



**REPÚBLICA DE CUBA**  
**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR**  
**UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**  
**Facultad de Ingeniería**

**Tesis para optar por el título académico Máster**  
**Eficiencia Energética**

A graphic illustration featuring a blue solar panel with a grid of cells, a yellow sun with rays, and a green leaf with a vein. The elements are arranged in a circular composition with green arrows indicating a clockwise cycle.

**Título: Potencialidades de sistema solar fotovoltaico**  
**en techos de la Refinería de Petróleo “Camilo**  
**Cienfuegos”**

**Autor: Ing. Lázaro León Alvarez**  
**Tutor: Dr.C. José P. Monteagudo Yanes.**

**Cienfuegos 2021**



**PENSAMIEN**



*"La perseverancia es la base de todas las  
acciones"*

*Lao Tzu*



**DECICATORI**



*A mis padres por su gran dedicación y su apoyo, les agradezco el haberme ayudado a ser la persona que soy*

.

*A mis amistades y compañeros de trabajo que de una forma u otra han contribuido a mi formación y han estado presentes en todo momento.*



**AGRADECIMIEN**



*A Dios, quien me ha ofrecido todo su amor y sabiduría.*

*A Claudia por acompañarme en este largo trayecto*

*A mi tutor Dr.C. José P. Monteagudo Yanes, sin el cual este proyecto no se hubiese realizado, gracias por sus consejos, su guía, su paciencia, entrega y por brindarme la oportunidad de ser su alumno*

*A todos los profesores y compañeros de clases que de una forma u otra han contribuido a mi formación durante estos 2 años.*

*A los directivos y trabajadores de la Empresa Refinería Camilo Cienfuegos por brindarme su apoyo en la realización de este proyecto.*

*A mi familia por su dedicación.*

*A todos los mencionados y a los que quizá olvidé GRACIAS*



# ÍNDICE



Índice	
<b>Resumen</b> .....	<b>7</b>
<b>Summary</b> .....	<b>8</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>9</b>
<b>Capítulo I: Energía Solar Fotovoltaica. Estado actual y tendencias en el mundo.</b>	
<b>Panorama energético cubano y perspectivas al 2030</b> .....	<b>12</b>
1.1 Fuentes de energías y contaminación ambiental .....	12
1.2 Energía Solar.....	14
1.2.1 Energía Solar Fotovoltaica .....	17
1.3 Sistema Solar Fotovoltaico .....	18
1.3.1 Clasificación de los SSFV .....	19
1.3.2 Componentes de un SSFV.....	21
1.3.3 Mantenimiento a los SSFV.....	23
1.3.4 Fallas y prácticas inadecuadas en la explotación de SSFV.....	25
1.4 Integración arquitectónica de la energía fotovoltaica en edificaciones.....	29
1.5 Costos relacionados con los SSFV.....	31
1.6 Principales ventajas y desventajas de las instalaciones fotovoltaicas.....	34
1.7 Métodos y metodologías de cálculo para la instalación de SSFV .....	35
1.8 Situación energética en Cuba.....	36
1.9 Experiencias en el uso de los sistemas fotovoltaicos operando de conjunto con el suministro de energía eléctrica del SEN .....	40
Conclusiones parciales del capítulo I.....	42
<b>Capítulo II: Caracterización constructiva y energética de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”</b> .....	<b>43</b>
2.1 Caracterización constructiva.....	49
2.2 Caracterización energética .....	50
2.2.1 Censo de carga por áreas.....	50
2.2.2 Control energético.....	53



Conclusiones parciales del capítulo II.....	55
<b>Capítulo III. Desarrollo del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” .....</b>	<b>56</b>
3.1 Localización y orientación de las naves incluidas en el estudio .....	56
3.2 Cálculos asociados al diseño del sistema fotovoltaico .....	59
3.2.1 Metodología integradora para el cálculo del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red .....	59
3.2.1 - Selección de los módulos .....	65
3.2.2 Orientación de los paneles.....	66
3.2.3 Cálculos de la instalación de un sistema solar fotovoltaico .....	66
3.3 Simulación de sistema de fotovoltaicos en el software PVsyst.....	69
3.3.1 Resumen de datos de la simulación .....	69
3.3.2 Comprobación de los resultados obtenidos.....	72
3.4 Cálculo de resistencia de la edificación. ....	73
Conclusiones parciales del capítulo III.....	75
<b>Capítulo IV: Evaluación económica y ambiental del uso del sistema fotovoltaico en las cubiertas de las Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” .....</b>	<b>76</b>
4.1 Evaluación económica y medio ambiental del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico propuesto .....	76
4.2 Costo evitado de energía eléctrica del SEN por suplir energía eléctrica desde el SSFV..	77
4.3 Análisis y aporte medio ambiental .....	78
Conclusiones parciales del capítulo IV .....	80
<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>81</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>83</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>91</b>



# RESUMEN



## Resumen

El sistema energético en Cuba se sustenta actualmente en el uso de combustibles fósiles representando un 95%, por lo que constituye una prioridad para el Estado diversificar la base energética encaminada hacia el 2030, donde se espera que las fuentes renovables de energía (FRE) representen el 24% en el aporte energético. El uso de los sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) está dentro de los aportes previstos en el plan de desarrollo de las FRE y su uso en las cubiertas de las edificaciones. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación está enfocado a elaborar estudio de prefactibilidad técnica, económica y ambiental de un sistema solar fotovoltaico de apoyo al suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”. Para el cumplimiento de dicha tarea se analizaron las características generales de las entidades, tales como: área disponible para el SSFV, ubicación geográfica, datos meteorológicos y consumos mensuales. Se demostró que es posible instalar 7 511 módulos, obteniéndose una generación de 10 065 kWh/día. Ello debe satisfacer el 3.87 % de la demanda eléctrica de la entidad. Con PVSYST 7.1 se simula el SSFV para conocer su comportamiento y comprobar la viabilidad del trabajo. El análisis de impacto ambiental determinando la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2 764.7 t/año y un ahorro de la quema de combustible de diésel de 867 t/año. El análisis económico del anteproyecto arrojó que la inversión se recupera en 7 años, con un valor presente neto de \$ 3 760 720 en un período de vida de 25 años.

*Palabras clave:* sistema solar fotovoltaico, refinerías, energía



# SUMMARY



### Summary

The energy system in Cuba is currently based on the use of fossil fuels, representing 95%, so it is a priority for the State to diversify the energy base towards 2030, where renewable energy sources (RES) are expected to represent 24% in the energy contribution. The use of photovoltaic solar systems (PSS) is within the contributions provided for in the RES development plan and its use on the roofs of buildings. For this reason, the objective of this research is focused on preparing a technical, economic and environmental pre-feasibility study of a photovoltaic solar system to support the supply of electricity to the “Camilo Cienfuegos” Oil Refinery. To fulfill this task, the general characteristics of the entities were analyzed, such as: area available for the SSFV, geographical location, meteorological data and monthly consumption. It was demonstrated that it is possible to install 7 511 modules, obtaining a generation of 10 065 kWh / day. This must satisfy 3.87% of the entity's electricity demand. With PVSYST 7.1 the SSFV is simulated to know its behavior and check the feasibility of the work. The environmental impact analysis determining the reduction of CO<sub>2</sub> emissions in 2 764.7 t / year and a saving of 867 t / year from burning diesel fuel. The economic analysis of the preliminary project showed that the investment is recovered in 7 years, with a net present value of \$ 3 760 720 in a life period of 25 years.

*Keywords:* photovoltaic solar system, refineries, energy



**INTRODUCCI**



## Introducción

El consumo de energía en el mundo se ha incrementado y se prevé que lo siga haciendo, debido al aumento de la población y a la dependencia de las personas a la tecnología. Por lo que se ha tomado conciencia sobre la necesidad de disminuir el consumo energético, mejorar su eficiencia y buscar nuevas alternativas; es por ello que se hace necesario incrementar el uso de las fuentes renovables de energía, las cuales no contaminan al medio ambiente (CEPAL, 2013).

La energía solar fotovoltaica (ESFV) está en el grupo de las Fuentes Renovables de Energía (FRE), sus tecnologías y aplicaciones cada día se encuentran con un mayor desarrollo en el área técnico-comercial siendo una de las productoras de electricidad con mayor capacidad en el mundo. En solo una hora el Sol suministra más energía a la Tierra que la que se consume en un año en todo el mundo (Potosinos, 2019).

La construcción de la Estrategia Energética 2030 ha partido de las políticas y planes nacionales del sector energía y ha tenido presentes las diferentes situaciones y prioridades existentes en los países. Un tema muy importante es el carácter integral e indivisible de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (CEPAL, 2020).

Cuba, no ajena a esta realidad, propone entre las Bases del Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030 establecer dentro de los principios rectores y ejes temáticos para la elaboración del Plan Nacional de Desarrollo al 2030 la necesidad de “Transformar y desarrollar, acelerada y eficientemente, la matriz energética mediante el incremento de la participación de las fuentes renovables y los otros recursos energéticos nacionales y el empleo de tecnologías de avanzada con el propósito de consolidar la eficiencia y sostenibilidad del sector y, en consecuencia, de la economía nacional” (PNUD, 2019).

La proyección del país es diversificar su matriz energética, que actualmente es un 96% de energía consumida que proviene de los combustibles fósiles y solo el 4% se obtiene de las fuentes renovables de energía. Ello quiere ser cambiado y la propuesta gubernamental es que en el año 2030 las fuentes renovables de energía representen el 24% en el aporte energético del país (Menéndez, 2020).

En Cuba se trabaja en diversos programas, los cuales se encuentran en diferentes niveles de preparación, inversión, gestión de financiamiento, negociación y ejecución, pero el más



avanzado es el programa solar fotovoltaico. Hasta la fecha se ha logrado un crecimiento de la potencia instalada y se cuenta con 156,6 MW pico en 67 parques solares fotovoltaicos, lo que representa el 22,4% de los 700 MW que se proyecta a tener en el 2030 con esta tecnología, que además de traduce en ahorro de combustible, fundamentalmente diésel (Yilén, 2019).

La demanda de energía en Cuba es creciente y, por lo tanto, resulta imprescindible la búsqueda de alternativas o la utilización de fuentes renovables (FRE), para la sostenibilidad económica del país (Labrador, 2018).

El uso de los sistemas solares fotovoltaicos está dentro de los aportes previstos en el plan de desarrollo de las fuentes renovables y su uso en las cubiertas de las edificaciones se ha extendido en los últimos años tanto internacionalmente como a nivel nacional. Ello está dado porque en las edificaciones con techos de alta resistencia, la cubierta de la edificación constituye un área no utilizable y económicamente igual área a nivel de tierra puede tener diferentes usos, desde jardines hasta base de edificaciones colaterales en caso de ampliación requerido por la institución (Morales, Yanes, Dala, y Borges, 2020).

La Empresa Refinería de Cienfuegos SA, es uno de los pilares principales de la provincia de Cienfuegos y uno de los mayores consumidores de energía de la provincia de Cienfuegos, de manera que se ha planteado dentro de sus estrategias de desarrollo disminuir el consumo energético proveniente de combustibles fósiles y de esta manera contribuir al plan Energético del país, mediante el aprovechamiento de sus áreas techadas en el uso de sistemas solares fotovoltaicos.

### **Problema científico:**

La Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” satisface sus necesidades de energía eléctrica desde el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), energía generada a partir de combustibles fósiles, de alto costo e impacto ambiental.

### **Hipótesis:**

La propuesta de un sistema solar fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” desde los techos de la institución, debe mostrar la capacidad de suministro de energía eléctrica que puede satisfacer y las bondades en la reducción del costo y el impacto ambiental.

### **Objetivo general:**



Elaborar el estudio de prefactibilidad técnica, económica y ambiental de un sistema solar fotovoltaico de apoyo al suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.

**Objetivos específicos:**

1. Definir el estado actual y tendencias del uso de sistemas fotovoltaico desde los techos de las instituciones para el suministro de apoyo de energía eléctrica a instalaciones industriales y de servicio.
2. Realizar la caracterización energética de la industria, niveles de consumo general de energía eléctrica por tipo de planta. Caracterización elemental de las edificaciones que albergan los procesos industriales y de servicio.
3. Desarrollar la propuesta preliminar de los sistemas solares fotovoltaicos a colocar sobre la estructura de las naves. Determinar capacidad de generación y resistencia mecánica elemental de nave estudiada.
4. Evaluación preliminar económica y ambiental de las soluciones propuestas.

La investigación queda estructura en cuatro capítulos:

**Capítulo I:** Energía Solar Fotovoltaica. Estado actual y tendencias en el mundo. Panorama energético cubano y perspectivas al 2030.

**Capítulo II:** Caracterización constructiva y energética de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.

**Capítulo III:** Desarrollo del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”.

**Capítulo IV:** Evaluación económica y medio ambiental del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico propuesto.



# CAPÍTULO I



## Capítulo I: Energía Solar Fotovoltaica. Estado actual y tendencias en el mundo.

### Panorama energético cubano y perspectivas al 2030

#### 1.1 Fuentes de energías y contaminación ambiental

Para cualquier nación que busque su bienestar y progreso es necesaria la energía. Por lo que su prioridad debe estar en función de la adecuada obtención, desarrollo y uso sostenible de fuentes energéticas para todos sus ciudadanos (CEPAL, 2013).

Existen dos grandes grupos en los que se pueden dividir las fuentes de energía: las energías renovables y las no renovables. Se consideran no renovables aquellas que a escala humana no son capaces de crearse al mismo ritmo en que son consumidas y las renovables son inagotables a escala humana, su origen principal es solar (García, 2016).

Las implicaciones ambientales y los problemas vinculados al cambio climático conforman temas ineludibles dentro de las tendencias mundiales del desarrollo energético en el siglo XXI (CEPAL, 2013) y (Bjork, Connors, Welch, Shaw, y Hewitt, 2014). Cada año se incorporan a la atmósfera, más de  $5,6 \times 10^9$  toneladas métricas de carbón en forma de  $\text{CO}_2$ , lo que provoca alrededor del 50 % del calentamiento atmosférico, donde el sector más contaminante en el mundo es el energético con un 57 % de las emisiones (Stolik, 2019).

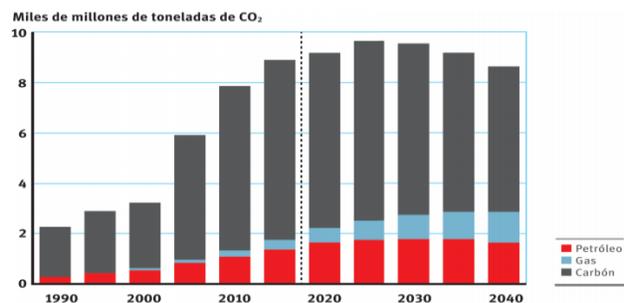
Mucho se ha investigado en los últimos años sobre los problemas medioambientales, dentro de los resultados principales obtenidos destaca el incremento de emisiones de  $\text{CO}_2$ . A principios del siglo XIX, era de 250 ppm, 340 ppm en 1980 y 350 ppm en 1990; de seguir así, para los años 2030-2040 la temperatura promedio sube a unos  $1,3 \text{ }^\circ\text{C}$ , (Ver Figura 1.1), suficiente para producir una catástrofe ecológica. El carbón y el petróleo son los que mayor influencia tienen

La elevada demanda de energía en el mundo se ha convertido en una preocupación, pues el suministro de combustible está alcanzando su punto máximo lo que se puede observar en el Anexo 1 y cada año que pasa continua el crecimiento poblacional. De modo que considerar el uso de energías renovables se ha convertido en prioridad para un desarrollo sostenible tanto tecnológicamente como ambientalmente, como la opción más segura para satisfacer la demanda mundial (Bjork et al., 2014).



## Figura 1.1

*Evolución de las emisiones fósiles de CO<sub>2</sub> (1990-2040).*



*Nota:* Tomado de Stolik (2019).

Existen varios factores de importancia en el tema energético, sobre todo la inversión de millones de dólares en plantas y otras industrias que utilizan combustibles fósiles, de ahí la necesidad de un cambio de esta situación (Stolik, 2019). En particular se resalta el papel que pueden jugar los avances en innovación y desarrollo tecnológico, la eficiencia energética y las fuentes renovables (CEPAL, 2013).

