energía eólica, la energía hidráulica y la energía solar.

Cuba no ha quedado ajena a esto, en el 2005, se adoptó un sistema de decisiones estatales dirigidas a la progresiva reducción del gasto de energía, esto incluye el uso justo de los combustibles y la creciente modernización tecnológica de la sociedad, que redunden en el cuidado de la naturaleza. Es así

---

que se implementaron programas en el sector privado y el estatal, como el programa de sustitución y renovación de los equipos y medios existentes por otros más eficientes y la paralización definitiva de los equipos ineficientes, así como también la utilización de la energía eólica y solar.

En ese sentido se ha encaminado un grupo de proyectos referidos a la posibilidad de utilizar la energía alternativa, principalmente la eólica y la solar.

A pesar de que aún estas fuentes de energía son insuficientes por si solas para satisfacer la demanda energética actual, si se puede destacar que la aplicación de las mismas ayuda de forma significativa y su aprovechamiento es cada vez mayor, prometiéndose conjuntamente con otras convertirse en suficientes proveedoras de energía eléctrica, pues su impacto negativo al medio ambiente es prácticamente nulo llegando a valores considerables en cuanto a lo que de generación se trata.

En el caso de la radiación solar, es la fuente primaria de energía, es no contaminante, está distribuida de manera territorial y su disponibilidad potencial es muy superior a las necesidades del hombre.

Esta variante de suministro de energía eléctrica mediante paneles solares puede emplearse en la EMNI, para apoyar el ahorro de energía contribuyendo a reducir la importación de petróleo.

**Situación problemática:** la Empresa Mecánica del Níquel enfrenta en la actualidad una gran demanda de energía eléctrica del sistema electroenergético nacional para asegurar su proceso productivo, incidiendo esto de forma negativa en los indicadores energéticos de la empresa, donde con el aprovechamiento de la energía solar se puede disminuir la demanda de electricidad.

**Problema científico:** los altos niveles de consumo de energía eléctrica en el edificio administrativo de la EMNI, provocados por el uso continuo de equipos de iluminación, climatización y cómputo, entre otros.

---

**Objetivo general:** diseñar un sistema fotovoltaico conectado a red que permita, a través del aprovechamiento de la energía solar, disminuir las facturaciones de electricidad de las oficinas del edificio administrativo de la Empresa Mecánica del Níquel.

**Objeto de estudio:** proceso de generación de electricidad a través de la energía solar.

**Campo de acción:** los generadores solares fotovoltaicos aplicados como fuentes de energía para los equipos de iluminación, climatización, cómputo y otros, del edificio administrativo de la EMNI.

**Objetivos específicos:**

- Determinar el estado del arte vinculado con los generadores solares fotovoltaicos.
- Determinar el consumo eléctrico del edificio administrativo en la EMNI.
- Proponer la implementación de un generador solar fotovoltaico partiendo de la selección más óptima en cuanto a las partes que lo componen.
- Realizar la valoración económica y medioambiental de la propuesta a implementar.

**Hipótesis:** si se realiza un adecuado estudio del consumo de energía eléctrica proveniente de la red, en el edificio administrativo, se podrá diseñar un generador solar fotovoltaico conectado a red, que permita sustituir parte del uso de esta energía por la producida con energía solar.

**Métodos de Investigación:**

**Métodos**

Teóricos - Históricos

**Técnicas**

Revisión bibliográfica general y discriminativa, posición crítica ante los hechos y evaluación de las tendencias, inducción - deducción y, análisis

---

– síntesis. Aplicado para determinar la evolución histórica del objeto de estudio.

### **Teórico – Lógicos**

Hipotético – deductivo      Análisis y síntesis, abstracción, inducción – deducción. Aplicado en la elaboración de la hipótesis. Búsqueda de antecedentes, causas y condiciones que dieron origen a la investigación.

### **Empíricos**

Observación      Observación directa, entrevistas, método de búsqueda y solución de problemas. Para la obtención de datos.

Medición      Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos

Comparación      Análisis entre productos, precios, calidad, vida útil. Para apoyar los criterios de decisión propuestos.

---

# **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LOS GENERADORES SOLARES FOTOVOLTAICOS**

## **Introducción al capítulo**

En este capítulo se presentarán los principales aspectos históricos y teóricos que permitan comprender el funcionamiento de los generadores solares fotovoltaicos. En la parte teórica se abordará lo referente a los sistemas solares fotovoltaicos conectados a red.

### **1.1. Breve reseña histórica de las celdas fotovoltaicas**

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1839 en celdas electrolíticas por Becquerell y en sólidos (selenio) en 1877 por Adams y Day. En 1883, Fritts descubrió la primera celda fotovoltaica de selenio. Estas celdas se emplean aún hoy en día en instrumentos de medición de luz debido a la similitud entre la sensibilidad espectral de esta celda y la del ojo humano. En 1930, Schottky desarrolló la teoría que sirvió para explicar el efecto fotovoltaico y Lange sugirió las celdas solares como dispositivos adecuados para la generación de electricidad. Durante los años 30 y 40 se realizó una gran actividad investigativa en Germanio (Ge) y silicio (Si). El año 1954 puede ser considerado como el nacimiento de las celdas solares.

#### **1.1.1. *Aplicaciones más frecuentes de los sistemas fotovoltaicos***

De los usos más frecuentes de los sistemas fotovoltaicos, se mencionan:

- Estaciones repetidoras de microondas y de radio.
- Electrificación de pueblos en áreas remotas (Electrificación rural).
- Instalaciones médicas en áreas rurales.
- Corriente eléctrica para casas de campo.
- Sistemas de comunicaciones de emergencia.
- Sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua.
- Faros, boyas y balizas de navegación marítima.

- 
- Bombeo para sistemas de riego, agua potable en áreas rurales y abrevaderos para el ganado.
  - Sistemas de desalinización.
  - Vehículos de recreo.
  - Señalización ferroviaria.
  - Sistemas para cargar los acumuladores de barcos.
  - Fuente de energía para naves espaciales.
  - Postes SOS (Teléfonos de emergencia de carretera).

### ***1.1.2. Desarrollo de los generadores solares fotovoltaicos en el mundo y en Cuba***

El desarrollo de los generadores solares fotovoltaicos viene sobre la base de la tecnología y la capacidad de generación que se ha alcanzado en la actualidad, pues el desarrollo de estos equipos ha permitido insertarlos, cada vez con mayor aceptación, en diferentes industrias que son dependientes de la energía eléctrica producida a partir del petróleo.

Entre las mayores centrales de energía solar del mundo en la actualidad, se menciona la de Amareleja, Portugal, con más de 262 000 paneles fotovoltaicos instalados y una capacidad de generación de hasta 93 GigaWatt por año, suficiente para suministrar energía a miles de hogares.

En Cuba se ha estado fomentando desde hace un tiempo atrás el uso de la tecnología fotovoltaica. Entre los usos más comunes de los sistemas de electrificación fotovoltaica se puede mencionar, círculos sociales y consultorios médicos en lugares de difícil acceso, fundamentalmente en zonas montañosas de la región oriental, sobre todo en la Sierra Maestra, donde más de 1944 escuelas han recibido este beneficio.

Miles son los lugares que representan objetivos sociales y económicos, que a lo largo de toda la geografía cubana han sido electrificados con paneles solares entre los que destacan: cooperativas, fincas, campismos populares, repetidores de televisión e instalaciones de telefonía no atendidas entre otros.

---

En los últimos años se recuperó la producción de módulos fotovoltaicos en el país y el combinado de componentes electrónicos de Pinar del Río debe alcanzar una capacidad de producción de 2 MW, lo que permitirá satisfacer crecientes demandas del mercado nacional y la exportación.

## **1.2. Generadores solares fotovoltaicos**

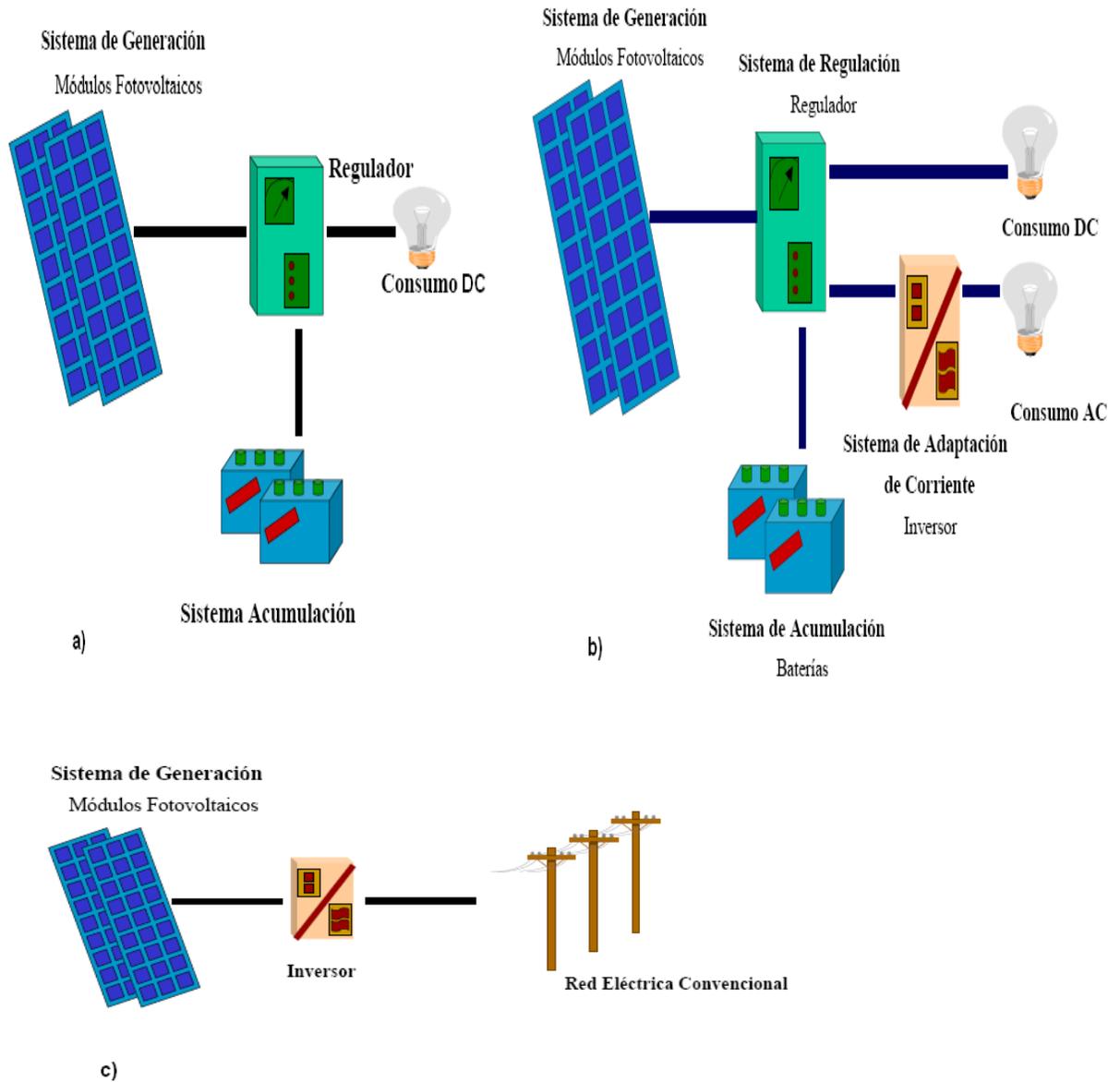
Los generadores solares fotovoltaicos (GSF), son dispositivos que convierten directamente parte de la energía de la luz solar en electricidad. Su componente más importante es la celda fotovoltaica que se fabrica principalmente con silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y el mismo material semiconductor usado en las computadoras. Cuando el silicio se contamina o dopa con otros materiales de ciertas características, obtiene propiedades eléctricas únicas en presencia de luz solar. Los electrones son excitados por la luz y se mueven a través del silicio; este es conocido como el efecto fotovoltaico y produce una corriente eléctrica directa.

### **1.2.1. Tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos**

Según su funcionamiento con relación a una red eléctrica convencional existen dos tipos fundamentales de sistemas fotovoltaicos, de una parte están los denominados sistemas fotovoltaicos conectados (o enganchados) a red (SFCR). Por otra parte están los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), que al contrario de los anteriores, no necesitan de una conexión con una red eléctrica, y su funcionamiento es independiente o autónomo de dicha red (de ahí su nombre). Los SFA fueron anteriores en el tiempo a los SFCR, y, aunque si bien estos últimos están consiguiendo un crecimiento muy importante, sobre todo en los países que cuentan con un amplio desarrollo de redes eléctricas en todo su territorio, los SFA siguen siendo los más empleados en países con poco desarrollo industrial, en zonas rurales, en lugares remotos y poco accesibles.

En la figura 2 se muestran los esquemas de tres tipos de sistemas fotovoltaicos muy típicos. El primero de ellos es un SFA con cargas sólo de corriente

continua. El segundo de ellos es muy similar al anterior pero que incluye cargas de corriente alterna también. Y el tercero es un ejemplo de SFCR.



**Figura 2.** Sistemas fotovoltaicos autónomos: a) con carga sólo de corriente continua, b) con carga de corriente continua y alterna; y c), sistema fotovoltaico conectado a red. Fuente: Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos, J. Aguilera; L. Hontoria.

---

### **1.2.2. Elementos fundamentales que componen un sistema fotovoltaico conectado a red**

- Panel fotovoltaico
- Inversor

#### **Módulo o Panel fotovoltaico**

Al grupo de células fotoeléctricas o fotovoltaicas para energía solar, se le conoce como panel fotovoltaico (ver anexo 4). Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células solares conectadas como circuito en serie. En su fabricación se producen módulos formados por 30, 32, 33, 36, 60, etc. celdas en serie, según la aplicación requerida. La tensión nominal del módulo será igual al producto del número de celdas que lo componen por la tensión de cada celda (aprox. 0,5 Volts), usualmente se fabrican a una tensión de salida de 12 V, 24 V, 30 V, etc. De las redes de células que forman el panel, se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo. El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua.

#### **Inversor**

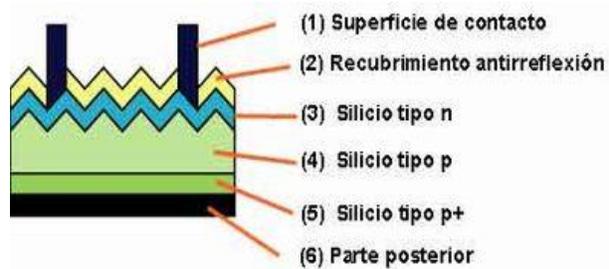
Los inversores son dispositivos que tienen como función cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para controlar alta potencia. Los inversores también se utilizan para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas. Existen diferentes tipos de inversores, entre los que se pueden mencionar están: los monofásicos y los trifásicos.

---

### 1.2.3. Células solares fotovoltaicas

La célula solar es un dispositivo de conversión directa que transforma la radiación solar directamente en electricidad (los dispositivos de transformación indirecta utilizan uno o más procesos de conversión intermedia para generar electricidad).

La célula fotovoltaica (figura 3) es el equivalente de un generador de energía a la que se le ha añadido un diodo.



**Figura 3.** Estructura de una célula fotovoltaica.

### Tipos de células más utilizadas

Células de silicio amorfo:

El silicio, durante su transformación, produce un gas que se proyecta sobre una lámina de vidrio. La celda es gris muy oscuro. Es la célula de las calculadoras y relojes llamados “solares”. Estas células fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear los mismos métodos de fabricación de diodos.

Ventajas:

- Funciona con una luz difusa baja (incluso en días nublados),
- Un poco menos costosa que otras tecnologías,
- Integración sobre soporte flexible o rígido.

---

Inconvenientes:

- Rendimiento a pleno sol bajo, del 5% al 7%.
- Rendimiento decreciente con el tiempo (~7%).

Células de silicio monocristalino:

Al enfriarse, el silicio fundido se solidifica formando un único cristal de grandes dimensiones. Luego se corta el cristal en delgadas capas que dan lugar a las células. Estas células generalmente son un azul uniforme.

Ventajas:

- Buen rendimiento de 14% al 16%
- Buena relación Watt-pico por metro cuadrado ( $\text{Wp/m}^2$ ) ( $150 \text{ Wp/m}^2$ , lo que ahorra espacio en caso necesario)
- Número de fabricantes elevado

Inconveniente:

- Costo elevado

Células de silicio multicristalino:

En su fabricación, durante el enfriamiento del silicio en un molde se forman varios cristales. La fotocélula es de aspecto azulado, pero no es uniforme, se distinguen diferentes colores creados por los diferentes cristales.

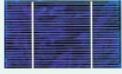
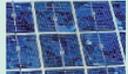
Ventajas:

- Células cuadradas que permite un mejor funcionamiento en un módulo,
- Eficiencia de conversión óptima, alrededor de  $100 \text{ Wp/m}^2$ , pero un poco menor que en el monocristalino.
- Lingote más barato de producir que el monocristalino.

Inconveniente:

Bajo rendimiento en condiciones de iluminación baja.

A continuación mostramos los tres tipos principales de células usadas en la fabricación de paneles solares.

Células	Silicio	Rendimiento laboratorio	Rendimiento directo	Características	Fabricación
	Monocristalino	24 %	15 - 18 %	Son típicos los azules homogéneos y la conexión de las células individuales entre sí (Czochralski).	Se obtiene de silicio puro fundido y dopado con boro.
	Policristalino	19 - 20 %	12 - 14 %	La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos azules.	Igual que el del monocristalino, pero se disminuye el número de fases de cristalización.
	Amorfo	16 %	< 10 %	Tiene un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las células.	Tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico.

**Figura 4.** Tipos de células fotovoltaicas.

Es importante destacar que la vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye.

### 1.3. Energía solar

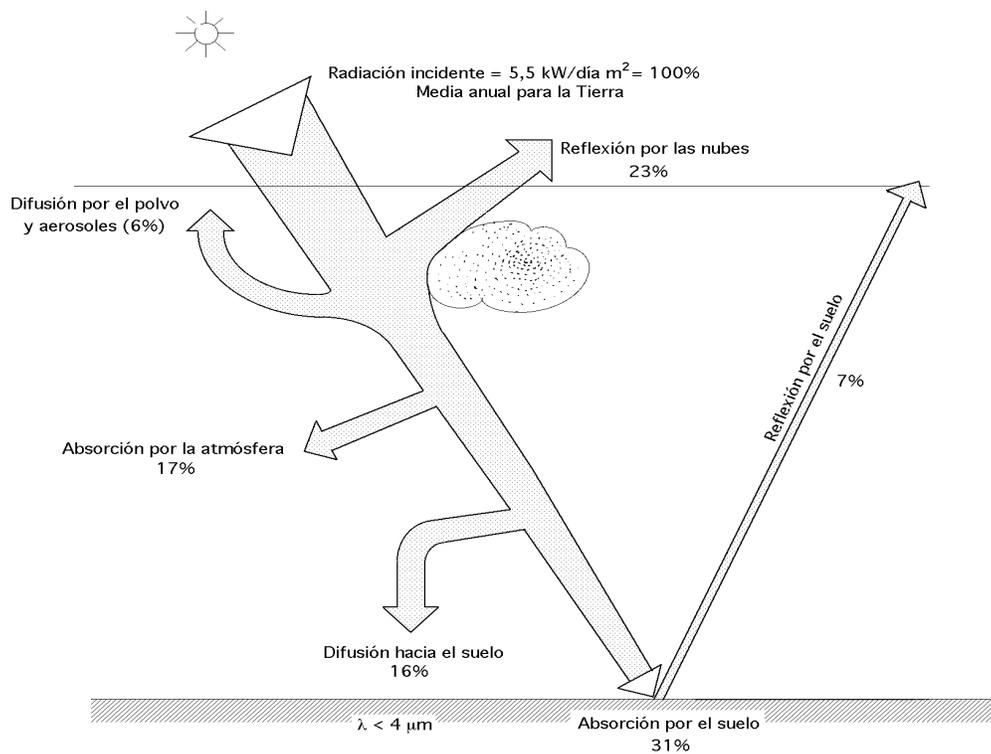
Según Futrille (2005), la constante solar, es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera.

Para una mejor comprensión explica, además, que: la combinación de tres factores, la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol, determinan un flujo luminoso, donde ese flujo (de materia, energía), se describe como la cantidad de ese "algo" que pasa a través de una superficie, por unidad de área y por unidad de tiempo.

Radiación solar: es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol.

Según Díez (2003) desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de  $5,6(10)^{35}$  GeVy, de ella, la

tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1,73(10)^{14}$  kW, o sea  $1,353 \text{ kW/m}^2$ , que se conoce como constante solar y cuyo valor fluctúa en un  $\pm 3\%$  debido a la variación periódica de la distancia entre la tierra y el sol. La atmósfera y la superficie terrestre se encuentran a temperaturas medias distintas y, por lo tanto, también irradian energía; así, la longitud de onda de la radiación solar está comprendida entre  $0,05 \mu\text{m}$  y  $4 \mu\text{m}$ , mientras que la radiación terrestre lo está entre  $3 \mu\text{m}$  y  $80 \mu\text{m}$ , es decir, se trata de emisiones de onda larga. De la energía solar incidente sobre la superficie de la tierra, sólo el 47% incidente alcanza la superficie terrestre, de forma que el 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser difundida por el polvo, vapor de agua y moléculas de aire. El 53% de la energía restante no alcanza la superficie de la tierra, ya que un 2% es absorbida por la estratosfera, principalmente por el ozono, el 15% por la troposfera, (agua, ozono y nubes), en total  $2 + 15 = 17\%$  y por otra parte, un 23% es reflejada por las nubes, un 7% es reflejada por el suelo y el 6 % restante corresponde a aquella energía difundida por la atmósfera que se dirige hacia el cielo.



**Figura 1.** Balance de radiación solar. Fuente: Díez, P.F. 2003

---

### **1.3.1. Horas de sol equivalente**

La intensidad de la luz solar que alcanza al planeta varía según el momento del día y del año, el lugar y las condiciones climáticas. La energía total registrada sobre una base diaria o anual se denomina “radiación” e indica la intensidad de dicha luz. La radiación se expresa en Wh/m<sup>2</sup> por día o, también, en kWh/m<sup>2</sup> por día. Con el fin de simplificar los cálculos realizados según la información de radiación, la energía solar se expresa en equivalentes a horas de luz solar plena. La luz solar plena registra una potencia de unos 1000 W/m<sup>2</sup>; por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a 1 kWh/m<sup>2</sup> de energía, es también denominada “hora de sol equivalente”, “hora de sol pico” u “hora de sol punta”. La luz solar plena registra una potencia de unos 1000 W/m<sup>2</sup>. Esta luz, cayendo perpendicular sobre una superficie de 1 m<sup>2</sup> durante una hora, equivale a una energía de 1000 Wh o 1 kWh (Energía = Potencia multiplicada por tiempo. ( $E = P \times t$ )). Del mismo modo, una radiación diaria promedio de 5 kWh/m<sup>2</sup>/día corresponderá a 5 horas de luz solar plena al día.

### **1.3.2. La energía, su unidad de medida**

Cuando la potencia se disipa en una carga, se calcula en términos del tiempo y se puede determinar la cantidad de energía consumida por la carga. Si se entrega un Watt (W) durante un segundo, la energía consumida en este tiempo es igual a un Joule. Por lo tanto al Joule también se le llama Watt-segundo (Ws). En los cálculos de potencia eléctrica, también se utilizan el Watt-hora (Wh) o el kiloWatt-hora (kWh), por considerarse unidades más convenientes que el Watt-segundo. Un kiloWatt-hora representa 1000 W entregados durante una hora, y así sucesivamente para niveles más altos de energía, como es el caso del MegaWatt-hora (MWh) que representa 1000 kWh o 1000 000 Wh.

Para entender este concepto de una manera más fácil, se entregan a continuación las definiciones de irradiancia e insolación:

---

## **Irradiancia**

Potencia solar medida en Watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Parámetro clave para entender o probar el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en un momento dado.

## **Insolación**

Energía solar medida en Watts-hora por metro cuadrado ( $Wh/m^2$ ). Parámetro clave para diseñar sistemas fotovoltaicos o entender su desempeño promedio.

Para el cálculo de la energía entregada por un panel solar, se deberá transformar esta información de la insolación de un día, en “horas de sol equivalentes”, donde se toma el valor entregado por la insolación, y al dividirlo por el valor de  $1000 Wh/m^2$  se obtiene el valor de estas “horas de sol equivalentes”.

## **Energía en la celda solar**

Al ser expuesta a la luz, una celda solar produce electricidad. Dependiendo de la intensidad de la luz (la radiación en  $W/m^2$ ), una celda solar produce mayor o menor cantidad de electricidad. Para determinar y comparar la potencia nominal de los paneles solares, se mide su salida bajo condiciones estándar de prueba (STC). Estas son:

- Una radiación de  $1000 W/m^2$ .
- Un espectro solar de referencia.
- Una temperatura de celda de  $25^{\circ}C$  (la eficiencia de un panel solar disminuye significativamente cuando la temperatura de la celda aumenta).

---

#### **1.4. Estructura física de los módulos fotovoltaicos**

Para una adecuada selección de los módulos estos deben poseer rigidez en su estructura, aislamiento eléctrico y resistencia a los agentes climáticos. Por esto, las celdas conectadas en serie, son encapsuladas en un plástico elástico (Etilvinilacelato) que hace las veces de aislante eléctrico, un vidrio templado de bajo contenido de hierro, en la cara que mira al sol, y una lámina plástica multicapa (Poliéster) en la cara posterior. En algunos casos el vidrio es reemplazado por una lámina de material plástico transparente. El módulo tiene un marco que se compone de aluminio o de poliuretano, y cajas de conexiones a las cuales llegan los terminales positivo y negativo de la serie de celdas. En las borneras de las cajas se conectan los cables que vinculan el módulo al sistema

#### **1.5. Ubicación de los paneles según su orientación e inclinación**

Un panel solar genera electricidad incluso en ausencia de luz solar directa. Por ende, un sistema solar generará energía aún con cielo nublado. Sin embargo, las condiciones óptimas de operación implican: la presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el Sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz solar directa. En el hemisferio Sur, el panel deberá orientarse hacia el Norte y en el hemisferio Norte, hacia el Sur. Los módulos deberán estar orientados de manera tal que el frente de los mismos mire al norte geográfico en el hemisferio Sur del planeta y en el hemisferio Norte, hacia el Sur geográfico. Cuando el sol alcanza el punto más alto en su trayectoria en el firmamento se denomina mediodía solar.