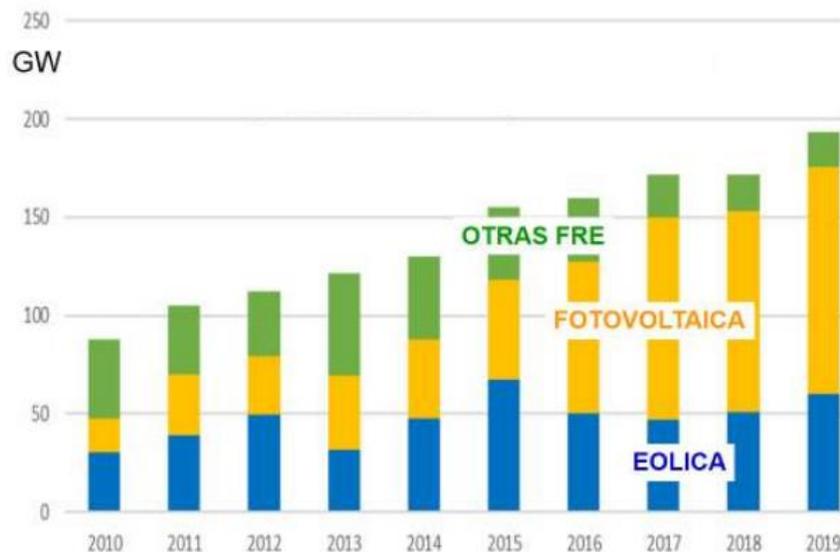
Mediante el aprovechamiento de los recursos locales, la creación de nuevas industrias, conocimientos y empleos, las energías renovables ofrecen un crecimiento económico sostenible. El desarrollo de dichas energías ofrece oportunidades para la creación de nuevas empresas y nuevas tecnologías, tanto para negocios pequeños como para empresas grandes, lo que se refleja en sus planes de negocio a largo plazo (IRENA, 2020a).

La generación de energía renovable sigue creciendo en 2020, a pesar de la pandemia de la COVID-19. El aumento constante de la competitividad de las renovables, sumado a su modularidad, a su rápida escalabilidad y a su potencial de creación de empleo, hacen que también resulten muy atractivas cuando los países y las comunidades evalúan sus opciones de estímulo económico (IRENA, 2020b).

La hidroenergía ha sido y es la FRE con más generación de energía eléctrica, seguida por la eólica mientras que la FV ha continuado incrementándose, tal como se muestra en la Figura 1.2 las instalaciones anuales en términos de potencia.

**Figura 1.2**

*Evolución de la instalación de FRE sin hidroenergía.*



*Nota:* Tomado de Stolik (2021).

Los pronósticos mundiales a largo plazo de crecimiento de la FRE planteadas desde hace varios años son disimiles, pero todas apuntan a una fuerte presencia de la solar, como se observa en la Figura 1.2, por lo que en el siguiente epígrafe se profundiza acerca de la misma.

## 1.2 Energía Solar

La energía solar emitida a la Tierra, que corresponde a  $900 \text{ W/m}^2$ , lo que equivale a 2 000 veces el consumo energético mundial. El aprovechamiento de la misma trae grandes beneficios para el hombre ya que supera el consumo energético mundial siendo una fuente de energía renovable en continuo crecimiento y reduce las emisiones de  $\text{CO}_2$  al medio ambiente, adquiriendo un papel importante frente al cambio climático (Energía Solar, 2020) y (Escobar, 2013).

Stapleton y Neill (2012) plantean que la radiación emitida por el sol es inconsistente, pues existen importantes variaciones de radiación en la superficie terrestre, debido a la órbita de la tierra y el albedo de ciertas áreas.

La radiación electromagnética de los rayos del sol recibida en todo el planeta presenta un valor mínimo promedio cercano a  $800 \text{ kWh/m}^2/\text{año}$ , correspondiente a zonas cercanas a los polos. En la medida que las zonas se acercan al ecuador, la radiación solar se va incrementando hasta encontrarse distribuida en una banda de color amarillo (Ver Anexo 2) de  $1\ 700$



kWh/m<sup>2</sup>/año. Las radiaciones más altas del planeta que se encuentran en zonas desérticas y prácticamente toda América Latina y el Caribe, África y Medio Oriente se presentan altas intensidades de radiación solar (Stolik, 2019).

En el mapa de radiación solar promedio en Cuba (Ver Figura 1.3) se puede observar la radiación solar que incide sobre la superficie de nuestro país. En este mapa se corrobora que las instalaciones fotovoltaicas son válidas en la inmensa mayoría del territorio cubano, ejemplo de ello es la radiación solar anual en Cienfuegos que se caracteriza por una buena presencia de esta; donde la radiación solar se encuentra en el orden de más de 5,5 kWh/m<sup>2</sup> en la provincia.

### Figura 1.3

*Mapa de Irradiación global horizontal en Cuba.*



*Nota:* Tomado de Solargis (2018).

Benavides (2013) afirma que la radiación solar debe ser cuantificada para estimar el potencial de energía a producir en una instalación. La cantidad de energía solar recibida por un área durante un día se le denomina insolación y se mide en kWh/m<sup>2</sup>/día, la que depende de la hora, la inclinación de la Tierra respecto del Sol, grado de contaminación y condiciones meteorológicas. La radiación solar puede ser clasificada en (Benito y Ruiz, 2018):

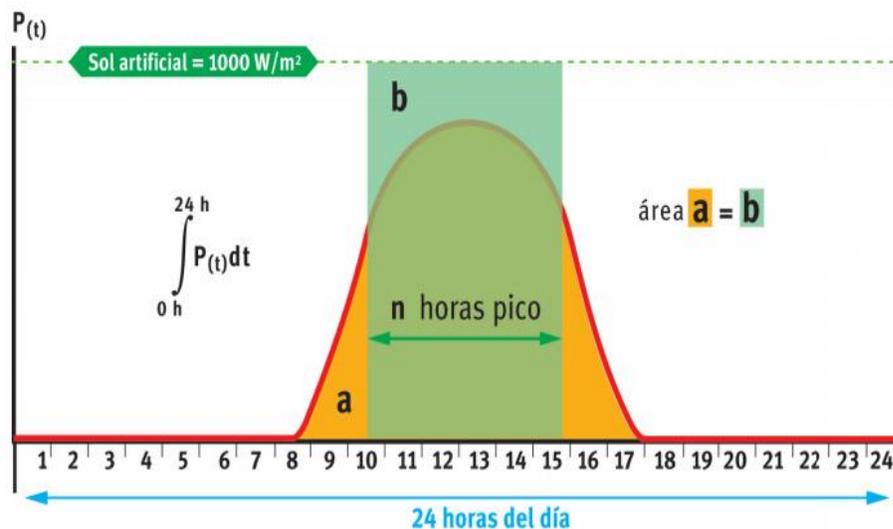


- Radiación difusa: es la parte de la radiación solar procedente de la dispersión de la radiación a su paso por la atmosfera. Es el único tipo de radiación que existe en un día nublado.
- Radiación solar directa: es la parte de la radiación solar que llega en la dirección del sol y proyecta sombras sobre los objetos. Puede observarse únicamente en los días soleados.

A continuación en la Figura 1.4 se muestra las horas pico de sol o HSP, área bajo la curva, se puede llevar a un área aproximadamente cuadrada conformada por la sumatoria del área bajo la curva sobre la unidad de  $1\ 000\ \text{W/m}^2$  (Stapleton y Neill, 2012).

**Figura 1.4**

*Potencia en watt y horas pico.*



*Nota:* Tomado de Banyeres (2019)

Autores como Escobar (2013) plantean que la energía solar se clasifica según la tecnología y su uso general en:

- Energía solar pasiva: no requiere elementos o sistemas mecánicos para aprovechar el calor del sol. Por medio de calentamiento directo o locales, con el efecto invernadero, se construyen viviendas y locales diseñados para aprovechar al máximo y minimizar las pérdidas de energía.
- Energía solar térmica: aprovecha la radiación termina del sol para calentamiento de agua para uso sanitario y calefacción.
- Energía solar termoeléctrica: la radiación del sol calienta un fluido, por medio de éste y un ciclo térmico produce electricidad; Acumulación del calor solar: Usado especialmente para aprovechar el calor emanado por el sol, por medio del calentamiento de paneles por los cuales



circula un fluido o agua, esta medida puede suponer un ahorro importante de energía, teniendo en cuenta que en países desarrollados el 5% de la energía es usada en calentar agua.

- **Energía solar híbrida:** Combina la energía solar con otra energía. Según la energía con la que se combine es una hibridación y se puede usar para la Generación de electricidad con energía solar la cual se puede dar de varias formas, con sistemas termales, convirtiendo agua en vapor, mediante una turbina convencional, se genera electricidad; con este sistema se convierte energía eléctrica del orden del 20% de la energía calorífica que llega a los paneles.
- **Energía solar fotovoltaica:** Produce energía eléctrica a través de paneles solares semiconductores. La electricidad puede obtenerse también por medio del efecto fotoeléctrico. Las células fotovoltaicas presentan una eficiencia aproximada del 10 al 19%, sin embargo, algunos prototipos llegan al 30%, por lo cual se requieren cantidades significativas de paneles para la producción de energía con este sistema.

En términos generales, la energía solar es convertida en tres tipos de energía (Bjork et al., 2014):

- La energía solar térmica se refiere a la energía solar convertida a calor. Generalmente dirigida a poblaciones domésticas, esta puede tomar la forma de espacio solar, calentamiento de agua y piscinas, y refrigeración solar térmica.
- La energía solar concentrada es un tipo de energía solar térmica usada para generar electricidad. Más a menudo destinada a la producción de energía a gran escala, las tecnologías de energía solar concentrada utilizan lentes o espejos para reflejar y concentrar la luz solar en los receptores (un rayo delgado). El calor concentrado se convierte en energía térmica, que a su vez produce electricidad a través de una turbina de vapor o de un motor de calor accionando un generador.

Una de las fuentes de energía limpia y renovable más rentable y fiable para satisfacer las demandas energéticas de los países es la energía solar fotovoltaica, pues representa una fórmula energética radicalmente más respetuosa con el medio ambiente que cualquier otra energía convencional y ofrece una alternativa ecológica sostenible para todos (García, 2016).

### **1.2.1 Energía Solar Fotovoltaica**

La energía fotovoltaica ha sido una de las últimas fuentes de energía eléctrica en desarrollarse, la cual ha ganado terreno frente a otras fuentes de energía renovable en los últimos años. La misma es versátil, pues puede utilizar diversos dispositivos tecnológicos, sin que produzcan subproductos peligrosos para el medio ambiente (Stolik, 2019).



Este tipo de energía es posible gracias a la transformación de la radiación de luz solar que incide en paneles solares y produce electricidad, en ese momento es cuando se produce un efecto fotovoltaico, activando los electrones en un material semiconductor para así generar corriente eléctrica, aunque el rendimiento de este proceso es muy pequeño, pues en el mejor de los casos solo un 25% de la energía luminosa se transforma en eléctrica, para obtener suficiente amperaje, se conectan varias celdas en serie, formando así los módulos o paneles fotovoltaicos (Autosolar, 2020).

La energía solar fotovoltaica, como fuente renovable representa una fórmula energética radicalmente más respetuosa con el medio ambiente que cualquier otra energía convencional. Es una de las fuentes de energía limpia y renovable más rentable y fiable para satisfacer las demandas energéticas de los países, ofrece una alternativa ecológica sostenible para todos los habitantes del planeta Tierra (García, 2016).

### **1.3 Sistema Solar Fotovoltaico**

Un SSFV es un conjunto de dispositivos que aprovecha la radiación emanada por el sol para producir energía eléctrica en voltajes menores, y ser aprovechada directamente por dispositivos de iguales condiciones de voltaje o en baterías (Escobar, 2013).

Cornejo (2014) plantea que un SSFV es un grupo de células o paneles solares directamente interconectadas y encapsuladas como único bloque, que producen una corriente continua de energía, la cual es convertida a corriente alterna a través de un inversor (Cornejo, 2014).

El uso de SSFV ha ido en crecimiento acelerado a nivel mundial. Según datos obtenidos por Europe (2020), se estima una capacidad instalada acumulada de SSFV de 1 678 GW para el 2024 en el escenario más próspero, mientras que para un escenario bajo se estiman valores de 1 177 GW y el escenario medio probable de 1 427 GW. Dicho crecimiento se muestra en la Figura 1.5 a continuación:

**Figura 1.5**

Escenarios totales del mercado fotovoltaico 2020-2024.



Nota: Tomado de Europe (2020).

La capacidad acumulada de energía solar fotovoltaica instalada en el mundo ha aumentado en un 23% de 516,8 GW en 2018 a 633,7 GW en 2019. Lo que significa que la energía solar total ha crecido casi 400 veces desde principios de siglo (Ver Anexo 3). En retrospectiva, solo hace 10 años, la capacidad fotovoltaica instalada total del mundo aumentó en más de un 1 500%, de 41,4 GW en 2010(Europe, 2020).

### 1.3.1 Clasificación de los SSFV

En la bibliografía consultada, según el criterio de diversos autores los sistemas SSFV pueden ser clasificados en aislados y conectados a la red, dependiendo del objetivo de la instalación y sus características principales. A continuación, se explica dicha clasificación:

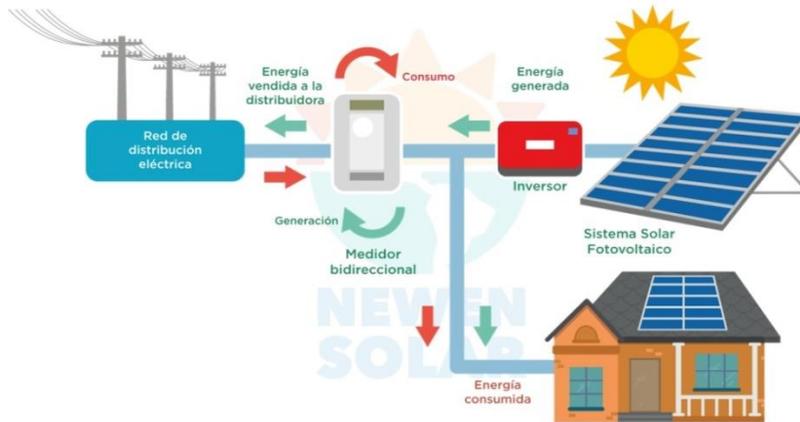
- Sistemas Fotovoltaicos Conectados a la Red.

Un Sistema Fotovoltaico conectado a la red es un sistema cuya función es producir energía eléctrica en condiciones adecuadas para poder ser inyectada en la red convencional. Como se muestra en la Figura 1.6, está compuesto por el generador fotovoltaico, un inversor DC/AC y un conjunto de protecciones eléctricas. La energía producida por este sistema es consumida parcial o totalmente en las cercanías, y la energía sobrante será inyectada en la red para su distribución a otros puntos de consumo (Perpiñán, 2018).



**Figura 1.6**

*Sistema Solar Fotovoltaico conectado a la red.*



*Nota:* Tomado de Newsolar (2018).

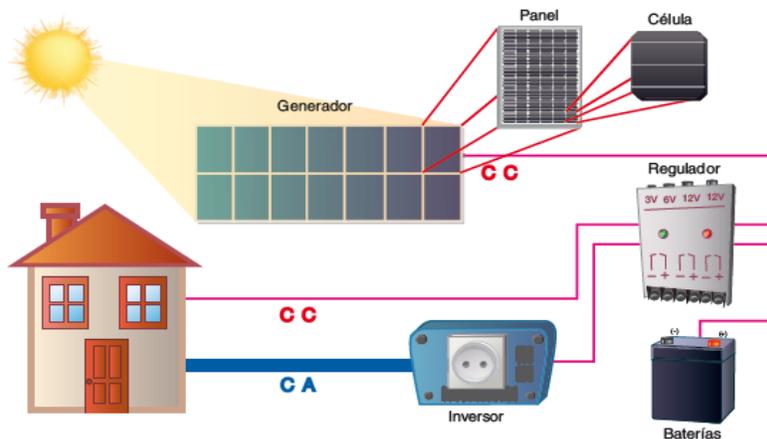
- **Sistemas Fotovoltaicos Aislados.**

Los sistemas fotovoltaicos de los sistemas remotos aislados, generalmente, incorporan baterías eléctricas para utilizar la electricidad fotovoltaica en forma diferida en ausencia de luz solar y en múltiples aplicaciones importantes (Ver Figura 1.7). Por lo general son sistemas de poca potencia (Stolik, 2019).

Un sistema solar fotovoltaico aislado produce energía eléctrica para satisfacer el consumo de cargas eléctricas no conectadas a la red, empleando un sistema de acumulación energético para hacer frente a los períodos en los que la generación es inferior al consumo (Benito y Ruiz, 2018).

**Figura 1.7**

*Sistema Solar Fotovoltaico Aislado.*



*Nota:* Tomado de Obrero (2011)



En un SSFV aislado los inversores suelen incorporar un mecanismo de regulación de descarga que permite esta conexión. El funcionamiento de estos inversores es, en muchos aspectos, similar al de los inversores de conexión a red pero con varias peculiaridades. La principal diferencia está en su salida: dado que estos inversores no están conectados a una red con la que sincronizar, deben funcionar como fuentes de tensión y no como fuentes de corriente (Perpiñán, 2018).