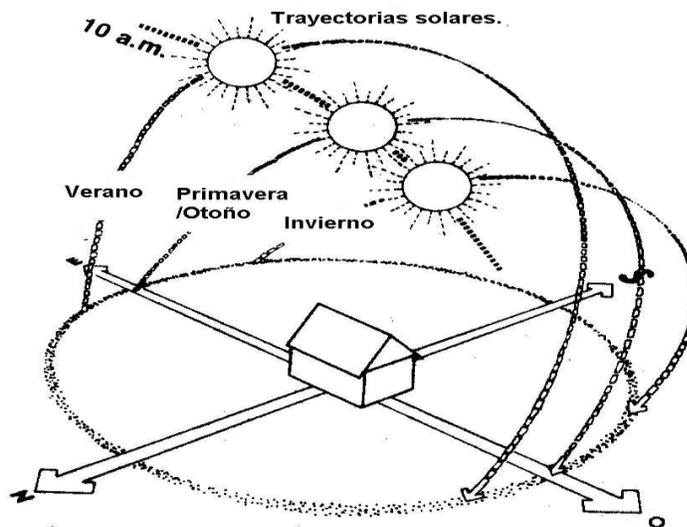
Un método simple para determinar el Norte (o Sur) geográfico es el siguiente: plante una estaca en el suelo y observe la longitud de su sombra. Cuando esta se reduce a un mínimo, se ha alcanzado el mediodía solar para esa estación del año. La dirección de la sombra y la posición del sol le indican la dirección del Norte (o Sur) geográfico. Este método puede ser perfeccionado si el diario local u otro medio publica el tiempo de salida y puesta del sol. La mitad de esa diferencia horaria, sumada a la hora de

---

salida, proporciona la hora para el mediodía solar. En ese momento se puede observar la dirección de la sombra y la posición del sol. Por lo tanto, en la práctica, los paneles solares deberán ser colocados en ángulo con el plano horizontal (inclinados). Cerca del Ecuador, el panel solar deberá colocarse ligeramente inclinado (casi horizontal) para permitir que la lluvia limpie el polvo.

El sol se desplaza en el cielo de Este a Oeste (figura 5). Los paneles solares alcanzan su máxima efectividad cuando están orientados hacia el sol, en un ángulo perpendicular con éste al mediodía. Por lo general, los paneles solares son colocados sobre un techo o una estructura con una posición fija no pudiendo seguir la trayectoria del sol en el cielo. Por lo tanto, no estarán orientados hacia el astro con un ángulo óptimo ( $90^\circ$ ) durante toda la jornada. El ángulo entre el plano horizontal y el panel solar se denomina ángulo de inclinación. Debido al movimiento terrestre alrededor del sol, existen también variaciones estacionales. Idealmente, en verano los paneles solares deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal para aprovechar al máximo la luz solar. Sin embargo, los mismos paneles no estarán, entonces, en posición óptima para el sol del invierno. Con el propósito de alcanzar un mejor rendimiento anual promedio, los paneles solares deberán ser instalados en un ángulo fijo, determinado en algún punto entre los ángulos óptimos para el verano y para el invierno. Cada latitud presenta un ángulo de inclinación óptimo. Los paneles deben colocarse en posición horizontal únicamente en zonas cercanas al Ecuador. Los distribuidores de paneles solares recomiendan que se utilice un ángulo de inclinación igual a la latitud más  $15^\circ$ . Esto se debe principalmente a que con esta inclinación, el panel solar tendrá un mejor rendimiento anual.

La orientación del sol varía según la hora del día y también de acuerdo al día del año.



**Figura 5.** Variación de la posición del Sol a lo largo del día y del año.

### **1.6. Número de módulos fotovoltaicos requeridos**

Con el valor de la energía que debe ser generada y con la aportada por el panel, se tiene una relación entre ambos valores que entrega una indicación del número de paneles requeridos en el sistema. El otro factor que determina el número de módulos es la diferencia entre los voltajes de los artefactos que consumen la energía y el sistema de generación. Para alcanzar los requerimientos del sistema tanto en carga como en voltaje, se debe tener en cuenta que las conexiones en serie suman las tensiones (voltajes) y las conexiones en paralelo suman las cargas. Así, por ejemplo, si se tiene que abastecer una carga de 200 Wh/día, de equipos que funcionan con 12 Volts, y se cuenta con un módulo fotovoltaico de 12 volts que genera en la localización deseada, un valor de 50 Wh/día, se necesitan 4 módulos fotovoltaicos conectados en paralelo.

### **1.7. Sistema de generación**

Un sistema fotovoltaico consiste en la integración de varios componentes, cada uno de ellos cumpliendo con una o más funciones específicas, a fin de que este pueda suplir la demanda de energía eléctrica impuesta por el tipo

---

de carga, usando la energía solar. Las características de la carga eléctrica determinan los tipos de componentes que deberán utilizarse en el sistema. La completa definición de la carga debe tener en cuenta tres características que la definen: el tipo, el valor energético y el régimen de uso.

El valor energético representa el total de energía que consumirá la carga dentro de un período determinado, generalmente un día. Para sistemas pequeños este valor estará dado en Wh/día. Para sistemas de mayor consumo en kWh/día. El régimen de uso responde a dos características: cuándo se usa la energía generada y la rapidez de su uso. Dependiendo de cuándo se usa la energía, se tendrá un régimen diurno, nocturno o mixto. La rapidez del consumo (energía por unidad de tiempo), determina el valor de la potencia máxima requerida por la carga. El tipo de carga se asume en dos tipos: en corriente directa (o continua), o en corriente alterna.

### **Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se abordó los principales aspectos de los generadores solares fotovoltaicos, como es: el desarrollo de los mismos en Cuba y el mundo, su funcionamiento, los principales tipos que existen y características en cuanto a su funcionamiento.

---

## **CAPÍTULO 2. NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA EL CÁLCULO DE UN GENERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO CONECTADO A RED APLICADO AL EDIFICIO ADMINISTRATIVO DE LA EMNI**

### **Introducción al capítulo**

En el presente capítulo se desarrolla la determinación de la demanda eléctrica de los consumidores del edificio administrativo perteneciente a la EMNI, así como la selección de los diferentes elementos, normas y especificaciones establecidas por el Centro de Investigaciones de Energía Solar en Cuba (CIES) para la instalación de un generador solar fotovoltaico conectado a red.

En este momento es necesario aclarar, que la entidad EMNI, solicitó en el año 2013 al CIES de Santiago de Cuba los estudios para la posible aplicación de la energía solar en la entidad, de dicho estudio, se tomaron los potenciales de generación, específicamente en el edificio administrativo.

Antes de realizar cualquier cálculo, se considera conveniente establecer las especificaciones técnicas que se deben cumplir en el trabajo, para lo cual se tomará como base los resultados del estudio investigativo de CIES en el 2013 a la EMNI.

### **2.1. Normas de calidad establecidas para componentes de sistema fotovoltaicos**

Todos los componentes del sistema fotovoltaico deben estar en conformidad con las normas cubanas e internacionales lo que garantiza su calidad, integridad y un óptimo desempeño después de la instalación.

Algunas de estas normas se mencionan a continuación:

- IEC 61215 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic Modules: Design Qualification and Type approval.

- 
- IEC 61646 Thin Film Terrestrial photovoltaic: Modules Design Qualification and Type approval.
  - IEC 60891 Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.
  - IEC 61730 Photovoltaic Modules: Safety Qualification.
  - IEC 60364-7-712 Electrical Installations of Buildings-Part 7-712; Requirements for especial installations or locations solar photovoltaic (PV) Power supply systems.

El equipamiento de tipo más general (líneas eléctricas, cableado, medidores de energía, edificaciones y sistemas de protección) deben satisfacer la normas eléctricas cubanas vigentes que están recogidas en el código electrotécnico cubano NC 800-1 del 2011 de la Oficina Nacional de Normalización del CITMA, para baja tensión.

A continuación se hará mención a las más relevantes que el código electrotécnico cubano reconoce:

- IEC 61000-4-30 Expone los requisitos que se deben mantener en la calidad de la energía eléctrica.
- IEC 6034-6 Expone los ensayos del aislamiento de cables conductores de la instalación fija, ensayos de continuidad y de conductividad de los conductores de protección de equipotencialidad y de unión de tierra.
- ISO 14001 Expone el cumplimiento de los requisitos ambientales.
- IEC 60076 Expone las normas para los transformadores conectado de media tensión a baja tensión.
- IEC 60287-1-1 Expone las normas para los conductores eléctricos.
- IEC 60439 Expone el equipamiento eléctrico de distribución de baja tensión.
- IEC 60071 Expone los niveles de aislamiento en media tensión.
- NC IEC 60364 Expone la protección aguas abajo del transformador.
- IEC 61140 Expone la protección de la persona contra el choque eléctrico.

- 
- IEC 60529 Expone los grados de protección proporcionado por las envolventes (IP)
  - IEC 60715 Expone el dimensionamiento del equipamiento de interrupción seccionamiento y control de baja tensión.
  - IEC 60724 Límites de temperatura durante el cortocircuito de cables eléctricos.
  - IEC 61557 Seguridad eléctrica en los sistemas de baja tensión.
  - NC UNE IEC 62305 4 Expone la norma de protección contra rayo en los sistemas eléctricos y electrónicos.

## **2.2. Determinación del consumo energético de los equipos eléctricos en el edificio administrativo**

Se determinaron los equipos eléctricos existentes en el edificio administrativo de la EMNI y el consumo eléctrico de las instalaciones y sus variaciones. Los resultados obtenidos y la información facilitada por los especialistas energéticos sirvieron para reconocer que para el cálculo del consumo eléctrico de las oficinas a estudiar, es fuente confiable guiarse por el consumo propio que contiene cada equipo eléctrico y que viene señalado en sus datos nominales o por medición a través de equipos de medición (metrocontadores de energía activa instalados y medidores de corriente activa o hook on).

En el caso de las computadoras personales y otros equipos similares en cuanto a su funcionamiento, se realizaron mediciones con el equipo realizando distintas actividades, comprobándose así que los rangos de consumo eléctrico entregados por los fabricantes son correctos, ejemplo de estos son las computadoras la cual posee un consumo variable, dependiendo de los elementos que se pongan a funcionar, es decir, si se está utilizando el monitor, un CD-ROM, o si se están utilizando programas que utilicen una aceleración de gráficos, etc. Por lo que se elegirá el consumo promedio de estos equipos para el cálculo del consumo de la oficina.

El procedimiento a seguir para el cálculo del consumo eléctrico de los equipos a utilizar en las oficinas, será el descrito a continuación: los valores usados para el consumo eléctrico de cada equipo, será el que indica el fabricante en la placa del producto o en su ficha técnica, y en el caso de existir consumos variables, se utilizará un valor estimado que puede ser el promedio entre el consumo mayor y el menor de dicho equipo. Para el presente trabajo, se define como usuario de modo referido, a todas las instalaciones ubicadas en el segundo y tercer piso del edificio administrativo, este tiene un consumo instantáneo de 60,719 kWh. (Ver anexo 1).

Para lograr establecer un nivel más práctico de los consumos promedios, se afecta este consumo instantáneo por un coeficiente de utilización de 0,9375, establecido por el estudio práctico realizado entre el diplomante y los especialistas energéticos, esto establece un consumo promedio de 56,924 kWh.

### **2.3. Especificaciones técnicas para los generadores fotovoltaicos conectados a red**

#### **Horas de sol equivalente**

Para llegar a este valor, se utilizarán algunas referencias, la principal de ella, la aporta CIES, en su estudio realizado en la EMNI (tabla 1). Por lo que, para Moa, se calcula una radiación anual promedio de 3,538 kWh/m<sup>2</sup>/día que corresponde a 3,538 horas de luz solar plena al día.

**Tabla. 1** Radiación solar anual de Moa (Holguín, Cuba). Fuente: CIES.

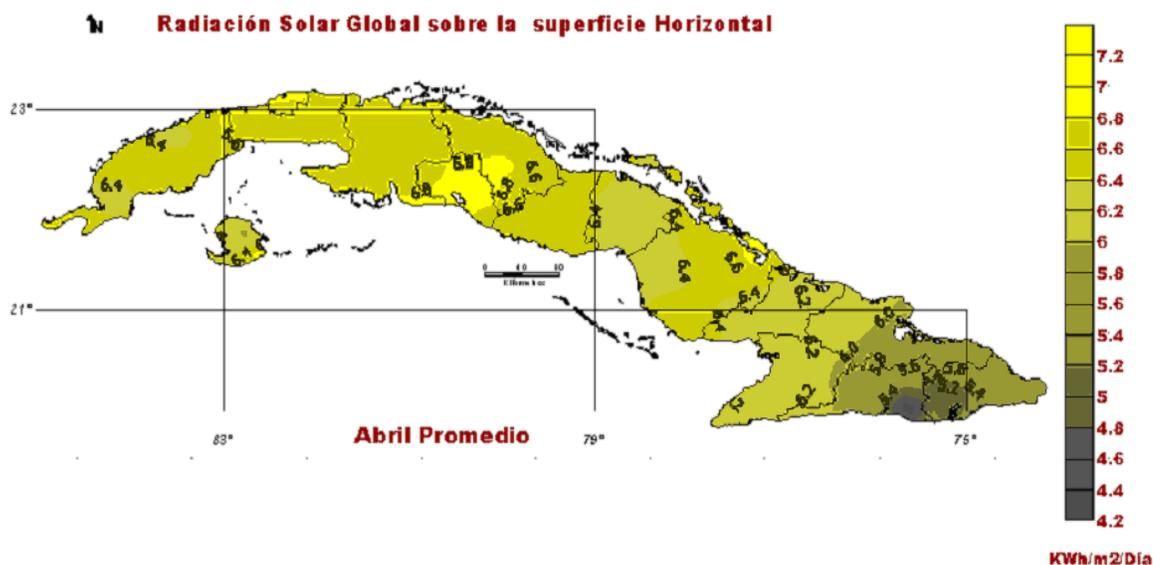
	En	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Año
Irradiancia global horizontal promedio kWh/m <sup>2</sup>	80,3	97,4	124,2	111,7	117,6	128,9	137,6	131,7	104,4	95,3	82,8	79,6	107,6
Promedio horas sol equiv./ día	2,59	3,48	4,01	3,72	3,79	4,30	4,40	4,25	3,48	3,074	2,76	2,568	3,538

A modo de comparación, otras referencias investigadas (tabla 2) muestran la radiación solar anual en Imías, Guantánamo; lugar relativamente cercano al municipio Moa en cuanto a latitud, pero con valores superiores en radiación solar y con un clima seco y semidesértico.

En Moa, el clima es más lluvioso y nuboso. En la figura 6 se muestra que Moa está situada en una zona donde la radiación solar para el mes de Abril debería estar entre 5,2 kWh/m<sup>2</sup> y 6 kWh/m<sup>2</sup>, sin embargo, según el estudio de CIES Santiago, el microclima de Moa, afecta este valor hasta 3,72 kWh/m<sup>2</sup>, en dicho mes.

**Tabla 2.** Valor medio mensual de la radiación incidente sobre un plano para diferentes ángulos de inclinación en kWh/m<sup>2</sup> en Imías, Guantánamo.

$\beta$	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov.	Dic.	Promedio anual	$\beta$
0°	4,73	4,92	6,20	7,23	6,66	6,22	6,42	6,48	5,84	5,67	4,28	4,45	5,763	0°
10°	5,29	5,29	6,44	7,22	6,47	5,98	6,20	6,40	5,96	6,05	4,71	5,03	5,924	10°
15°	5,53	5,43	6,50	7,16	6,33	5,82	6,04	6,31	5,97	6,18	4,89	5,27	5,957	15°
<b>18°</b>	<b>5,65</b>	<b>5,51</b>	<b>6,53</b>	<b>7,11</b>	<b>6,23</b>	<b>5,72</b>	<b>5,97</b>	<b>6,27</b>	<b>6,00</b>	<b>6,25</b>	<b>4,98</b>	<b>5,41</b>	<b>5,972</b>	<b>18°</b>
20°	5,73	5,55	6,53	7,06	6,18	5,67	5,89	6,19	5,95	6,28	5,04	5,49	5,968	20°
25°	5,90	5,63	6,52	6,92	5,96	5,43	5,66	6,03	5,90	6,35	5,16	5,67	5,931	25°
30°	6,04	5,68	6,48	6,74	5,73	5,20	5,43	5,84	5,82	6,38	5,25	5,82	5,871	30°
35°	6,14	5,69	6,40	6,53	5,48	4,95	5,18	5,63	5,70	6,37	5,31	5,94	5,780	35°
40°	6,20	5,68	6,28	6,29	5,21	4,69	4,91	5,39	5,56	6,32	5,34	6,02	5,659	40°
45°	6,23	5,63	6,13	6,01	4,92	4,40	4,62	5,13	5,38	6,24	5,34	6,06	5,509	45°
										<i>Valor máximo promedio anual (kWh/m<sup>2</sup>)</i>			<b>5,972</b>	<b>18°</b>



**Figura 6.** Radiación solar en Cuba. Mapa elaborado por el Instituto de Meteorología de Cuba. (Ver anexo 5)

### Módulos fotovoltaicos

Según CIES, los módulos fotovoltaicos deben cumplir las siguientes especificaciones:

1. Los generadores fotovoltaicos deben estar constituidos por módulos fotovoltaicos del mismo tipo y modelo.
2. Los módulos deben contar con las certificaciones de potencia flash del fabricante.
3. Los módulos deben ser resistentes a la degradación inducida por voltaje (PID Potential Induced Degradation).
4. La potencia (en condiciones estándar de medida (CEM)) de los generadores fotovoltaicos medida en la entrada de cada inversor debe ser igual o superior al 93% de la potencia nominal correspondiente.
5. Con los inversores inyectando normalmente en la red y en ausencia de sombras los módulos no deben mostrar ningún efecto de punto caliente.
6. Todas las cadenas constituidas por módulos conectados en serie deben estar protegidas con fusibles en ambos polos.

- 
7. Debe hacerse una asociación en paralelo de las cadenas en la caja de conexión que se encuentra a la sombra de los generadores, que incluye los siguientes elementos:
    - Conjunto Brequer - disyuntor de la cadena.
    - Dispositivos de protección contra sobre voltaje (SPD) entre ambos polos de la conexión en paralelo o en el sistema de aterramiento.
    - Interruptores / seccionadores de la carga.
    - Dependiendo de la configuración, estos elementos pueden ser integrados en el inversor.
  8. Fusibles, dispositivos de protección contra sobre voltaje y seccionador de carga deben estar en concordancia con la norma IEC 60634-7-712.
  9. Las cajas de conexiones deben ser por lo menos IP-54 y deben ser resistente a la radiación ultravioleta.
  10. Dentro de las cajas de conexión, los elementos deben estar dispuestos de tal manera que los polos positivo y negativo estén separados lo más posible, esto es para reducir el riesgo de contacto directo.
  11. Los conductores de corriente continua (CC) desde las cajas de conexiones hasta la entrada de los inversores deben estar colocados en conductos subterráneos con cajas de conexiones siguiendo el cableado los estándares cubanos para instalaciones eléctricas.
  12. La caída de voltaje en los conductores de corriente continua desde los módulos a la entrada de los inversores deben ser inferior al 2% para la corriente de máxima potencia del generador en condiciones CEM.
- Considerando todo lo anterior, se muestra en la tabla 3 las características eléctricas de la celda fotovoltaica modelo: JAM6-60-245-SI.

---

**Tabla 3.** Celda fotovoltaica. Modelo del panel: JAM6-60-245-SI.

Tecnología: Monocristalina	
Características eléctricas	JAM6-60-245-SI
Potencia máxima (Pmax)	245 W
Tensión a máxima potencia (Vmp)	30.76 V
Corriente a máxima potencia (Imp)	7,96 A
Tensión en circuito abierto (Voc)	37,74 V
Corriente en cortocircuito (Isc)	8.54 A
Dimensiones (l x a)	1,650 x 0,991 m
Tolerancia en potencia de salida	±3%
Peso	19,5 kg
Eficiencia del panel	14,98%
Temperatura en operación	-40°C a +85°C

### **Cálculo del número de paneles**

Para el cálculo del número de paneles del generador conectado a red, se consideran cuatro aspectos fundamentales, las dimensiones limitadas del terreno, las dimensiones de los paneles solares seleccionados, la inclinación de los paneles y la carga a alimentar, partiendo de que la carga máxima instantánea consumida según el coeficiente de utilización de los equipos en el edificio administrativo es de 56,924 kWh.

### **Sistema de campo**

El sistema de campo debe estar constituido por sistemas fotovoltaicos completamente idénticos.

---

## **Orientación e inclinación de los paneles fotovoltaicos**

El sistema fotovoltaico de conexión a red estará situado en el edificio administrativo de la Empresa Mecánica del Níquel Comandante Gustavo Machin Hoed de Beche, Moa, Provincia Holguín, las coordenadas de emplazamiento son:  $20^{\circ}38'941''$  N,  $74^{\circ}57'42''$  O a 90 m sobre el nivel del mar.

Según la ubicación antes mencionada del lugar de la instalación de los módulos fotovoltaicos y los estudios realizados por CIES, la ubicación ideal de los paneles debe ser hacia el Sur franco, pero esto provocaría un mal aprovechamiento de toda el área disponible en el techo del edificio debido a la ubicación de los paneles. Por lo que buscando una solución, se comprobó mediante el programa profesional PVSYST, versión 5.71 utilizado por CIES, que orientando los paneles a  $-26^{\circ}$  del Sur franco, que es como está orientado el edificio, se generarían prácticamente la misma cantidad energía en un año, que si se orientaran hacia el Sur franco. Según la investigación realizada en este trabajo, en el capítulo uno se determinó que la inclinación de los paneles será la latitud del lugar (edificio administrativo  $20^{\circ}$  de latitud) más  $15^{\circ}$  buscando el máximo aprovechamiento de la energía solar en todo el año y un mayor rendimiento en las horas solar pico.

### **Tipo de célula constituyente:**

Los tipos de celdas seleccionados deberán de ser los mismos, en este caso: monocristalina

### **Radiación solar disponible**

El valor de la radiación solar disponible, se estableció en este capítulo en la tabla 1.

### **Disponibilidad en el mercado**

En la búsqueda realizada, vía internet, varios fabricantes de China, Alemania

---

y Japón, producen celdas similares en eficiencia y principio de fabricación a las seleccionadas en este trabajo, además cada año, mejora exponencialmente la eficiencia de las mismas.

### **Potencia nominal**

Según el estudio de CIES, la potencia nominal de la instalación debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. El valor de potencia en CEM (Condiciones Estándares de Medida) característica o nominal de un módulo es un valor dado por el fabricante.
2. El valor de la potencia nominal de un generador fotovoltaico es el producto del número de módulos que se instalarán por la potencia nominal de los módulos.
3. La suma de la potencia nominal de todos los módulos fotovoltaicos del sistema deben estar, tan cerca como sea posible a la potencia pico de 62 kWp, sin llegar a superar este valor.
4. Las potencias nominales de las cadenas deben ser iguales entre sí, con un margen de  $\pm 10\%$ .

### **Carga existente**

La carga que existe en el edificio administrativo es bastante estable y constante, desde el inicio de la jornada laboral (8:00 AM) hasta su culminación (5:18 PM), de lunes a sábado, solo se afecta por un coeficiente de utilización y de demanda que se calcula en este trabajo. No existen motores de grandes dimensiones. La carga existente se conforma, por equipos informáticos, de alumbrado y de climatización. (Ver anexo 1).

### **Voltaje de trabajo**

El voltaje de trabajo de la carga que se alimentará es de 220 y 110 V corriente alterna ( $\pm 5\%$ ). Por tanto este es el valor que se debe de garantizar a la salida de los inversores.

---

El voltaje de salida de las celdas fotovoltaicas dependerá de la radiación solar incidente, por tanto se establecerá una relación serie paralelo que garantice un voltaje de corriente directa admisible a la entrada de los inversores seleccionados.

## **Inversores**

Según CIES, los inversores deben cumplir con las siguientes especificaciones:

1. El número mínimo de cadenas del sistema no deben ser inferiores a 4.
2. La relación entre la potencia nominal de cada inversor y la potencia nominal de la cadena conectada a él, no debe ser inferior al 0,85.
3. La eficiencia energética de los inversores debe ser igual o mayor que 0,95.

Esta eficiencia está dada por la fórmula:

$$1. \quad \eta_{EN} = 0.2 * \eta_{10} + 0.6 * \eta_{50} + 0.2 * \eta_{100} \quad 2. \quad (1)$$

Donde:

$\eta_{10}$ ,  $\eta_{50}$  y  $\eta_{100}$ : representan, respectivamente, las eficiencias en potencia para un 10%, 50% y 100% de la potencia nominal del inversor.

4. Los inversores deben ser capaces de funcionar normalmente a la potencia nominal con una temperatura ambiente de 50°C.
5. La distorsión armónica total de la corriente debe ser menor que tres por ciento, considerando una distorsión armónica total del voltaje de la red inferior a un 1%.
6. Para ayudar en la preservación de la calidad del servicio eléctrico:
  - a) Los inversores deben cumplir con las normas y requerimiento cubanos de calidad de la red.
  - b) Los inversores deben ser capaces de operar con un factor de potencia superior a 0,95.
  - c) Para que cumpla la norma cubana de frecuencia, la variación de frecuencia debe ser  $\pm 1\%$  con respecto a la frecuencia nominal de la red (60Hz).

- 
7. A pesar que el inversor seleccionado opera en un rango de frecuencia de la red de corriente alterna (AC) entre 60Hz  $\pm$  1%, la respuesta a las condiciones anormales de frecuencia debe cumplir los requisitos para la desconexión por sobre y baja frecuencia (desconexión para frecuencias inferiores a 58Hz, reducción de la potencia a una tasa de 40% por Hz para frecuencias entre 60,5Hz y 62Hz y desconexión para frecuencias superiores a 62Hz).
  8. Los inversores deben incluir protección contra un funcionamiento en isla, respetando la respuesta a los fundamentos del voltaje. En particular, el sistema fotovoltaico para dejar de suministrar la energía a la red dentro de dos segundos después de la pérdida de red (aislamiento).
  9. La reconexión del inversor debe esperar entre uno y tres minutos después del restablecimiento de las condiciones operacionales del voltaje y frecuencia de red.
  10. Los inversores deben incluir protección contra la inversión de polaridad en la entrada de corriente continua, cortocircuito en la salida de corriente alterna y sobrevoltaje en ambos circuitos de corriente directa y corriente alterna.
  11. Los inversores deben incluir detección y protección de fallo de aislamiento de acuerdo con los requisitos de las normas IEC 60364-7-712.
  12. Para facilitar los ensayos de aceptación, los inversores deben incluir algún medio (shunt, transformador de corriente, etc.) para medir la corriente continua en la entrada con una precisión mejor que 0,5%. Estos medios deben estar debidamente certificados y estar totalmente accesibles a las personas a cargo de los ensayos.
  13. Los consumos internos propios de los inversores se pueden alimentar de la misma línea en la que se conecta el inversor o en la línea de servicios auxiliares.
  14. En el caso de la utilización de inversores centralizados, los mismos deben estar ubicados dentro de una edificación, es decir en una sala eléctrica.

---

15. Los inversores tendrán un grado de protección mínima IP 2,0 para inversores en el interior de edificios y lugares inaccesibles, IP 3,0 para inversores en el interior de edificios y lugares accesibles y de IP 6,5 para inversores instalados a la intemperie.

Además:

15.1. Los inversores deben ser trifásicos.

15.2. Los inversores deben ser capaces de operar como un factor de potencia superior a 0,9. El factor de regulación de potencia debe ser automático, en función de la tensión en el punto de conexión del inversor y la línea de servicios auxiliares.