### 1.3.2 Componentes de un SSFV

Un SSFV cuenta con varios componentes, a continuación, se describen los mismos según la bibliografía consultada:

- Módulos fotovoltaicos

El módulo fotovoltaico es el panel que reúne cierta cantidad ordenada de celdas fotovoltaicas más otros materiales. El módulo toma el nombre de los tipos de celdas que la integran; la celda fotovoltaica es el elemento más característico e importante del módulo fotovoltaico (Stolik, 2019) (Ver Anexo 4). Los módulos pueden ser calificados en función de su tecnología de fabricación según García (2016) en:

- ✓ Silicio monocristalino: Fabricados en base a lingotes de silicio puro. Posee un rendimiento en laboratorio de 25% y un rendimiento comercial entre 14-16%.
- ✓ Silicio policristalino: Fabricados en base a la refundición de piezas de silicio puro produciendo rendimientos menores al monocristalino. Los rendimientos de laboratorio se encuentran alrededor del 20,4% y su rendimiento comercial entre los 12-14%.
- ✓ Silicio amorfo: Fabricados también en base a la refundición de silicio puro y, además, combinado con múltiples capas u otras tecnologías, entregando rendimientos que supera el 18%.

- Inversores

Son utilizados para convertir la corriente directa (CD) en alterna (CA), reducen automáticamente la potencia en caso de sobre frecuencias, para estabilizar la frecuencia de la red, cuando se genera más energía de la necesaria. Poseen la capacidad de suministrar potencia reactiva que ayuda a mantener la estabilidad en la tensión de la red. Se pueden emplear para compensar desfasajes no deseados y poseen protecciones de apoyo dinámico que protegen la red en caso de fallo y ayudan a evitar la propagación de un fallo o al menos limitarla (Stolik, 2019), (Obrero, 2011).

- Dispositivos de almacenamiento o baterías



Las dos aplicaciones más importantes del almacenamiento eléctrico en baterías son para el transporte y para la generación diferida de electricidad en ausencia o disminución de la radiación solar (Perpiñán, 2018)

En sistemas solares fotovoltaicos aislados se requiere un equilibrio relativo en importancia entre las celdas solares, que son el corazón del sistema, y el sistema de almacenamiento de energía, debido a que no es frecuente que la radiación solar coincida perfectamente con los requerimientos de energía ni que el sol esté disponible todo el tiempo (Stolik, 2019). En cuanto al tipo de baterías que pueden utilizarse deben mencionarse básicamente tres: baterías de plomo, baterías de níquel cadmio (Ni-Cd) y baterías Li-ion (García, 2016).

- Estructuras y soportes

Los soportes físicos son los que sostienen los módulos en una determinada posición por toda la vida útil del sistema fotovoltaico (Stolik, 2019). Su función principal es optimizar la resistencia y la fijación de la estructura del módulo y la instalación del SSFV. Los paneles fotovoltaicos deben montarse en una estructura estable y duradera que además de soportar la matriz o el campo fotovoltaico resista los embates del viento, la lluvia, el granizo y otras condiciones adversas (Ortiz, 2013).

- Cables de conexión

Los cables y conectores deben ser resistentes a los rayos UV, al ozono, a las exigencias mecánicas y a las variaciones extremas de temperatura. Por otro lado, no debe descuidarse la regulación (caída de voltaje) entre la matriz fotovoltaica y el inversor. Los conductores para corriente continua deben tener doble aislamiento y ser alambres de cobre (Ortiz, 2013).

El cableado es el encargado de transportar la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos hasta el inversor, donde se transforma en corriente alterna para su posterior utilización (Stolik, 2019)

- Regulador

Para un correcto funcionamiento de la instalación, hay que instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobre descarga de la batería, con el fin de alargar su vida útil (Obrero, 2011).

El regulador trabaja por tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y



en la parte de descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva de la batería (Obrero, 2011).

### 1.3.3 Mantenimiento a los SSFV

Para tener una mayor seguridad y vida útil en una planta fotovoltaica se debe tener un control de fallas mediante un plan de mantenimiento los principales componentes planteados por Stolik (2019) son:

- Preventivo: Se debe disponer de un plan de mantenimiento preventivo, que incluya:
  - ✓ Operaciones de inspección visual.
  - ✓ Otras operaciones de funcionamiento dentro de los límites aceptables.
  - ✓ Medición de la resistencia de aislamiento en caso de haber humedad o ruptura del vidrio,
  - ✓ Realizar un análisis de datos en el inversor
  - ✓ Monitoreo en tiempo real que muestre datos eléctricos, ambientales, configuración de mensaje de alarmas
  - ✓ Mapa de la planta fotovoltaica para la supervisión visual de distintos equipos para controlar los parámetros de producción (tensión, intensidad, potencia),
  - ✓ Revisar conexiones de los sensores que se encuentren en buen estado y no presenten deterioros o rupturas
- Correctivo: Realizar todas las operaciones de sustitución necesarias, para asegurar que el sistema funciona correctamente durante su vida útil; lo cual incluye:
  - ✓ Visita a la instalación en los plazos indicados y cada vez que el usuario lo requiera por avería grave.
  - ✓ Análisis y definición de presupuestos de los trabajos y reposiciones necesarias.
  - ✓ Revisar que los costos económicos formen parte del precio anual del contrato de mantenimiento.

Por su parte Aguilera y Guerrero (2020), incluyen un paso más a estos, referido al mantenimiento predictivo, el cual utiliza información en tiempo real para llevar a cabo medidas preventivas como limpieza o mantenimiento anticipando las fallas.

El mantenimiento se debe realizar por personal técnico calificado, bajo la responsabilidad de la empresa instaladora, pues se busca maximizar la generación de energía, evitar los tiempos de inactividad, minimizar las fallas, evitar las fallas más costosas y aumentar la vida útil de la planta fotovoltaica. Aunque un sistema fotovoltaico funciona automáticamente, un



mantenimiento regular es una tarea indispensable y necesaria y deber ser realizada con determinada frecuencia (ver Tabla 1.1) (Aguilera y Guerrero, 2020).

**Tabla 1.1**

*Resumen de la frecuencia de mantenimiento.*

Equipo	Frecuencia	Mantenimiento
Transformador de voltaje medio.	1 año	Nivel de aceite, temperaturas, fugas, sistemas de ventilación, entre otros.
	2 año	Comprobar la existencia de corrosión en la parte superior de la estructura del armario del transformador. Funcionamiento, deterioro, decoloración de fusibles, entre otros.
	6 años	Tomar muestras y pruebas de aceite y tratarlo de ser necesario.
Equipo de conexión de medio voltaje.	1 año	Inspección visual, limpiar la celda, comprobación de cada accesorio, comprobar el etiquetado de seguridad y comprobar las conexiones con los relés de protección.
	6 años	Comprobar las uniones, comprobar el estado de los fusibles, interruptores y accesorios.
Sistema de medición de energía.	1 año	Revisión, limpieza y comprobación de accesorios y conexiones eléctricas.
Sistema de comunicación	De ser necesario	Revisión de las instalaciones, verificación de los indicadores de funcionamiento, limpieza y comprobación de todas las conexiones.
Sistema de monitoreo	1 año	Verificación de indicadores de funcionamientos, alarmas, conexiones y uniones, limpieza externa de los accesorios, entre otros.
Sistema de medición meteorológico.	Seis meses	Verificación de alarmas, inspección visual y limpieza de los accesorios, comprobación de las conexiones, entre otros.
Estructura del soporte	Seis meses	Inspección visual de partes fijas y uniones, limpieza y tratamientos en la zona afectada.
Módulos	1 año	Análisis de varianza, inspección visual de los cables, inspección termografía.

Nota: Tomado de Aguilera y Guerrero (2020).



### 1.3.4 Fallas y prácticas inadecuadas en la explotación de SSFV

Existe una gran variedad y modularidad de sistemas fotovoltaicos, por lo que existe un número significativo de errores que pueden darse debido a una formación insuficiente de los instaladores sobre la disponibilidad y parámetros técnicos de los diferentes componentes fotovoltaicos (EPIA, 2011).

Los fallos más comunes no se dan debido a las malas prácticas en una determinada fase de la instalación, sino que son una combinación o acumulación de acciones no óptimas en las diferentes etapas o simplemente debido a la comunicación incorrecta o inadecuada entre los diseñadores e instaladores. Para evitar este tipo de fallos, el sector fotovoltaico necesita personal diversificado y cualificado. Una mano de obra cualificada exige una formación y sistema de certificación adecuados (Marín, 2018).

Teniendo en cuenta el criterio de varios autores se construye la Tabla 1.2 resumen de las posibles fallas en SSFV (EPIA, 2011), (de las Heras León, 2018), (Nación y Morrone, 2019) y (Gómez, 2020).

**Tabla 1.2**

*Resumen de las principales fallas en SSFV.*

Selección de ubicación	
Parámetros	Fallos / Prácticas Inadecuadas
Orientación	Instalaciones orientadas norte / oeste
Inclinación	Diferentes azimuts o inclinaciones en la misma rama o string. Sistema no inclinado conforme al ángulo apropiado para su latitud (para el mejor rendimiento a lo largo de todo el año).
Sombreado	Colocar el sistema en una zona rodeada de árboles y / o edificios. No se tiene en cuenta el sombreado estacional.
Corrosión	Los módulos están ubicados en las zonas expuestas al agua salada.
Biodiversidad(para grandes sistemas sobre el suelo)	Se descuida el potencial impacto para la vida salvaje debido a un estudio de impacto ambiental inadecuado.
Diseño y planificación del sistema	
Parámetros	Fallos / Prácticas Inadecuadas
Carga estructural	No se considera la antigüedad y las condiciones del tejado.



	<p>Uso inadecuado de estructuras que eviten problemas de estabilidad. No respetar el código técnico de la edificación.</p>
Resistencia al viento	<p>Montaje inadecuado. Sistema no montado sobre bases de hormigón.</p>
Ubicación	<p>No respetar el código técnico de la edificación y las normas de seguridad (por ejemplo, sobrecarga de la cubierta, falta de acceso a los bomberos). El BOS no está situado en recintos protegidos de las inclemencias del tiempo.</p>
Equipos	<p>Cables de tamaño insuficiente e inversor, optimizador de potencia (MPPT), protecciones, caja de conexiones y transformadores inadecuados.</p>
Rayos / puesta a tierra	<p>Sin protección contra rayos, puesta a tierra y protección contra sobretensiones. Sistema fotovoltaico instalado en un lugar expuesto. Permitir que el cobre (puesta a tierra de los equipos) entre en contacto con el soporte de aluminio y marcos de los módulos.</p>
Conexiones eléctricas	<p>Polaridad incorrecta. Protección del circuito incorrecta. Desadaptación: desadaptación del inversor o medida incorrecta de la generación de salida del inversor. Los recorridos de los cables eléctricos no están optimizados. No se tienen en cuenta los códigos eléctricos o reglamentos técnicos para la conexión a la red.</p>
<p>Los componentes del sistema, exceptuando los módulos fotovoltaicos, se conocen con el termino en ingles BOS (Balance of system).</p>	
<p>Instalación física de los componentes</p>	
Parámetros	Fallos / Prácticas Inadecuadas
Sombreado	No se mantienen las distancias entre las filas de los módulos.
Daño en el tejado	Perforación sin métodos de sellado adecuados
Corrosión	Materiales utilizados en el exterior que no sean resistentes a la luz del sol / rayos UVA
Configuración del campo fotovoltaico	<p>Los módulos son sometidos a sobreesfuerzos debido a la expansión térmica de la estructura del soporte. Poner muy pocos módulos en serie para el correcto funcionamiento del inversor durante las</p>



	<p>altas temperaturas del verano.                  Ventilación insuficiente del módulo.                  Se utilizan módulos de diferentes configuraciones y diferentes valores de potencia nominal en el mismo campo fotovoltaico.</p>
Inversor	<p>Colocado en un lugar directamente expuesto a la luz del sol.                  Ventilación insuficiente.                  Colocado a larga distancia de la caja de conexiones del campo fotovoltaico.                  Instalado sobre o cerca de una zona inflamable.</p>
Cableado	<p>Cables tirantes o flojos.                  Soporte del cable inadecuado con una exposición a daños físicos.                  Múltiples cables entrando en un collarín para un solo cable.</p>
Conductores	<p>Conductores no sujetos a menos de 30 cm de las cajas de conexión.                  Curvado del cable demasiado cerca de las cajas de conexión.</p>
Baterías	<p>No instaladas en un recinto aislado del control u otros componentes fotovoltaicos.                  Instaladas cerca de materiales inflamables o radioactivos.                  Expuestas a la luz directa del sol.                  Expuestas a altas temperaturas.</p>
Etiquetado y las señales de peligro	Ausencia o localización incorrecta.
Sensores	Mal colocados.
Cajas o elementos de paso	Cubrirlas haciéndolas casi inaccesible para el servicio.
<b>Seguridad</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Fallos / Prácticas Inadecuadas</b>
Seguridad de los técnicos	<p>No se utiliza el equipo de protección de caídas aun cuando es necesario.                  Incumplimiento de las regulaciones de prevención de accidentes.                  Trabajar en condiciones adversas: condiciones de humedad, vientos fuertes o superficies heladas en los tejados.                  El instalador anda sobre paneles.                  El inversor se instala después del cableado.</p>



En caso de incendios	
Medidas de organización	No etiquetar el sistema fotovoltaico en cajas de conexiones y distribuidor principal del edificio con un signo indicador. Falta de planes de emergencia para los trabajadores.
Medidas estructurales	Cableado no resistente al fuego. Falta de trazado de los cables de CC fuera del edificio. El inversor se instala en el interior del edificio.
Medidas técnicas	Falta del interruptor de desconexión de CC en el área de caja de fusibles principal del edificio.
Mantenimiento / Inspección	
Técnico	No hacer anualmente el mantenimiento de conexiones mecánicas y eléctricas (corrientes y voltajes de circuito, electrolito de la batería, entre otros) Superficie frontal de los módulos fotovoltaicos no cubierta durante el mantenimiento. No remplazar componentes de montaje doblados, corroídos o dañados. No asegurar componentes sueltos o cierres. Los extintores de incendios no se encuentran en las proximidades de la batería. El propietario no sido informado / instruido para controlar con frecuencia el rendimiento del sistema.
Propietario (El instalador fotovoltaico deberá asesorar a los propietarios de las medidas de mantenimiento a seguir.)	No se registran los kWh producidos periódicamente (la desviación de los valores esperados puede ser un motivo para la comprobación del sistema). Los paneles no son debidamente lavados, cuando son necesarios. Los paneles se rayan durante el procedimiento de limpieza (al utilizar cepillos y detergentes fuertes). Los arboles cerca del sistema no son adecuadamente podados o recortados. Las superficies de las baterías no se mantienen limpias. No se comprueba el nivel de electrolito en las baterías.

Nota. Elaboración propia.



#### 1.4 Integración arquitectónica de la energía fotovoltaica en edificaciones

Integración solar fotovoltaica se refiere a cualquier instalación solar fotovoltaica integrada en cualquier superficie de un edificio, un tejado, una cubierta, una fachada, marquesinas, entre otros y ofrece infinitas posibilidades (López, 2009).

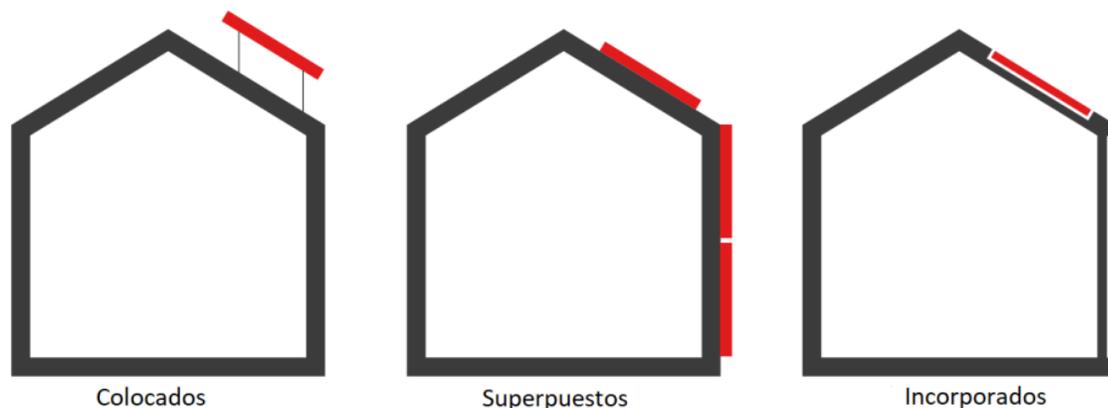
La integración fotovoltaica en edificios (BIPV- Building Integrated Photovoltaics) supone la sustitución de materiales convencionales de construcción por nuevos elementos arquitectónicos fotovoltaicos que son generadores de energía (López, 2009).