15.3. Los inversores cumplirán con las directivas de Seguridad Eléctrica y Compatibilidad Electromagnética (ambas serán certificadas por el fabricante) incorporando protecciones frente a:

- Cortocircuitos en alterna.
- Tensión de red fuera de rango.
- Frecuencia de red fuera de rango.
- Sobre tensiones mediante varistores o similares.
- Perturbaciones presentes en la red como micro cortes, pulsos, defectos de ciclos, ausencia y retorno a red, etc.

15.4. Cada inversor dispondrá de la señalización necesaria para su correcta operación e incorporará los controles automáticos imprescindibles que aseguren su adecuada supervisión y manejo.

15.5. Cada inversor incorporará al menos los controles manuales siguientes:

- Encendido y apagado general del inversor.
- Conexión y desconexión del inversor a la interfaz de corriente alterna.

### **Cálculos para seleccionar la potencia de los inversores**

La potencia total en inversores va a ser igual a la suma de la potencia activa de todos los inversores a utilizar y esta suma, a su vez, será igual a la carga que se desea suplir.

---

## **Cableado**

Según CIES:

1. Los positivos y negativos de cada grupo de módulos se conducirán separados y protegidos de acuerdo a la normativa vigente.
2. Los conductores serán de cobre y tendrán la sección adecuada para evitar caídas de tensión y calentamiento. Concretamente, para cualquier condición de trabajo los conductores deberán tener la sección suficiente para que la caída de tensión sea inferior al 1,5%.
3. El cable deberá tener la longitud necesaria para no generar esfuerzos en los diversos elementos, ni posibilidad de enganche por el tránsito normal de personas.
4. Todo el cableado de continua será de doble aislamiento y adecuado para su uso en la intemperie, al aire o enterrado.

## **Estructura de soporte**

Según CIES, las estructuras de soporte deben cumplir con las siguientes especificaciones:

1. Deben ser diseñadas para soportar rachas de vientos de 250 km/h y superiores de ser posible, además de ambientes de corrosión.
2. Deben estar hechas de aluminio o acero galvanizado y deberán cumplir con requisitos de duración de 25 años. Los procedimientos de instalación deben preservar la protección contra la corrosión, esto también se aplica a los pernos, tuercas, tornillos y elementos de sujeción en general.
3. Todos los módulos deben estar a una altura entre un metro del suelo, para evitar sombras producidas por la vegetación y cuatro metros para facilitar la tarea de limpieza, así como separación de al menos un centímetro entre los módulos adyacentes. Como en este caso todos los módulos estarán en una azotea, donde no hay vegetación, tendrán una altura de 30 cm del suelo para evitar la influencia de los vientos.

- 
4. La estructura se realizará según la orientación y ángulo de inclinación especificado para el generador fotovoltaico buscando la facilidad de montaje, desmontaje y posibles sustituciones futuras de elementos. La estructura estará protegida superficialmente contra agentes ambientales. Cualquier taladrado se realizará antes de proceder al galvanizado o protección de la estructura. Si es galvanizada el espesor mínimo será de 80 micras.
  5. La tornillería será realizada en acero inoxidable, cumpliendo la norma MV-106. Si la estructura está galvanizada se admitirán tornillos galvanizados, exceptuando la sujeción de los módulos a la misma, que será mediante tornillos de acero inoxidable. Se debe evitar en todo caso arrojar sombra sobre los módulos por cualquier elemento de la instalación.
  6. Si los módulos están integrados en cubierta, el diseño de la estructura y la estanquidad entre módulos se ajustará a las exigencias de las normas básicas de la edificación y a las técnicas usuales en la construcción de cubiertas.

### **Aterramiento y protección contra descargas atmosféricas**

Según CIES, la conexión a tierra y protección contra descargas atmosféricas debe cumplir con las siguientes especificaciones:

1. El aterramiento de media tensión y baja tensión debe ser independiente entre sí, para asegurar que una falla a tierra de la línea de media tensión no repercuta negativamente en los equipos conectados en baja tensión.
2. Todas las estructuras metálicas y equipos conectados en baja tensión deben estar conectados al sistema de aterramiento. La conexión debe ser equipotencial

### **Seguridad y protección**

Según CIES, la instalación debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- 
1. Todo el perímetro de la instalación estará protegido por una cerca metálica de altura no inferior a 2,2 m.
    - a. En el caso del edificio administrativo esto no será necesario pues los paneles serán instalados en la azotea.
  2. Todo el perímetro de la instalación deberá contar con un sistema de cámaras de vigilancia y detección automática de intrusos.
  3. En caso de detección de intrusos el sistema de vigilancia debe activar automáticamente una alarma y dar aviso.
  4. La alimentación eléctrica del sistema de vigilancia debe hacerse a través de un sistema de alimentación ininterrumpida con autonomía mínima de dos horas.
  5. Las edificaciones deberán poseer equipos de extinción de incendios de acuerdo con las normas cubanas.

### **Conexión**

La instalación se conectará directamente a red, una opción valorada con el cliente para disminuir costos iniciales y de mantenimiento pues el cliente necesita esta opción de generación de electricidad para disminuir costos de electricidad. Además tiene opción de generación de emergencia por grupo electrógeno cuando no exista posibilidad de generación fotovoltaica.

### **Cálculo del regulador de carga**

No se establecerá el cálculo de un regulador de carga por cuanto el sistema de generación está diseñado para que en su momento de entrega de carga máxima, esta esté dentro de los valores admisibles por los inversores.

### **Ecuaciones utilizadas y cálculo**

Según se comprobó en el proceso de investigación, para los cálculos del dimensionamiento de un generador solar fotovoltaico, existen diferentes metodologías y ecuaciones de cálculo dependiendo el tipo de sistema (si es un SFA o SFCR). A continuación se hace mención de las formas de cálculo

---

utilizadas, aclarando, que la metodología en este trabajo se desarrolló de acuerdo a las condiciones y características que impone el lugar.

Para el cálculo del número de paneles se presentan los siguientes pasos de acuerdo a lo antes mencionado:

1. Determinar la potencia real máxima que demandará del edificio administrativo ( $P_{rm}$ )

- Potencia pico del edificio administrativo ( $P_p$ ) = 60,719 kWh (Ver anexo 1)
- Coeficiente de utilización del edificio administrativo ( $C_u$ ) = 93,75% (0,9375)

$$P_{rm} = P_p * C_u \quad (1)$$

- $P_{rm} = 60,719 \text{ kWh} * 0,9375 = 56,924 \text{ kWh}$

2. Calcular el número de inversores ( $N_{inv}$ )

$$N_{inv} = P_{rm} / P_{inv} \quad (2)$$

- $N_{inv} = 56,924 \text{ kWh} / 15 \text{ kW} = 3,794 = 4$  (3,794 se redondea al número que le sigue)

Donde:

- Potencia del inversor seleccionado ( $P_{inv}$ ) = 15 kW (Ver anexo 3)

3. Determinar la potencia, voltaje y corriente en corriente continua (CC) por inversor (Ver anexo 3).

4. Establecer de acuerdo al máximo de potencia en CC del inversor, el número de paneles fotovoltaicos admisibles por inversor de acuerdo a la potencia nominal de los paneles a utilizar

$$N_{p_{inv}} = P_{inv_{CC}} / P_{m_p} \quad (3)$$

- $N_{p_{inv}} = 15,5 \text{ kW} / 245 = 63,26 = 63$  (se redondea al mismo número)

Donde:

- Potencia máxima del inversor en CC ( $P_{inv_{CC}}$ ) = 15,5 kW
- Número de paneles por inversor ( $N_{p_{inv}}$ ) = 63
- Potencia máxima por panel fotovoltaico ( $P_{m_p}$ ) = 245 W (Ver anexo 2)

---

5. Determinar el número total de paneles fotovoltaicos ( $N_{tp}$ )

$$N_{tp} = N_{p_{inv}} * N_{inv} \quad (4)$$

- $N_{tp} = 63 * 4 = 252$

6. Calcular la cantidad de paneles conectados en serie y en paralelo por inversor

Número de paneles conectados en serie ( $N_{ps}$ )

$$N_{ps} = V_{invCC} / V_{m_p} \quad (5)$$

- $N_{ps} = 700 \text{ V} / 30,76 \text{ V} = 22,75 = 22$  (este valor obtenido sobrepasa la potencia admisible por el inversor en CC al colocar 3 grupos de esta cantidad en paralelo, por lo que se calcula nuevamente con un número menor hasta que cumpla con los valores admisibles por el inversor. En este caso 21 paneles)

Donde:

Voltaje nominal del inversor en CC ( $V_{invCC}$ ) = 700 V

Voltaje a máxima potencia por panel ( $V_{m_p}$ ) = 30,76 V

Cadenas de paneles conectados en paralelo ( $N_{pp}$ )

$$N_{pp} = N_{p_{inv}} / N_{ps} \quad (6)$$

- $N_{pp} = 63 / 21 = 3$

No puede ser mayor la corriente generada por ( $N_{pp}$ ) que la corriente nominal del inversor en CC.

7. Cálculo del área que ocuparán los paneles en posición inclinada

Área que ocuparán los paneles (A)

$$A = N_{tp} * (A_p + S) * L_p \quad (7)$$

- $A = 252 * (0,991 \text{ m} + 1,136 \text{ m}) * 1,65 \text{ m} = 885 \text{ m}^2$

Donde:

Espacio necesario en  $\text{m}^2$  (A)

Número total de paneles ( $N_{tp}$ )

Ancho del panel ( $A_p$ ) = 0,991m

---

Sombra (S) = 1,136 m

Largo del panel (Lp) = 1,65 m

La sombra (S) será:

$$S = 2 \cdot AI \quad (8)$$

- $S = 2 \cdot 0,568 = 1,136 \text{ m}$

Donde:

Altura de lo que produce la sombra (AI)

#### 8. Cálculo del calibre del conductor

Se procedió utilizando la ecuación de potencia siguiendo los pasos siguientes:

Para el caso de los conductores en CC (desde los paneles solares al inversor) se multiplicó los tres grupos de paneles conectados en serie por la corriente de cada grupo

- $7,96 \text{ A} \cdot 3 = 23,88 \text{ A}$  (se redondea al número que le sigue)

Para el caso de los conductores en AC (salida del inversor)

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \quad (9)$$

- $I = 60000 / 358,53 = 167,35 \text{ A} = 168 \text{ A}$  (se redondea al número que le sigue)

9. Seleccionar el calibre del conductor mediante una tabla con los valores de corriente obtenidos.

### Conclusiones del capítulo

En este capítulo se establecieron los requisitos técnicos para la instalación de un sistema fotovoltaico de conexión a red en el edificio administrativo de la EMNI, así como los requisitos de calidad que se aplican para garantizar el cumplimiento de las especificaciones.

---

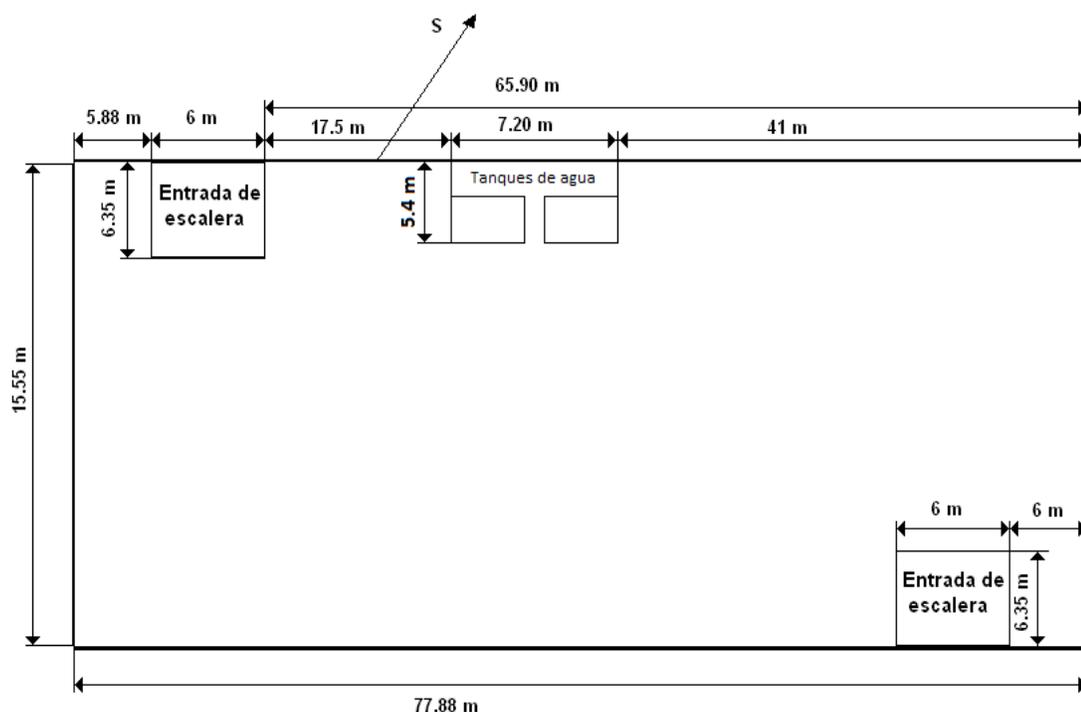
## CAPÍTULO 3. RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

### Introducción al capítulo

En este capítulo se presentará la propuesta de un generador solar fotovoltaico aplicado al edificio administrativo de la EMNI, partiendo de los aspectos expuestos en el capítulo anterior, así como la valoración económica del mismo y las principales ventajas de implementar esta propuesta.

#### 3.1. Propuesta del generador solar fotovoltaico

Según los datos obtenidos, el edificio administrativo de la EMNI presenta un área total en su azotea de 1211 m<sup>2</sup> (figura7) de los cuales, 1019 m<sup>2</sup> solo están disponibles para la instalación de los módulos fotovoltaicos.



**Figura 7.** Vista superior y dimensiones del edificio administrativo EMNI. Fuente: CIES

El edificio administrativo presenta un consumo máximo de 60,719 kWh el cual se afecta por un coeficiente de utilización de un 0,9375, estableciendo esto un consumo promedio de 56,924 kWh. Por lo que se propone un sistema

---

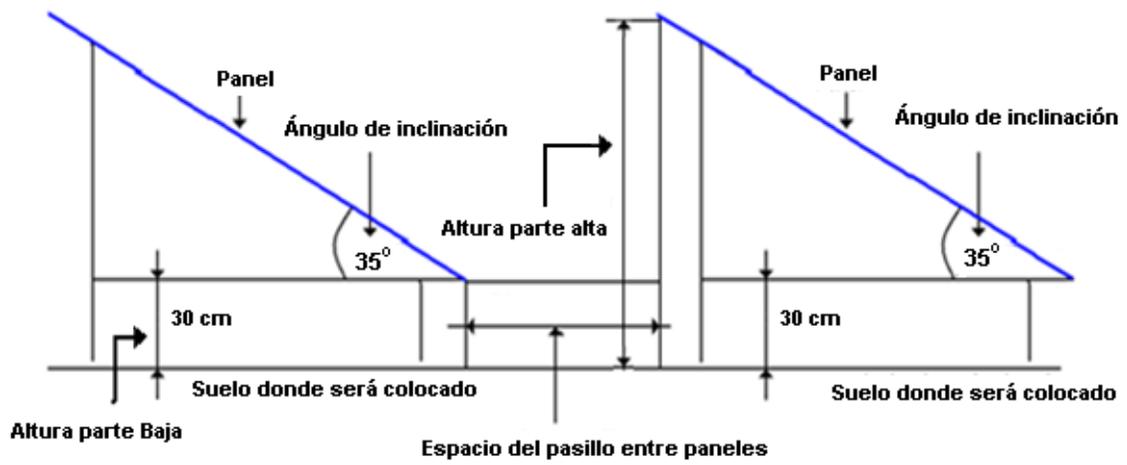
fotovoltaico conectado a red que estará compuesto por celdas fotovoltaicas modelo JAM 6 60/245 de silicio monocristalino, los módulos tendrán una potencia nominal de 245 W cada uno y el número total de estos será de 252 para una potencia de 61,72 kWh de generación. Para la conversión de la corriente se contará con 4 inversores de corriente continua a corriente alterna, modelo TLX Danfoss, trifásicos, de 15 kW cada uno con una tensión nominal de entrada en corriente continua de 700 V (Valor para el cual se logra el mayor rendimiento), y de salida en corriente alterna de 230 V para una potencia máxima de 60 kWh.

Los módulos solares se ubicarán en el techo del edificio administrativo, paralelos al borde del mismo, mirando al Sur, con una inclinación de 35° con respecto al suelo, sobre una estructura de aluminio a una altura de 30 cm como lo muestra la figura 8. Se conectará por inversor 63 módulos fotovoltaicos en una conexión que será de 3 grupos de módulos conectados en paralelo, donde cada grupo estará formado por 21 módulos conectados en serie buscando obtener entre el paralelo serie una corriente y tensión lo más cercana a la corriente y tensión nominal del inversor en la parte de CC, para maximizar la eficiencia del mismo.

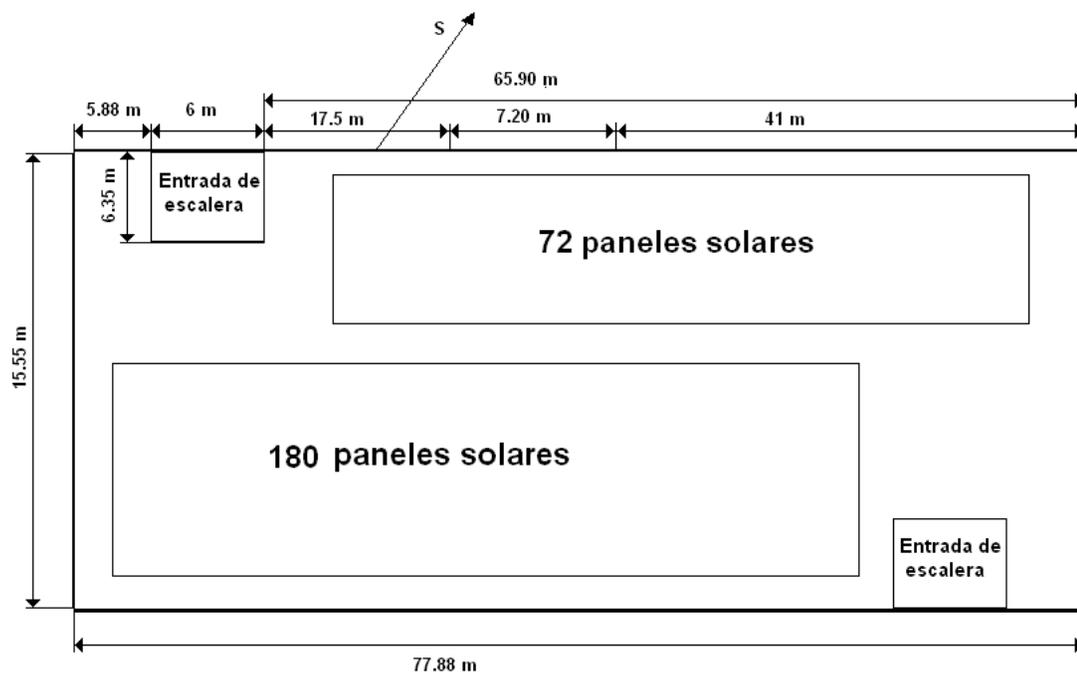
El área ocupada por los módulos fotovoltaicos será de 885 m<sup>2</sup> (figura 9), con un pasillo entre las filas de los paneles de 1,136 m (figura 8).

La conexión a la red será como se muestra en el anexo 6.

Los conductores utilizados serán de cobre, para la parte de CC (desde los módulos fotovoltaicos al inversor) se usarán 311 m de conductor número 15, según la norma AWG, para una corriente máxima de 24 A y un área de conductor de 1,65 mm<sup>2</sup>. Para la parte de CA (desde el inversor hasta el punto de distribución) se usarán 100 m de conductor de 4 vías, donde cada vía será un conductor número 2, según la norma AWG, para una corriente de 168 A y un área de conductor de 33,60 mm<sup>2</sup>.



**Figura 8.** Vista lateral de los módulos. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9.** Ubicación de los módulos solares. Fuente: Elaboración propia.

---

### 3.2. Valoración económica

El valor energético representa el total de energía que consumirá la carga dentro de un período determinado. La energía consumida que se establece para el horario de trabajo de 9 horas diarias de lunes a viernes, a un promedio de 56,924 kWh. Por lo que se consume en el proceso productivo diario 512,316 kWh/día (Ver anexo 1).

El régimen de uso de la energía generada será inmediatamente, no se usarán baterías. El sistema será conectado en paralelo con la red, o sea, directamente a la carga de la red. Al no existir baterías ni componentes electrónicos aumenta la confiabilidad pero resulta difícil mantener un rendimiento eficiente a lo largo del día.

La conversión de corriente continua a corriente alterna se realiza con una eficiencia que oscila en el 98% con el inversor propuesto, esto significa que las pérdidas serán 2% de la potencia suministrada a la entrada. Este valor satisface la capacidad de los inversores seleccionados (60 kW, 4 unidades de 15 kW cada una). Por tanto la capacidad de generación de los paneles solares debe cubrir los 56,924 kWh de la carga y el 2% de pérdidas de los inversores, equivalentes a 1,889 kWh, lo que totalizan 58,813 kWh.

Cantidad de paneles: 252

Potencia de cada panel: 245 W

Modelo JAM6-60-245-SI, con eficiencia 14,98%

Energía generada pico en paneles =  $252 \cdot 245 \text{ W}$

Energía generada pico en paneles= 61,74 kWh

Para el cálculo de la energía generada, se utiliza el valor de horas sol equivalentes por día de 3,538 kWh/día en el municipio de Moa.

Energía generada/año en paneles (Eg/ap)

---

$Eg/ap = \text{Horas sol equivalentes} \cdot \text{Generación pico} \cdot \text{Número de días}$

$Eg/ap = 3,538 \cdot 61,74 \cdot 365$

$Eg/ap = 79729,1838 \text{ kWh/año}$

Teniendo en cuenta los cálculos antes realizados y que el precio de los sistemas fotovoltaicos de conexión a red en el mercado internacional, varían según el avance del desarrollo tecnológico, se toman los precios del año 2013, donde aproximadamente el Watt pico (Wp) instalado, se comercializa a 3 dólares, según CIES. Por consiguiente, una instalación de 61740 Wp tendría un costo de \$185 220,00.

Por otra parte, en el presente año se han observado fabricantes de paneles que han disminuido los precios a las celdas fotovoltaicas (0,34 \$/W).

Debido a que la solicitud de montaje de este generador se hará para 2016, donde se espera una disminución de los precios, la valoración económica se basa en un costo de 2,34 \$/W. Por lo cual, una instalación de 61740 Wp, tendría un costo de \$144 471,60.

Energía generada/año en paneles con 252 paneles de 245 Wp = 79729,1838 kWh/año

Afectando este número por las pérdidas de inversores (2%), la potencia de generación útil a la salida de los inversores = 78134,6 kWh/año

Precio de la electricidad en EMNI en 2014 = 0,2 \$/kWh.

Importe de la generación fotovoltaica en un año = Precio · Energía generada al año.

Importe de la generación fotovoltaica en un año = 15626,92 \$/año.

Por otra parte, se reducen las pérdidas de transformación existentes actualmente que involucran a dos transformadores (1 de 10 000 kVA y 1 de

---

1000 kVA), los cuales tendrán menores pérdidas de transformación equivalentes a 2264 kWh/año (452 \$/año).

Amortización:

- En la variante de importe de la instalación 3,00 \$/Wp:

Amortización = Costo de instalación de 252 paneles de 245 Wp / (importe de energía generada al año + ahorro por pérdidas de transformación - pérdidas en inversores).

$$\text{Amortización} = \$185220,00 / (\$15626,92 + \$452,80 - \$1594,23)$$

Amortización = 12,78 años  $\approx$  12 años y 8 meses.

- En la variante de importe de la instalación 2,34 \$/Wp:

Amortización = Costo de instalación de 252 paneles de 245 Wp / (importe de energía generada al año + ahorro por pérdidas de transformación - pérdidas en inversores).

$$\text{Amortización} = \$144471,60 / (\$15626,92 + \$452,80 - \$1594,23)$$

Amortización = 9,97 años  $\approx$  10 años

Es importante destacar que para el caso de la instalación del generador en el edificio administrativo de la EMNI solo incluirán gastos significativos los módulos fotovoltaicos y los inversores, pues los demás elementos que componen la propuesta como es el caso de los conductores, las estructuras de soporte etc., la empresa está en condiciones de suministrarlos, por lo que el valor de la inversión disminuiría.

Considerando lo antes mencionado, el tiempo de recuperación aproximado de la inversión propuesta es de 10 años, sin embargo los costos estimados de las estructuras de soportes (que se fabricarían en la entidad) y los cables que esta ya posee, disminuirían alrededor de un 8% el costo total, por lo que se estima

---

que tardaría unos 9 años amortizando, y unos 15 años generando ganancias, debido a que estas instalaciones tienen una vida útil de 25 años aproximadamente.

### **3.3. Impacto medioambiental**

El beneficio del sistema en este sentido, está dado por su contribución a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Al recibir su energía del sol, estos son independientes del suministro de combustible, almacenamiento y manejo y no producen contaminantes al medio ambiente. Si se compara con una central de igual característica que trabaje con combustibles fósiles, se estima una reducción de 55798 kg de CO<sub>2</sub> al año (0,7 kg de CO<sub>2</sub> por cada kWh generado).

Cabe destacar que para la instalación de los paneles se utilizó la azotea de un edificio, con lo que se evitaban cambios en la topografía, conservando el entorno original.

### **3.4. Impacto científico y tecnológico**

El impacto científico y tecnológico está dado en que este SFCR, constituye un paso más en el uso de “tecnología limpia”, un aspecto importante (teniendo en cuenta las características del municipio), aunque a una escala muy pequeña,

Por otra parte el trabajo está dirigido al análisis de la factibilidad del sistema que se pretende aplicar, donde se tratan aspectos técnicos, económicos y medioambientales.

Otro aspecto a destacar es el alto grado de confiabilidad que se les confiere, por la simplicidad en el diseño y por carecer de partes móviles, esto último contribuye a reducir costos de operación y mantenimiento.

### **Conclusiones del capítulo**

El resultado que muestra este capítulo demostró que un generador solar fotovoltaico conectado a red representa una opción aplicable al edificio administrativo de la EMNI, pues sus características en cuanto a, generación,

---

mantenimiento y durabilidad así lo demuestran. Es además una forma de energía limpia y amigable con el medio ambiente y se puede decir que por los años de amortización calculados (10 años aproximadamente) se tiene más de la mitad de los años de vida útil (15 años aproximadamente) de la instalación, solo de ganancias.