En relación a la disposición de los paneles solares en edificaciones existen diferentes posturas (Ver Figura 1.8), pueden ser colocados, superpuestos e incorporación arquitectónica (D. Marin, 2018).

- **Colocados:** Cuando se instalan los paneles sin relación formal, material o de color con la edificación, a veces en contraposición o de forma no paralela a la envolvente por lo general son el resultado de aprovechar una máxima irradiación y/o para evitar sombras.
- **Superpuestos:** Cuando las placas guardan un paralelismo con uno de los planos de la edificación. A veces en relación con la composición y ritmos del edificio, es decir centrado o en un eje formal, con alguna relación en color y materialidad.
- **Incorporados:** Cuando reemplazan recubrimientos o elementos funcionales arquitectónicos de una edificación, cumpliendo propiedades que cualquier material de exteriores debe proporcionar; como estanqueidad y resistencia mecánica, o funcionar adecuadamente como balaustrada, filtro solar, ventanal, entre otros.

#### Figura 1.8

*Esquemas de paneles solares colocados en edificación.*



*Nota:* Tomado de Marin (2018).



Existen varias aplicaciones de la integración fotovoltaica en edificios, a continuación se explican algunas de ellas (López, 2009), (Chivelet, 2011), (Ribeiro, 2015) (Montero, 2016) y (D. Marin, 2018):

- **Integración en fachadas:** La utilización de sistemas fotovoltaicos integrados a fachadas se pueda dar de diversas maneras. Las construcciones de las fachadas pueden ser ventiladas o no ventiladas, y estas características son importantes en el momento de decidir qué tipo de tecnología fotovoltaica se puede integrar. Actualmente se encuentran en el mercado gran variedad de módulos o componentes constructivos fotovoltaicos para aplicaciones en fachadas.
  - ✓ Fachadas ventiladas: La integración en fachadas ventiladas se hace sustituyendo la piel exterior por módulos fotovoltaicos, bien sean de vidrio o de otros soportes opacos, como aluminio, cerámica o plástico.
  - ✓ Fachadas no ventiladas o tipo muro cortina: Se pueden utilizar para fachadas verticales o inclinadas, curvas o no, utilizando el sistema montado directamente en obra tradicional o el sistema modular. Admiten ambas soluciones mixtas, con módulos transparentes y opacos. En el caso de utilizarse tecnologías fotovoltaicas de silicio cristalino, donde la falta de ventilación de la cara posterior de los módulos se traduce en pérdidas de eficiencia.
- **Lucernarios y atrios:** Se constituye en cubiertas generadoras de energía transparentes. El juego de transparencia y sombras se consigue ajustando la distancia entre células, que en este caso son muy importantes en el resultado arquitectónico, ya que las células están visibles.
- **Integración en cubiertas:** Las cubiertas ofrecen el mayor potencial de integración de paneles solares en edificios, por ser las superficies mejor situadas y de mayor extensión, libres de obstáculos y restricciones. Además, en zonas ecuatoriales el potencial es sustancialmente mayor en cubiertas, en cambio, en regiones cercanas a los polos, ganan potencial las fachadas. Dependiendo del tipo de edificación, la integración se puede realizar en las cubiertas inclinadas o en las planas, sean o no transitables
  - ✓ Cubiertas inclinadas: Consiste en sustituir los elementos convencionales del tejado por colectores solares. De este modo ya no es necesario tener en cuenta el área de sombra en la siguiente fila de módulos. El sistema de anclaje de paneles superpuestos más utilizado en cubiertas inclinadas de edificios industriales es mediante montantes de aluminio atornillados al material de cubierta que sirven para sujetar los módulos.



Este sistema es el más rápido y fácil de instalar, además garantiza la impermeabilidad del techo y los colectores pueden disponerse horizontal o verticalmente.

- ✓ Cubiertas planas: Es la forma de integración más habitual, mediante una estructura de soporte, se calibran y disponen paneles en inclinación y orientación adecuada para conseguir la máxima producción energética, normalmente retranqueados del perímetro del edificio.

Los sistemas fotovoltaicos sobre tejados y cubiertas son de pequeño a mediano tamaño, esto es de 5 kW a 200 kW. Aunque a veces se supera este valor y se alcanzan dos o tres MW (Pérez, 2013).

En el mercado hay numerosas ofertas de componentes constructivos fotovoltaicos para instalar en edificaciones y sus costos son muy variables en dependencia de su incorporación (Ribeiro, 2015). Para la integración de estos sistemas, las cubiertas de edificaciones son consideradas las superficies más favorables y mayormente utilizadas, siempre y cuando la orientación sea favorable para evitar sombras y ventilar la cara posterior de los módulos (Ribeiro, 2015).

### **1.5 Costos relacionados con los SSFV**

La capacidad de energía renovable recién instalada cuesta cada vez menos que las opciones de generación de energía más baratas basadas en combustibles fósiles. Los datos de costos presentados en este estudio integral de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) confirman cuán decisivamente han cambiado las tornas (IRENA, 2020b).

Más de la mitad de la capacidad renovable agregada en 2019 ha logrado menores costos de electricidad que el carbón. Los nuevos proyectos solares y eólicos están socavando la más barata de las plantas de carbón existentes. Los resultados de la subasta muestran que estas tendencias favorables de costos para las energías renovables se aceleran (IRENA, 2020b).

Las continuas disminuciones de costos confirman la necesidad de energía renovable como una solución climática y de descarbonización de bajo costo, alineando las necesidades económicas a corto plazo con los objetivos de desarrollo sostenible a mediano y largo plazo. Las instalaciones de energía renovable podrían constituir un componente clave de los paquetes de estímulo económico tras la pandemia de COVID-19 (IRENA, 2020b).

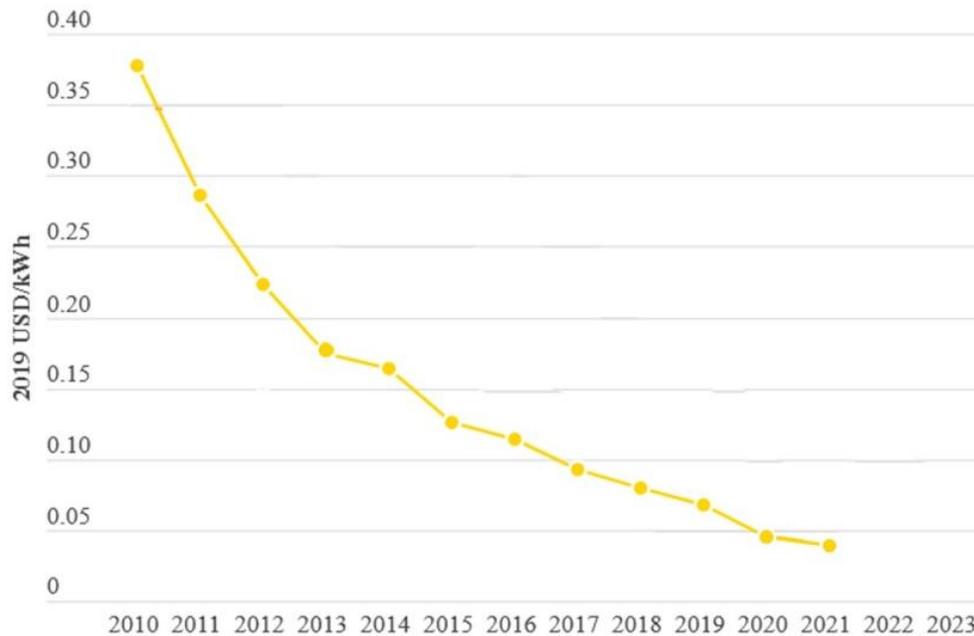
El costo de la electricidad generada a partir de energía solar fotovoltaica registró un descenso del 82% entre 2010 y 2019 (Ver Figura 1.9). Las mejoras de los costos experimentadas desde



2010 se han debido principalmente a la reducción del 90% en los precios de los módulos, junto con la disminución de los costos del balance del sistema. Todo ello ha provocado una reducción de los costos totales de instalación de energía solar FV de casi el 80% en la última década (IRENA, 2020a).

### Figura 1.9

*Tendencia de los costos de kWh de la energía fotovoltaica.*

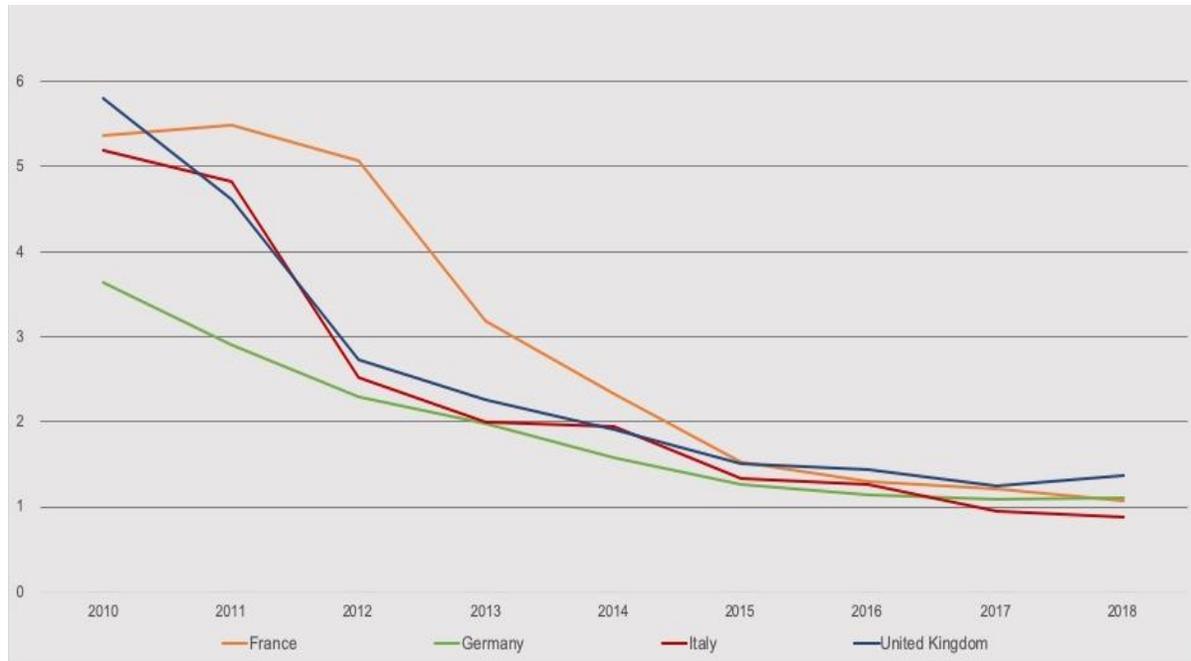


*Nota:* Tomado de IRENA (2020a).

El precio de los paneles fotovoltaicos generalmente se mide en términos de coste por vatios, es decir, la cantidad de energía que se produce o consume por unidad de tiempo. Hace una década los costos de los paneles solares estaba alrededor de los 6 dólares por Watt, mientras que en la actualidad está por debajo de 1 dólar cada Watt, como se muestra en la Figura 1.10 (Carbonell, 2020).

**Figura 1.10**

*Tendencia del precio del panel solar fotovoltaico (\$/Watt).*



Nota: Tomado de Carbonell (2020).

Stolik (2019) plantea que para la evaluación económica de este tipo de instalaciones se debe tener en cuenta los siguientes elementos:

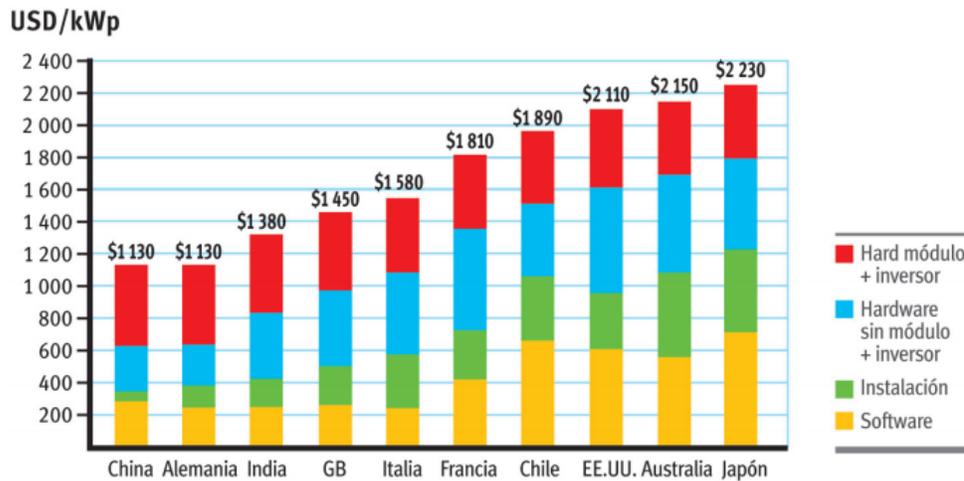
- Todos los costos iniciales y posteriores (módulos, inversores, estructura, cableado, obra civil, instalación y montaje y otras labores.)
- Prestamos, créditos, otros financiamientos.
- Operación y Mantenimiento.
- Costos imprevistos.
- Impuestos por ganancias, permisos y arrendamientos.

La Figura 1.11 muestra un ejemplo aproximado del precio de instalación de un SSFV por países, desde precios más bajos, correspondiente al caso de China y Alemania (1 130 USD/kWp), hasta valores superiores para otros países.



**Figura 1.11**

Valores de costos totales de instalación de kWp.



Nota: Tomado de IRENA (2015).

Por su parte la entidad suministradora cubana dedicada a la instalación y montaje de sistemas solares fotovoltaicos COPEXTEL S.A. tiene como precio de instalación de 1 kWp \$ 2 550 MLC (Finalé, 2019).

### 1.6 Principales ventajas y desventajas de las instalaciones fotovoltaicas

Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica desarrollada se realiza un resumen en la Tabla 1.3 de las principales ventajas y desventajas de los SSFV, que se muestra a continuación según los autores Uzquiano, Sullivan, y Sandy (2015), Stolik (2019), Potosinos (2019) y Autosolar (2020).

**Tabla 1.3**

Principales ventajas y desventajas de los SSFV.

Ventajas	Desventajas
Energía limpia, pues no emite ningún tipo de residuo.	Las instalaciones exigen una gran superficie de suelo.
Fuente inagotable y gratuita de energía. Promedio de radiación estable y predecible	La radiación solar no es uniforme, pues su uso se limita a zonas de elevado número de horas de sol al año.
Compensan desigualdades: los países menos desarrollados disponen de ella y no necesitan importarla.	El coste de las instalaciones es alto en relación a su rendimiento.



Reducen la contaminación sonora ya que operan silenciosamente.	Aunque es una energía limpia, producir y mantener los paneles fotovoltaicos es contaminante.
Durabilidad, la mayoría de los módulos fotovoltaicos duran más de 20 años	Las instalaciones modifican el entorno inmediato, dada su magnitud.
Los módulos pueden ser añadidos gradualmente para incrementar la energía disponible.	La eliminación de los componentes de los sistemas fotovoltaicos provoca un peligro ambiental moderado.
No tiene costos por uso de combustible.	La mayoría de sus componentes pueden ser reciclados, excepto los semiconductores.
los excedentes que se creen en una instalación pueden verse a la red eléctrica y conseguir algunos beneficios	Baja eficiencia
Sol disponible en todo el mundo	Alto costo en sus inicios
Silicio disponible en todo el planeta	Carácter intermitente
La más instantánea de las energías solares	Es subsidiada
Sin partes móviles para sistemas fijos	El área es un problema para la fotovoltaica
Aplicaciones versátiles en amplio rango de potencia	
Accesibilidad y poco riesgo tecnológico	
Fácil traslado y rápida instalación	
Utiliza poca agua	
Genera energía para su almacenamiento	
Se puede utilizar en corriente directa y en corriente alterna	
Se abarata continuamente	

*Nota.* Elaboración propia.

Como se puede observar son numerosas las ventajas de utilizar SSFV, pues su aprovechamiento no contamina el medioambiente y además es accesible a todos ya que su fuente de energía proviene del Sol. Sus instalaciones pueden ser pequeñas o de gran tamaño, adecuadas para abastecer las necesidades domésticas de una vivienda urbana o aislada, como para plantas de generación a gran escala y muchas otras ventajas como las mencionadas anteriormente.

### 1.7 Métodos y metodologías de cálculo para la instalación de SSFV

En la bibliografía consultada se puede observar que existen diferentes métodos o metodologías para el cálculo sistemas solares fotovoltaicos, entre las que destacan:



- Hernández Morales, Monteagudo Yanes, Dala, y Jiménez Borges (2020) proponen una secuencia de 11 pasos lógicos para la cubierta del edificio 7 de la Universidad de Cienfuegos con resultados positivos. Ver Anexo 5
- Becerra (2019) plantea una metodología integradora compuesta por 12 pasos y es aplicada con resultados satisfactorios en la empresa de Materiales de la Construcción de la provincia de Cienfuegos, pasos que se muestran en el Anexo 6
- Programas simuladores de instalaciones solares, los mismos permiten el diseño de instalaciones SFV, simular dichas instalaciones, además del cálculo de parámetros solares y sombras. Algunos de estos son Max-Design (SolarMax), Powador-PV-Pilot (KAKO New Energy), PVSyst (Instituto de Ciencias del Medioambiente de la Universidad de Génova), PVGIS (Comisión Europea), Solar-Pro (Laplace System Co) (Carratalá y Sales, 2017).
- Benito y Ruiz (2018) propone una ruta metodológica que consta de tres etapas y 12 pasos. Sus etapas son la recolección de información, realización de cálculos y matrices y análisis de resultados y recomendaciones. Ver Anexo 7

### 1.8 Situación energética en Cuba

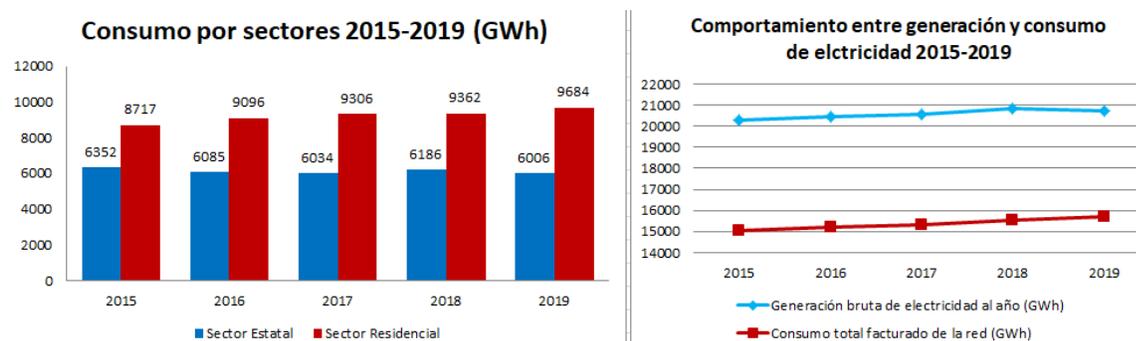
Cuba ha sido un gran importador de petróleo. Antes de 1958 el consumo era costeable, época en la que por una tonelada de azúcar se adquirían 7 toneladas de petróleo. En 1958, la generación eléctrica anual corresponde a valores de 1 760 GWh, en 1965 de 2 592 GWh, en 1970 de 3 609 GWh y en 1975 de 5 412 GWh (Rodríguez, 2002). En los años noventa, en el mercado mundial, por una tonelada de azúcar se adquiría algo más de 1,4 toneladas de petróleo (Laino, 2008). La producción nacional de petróleo aumenta posteriormente, lo que ha sido de gran ayuda; pero aun no es suficiente, debido a su gran peso y alto contenido de azufre, y el mismo es quemado en las termoeléctricas con la finalidad de generar electricidad (Stolik, 2019).

El país ha mantenido una producción bruta de electricidad con poco crecimiento durante los años 2015-2019 (ver Figura 1.12). Otro análisis realizado es el consumo por sectores en el país, donde destaca que el sector residencial presenta el mayor consumo en el país con un promedio de 9 233 GWh al año, mientras que el sector estatal solamente consume como promedio 6 132 GWh al año.



**Figura 1.12**

*Generación y consumo en Cuba 2015-2019.*

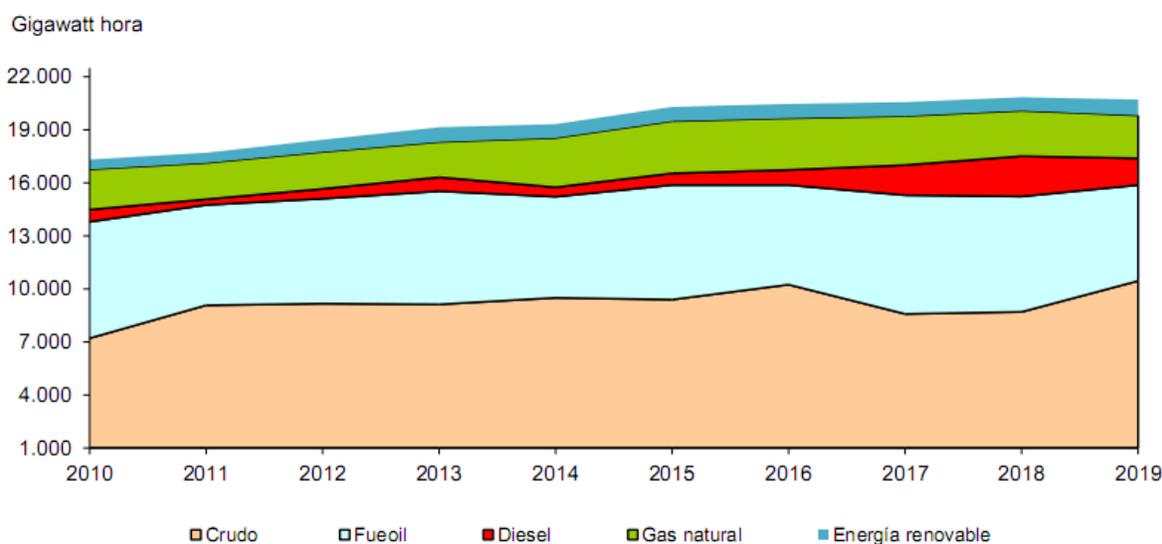


*Nota:* Elaboración propia a partir de (ONEI, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020).

Teniendo en cuenta que la generación eléctrica en Cuba en su mayoría es por combustibles fósiles, los que representan el 96% de la energía generada ( Ver Figuras 1.13 y 1.14), el costo de la misma es muy alto, pues depende del costo del barril de petróleo, que va en ascenso con cada año que pasa (Stolik, 2019) y (Espinosa, Céspedes, y Doval, 2020).

**Figura 1.13**

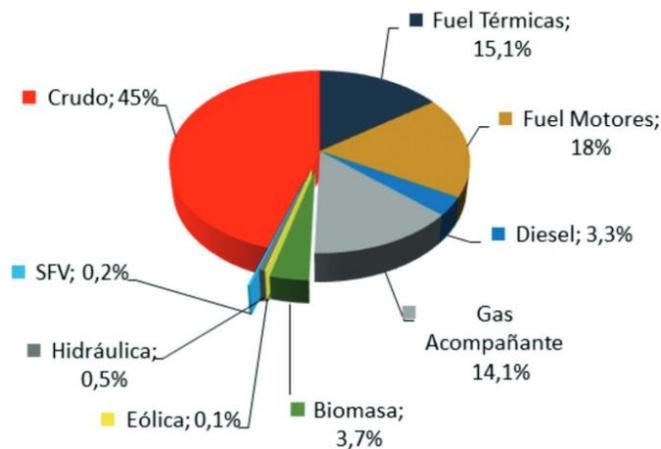
*Participación en la generación bruta de electricidad por tipo de combustible fósil y fuentes renovables de energía 2010-2019.*



*Nota:* Tomado de ONEI (2019).

**Figura 1.14**

*Matriz energética actual de Cuba.*



*Nota:* Tomado de MINEM (2019).

Esto demuestra la necesidad de diversificar la matriz energética del país en la búsqueda de una soberanía energética, donde se incluya la sustitución de los combustibles fósiles que originan un altísimo grado de subvenciones, a la vez que se torna un obstáculo para el aumento de la generación eléctrica en función del desarrollo económico y social del país (Stolik, 2019).

La demanda de energía en Cuba es creciente y, por lo tanto, resulta imprescindible la búsqueda de alternativas como el uso del gas y el biogás, o la utilización de fuentes renovables (FRE), para la sostenibilidad económica del país (Labrador, 2018).

La proyección estimada del país es que, para el 2030, la participación de las FRE en la matriz eléctrica sea del 24 %, y que estas puedan cubrir el 60 % del incremento del consumo, donde se valora el hecho de convertir los hogares e incluso las instituciones estatales, en objetivos de energía positiva (Labrador, 2018).

En Cuba se trabaja en diversos programas, los cuales se encuentran en diferentes niveles de preparación, inversión, gestión de financiamiento, negociación y ejecución, pero el más avanzado es el programa solar fotovoltaico. Hasta la fecha se ha logrado un crecimiento de la potencia instalada como se muestra en la Figura 1.15 y se cuenta con 156,6 MW pico en 67 parques solares fotovoltaicos, lo que representa el 22,4% de los 700 MW que se proyecta a



tener en el 2030 con esta tecnología, que además de traduce en ahorro de combustible, fundamentalmente diésel (Yilén, 2019).

**Figura 1.15**

*Potencia fotovoltaica instalada por provincias en MW.*



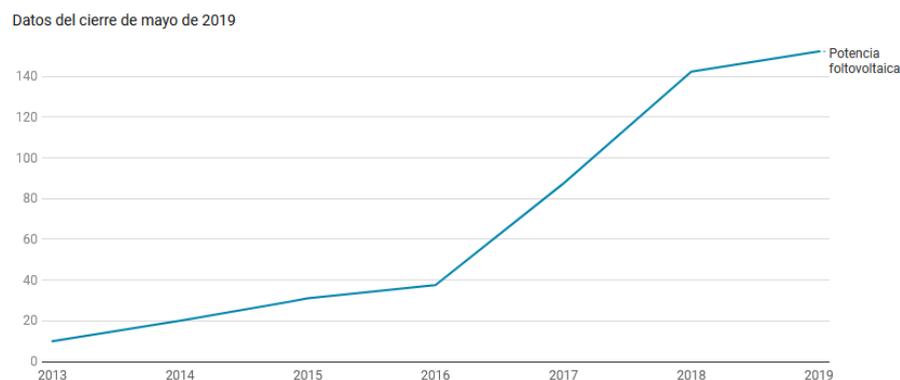
*Nota:* Tomado de Yilén (2019).

Como se puede observar en la mayor parte de las provincias del país se han construido parques fotovoltaicos, destacando Pinar del Río, Sancti Spíritus, Cienfuegos y Granma, quienes aportan así al sistema eléctrico nacional y la economía del país.

En el año 2018 se genera en Cuba 151 980 MWh, lo que equivale a un ahorro de 32 873 toneladas de combustible, actualmente la generación fotovoltaica aporta el 1,15 % del consumo total del país. En la siguiente Figura se observa la evolución de la potencia fotovoltaica instalada desde 2013-2019.

**Figura 1.16**

*Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en Cuba desde 2013-2019.*



*Nota:* Tomado de Cubahora (2019).



La potencia instalada ha ido en crecimiento acelerado desde 2013, donde solamente era de 10 MW, en año 2016 corresponde a valores de 37,5 MW, para luego en 2018 obtener 142,8 MW y 152,3 MW en 2019, lo que responde al plan estratégico del país en cuanto al crecimiento energético a partir del uso de FRE.

### **1.9 Experiencias en el uso de los sistemas fotovoltaicos operando de conjunto con el suministro de energía eléctrica del SEN**

En el país se han llevado a cabo varios proyectos con resultados positivos en la implementación de paneles solares en techo, a continuación, se muestran los principales resultados obtenidos de la bibliografía consultada:

- 2016- Parque fotovoltaico de la Ronera Central, Santo Domingo, Villa Clara. El sistema fotovoltaico se encuentra distribuido por los techos de cuatro naves con las que cuenta la entidad. La producción estimada del conjunto de todas las instalaciones será de 966 628,29 kWh/año, la potencia total del sistema es de 688 kWp. Se estima que en los periodos de producción de la Ronera Central “Agustín González Mena” el 40% de esta energía generada será consumida por la propia Ronera, cediendo el resto a la red. En los periodos en los que la Ronera no tenga producción toda la energía generada en la planta fotovoltaica será cedida a la red. (González, 2016)
- 2019-Desarrollo de Mariel (ZEDM): En las zonas de actividades logísticas de la Zona Especial de Desarrollo de Mariel (ZEDM): En ellas se han instalado 9 480 paneles fotovoltaicos, que tienen un potencial total de 2,4 MWh, lo cual permite satisfacer la demanda de sus operaciones y vender el excedente a la Unión Eléctrica Cubana. La base logística de TRD ha aportado al sistema eléctrico 1,1 GWh, mientras que CIMEX reporta una entrega de 900 MWh y Servicios Logísticos Mariel, genera como promedio mensual 138 MWh y su suministro a la red nacional supera los 2,5 GWh (Radiorebelde, 2019).

En la terminal intermodal de Angosta, los techos tienen instalados paneles solares con una potencia total de 125 kWh. Esta energía generada contribuye a cubrir una parte del consumo de electricidad en la edificación. El centro de Elaboración de Alimentos, cubre el 75% de su consumo diario de electricidad mediante la generación de energía solar. Los 2 520 paneles instalados sobre su cubierta de 280 Wp, tienen una capacidad máxima instalada de 705 kWp y generan como promedio diario 4 MWh (Radiorebelde, 2019).

- 2019- Hospital santiaguero: posee tecnología china, de inyección a red formada por 384 paneles con una potencia de 96 kilowatt (kw) pico, que ocupa una extensión de 600



metros cuadrados sobre los techos de la cisterna y la lavandería del centro asistencial, El sistema ha producido 55 MW, para un ahorro de 14 toneladas (t) de combustible, y se han dejado de emitir a la atmósfera 62 t de CO<sub>2</sub>(Granma, 2019)

- 2019- Almacenes Artemisa: El proyecto consiste en un sistema fotovoltaico sobre cubierta 1,25 MWp, dos sistemas de 605 kWp y un sistema de 700 kWp. Para la realización del sistema, también se proporcionaron cabinas auto portantes STC-box, conectores y materiales auxiliares. El sistema SCADA SunVigilant controla el sistema fotovoltaico, que alimenta la energía producida en exceso en comparación con las necesidades de los edificios en la red local (SYSTEMS, 2020)
- 2020-Implementación de un sistema fotovoltaico en el techo de la estación de bomberos de Artemisa: El proyecto incluye el estudio, ejecución e instalación de toda la planta en apenas mes y medio. Se trata de un sistema de distribución para un total de 67,2kWp que contiene 3 inversores, 240 celdas, 3 String-Box y equipos eléctricos auxiliares. Teniendo en cuenta el excelente resultado del proyecto, el cliente tiene intención de implementar el sistema, con el objetivo de acumular energía y ser independiente de la red eléctrica para sus necesidades energéticas (SYSTEMS, 2020).
- 2020- Sistema fotovoltaico de techo para torrefactora: Estudio de ingeniería, construcción y puesta en marcha de un sistema fotovoltaico (FV) en techo 168kWp que incluye 594 paneles solares 280kWp, 3 inversores 50kW, y paneles de baja tensión (BT) Euro-SDS 415 / 240V 60Hz, para el suministro de energía eléctrica a una gran planta tostadora de café que tiene una capacidad de producción de 200 kg por hora de café cubano.



### Conclusiones parciales del capítulo I

1. La capacidad acumulada de energía solar fotovoltaica instalada ha aumentado en un 23% de 633,7 GW a fines de 2019, frente a los 516,8 GW en 2018. Eso significa que la energía solar total ha crecido casi 400 veces desde principios de siglo.
2. El uso de SSFV no contamina el medioambiente y es accesible a todos ya que su fuente de energía proviene del Sol. Sus instalaciones pueden ser pequeñas o de gran tamaño, adecuadas para abastecer las necesidades domésticas de una vivienda urbana o aislada, como para plantas de generación a gran escala conectadas a la red.
3. En Cuba destaca el sector residencial con consumo eléctricos, con un promedio de 9 233 GWh al año, mientras que el sector estatal solamente consume como promedio 6 132 GWh al año.
4. La proyección estimada del país es que, para el 2030, la participación de las FRE en la matriz eléctrica sea del 24 %, y que estas puedan cubrir el 60 % del incremento del consumo, donde se valora el hecho de convertir los hogares e incluso las instituciones estatales, en objetivos de energía positiva.
5. Hasta la fecha se ha logrado un crecimiento de la potencia instalada y se cuenta con 156,6 MW pico en 67 parques solares fotovoltaicos, lo que representa el 22,4% de los 700 MW que se proyecta a tener en el 2030 con esta tecnología.