---

## CONCLUSIONES

- La propuesta de sistema fotovoltaico conectado a red para el aprovechamiento de la energía solar en la EMNI permite disminuir las facturaciones de electricidad de la entidad, demostrando su viabilidad técnica.
- Se realizó el análisis del consumo de energía de las oficinas de la Empresa Mecánica del Níquel, ubicadas en el edificio administrativo permitiendo adecuar la metodología de diseño empleada a las condiciones específicas de la empresa.
- Los resultados obtenidos en el análisis económico y medioambiental muestran, la sostenibilidad de la propuesta elaborada y la factibilidad de su aplicación.

---

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda después de obtenidos los resultados:

1. Presentar el trabajo desarrollado a la dirección de la Empresa Mecánica del Níquel, para su evaluación y aprobación.
2. A partir del análisis presentado, continuar realizando estudios sobre el tema en cuestión, que permitan insertar los nuevos adelantos tecnológicos para el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica, en otras áreas de la empresa y la localidad.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. Agilá Fuster Antoni. Instalación Fotovoltaica Conectada a Red. (2009)
2. Aguilera Jorge, Hontoria Leocadio. Dimensionado de Sistemas Fotovoltaicos Autónomos. (2010)
3. Alabart, J.A. Diaz, J.R. Garcia, R. Hernández, R. Sistemas Solares Fotovoltaicos. (2008)
4. Augustin, C. "Cálculo de una instalación solar térmica y fotovoltaica." Revista REIMEE, Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez. (2010)
5. Cabrera Ihosvany. Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red. (2005)
6. Carabe, J.; Schubert, M.; Mataras, D.; Andreu, J.; Roca, F.; & Pribat, D. The European Network on Amorphous-Silicon Device Technology. aSiNet:Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japan, 12-16 May 2003, paper 5P-D4-23, (2003)
7. "Componentes de una instalación solar fotovoltaica." Cursos sobre Energías Alternativa. (2010)
8. Durán, J. C. y E. M. Godfrin. Aprovechamiento de la Energía Solar en la Argentina y en el Mundo. Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. (2004)
9. Energía Fotovoltaica - Manual sobre tecnología, Proyecto e Instalación. Futrille Marielsi, Rojas Eliécer, Rumbo Gerardo, Yumaira Villegas. Sistemas de generación Fotovoltaica. (2005)
10. "Especificaciones Técnicas para el Sistema Fotovoltaico de Conexión a Red de la Empresa Mecánica del Níquel por CIES Santiago de Cuba". (2013)
11. E. Lorenzo et al. Electricidad Solar. Progensa. 1994.
12. Fernández Díez Pedro. Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura. (2003)
13. Heredia, Rubén. Camejo, José. Márquez, Soe. Manual Básico de Mantenimiento Técnico de Sistemas Solares Fotovoltaicos. (2003).
14. Luque y Hedegeus. Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley And Sons ( 2003)
15. L. Barra, S. Cataloni, F. Fontana, F. Lavorante. Solar Energy (1984)

- 
- 16.J.Richard, William. Tecnología y Aplicación de la Energía Solar. (2004)
  - 17.Nieto Rodríguez José. Energía Solar. (2004)
  - 18.M. Sidrach-de-Cardona, Ll. Mora López. A general multivariate qualitative model for sizing stand alone photovoltaic systems. Solar Energy Materials and Solar Cells 59 (1999)
  - 19.Ramos, R., J. e. Camejo. Manual Básico de Mantenimiento de Sistemas Solares Fotovoltaico. Departamento de Fotovoltaica del Centro de Investigaciones de Energía Solar. CUBASOLAR, Santiago de Cuba (2003)
  - 20.Wiles John. Sistemas de Energía Fotovoltaica y El código Eléctrico Nacional. (1996)

---

**ANEXOS**

## Anexo1: Lista de consumidores de electricidad y potencia instalada.

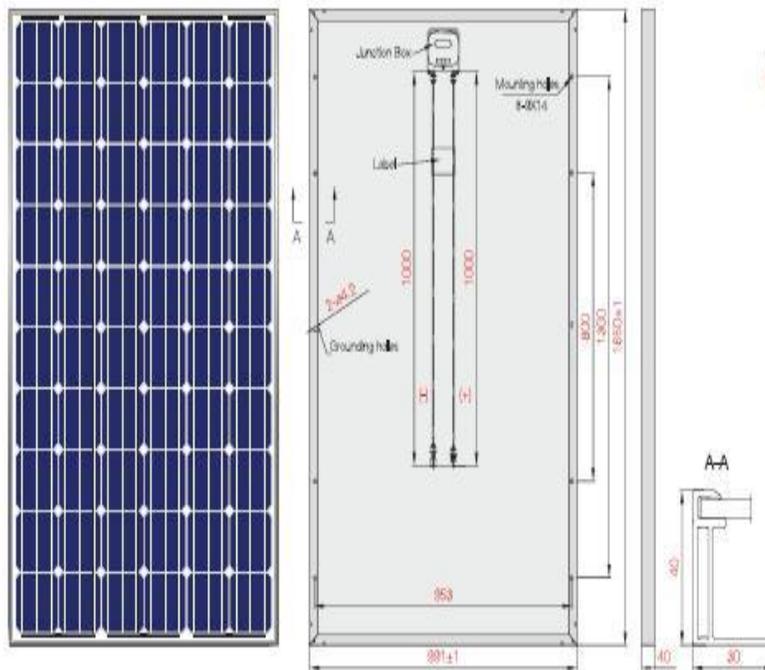
Área	Luminarias 4		Kl	Luminarias 32		Kw	Luminarias 1		Kw	Total	PC		Kl	Impresora		Tot
	Cant	Pot		Cant	Pot		Cant	Pot			Cant	Pot		Cant	Pot	
Informática		40	0	19	32	0,608		18	0	0,608	9	200	1,8	1	190	0,19
			0		32	0		18								
Pasillo 3 Piso			0	3	32	0,096		18	0	0,096			0			0
Pasillo 2 Piso			0		32	0	6	18	0,11	0,108			0			0
Nomina			0	4	32	0,128		18	0	0,128	2	200	0,4	1	190	0,19
Dra. Económica			0	8	32	0,256		18	0	0,256	2	200	0,4	1	190	0,19
			0		32	0		18								
Esp. Contabilidad			0	3	32	0,096		18	0	0,096	1	200	0,2	1	190	0,19
Medio Basicos			0	10	32	0,32		18	0	0,32	3	200	0,6	2	190	0,38
Finanzas Cobro			0	10	32	0,32		18	0	0,32	3	200	0,6	1	190	0,19
Finanzas pago	7	40	0,28		32	0		18	0	0,28	4	200	0,8	1	190	0,19
Planificación			0	4	32	0,128		18	0	0,128	4	200	0,8	1	190	0,19
Esp. Planif. Finanzas			0	2	32	0,064		18	0	0,064	1	200	0,2	1		0
Finanzas			0	7	32	0,224		18	0	0,224	2	200	0,4	1		0
			0		32	0		18								
			0		32	0		18								
Contabilidad			0	7	32	0,224		18	0	0,224	3	200	0,6	1	190	0,19
Salón de Reuniones EMNI			0	12	32	0,384		18			1	200	0,2			
Órgano de Cuadros			0	4	32	0,128		18			1	180	0,18	1	190	
Asesora			0	6	32	0,192		18			1	180	0,18	1	190	
Sec. Director	5	40	0,2		32	0		18	0	0,2	1	200	0,2	1	190	0,19
Dir. General	6	40	0,24		32	0		18	0	0,24	1	200	0,2	1	190	0,19
Mercadotecnia			0	5	32	0,16		18	0	0,16	3	200	0,6	1	190	0,19
Jurídica			0		32	0	10	18	0,18	0,18	3	200	0,6	1	190	0,19
Dir. Servicios Técnicos	7	40	0,28		32	0		18	0	0,28	2	200	0,4	2	190	0,38
Dir. Producción	11	40	0,44		32	0		18	0	0,44	2	200	0,4	1	190	0,19
Esp. Capacitación			0		32	0	8	18								
Aula de Capacitación			0		32	0	12	18	0,216	0,216			0			0
Dirección Recurso Humano			0		32	0	15	18	0,27	0,27	3	200	0,6	1	190	0,19
Seguridad y Protección			0	10	32	0,32		18	0	0,32	2	200	0,4	1	190	0,19
Radio base			0	2	32	0,064	8	18	0,144	0,208	1	200	0,2		191	0
Especialista de Inversiones			0		32	0	12	18	0,216	0,216	1	200	0,2	1	192	0,19
Departamento de Inversiones			0		32	0	24	18	0,432	0,432	2	200	0,4		193	0
Caja			0	4	32	0,128		18	0	0,128	1	200	0,2		194	0
Despacho			0	16	32	0,512		18	0	0,512	3	200	0,6	1	195	0,2
			0		32	0		18	0	0		200	0		196	0
OSIC			0	4	32	0,128		18	0	0,128		200	0		197	0
Baños H 3 Piso			0	2	32	0,064		18	0	0,064		200	0		198	0
Baños M 3 Piso			0		32	0	4	18	0,072	0,072		200	0		199	0
Baños M 2 Piso			0	1	32	0,032		18	0	0,032		200	0		200	0
Baños H 3 Piso			0	1	32	0,032		18	0	0,032		200	0		201	0
Biblioteca			0	8	32	0,256	14	18	0,252	0,508	1	200	0,2	1	202	0,2
Esp. Laboratorio			0	8	32	0,256	8	18	0,144	0,4	1	200	0,2	1	203	0,2
Auditoria			0	4	32	0,128		18	0	0,128	2	200	0,4	1	204	0,2
Téc. Servicio			0	2	32	0,064		18	0	0,064		200	0		205	0
Jefe de Servicio EMNI			0	2	32	0,064		18	0	0,064	1	200	0,2	1	206	0,21
Laboratorio Serconi			0	16	32	0,512		18	0	0,512	1	200	0,2	1	207	0,21
			0		32	0		18	0	0		200	0		208	0
Laboratorio Defectocopia			0	8	32	0,256	8	18	0,144	0,4	1	200	0,2		209	0
Recurso Humanos			0	6	32	0,192		18	0	0,192	2	200	0,4	1	210	0,21
Téc. Seguridad Social			0	4	32	0,128		18	0	0,128		200	0		211	0
Sub Total	36	240	1,44	202	1632	6,464	129	918	2,178	9,378	71	8560	14,2	31	7831	5,23

Área	Fax		Kv	Equipos de		Kw	Consolas		Kw	TV		Kv	Refrig.		Kwh	KwhTotal Instantánea
	Cant	Pot		Cant	Pot		Cant	Pot		Cant	Pot		Cant	Pot		
Informática			0	2	560	1,12	3	3600	10,8			0			0	13,91
							1	1200	1,2							1,2
Pasillo 3 Piso			0			0			0			0			0	0
Pasillo 2 Piso			0			0			0			0			0	0
Nomina			0	1	560	0,56			0			0			0	1,15
Dra. Económica	1	150	0,15	1	560	0,56			0			0			0	1,3
				1	1200	1,2										
Esp. Contabilidad			0	1	1200	1,2			0			0			0	1,59
Medio Basicos			0	2	560	1,12			0			0			0	2,1
Finanzas Cobro	1	150	0,15	3	560	1,68			0			0			0	2,62
Finanzas pago	1	150	0,15	3	560	1,68			0			0			0	2,82
Planificación				3	2	560	1,12					0			0	5,11
Esp. Planif. Finanzas			0	2	560	1,12			0			0			0	1,32
Finanzas			0	2	560	1,12			0			0			0	1,52
				1	1200	1,2										
Contabilidad			0	2	560	1,12			0			0			0	1,91
Salón de Reuniones EMNI							1	3600	3,6							
Órgano de Cuadros																
Asesora																
Sec. Director			0	1	560	0,56			0			0			0	0,95
Dir. General			0	2	560	1,12			0	1	115	0	1	120	0,12	1,63
Mercadotecnia			0	2	560	1,12			0			0			0	1,91
Jurídica	1	150	0,15	2	560	1,12			0			0			0	2,06
Dir. Servicios Técnicos			0	2	560	1,12			0			0			0	1,9
Dir. Producción			0	3	560	1,68			0			0			0	2,27
Esp. Capacitación				1	560	0,56										
Aula de Capacitación			0	2	560	1,12			0						0	1,12
Dirección Recurso Humano			0	2	560	1,12			0						0	1,91
Seguridad y Protección			0	2	560	1,12			0			0			0	1,71
Radio base				1	561	0,561										
Especialista de Inversiones			0	1	562	0,562			0			0			0	0,954
Departamento de Inversiones				3	563	1,689										
Caja			0	1	564	0,564			0			0			0	0,764
Despacho			0	2	565	1,13			0			0			0	1,925
				1	566	0,566										
OSIC			0	1	567	0,567			0						0	0,567
Baños H 3 Piso			0		568	0			0			0			0	0
Baños M 3 Piso			0		569	0			0						0	0
Baños M 2 Piso					570	0										
Baños H 3 Piso					571	0										
Biblioteca			0	1	572	0,572			0			0			0	0,974
Esp. Laboratorio			0	1	573	0,573			0			0			0	0,976
Auditoria				1	574	0,574										
Téc. Servicio				1	575	0,575										
Jefe de Servicio EMNI				1	576	0,576										
Laboratorio Serconi				2	577	1,154										
				2	578	1,156										
Laboratorio Defectocopia			0	1	579	0,579			0			0			0	0,779
Recurso Humanos			0	2	580	1,16			0			0			0	1,77
Téc. Seguridad Social				1	581	0,581										
Sub Total	4	600	3,6	65	26791	38,579	5	8400	15,6	1	115	0	1	120	0,12	60,719

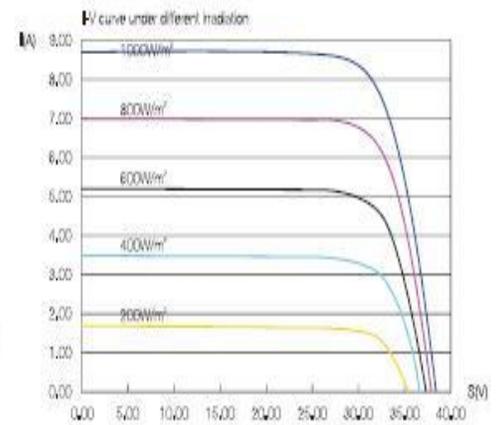
Anexo 2: Ficha técnica del panel fotovoltaico.