# CAPÍTULO II



## Capítulo II: Caracterización constructiva y energética de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”

### 2.1 Descripción de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”

La Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos” se encuentra localizada en la provincia de Cienfuegos en la Zona Industrial No. 3, Finca Carolina, al noroeste de la ciudad de Cienfuegos. Se ubica en el sector costero NW de la parte Norte de la Bahía de Cienfuegos, la cual se localiza en la zona sur-central de Cuba (específicamente entre los 22°4' y 22°11' LN y los 80°24' y 80°33' de LW, como se observa en la Figura 2.1). Sus instalaciones abarcan un área aproximada de 3 millones de m<sup>2</sup> (300 ha)

#### Figura 2.1

*Vista satelital de la Refinería Cienfuegos S.A.*



*Nota.* Elaboración propia

Diseñada para procesar 65 000 barriles/día de crudo “Soviet Export Blend”, fue construida a partir de 1977 con la participación de la desaparecida Unión Soviética por un período de 13 años. Desde su arrancada en marzo de 1991 hasta su paralización en enero de 1995 la planta procesó alrededor de 1,3 millones de toneladas de diferentes tipos de crudo, y a partir de 1995 hasta el momento de su reinauguración, la empresa prestó servicios como comercializadora de combustibles.



Después de un largo período de inactividad, el 10 de abril del 2006 se constituye la empresa PDV-CUPET, S.A. refinería Camilo Cienfuegos. Contrato capital de los accionistas: 51 % Comercial CUPET S.A. y 49 % PDVSA Cuba S.A.

### **Objeto Social**

El objeto social principal de la empresa es procesar y comercializar petróleo crudo y sus derivados.

Adicionalmente Refinería Cienfuegos S.A. podrá desarrollar en su totalidad proyectos de inversión de la industria petrolera primaria y de refinación en la República de Cuba o en el extranjero mediante la creación de sociedades mixtas, sucursales, representaciones y filiales, de forma directa o indirecta en asociación con sociedades extranjeras.

Refinería Cienfuegos S.A. tendrá todas las facultades que la ley cubana le conceda y podrá desarrollar cualquier actividad que sea complemento o consecuencia de las antes mencionadas, o que con ellas se relacionen de modo directo o indirecto, de entre las que, sin carácter limitativo, se enumeran las siguientes:

- 1) Refinación de petróleo crudo o crudo mejorado;
- 2) Diseño, ingeniería básica y de detalle, procuración, construcción, montaje, ajuste y puesta en explotación, asistencia técnica en todas las modalidades;
- 3) Preparación y calificación de su personal o del personal que le preste servicios directamente.
- 4) Operación, mantenimiento y reparación de plantas industriales;
- 5) Importación directa de materiales, equipos, sistemas, maquinarias, herramientas, insumos, medios tecnológicos de cualquier clase, servicios de asistencia técnica o servicios técnicos, que, sin limitar, se requieran para el desarrollo de su objeto social;
- 6) Importación directa de petróleo crudo, crudo mejorado y sus derivados;
- 7) Comercializar y/o exportar directamente las producciones terminadas del proceso de refinación;
- 8) Almacenamiento de petróleo crudo, crudo mejorado y de productos terminados de la refinación sean propios o de terceros;
- 9) Arrendar instalaciones, espacios y almacenes a terceros;
- 10) Concertar y participar en contratos de financiamientos provenientes de instituciones financieras bancarias y no bancarias para la ejecución de su objeto social.



- 11) Suscribir contratos para recibir u otorgar financiamientos para el desarrollo de su objeto social;
- 12) Contratación de servicios auxiliares, de investigación y desarrollo, y de prestación de todo tipo de servicios de asesoría, consultoría y proyectos a las sucursales, representaciones y filiales creadas por ella, así como a las empresas estatales y no estatales vinculadas a los proyectos de refinación de la industria del petróleo, mediante la utilización de las diferentes variantes de contratación de plantas completas, con o sin la modalidad llave en mano; construcción, posesión, operación y transferencia, servicios de ingeniería, procuración, construcción y administración, compraventas puntuales u otras modalidades, según se requieran para la ejecución del objeto social.
- 13) Contratación de personal para su utilización en las instalaciones propias y en actividades de la industria de refinación del petróleo, designación y remoción del personal que necesite para el cumplimiento de sus actividades.
- 14) Promoción, fomento de inversiones y captación de capitales para el desarrollo de las actividades para las cuales ha sido constituida.
- 15) Realización de los actos suficientes y necesarios para adquirir, vender, construir, comprar, usufructuar, traspasar, pignorar, enajenar, ceder, permutar, y disponer por cualquier medio reconocido en derecho, de los bienes muebles, inmuebles y activos intangibles que la ley y los estatutos le permitan.
- 16) Ejecución de todas aquellas operaciones comerciales o de disposición que fueren necesarias, para viabilizar, apoyar y desarrollar el objeto de la sociedad y en general para realizar cualquier otro negocio de lícito comercio relacionado con los proyectos de refinación de la industria del petróleo, en Cuba y en el extranjero.

### **Misión**

Refinar y comercializar hidrocarburos de forma eficiente y segura, garantizando se satisfagan los requisitos del cliente, con un capital humano competente, motivado y comprometido; con alta responsabilidad social y ambiental e introducción de mejoras tecnológicas.

### **Visión**

Ser una empresa reconocida nacionalmente en el campo de la refinación de hidrocarburos, con márgenes de refinación competitivos, reconocida por la elevada preparación de su capital humano, su alta responsabilidad social, ambiental y su contribución al desarrollo sostenible del país.



### Descripción del proceso.

Las principales secciones de la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos se enuncian a continuación y se muestra su interrelación en el Anexo 8:

- Sección 100 (Destilación atmosférica)
- Sección 200 (Reformación catalítica)
- Sección 300 (Hidrofinación de diésel)
- Sección 400 (Fraccionamiento de gases)
- Sección 600 (Hornos y Caldera recuperadora)
- Planta MEROX (Tratamiento de turbo)
- Sección de MCP (movimiento de crudos y productos)
- Sección de Procesos auxiliares
- Sección de PTR (Planta de tratamiento de residuales)
- Muelle

### Sección 100: Destilación atmosférica

El crudo que se encuentra almacenado en MCP, se bombea hasta la Sección 100 para ser sometido al proceso de desalación eléctrica y su fraccionamiento en torres de destilación; de donde se obtienen las siguientes fracciones o productos:

- PIE – 70 °C inestable: inyecta a la Sección 400.
- Fracción 70 – 180 °C: inyecta a la Planta de Reformación Catalítica.
- Fracción de Turbo combustible: como producto intermedio, que será sometido al proceso MEROX, para eliminar compuestos de azufre.
- Fracción de Diésel: sale como producto terminado.
- Fuel – oíl: se extrae como producto terminado.

### Sección 200: Reformación catalítica

Proveniente de la sección 100, la fracción 70-180 °C es alimentada a la etapa de hidrofinación de nafta primero y reformación de nafta después con el objetivo de obtener gasolina de 83, 90 y 94 octanos para la comercialización, además como producto de tope de la torre T-202 se obtiene GLP (gas licuado de petróleo).



### **Sección 300:(Hidrofinación de diésel)**

Proveniente de la sección 100, la fracción 180-350 °C es alimentada a la hidrofinadora de diésel, torres T-301 y T-302 donde ocurre primero un proceso de absorción con una solución de amina y después un proceso de desorción para eliminar del diésel el sulfuro de hidrógeno. Requisito indispensable para la comercialización del producto diésel.

### **Sección 400:(Fraccionamiento de gases)**

Proveniente de la sección 100, la fracción Pie-70 °C inestable y la nafta liviana inestable de la sección 200 son alimentadas a la torre T-401 con el objetivo de fraccionar los gases para obtener GLP. Por el tope de la torre salen los gases hasta los enfriadores por aire y de allí al tambor de reflujo D-401, desde este tambor se alimenta el reflujo para mantener la temperatura del tope y el exceso se envía como GLP al patio de tanques.

### **Sección 600:(Caldera recuperadora)**

Esta sección tiene como objetivo producir vapor de agua para el proceso de destilación, aprovechando el calor residual de los gases de escape de los hornos del proceso. Para ello requiere del consumo de agua tratada proveniente de la planta de tratamiento de agua en la sección de generación de vapor o procesos auxiliares.

### **Planta MEROX**

En esta planta es procesado el keroseno para la producción de combustible para aviación.

### **Sección de PTR:(Planta de Tratamiento de Residuales)**

En esta sección se recibe toda el agua que entra a la refinería, así como la que recircula por los dos sistemas de enfriamiento. Además, es la encargada de atender y tratar todos los residuales generados en los diferentes procesos de la refinería.

### **Sección de procesos auxiliares**

**Casa de Calderas:** Diseñada para producir 75 ton/h de vapor sobrecalentado a una presión de 13 kgf/cm<sup>2</sup> y temperatura de 225 °C. Posee actualmente 3 calderas de tubos de agua, con capacidad nominal de 25 ton/h.

**Energía Eléctrica:** Cuenta con un suministro de alta fiabilidad, alimentándose desde la termoeléctrica “Carlos Manuel de Céspedes” con una línea de 110 kV y otra desde la



subestación 220/110 kV de Cienfuegos, estas son independientes y poseen dos transformadores de 25 MVA 110/6 kV.

**Abastecimiento de Agua:** Cuenta con capacidad para almacenar 50 000 m<sup>3</sup> de agua dulce. El agua llega a la refinería bombeada desde el acueducto de Abreus, por una conductora de polietileno de alta densidad de 800 mm de diámetro y longitud 9 000 m, conectada a otra conductora del mismo material de 355 mm de diámetro y 1 920 m de longitud.

**Sistema Contra Incendios:** Está dotado con una red de espuma contra incendios, a la que pueden acoplarse los carros cisterna para combatir el fuego en tanques y estaciones de bombeo; además el muelle cuenta con un sistema centralizado de espuma y con una estación de preparación y bombeo. Existe también una red de agua contra incendios que opera a 14 kgf/cm<sup>2</sup> y llega a todas las áreas con necesidad de protección.

### **Muelle**

Cuenta con 3 muelles en total, de ellos 2 permiten recibir buques de hasta 226 m de eslora y 52 000 toneladas de peso muerto (DWT). El Muelle 1 tiene un calado de 11,7m, con 4 brazos de carga y descarga, con capacidad de 1 200 m<sup>3</sup>/h cada uno, destinados 2 de ellos para productos oscuros y 2 para productos claros. En ambos muelles existen facilidades para la carga y descarga de gas licuado del petróleo (GLP) por manguera. Existe además un muelle auxiliar para la carga de productos por patanas, el cual tiene un calado de 4,0m.

### **Movimiento de crudos y productos**

La capacidad total de almacenamiento es de 680 000 m<sup>3</sup>. Existen en esta área un total de 5 estaciones de bombeo para el trasiego y distribución de combustibles, divididas en 2 estaciones para productos terminados, 2 estaciones para productos intermedios y 1 estación para bombeo de crudo.

La Refinería se encuentra unida con la Central Termoeléctrica de Cienfuegos por un oleoducto de 11,3 km de largo y 8 pulgadas de diámetro para el bombeo de Fuel oil. Se puede entregar producto terminado tanto por ferrocarril como por camiones. Entre los productos terminados se cuenta con una capacidad nominal de almacenamiento de GLP ascendente a 7 800 m<sup>3</sup>, compuesta por 10 balas de GLP de 200 m<sup>3</sup> cada una, 5 balas de propano de 200 m<sup>3</sup> cada una, 4 esferas de GLP de 600 m<sup>3</sup> cada una y 4 esferas de butano de 600m<sup>3</sup> cada una.



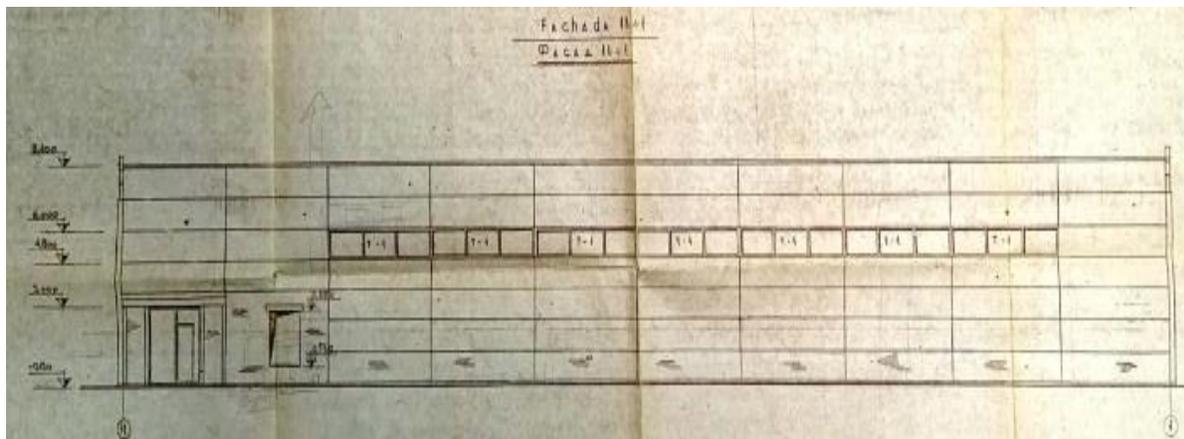
## 2.1 Caracterización constructiva

La Construcción corresponde al tipo "Girón" muy común en la zona central y oriental del país, este tipo de edificación está compuesta esencialmente por una estructura de esqueleto de hormigón con paredes del mismo material. Las estructuras de piso y cubierta están constituidas por losas doble T apoyadas sobre vigas. Estas losas están diseñadas para resistir su peso propio más una sobrecarga de relleno y piso de  $200 \text{ kg/m}^2$  y la carga de utilización, existen losas para cargas de utilización de  $300$ ,  $400$  y  $600 \text{ kg/m}^2$  (I. Marin, Whitmarsh, Calderón, Taboas, y Gutierrez, 1986).

Además, se conoce que la empresa Refinería de Cienfuegos cuenta con un sistema constructivo de naves prefabricadas de hormigón, con intercolumnios de  $6 \text{ m}$ ; paredes exteriores de losas spiroll ET-12-11R y paneles ventanas ET-12-12R, muros interiores de bloques de hormigón y cubierta formada por vigas ET-03-03 RA de  $18\ 000 \text{ mm}$  de longitud y losas de cubierta Et-01-02R de dimensiones  $6\ 000 \times 1\ 500 \text{ mm}$ . En la Figura 2.2 se muestra el plano de unas de las naves, específicamente Sección 800 y en el Anexo 9 se muestra la vista frontal y lateral.

### Figura 2.2

*Plano de la S-800(Panel de Control de la combinada).*



Nota: Tomado de la Refinería Cienfuegos S.A.

## 2.3 Configuración del sistema eléctrico de Refinería Cienfuegos S.A

La subestación principal, tiene la función de suministrar energía eléctrica a un grupo de cargas y de distribuir a un grupo de subestaciones. Está alimentada por dos líneas de  $110 \text{ kV}$ : una línea proviene de la Subestación Cantarrana  $220/110\text{kV}$  y la otra directamente de la Central Termoeléctrica "Carlos Manuel de Céspedes". Esta subestación posee dos transformadores de



potencia de 110/6,3/6,3 kV, inmersos en aceite con una capacidad de 20/25 MVA a 65°C con enfriamiento por aire natural (AN) y forzado (AF) y operan con cambiador automático de tomas bajo carga en el lado de alta tensión. Los transformadores poseen dos devanados por secundario quedando esta subestación principal con cuatro barras a 6,3 kV. Un diagrama unifilar se muestra en el anexo 10 y en el anexo 11 esquema monolinial general.

La configuración seleccionada para la distribución eléctrica es del tipo radial con secundario selectivo. Esta configuración puede ser encontrada en las subestaciones de distribución de 6 kV, en las subestaciones reductoras de 6 kV a 0,48 kV y en los Centros de Control de Motores (anexo 12).

## 2.2 Caracterización energética

### 2.2.1 Censo de carga por áreas

Para la realización del censo de carga en la empresa, se tomó las lecturas de consumo de energía de las diferentes áreas. El propósito principal de este censo de cargas es conocer la demanda eléctrica total de todas las áreas pertenecientes a la empresa y lo que representan en porcentos de energía eléctrica para un previo análisis de facturación eléctrica de la empresa.

A partir de los datos brindados por la empresa de los consumos de energía por áreas en los años 2018 y 2019, se desarrollan las tablas 2.1 y gráficos de análisis correspondientes a cada año.

Los principales consumidores son la planta de destilación atmosférica con un consumo de electricidad en el 2018 de 16 438 MWh/año, la planta de reformación catalítica 16 168 MWh/año y planta de finales ligeros 6 767 MWh/año y representando entre estas tres áreas al 59,62% del consumo de electricidad de la empresa y en el 2019 representa el 58,71%.

**Tabla 2.1**

*Consumo de energía por áreas en el año 2018 y 2019.*

Consumo en MWh anual por Áreas				
Nombre	Total 2018	%	Total 2019	%
Planta Destilación Atmosférica.	16 438,18	24,89	13 277,41	22,59
Planta Reformación Catalítica.	16 168,01	24,48	15 309,80	26,04
Planta Finales Ligeros	6 768,98	10,25	5 925,94	10,08
Tit. 122 Abastecimiento de Agua	6 767,45	10,25	5 495,30	9,35



Movimiento de Crudo y Producto	4 327,53	6,55	4 374,15	7,44
Tit. 120 Tratamiento de Residuales y Recuperación de Petróleo.	3 391,79	5,14	2 914,99	4,96
Hidrofinación Diesel Secc. 300	2 968,52	4,50	2 717,78	4,62
Tit. 52 Vapor	1 831,39	2,77	1 678,99	2,86
Planta Merox	1 826,68	2,77	1 510,69	2,57
Tit. 85 Aire Comprimido	1 531,85	2,32	1 661,25	2,83
Cocina Comedor	1 313,21	1,99	1 262,30	2,15
Dir.Mtto	880,97	1,33	850,97	1,45
Puesto Contra Incendios	573,19	0,87	599,02	1,02
Planta Amina	351,64	0,53	357,96	0,61
Servicios Portuarios	272,93	0,41	273,67	0,47
Gas Licuado	241,49	0,37	229,90	0,39
Laboratorio	180,69	0,27	158,24	0,27
Aulas de Capacitación	19,89	0,03	18,16	0,03
Gerencia de Compras	27,22	0,04	28,93	0,05
Gerencia AIT	26,05	0,04	25,62	0,04
Gerencia de Servicios de Ingeniería	25,13	0,04	25,69	0,04
Dir. SHA	17,37	0,03	17,08	0,03
Dir. Técnica	16,36	0,02	15,88	0,03
Subestación Eléctrica	14,65	0,02	14,91	0,03
Gerencia General	8,68	0,01	8,54	0,01
Gerencia Contabilidad	8,68	0,01	8,54	0,01
Gerencia de Capital Humano	8,68	0,01	8,54	0,01
Dirección MCP	8,68	0,01	8,54	0,01
Dir. Operaciones	3,47	0,01	3,42	0,01
<b>Total</b>	<b>66 019,38</b>	<b>99,97</b>	<b>58 782,22</b>	<b>100,00</b>

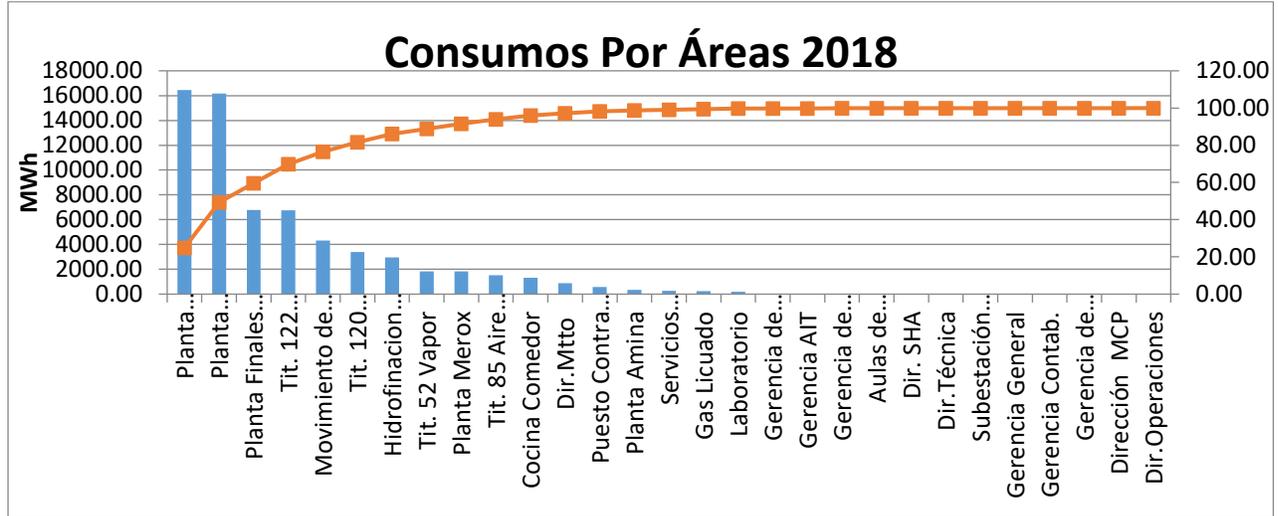
Nota. Elaboración propia.



Teniendo en cuenta el consumo energético de cada una de las áreas se realiza un Gráfico de Pareto para determinar cuáles son las que representan el mayor consumo energético en año 2018 y 2019. A continuación, en las Figuras 2.3 y 2.4 se puede observar dicho análisis.

**Figura 2.3**

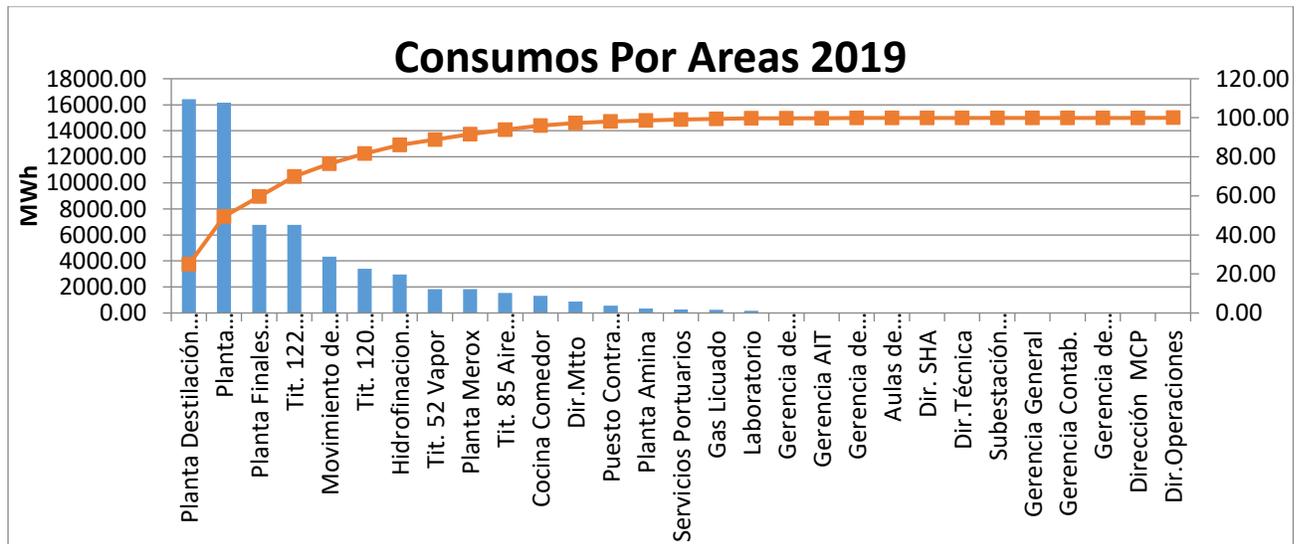
*Gráfico de Pareto de consumo de energía por áreas en el 2018.*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 2.4**

*Gráfico de Pareto de consumo de energía por áreas en el 2019.*



Nota. Elaboración propia.



Como se puede observar en el gráfico anterior las áreas de más alto consumo y que representan más del 50% del consumo en la refinería son:

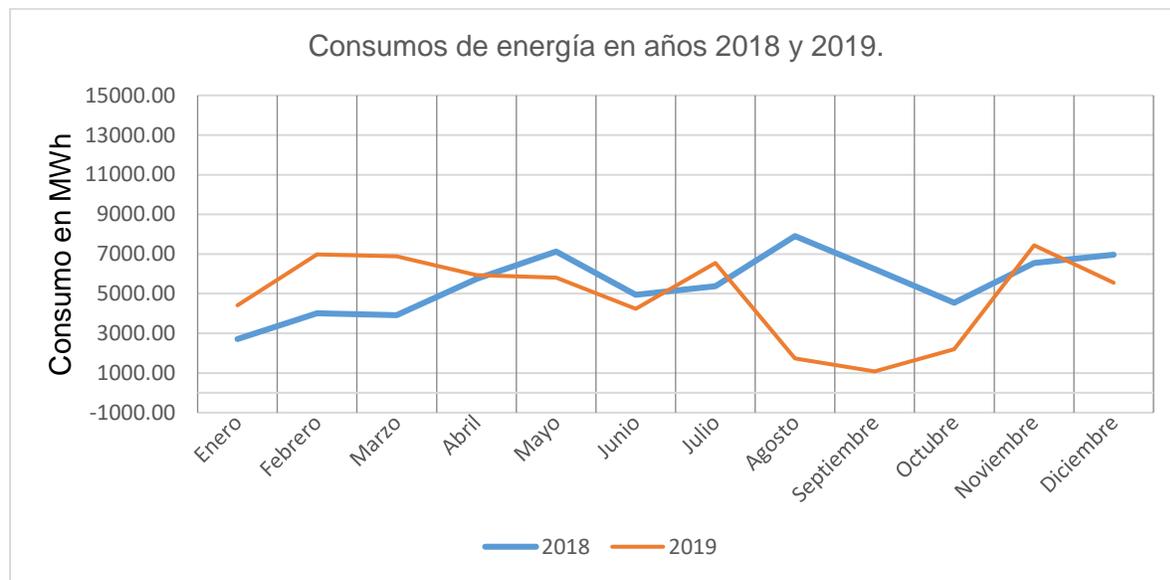
- Planta Destilación Atmosférica, con un 26,04% y 24,89% en cada año respectivamente.
- Planta Reformación Catalítica, con un 22,59% y 24,48% en cada año respectivamente.
- Planta Finales Ligeros, con un 10,08 % y 10,25 % en cada año respectivamente.

### 2.2.2 Control energético

El control energético se realiza sobre la base del consumo de la energía eléctrica, recurso que se quiere sustituir por una fuente renovable. En la Figura 2.5 se muestra el consumo de electricidad por meses en los años 2018 y 2019 de la Refinería Cienfuegos, donde se muestra que el rango de consumo se encuentra entre 1 000 - 7 900 MWh.

**Figura 2.5**

*Consumo de energía en los años 2018 y 2019.*



*Nota.* Elaboración propia.

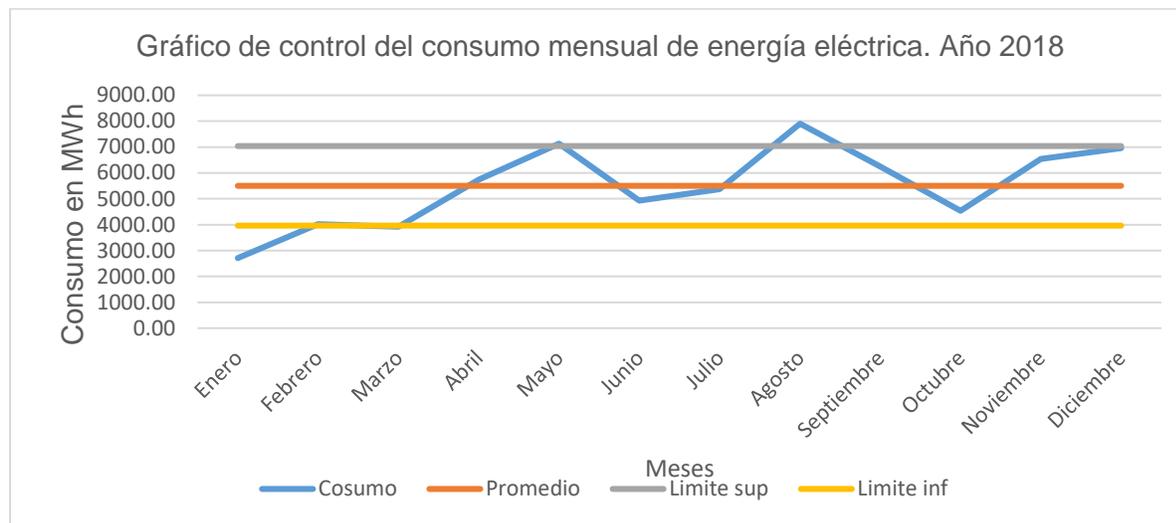
Los mayores consumos se pueden observar en el mes agosto 2018 con 7 903 MWh/mes y 7 439 MWh/mes en noviembre de 2019. Mientras que los meses de agosto a octubre de 2019 la refinería presenta los menores consumos eléctricos, pues corresponde a meses donde no se trabajó por falta de materia prima.

Otro análisis realizado son los gráficos de control (Ver Figuras 2.6, 2.7) en cada año en los diferentes casos de estudio con el objetivo de conocer de identificar el comportamiento del consumo y si el mismo se encuentra dentro de los límites de control.



**Figura 2.6**

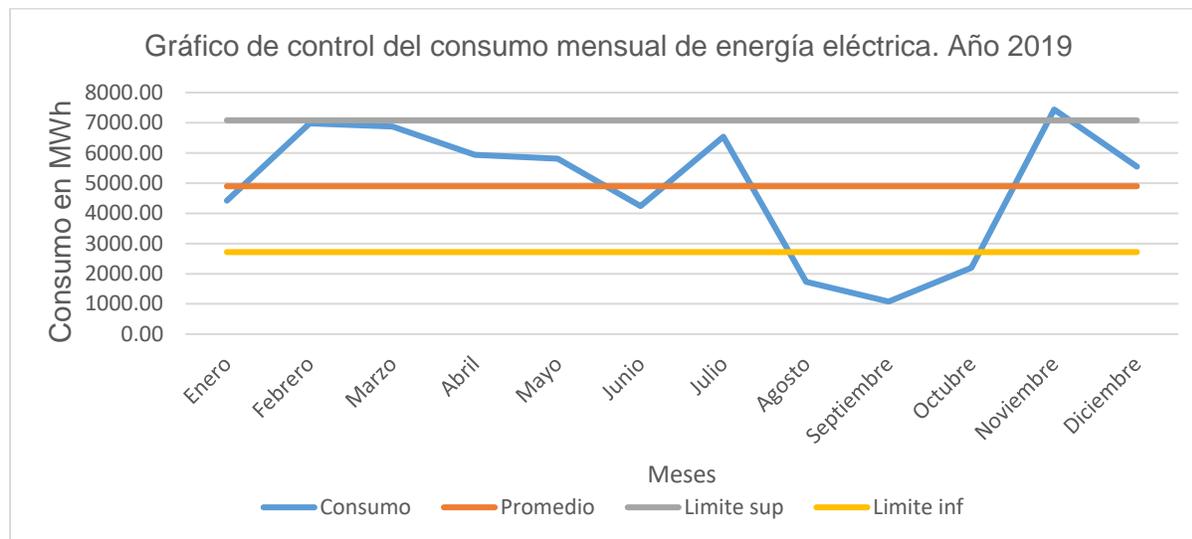
*Gráfico de control del consumo mensual de energía eléctrica. Año 2018.*



*Nota. Elaboración propia.*

**Figura 2.7**

*Gráfico de control del consumo mensual de energía eléctrica. Año 2019.*



*Nota. Elaboración propia.*

En ambos gráficos se aprecia que existen puntos fuera del rango de control debido a no tener materia prima para la operación de las plantas. Este elemento se puede apreciar en el consumo de energía eléctrica en la empresa tanto en el año 2018 y 2019, en los meses de enero, febrero y marzo del 2018 la refinería no trabajo todos días y en los meses de agosto, septiembre y octubre del 2019 no se refino.



### Conclusiones parciales del capítulo II

1. Las edificaciones que radican en la Refinería de Cienfuegos se caracterizan por ser muy resistente y presenta una carga de utilización sobre su techo de 300 Kg/m<sup>2</sup>.
2. La Refinería de Cienfuegos tiene como los mayores consumidores las plantas de procesos con un consumo de energía eléctrica que representa un 59,62 % en el 2018 y para el año 2019 un 58,71 %.
3. El equipamiento eléctrico de la Refinería de Cienfuegos cuenta con la configuración de distribución eléctrica radial con secundario selectivo presentando este un sistema redundante para casos de fallos eléctricos.
4. Los mayores consumos se pueden observar en el mes agosto 2018 con 7 903 MWh/mes y 7 439 MWh/mes en noviembre de 2019. Mientras que los meses de agosto a octubre de 2019 la refinería presenta los menos consumos eléctricos, pues corresponde a meses donde no se trabajó por falta de materia prima.