JA SOLAR

**JAM6** 60/235-265  
SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULE



I-V CURVE



## MECHANICAL PARAMETERS

Cell (mm)	Mono 156x156
Weight (kg)	19,5
Dimensions (LxWxH) (mm)	1650x991x40
Cable cross section size (mm <sup>2</sup> )	4
No. of cells and connections	60 (6x10)
No. of diodes	3 / 6
Packing configuration	25Pcs. / Carton

## WORKING CONDITIONS

Maximum System Voltage	DC 1000V (IEC) / 800V (UL)
Operating Temp.	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse	15 A
Max. Wind Load / Max. Snow Load	2400Pa 50 lb/ft <sup>2</sup> ; 5400Pa 112 lb/ft <sup>2</sup>
NOCT	45±2°C
Application Class	Class A

## ELECTRICAL PARAMETERS

TYPE	JAM6-60-235/S	JAM6-60-240/S	JAM6-60-245/S	JAM6-60-250/S	JAM6-60-255/S	JAM6-60-260/S	JAM6-60-265/S
Rated Maximum Power at STC (W)	235	240	245	250	255	260	265
Open Circuit Voltage (V <sub>oc</sub> /V)	37,19	37,49	37,74	37,92	38,10	38,28	38,46
Maximum Power Voltage (V <sub>mp</sub> /V)	30,36	30,56	30,76	30,96	31,16	31,36	31,56
Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> /A)	8,49	8,54	8,58	8,62	8,64	8,67	8,70
Maximum Power Current (I <sub>mp</sub> /A)	7,74	7,85	7,96	8,07	8,18	8,29	8,40
Module Efficiency (%)	14,37	14,68	14,98	15,29	15,59	15,90	16,21
Power Selection (W)	-0~+5 W						
Temperature Coefficient of I <sub>sc</sub> (α <sub>Isc</sub> )	+0,049%/°C						
Temperature Coefficient of Voc (β <sub>Voc</sub> )	-0,340%/°C						
Temperature Coefficient of P <sub>max</sub> (γ <sub>Pmp</sub> )	-0,430%/°C						
STC	Irradiance 1000W/m <sup>2</sup> ; Module Temperature 25°C, Air Mass 1.5						
Power Production Tolerance	± 3%						

## GUARANTEE

10-year limited product warranty

## Anexo 3: Ficha técnica del inversor.

MAKING MODERN LIVING POSSIBLE



# Serie de inversores TLX

## Serie de inversores trifásicos sin transformador de 6 a 15 kW

La serie TLX incluye TLX, TLX+, TLX Pro y TLX Pro+



**35 kg**

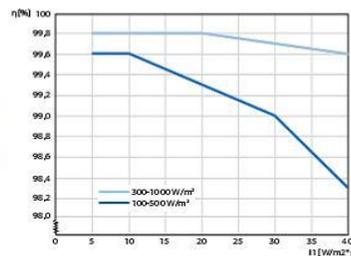
El peso de 6 a 15 kW

Garantiza la instalación de inversores de alto rendimiento de modo sencillo y sin incidencias

Serie de inversores TLX trifásicos de elevado rendimiento y sin transformador, con una eficiencia del 98 % genera máxima energía en todas las condiciones.

### Flexibilidad

Al integrar 1000 V<sub>cc</sub> a la entrada, un intervalo del MPP de 250-800 V y las múltiples entradas de CC en cada uno de los seguidores MPP individuales, permite más módulos en serie y cadenas más largas, mientras que proporciona una mayor flexibilidad en la configuración FV.



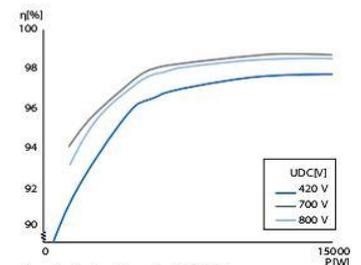
Eficiencia MPP

### Sencillez

La serie TLX Pro incluye tecnología de inversor maestro capaz de controlar hasta 100 inversores desde un único inversor. Del mismo modo, el servidor web integrado permite controlar, monitorizar y ajustar su propio sistema FV desde cualquier dispositivo conectado a internet.

### Dos mil millones de horas de experiencia

La serie TLX se ha instalado en todo el mundo, desde sistemas residenciales de 6 kW hasta grandes plantas de generación FV de hasta 100 MW.



Rendimiento de la serie TLX (15 kW)

- η98 %
- 1000 V<sub>cc</sub>
- 250-800 V<sub>MPP</sub>
- 3 × 230 V<sub>ca</sub>
- 6-15 kW

- Barrido FV
- Dimensiones compactas
- 12 unidades por palé
- 35 días de almacenamiento de datos integrado

- 35 kg
- Monitorización totalmente integrada
- 2-3 seguidores MPP independientes
- SMS por opción GSM

- Repetición de ajustes a 100 inversores
- Múltiples idiomas y ajustes de red
- Compatible con ConnectSmart™

Unidad	Parámetro	Serie TLX				
<b>CA</b>						
S	Potencia nominal aparente	6,0 kVA	8,0 kVA	10 kVA	12,5 kVA	15 kVA
$P_{ca}$	Potencia nominal activa <sup>b)</sup>	6,0 kW	8,0 kW	10 kW	12,5 kW	15 kW
	Intervalo de potencia reactiva	0-3,6 kVAr	0-4,8 kVAr	0-6,0 kVAr	0-7,5 kVAr	0-9,0 kVAr
$V_{ca}$	Tensión de red nominal (intervalo)	3P + N + PE - 230 V / 400 V ( $\pm 20\%$ )				
	Intensidad nominal de CA	3 x 8,7 A	3 x 11,6 A	3 x 14,5 A	3 x 18,1 A	3 x 21,7 A
$I_{ca,máx.}$	Intensidad máx. de CA	3 x 9,0 A	3 x 11,9 A	3 x 14,9 A	3 x 18,7 A	3 x 22,4 A
	Distorsión de intensidad de CA (THD %)	< 4 %		< 5 %		
$\cos\phi_{ca}$	Factor de potencia, sin regular	> 0,99 al 100 % de carga y 0,95 al 20 % de carga				
	Factor de potencia, regulado	0,8 inductivo - 0,8 capacitivo (TLX+ y TLX Pro+)				
	Pérdida de potencia «conectando»	10 W				
	Pérdida de potencia durante la noche (no conectado a la red)	< 5 W				
$f_r$	Frecuencia de red nominal (intervalo)	60 Hz $\pm 1\%$				
<b>CC</b>						
$P_{mppt,máx.}$	Potencia de entrada FV máxima por MPPT	8,0 kW				
$\Sigma P_{mppt,máx.}$	Potencia de entrada FV convertida máx. / nom., total.	6,2 kW	8,25 kW	10,3 kW	12,9 kW	15,5 kW
$V_{cc}$	Tensión nominal de CC	700 V				
$V_{mppt,mín.}$ - $V_{mppt,máx.}$	Potencia nominal de tensión MPP <sup>a)</sup>	260-800 V	345-800 V	430-800 V	358-800 V	430-800 V
	Seguidor MPP	2 (2 x MC4)			3 (3 x MC4)	
$V_{cc,máx.}$	Máx. tensión de CC	1000 V				
$V_{cc,act}$	Tensión activada	250 V				
$V_{cc,des}$	Tensión desactivada	250 V				
$I_{cc,máx.}$	Máx. intensidad de CC	2 x 12 A			3 x 12 A	
	Máx. corriente de cortocircuito de CC a STC	2 x 12 A			3 x 12 A	
	Potencia mínima de arranque	20 W				
<b>Eficiencia</b>						
	Eficiencia máx.	97,8 %	97,9 %	98 %		
	Eficiencia Europea a $V_{ca,r}$	96,5 %	97,0 %	97,0 %	97,3 %	97,4 %
	Eficiencia MPP, estática	99,9 %				
<b>Protección</b>						

Dimensiones (al., an. y pr.)	700 x 525 x 250 mm
Peso	35 kg
Nivel de ruido acústico	máx. 56 db(A)
Intervalo de temperatura de funcionamiento	De -25 a 60 °C (de 45 a 60 °C, reducción a altas cargas)
Temperatura de almacenamiento	De -25 a 60 °C
Humedad relativa	<95 %, sin condensación
<b>Servicios auxiliares</b>	
Potencia activa	Curvas de consigna fijas, controladas remotamente, mantenimiento de fallos
Potencia reactiva	Curvas de consigna constantes, controladas remotamente, mantenimiento de fallos (TLX+ y TLX Pro +)
<b>Seguridad</b>	
Homologaciones y certificados	<a href="http://www.danfoss.com/solar">www.danfoss.com/solar</a> → Download
Seguridad eléctrica	CEI 62109-1/CEI 62109-2 (Clase I, conectado a tierra, componente de comunicación de Clase II, PELV)
Seguridad funcional	Monitorización de la frecuencia y la tensión, detección de funcionamiento en isla, monitorización de intensidad residual

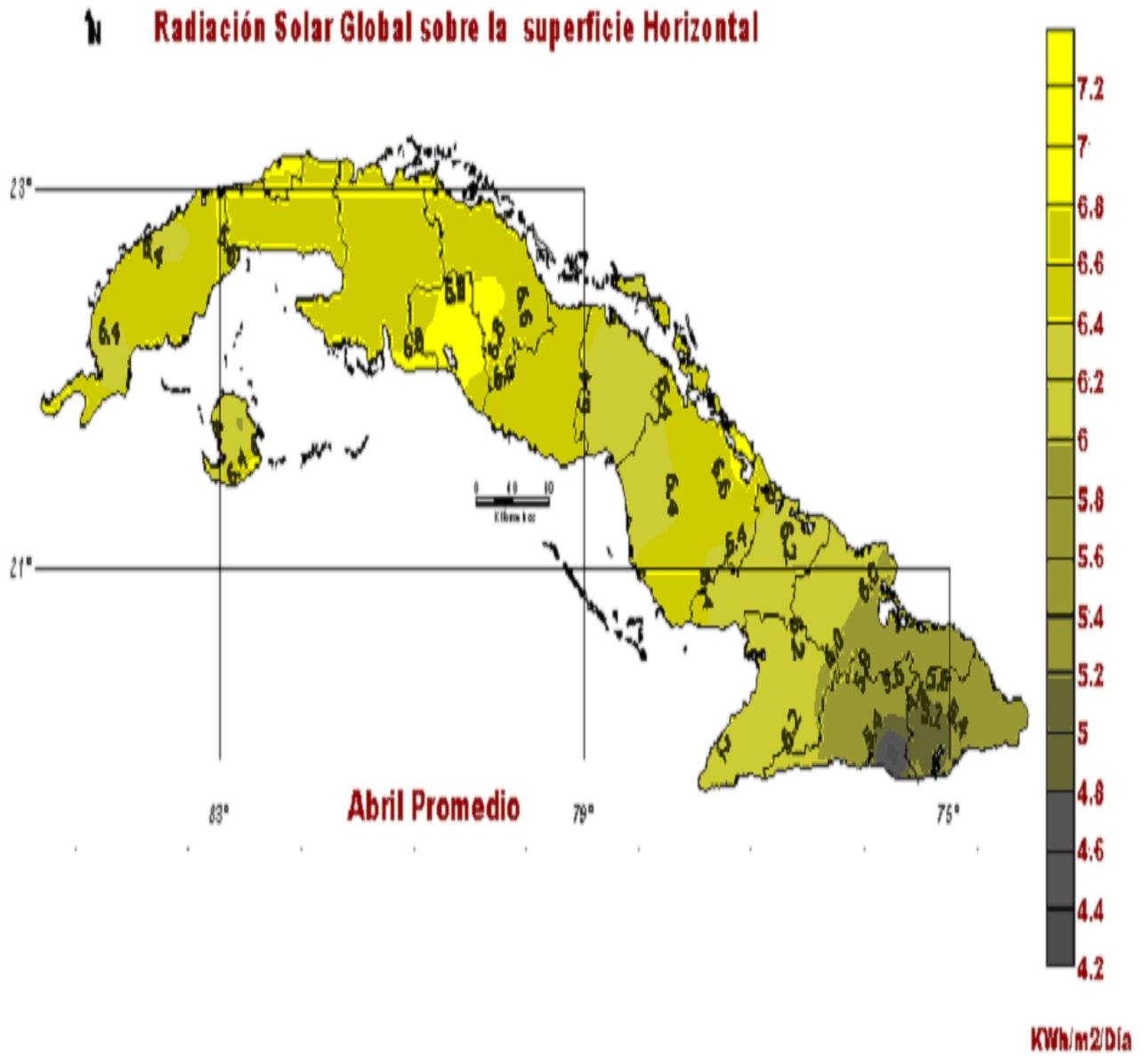
<sup>1)</sup> A tensión de red nominal ( $V_{ca,r}$ ),  $\cos(\phi) = 1$

<sup>2)</sup> A configuración de entrada simétrica. A configuración de entrada asimétrica.  $V_{mppmín}$  a partir de 250 V.

**Anexo 4:** Panel fotovoltaico.



**Anexo 5: Radiación solar en Cuba.**



**Anexo 6:** Esquema monolineal parcial de la EMNI, con la conexión del SFCR.