# CAPÍTULO III



## Capítulo III. Desarrollo del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico para la generación y suministro de energía eléctrica a la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”

### 3.1 Localización y orientación de las naves incluidas en el estudio

La instalación de los paneles solares se realizará sobre las cubiertas de las naves de la empresa. En la figura 3.1, 3.2 y 3.3 se muestra una vista superior de la Empresa Refinería de Cienfuegos SA con la distribución e identificación de las edificaciones en el área que abarca la empresa. En esta figura se han numerado cada una de las edificaciones para su identificación.

#### Figura 3.1

*Vista satelital de la empresa Refinería de Cienfuegos SA.*



*Nota:* Tomado de Google Maps



**Figura 3.2**

*Vista satelital de la empresa Refinería de Cienfuegos SA.*



*Nota: Tomado de Google Maps*

**Figura 3.3**

*Vista satelital de la empresa Refinería de Cienfuegos SA.*



*Nota: Tomado de Google Maps*



En la Tabla 3.1 se presenta el levantamiento de cada una de las cubiertas y la denominación dentro de la entidad, correspondiente a las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3.

**Tabla 3.1**

*Descripción y dimensiones de las Edificaciones de la Empresa Refinería de Cienfuegos SA.*

N° de Naves	NAVE	Largo (m)	Ancho (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1	Puesto Contra Incendios	78	15	1 170
2	Edificio de la dirección técnica	72	18	1 296
3	Almacén	72	36	2 592
4	Comercializadora	66	12	792
5	Panel de control del T-01	60	24	1 440
6	Oficinas T-64	54	15	810
7	Subestación principal	54	18	972
8	Sala de compresores de aire	48	18	864
9	Panel de PTR	42	18	756
10	Panel de MCP	42	18	756
11	Subestación de la S-400	36	18	648
12	Subestación eléctrica de los compresores	36	24	864
13	Panel de planta amina	36	12	432
14	Subestación de la S-100	30	18	540
15	Cuarto de equipos de contraincendios	30	12	360
16	Edificio de la maqueta	30	12	360
17	Taquillas de PTR	30	12	360
18	Subestación del muelle	30	12	360
19	Sala de compresores del T-17	24	6	144
20	Taller del personal de servicio	24	12	288
21	Almacén de PTR	24	12	288
22	Subestación de MCP	24	12	288
23	Subestación de la S-200	18	12	216
24	Taquillas del T-01	18	12	216
25	Subestación eléctrica de PTR	18	12	216
26	Panel del T-122	18	12	216
<b>Total</b>				<b>17 224</b>

Nota. Elaboración propia.



### 3.2 Cálculos asociados al diseño del sistema fotovoltaico

En el presente epígrafe se describen un grupo de metodologías o métodos para el cálculo de SSFV. Los mismos presentan el mismo objetivo, son muy similares y coherentes entre ellas, por lo que para el presente estudio se integran los principales pasos de las mismas, quedando estructurado como se muestra en el siguiente epígrafe.

#### 3.2.1 Metodología integradora para el cálculo del Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red

Para el cálculo, diseño e instalación del sistema fotovoltaico se requiere seguir una serie de pasos, los cuales se muestran a continuación:

##### 1. Selección del módulo fotovoltaico

Para la selección del módulo se deben tener en cuenta los aspectos mostrados en la Tabla 3.2, en busca del módulo más eficiente entre los disponibles en el mercado.

**Tabla 3.2**  
*Datos de Ficha Técnica de un módulo de un SSFV.*

Especificaciones técnicas	Características eléctricas	Límites	Parámetros térmicos
Celda	Modelo	Temperatura de operación	Coeficiente de temperatura (Isc)
No. de celdas y conexiones	Voltaje a circuito abierto (V <sup>oc</sup> ) [V]	Voltaje máximo del sistema	Coeficiente de temperatura (V <sup>oc</sup> )
Dimensiones del módulo	Voltaje en el punto de máxima potencia (V <sub>mp</sub> ) [V]	Valor máximo del fusible de la serie	Coeficiente de temperatura (P <sub>mp</sub> )
Cubierta frontal	Corriente de corto circuito (I <sub>sc</sub> ) [A]		
Material del marco	Corriente en el punto de máxima potencia (I <sub>mp</sub> ) [A]		
Peso	Potencia máxima a STC (P <sub>m</sub> ) [Wp]		
	Tolerancia [%]		
	STC: 1 000 W/m <sup>2</sup> , 25°C, AM 1,5		

*Nota.* Elaboración propia.



## 2. Determinación de la inclinación y orientación de los paneles

El mayor índice de radiación y, por tanto, el mayor rendimiento de un panel solar fotovoltaico se alcanza cuando los rayos solares inciden perpendiculares a su superficie. La trayectoria que describe el sol es elíptica, el ángulo de incidencia varía con las horas y con la estación del año (Guerrero, 2019).

De manera que decidir la orientación correcta de los paneles es de vital importancia si se desea adquirir mayor cantidad de radiación solar posible. Esta orientación puede ser impuesta por el emplazamiento donde se propone instalar los paneles, como es el caso de tejados con cierta orientación, o libre si la ubicación lo permite, como extensiones de terreno llanas. En este caso los paneles solares estarán orientados directamente hacia el sur.

Otro punto importante para el diseño de las instalaciones fotovoltaicas, es la inclinación que deben tener los paneles para la captar la mayor cantidad de radiación solar. La inclinación de los módulos solares se define mediante el ángulo de inclinación  $\beta$ , que es el ángulo que forma la superficie de los paneles con el plano horizontal.

Se recomienda un ángulo de inclinación igual a la latitud del sitio de instalación, ello permite la incidencia perpendicular del rayo solar sobre la superficie del panel, lo que favorece la máxima captación de energía durante todo el año. En la Tabla 3.3 se muestran los resultados del estudio realizado sobre el impacto en la captación de la radiación solar y conversión energética, según diferentes grados de la inclinación de los paneles para la latitud de la provincia de Cienfuegos (M. Rodríguez et al., 2012).

**Tabla 3.3**

*Resultados sobre la captación y conversión energéticas de las celdas fotovoltaicas a diferentes ángulos de inclinación.*

Grados de inclinación de los paneles							
5°	10°	15°	22°	25°	30°	35°	40°
Pérdidas en la captación de energía, Wh/m <sup>2</sup>			Inclinación adecuada para la provincia de Cienfuegos	Pérdidas en la captación de energía, Wh/m <sup>2</sup>			
-176	-59	-18		-23	-63	-103	-143
Pérdidas de conversión energética, kWh/kWp				Pérdidas de conversión energética, kWh/kWp			
-32.4	-11.4	-5		-6.4	-17.4	-28.5	-39.6

Nota: Tomado de M. Rodríguez et al. (2012).



### 3. Calculo de la distancia mínima entre paneles

Se calcula la distancia mínima de separación entre las distintas filas de módulos solares que componen el generador fotovoltaico para que no se produzcan sombras de unos módulos sobre otros. En la Tabla 3.4 se muestran todas las medidas que se deben tener en cuenta según H. López, Puente, Bon, y Moller (2014):

**Tabla 3.4**  
*Variables para el cálculo de la distancia mínima.*

	$d_{min}$ :	Distancia mínima entre aristas de paneles para evitar sombras, (m).
	A:	Ancho del panel (columna de módulos en paralelo), (m).
	h:	Componente de la altura del panel, (m).
	a:	Distancia de la arista superior de un panel a la arista inferior del otro respecto a la horizontal, (m).
	b:	Distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo respecto a la horizontal, (m).
	$\beta$ :	Grado de inclinación del panel respecto a la horizontal, ( $^{\circ}$ ). $\theta$ : Ángulo de la sombra respecto a la horizontal, ( $^{\circ}$ ).

*Nota.* Elaboración propia.

La Tabla 3.5 a continuación muestra las ecuaciones principales para los cálculos que deben ser efectuados.

**Tabla 3.5**  
*Ecuaciones de cálculo para obtener la distancia requerida entre paneles.*

Cálculo de la componente de la altura (h) del panel (m)	$h = L * \text{sen } \beta$
Cálculo de la distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo medido horizontalmente. (b) (m).	$b = L * \text{cos } \beta$
Cálculo distancia entre borde superior panel anterior y borde inferior panel posterior (a) (m)	$a = h / \text{tg. } \theta$
Cálculo del ángulo de incidencia del rayo solar respecto a tierra ( $\theta$ ) (Grados)	$\theta = 180 - 90 - \beta$
Cálculo de la distancia mínima entre aristas de paneles para evitar sombras ( $d_{min}$ ) (m)	$d_{min} = a + b$

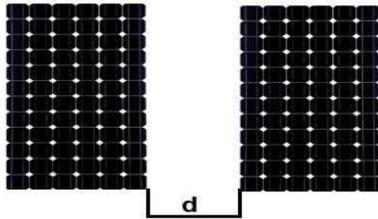
*Nota.* Elaboración propia.



En la Figura 3.4 a continuación se muestra la distancia que debe existir entre paneles y la posición de los mismos

**Figura 3.4**

*Distancia mínima entre paneles en la fila.*



*Nota.* Elaboración propia.

#### 4. Cálculo del número máximo teórico de paneles

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

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

Conocidas las dimensiones de los paneles solares y el área máxima a ocupar, en cada fila se coloca el número de paneles determinados por la siguiente expresión:

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

#### 5, 6, 7. Cálculo de la energía generada, Cálculo de la potencia instalada y determinación de la disposición de potencia /área

Los pasos 5, 6 y 7 de la metodología se muestran en la Tabla 3.6 para una mejor comprensión de los mismos.

**Tabla 3.6**

*Ecuaciones para el cálculo de Energía Generada, Cálculo de la potencia instalada y determinación de la disposición de potencia /área.*

Energía Generada	
$E_u = 0,654 * HSP * PN * N$ <p>0,654 es el factor de funcionamiento a tomar, este tiene en consideración la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, la eficiencia de los</p>	<p>PN: Potencia pico del panel (kWp.)                  N: Número de paneles                  HSP: Irradiación solar incidente sobre los paneles (5,5 kWh/m<sup>2</sup>*día.)</p>



inversores y pérdidas de cableado	
Potencia Instalada	
$P_{inst} = N * \left( \frac{PN}{1000} \right) kW$	PN: Potencia pico del panel (kWp.) N: Número de paneles
Disposición de potencia /área	
$Disp = \frac{At}{P_{inst}} m^2/kW$	Pinst: Potencia instalada(m <sup>2</sup> /kW) At: Área (m <sup>2</sup> )

Nota. Elaboración propia.

### 8. Selección del inversor

Para la selección del inversor se debe tener en cuenta sus características principales:

- Voltaje de alimentación o de entrada.
- Potencia máxima de salida.
- Eficiencia.

El voltaje de operación o de entrada del inversor debe seleccionarse con base en el voltaje de suministro de panel solar fotovoltaico. Además de esto, los inversores deben actuar como elemento seleccionador del punto de potencia máxima del panel o paneles solares (Ortiz, 2013).

### 9. Determinación del número de inversores

La cantidad de inversores que hacen falta para la instalación se determina mediante la ecuación (Ochoa, 2018):

$$\text{Número de inversores} = \frac{PI(kWp)}{P_{inversor}}$$

PI(kWp): Potencia instalada

P<sub>inversor</sub>: Potencia del inversor.

### 10. Simulación con el PVsyst

Una forma de verificación de los cálculos desarrollados será la realización de la simulación en el software "PVsyst" versión 7.1 desarrollado en la Universidad de Ginebra. Este es un potente programa informático de uso gratuito, que permite realizar el diseño, simulación y análisis de datos de una instalación fotovoltaica; posee una amplia base de datos de los principales componentes usados en una instalación del mercado internacional y permite añadir nuevos. Entre las ventajas con las que cuenta el programa hay que destacar que posee una base meteorológica que permite dimensionar la instalación en función de su ubicación, calcular la inclinación y orientación óptima, calcular las pérdidas y producción de energía, ya que simula la orientación del sol.



**11. Análisis de costo**

Para conocer la rentabilidad de la propuesta es necesario un conjunto de análisis económicos, de los cuales se muestra las ecuaciones correspondientes. Ver Tabla 3.7.

**Tabla 3.7**

*Ecuaciones para análisis económico de la propuesta de un SSFV.*

$C_{eEE\ SEN} = EE_{aHD} * C_{uEE}$	<p>EE<sub>aHD</sub>: Consumo anual de energía eléctrica en el horario diurno. (kWh/año)                  C<sub>uEE</sub>: Costo unitario de energía eléctrica pagado al SEN en horario diurno. (\$/kWh).                  C<sub>eEE SEN</sub>: Costo evitado de energía eléctrica del SEN por suplir energía eléctrica desde el SSFV.</p>
$C_{EEFV\ al\ SEN} = (E.E_{SSFV} - EE_{aHD}) * C_{uEEFV}$	<p>E.E.<sub>SSFV</sub>: Energía Eléctrica anual entregada por el Sistema Solar Fotovoltaico al SEN en horario diurno. (kWh/año).                  C<sub>uEEFV</sub>: Costo unitario de energía eléctrica entregada al SEN                  C<sub>E.E.FV al SEN</sub>: Costo anual de la energía eléctrica entregada al SEN por el SSFV en horario diurno.</p>
$C_{EE\ al\ SEN\ f.s.} = E.E_{SSFV\ f.f.} * C_{uEEFV}$	<p>E.E.<sub>SSFVfs.</sub>: Energía eléctrica anual entregada al SEN por el SSFV en fin de semana. (kWh/año).</p>
<p><b>Ahorro de capital = Ingresos totales * TVU</b></p>	<p>Ingresos totales: Ingresos por concepto de energía ahorrada                  TVU: tiempo de vida útil del SSFV a instalar</p>
<p><b>Relación beneficio/costo = <math>\frac{\text{Ahorro capital}}{CT}</math></b></p>	<p>CT: Costos Totales de la instalación del SSFV</p>
<p><b><math>PRI = \frac{CT}{\text{Ingreso anual}}</math></b></p>	<p>Período de recuperación de la inversión</p>
$VAN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1 + D)^i}$	<p>-K<sub>0</sub>: Inversión o capital inicial. (CUC)                  Fc<sub>i</sub>: Flujo de caja en el año i. (CUC)                  D: Tasa de descuento real utilizada.</p>
$Fc_i = (I_i - G_i - Dep) * (1 - T/100) + Dep$	<p>I<sub>i</sub>: Ingreso en el año. (CUC)                  G<sub>i</sub>: Gastos en el año. (CUC)                  T: Tasa de impuesto sobre la ganancia (%)                  Dep: Depreciación del equipamiento o amortización de la inversión. (CUC)</p>
$Dep = \frac{K_0}{n}$	<p>n: Vida útil del sistema. (Años)</p>
$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1 + TIR)^i}$	<p>Tasa interna de retorno</p>

Nota. Elaboración propia.



El valor actual neto (VAN) es un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos y egresos que tendrá un proyecto, para determinar, si luego de descontar la inversión inicial, quedaría alguna ganancia. Si el resultado es positivo, el proyecto es viable (Santacruz, 2017).

Se conoce como Tasa interna de retorno (TIR) a la tasa de descuento de un proyecto de inversión que permite que el beneficio neto actualizado (BNA) sea igual a la inversión (esto es, VAN igual a cero). La TIR es la máxima tasa de descuento que un proyecto puede tener para ser rentable, pues una mayor tasa ocasionaría que el BNA sea menor que la inversión (VAN menor que cero) (Santacruz, 2017).

**12. Análisis medioambiental**

El análisis medioambiental es considerado de suma importancia, pues permite evidenciar el combustible fósil no quemado, mediante la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y con esto se evidencian los beneficios de instalación de un SSFV para el medio ambiente. La Tabla 3.8 a continuación muestra las ecuaciones necesarias para determinar dichos valores.

**Tabla 3.8**

*Ecuaciones para el análisis medioambiental.*

$Combustible\ ahorrado = \frac{E * g}{1\ 000}$	E: energía generada, kWh/año. g: es el consumo específico de combustible de plantas de generación eléctrica
$CO_2\ no\ emitido = \frac{Combustible\ ahorrado * k}{\rho}$	K: coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO <sub>2</sub> no vertidas a la atmósfera ρ: densidad del combustible

*Nota:* Elaboración propia a partir de Benito y Ruiz (2018).

Una vez terminados todos los cálculos técnicos, económico y medioambientales se concluye el anteproyecto de un SSFV. A continuación, se desarrollan los cálculos de la metodología mostrada anteriormente.

**3.2.1 - Selección de los módulos**

El modulo seleccionado para la instalación fotovoltaica es comercializado por la empresa CR Technology Systems S.p.A., que presenta sucursal en Miramar, La Habana, Cuba. En la Tabla 3.9 se muestran las características técnicas del panel HT60-156M- 320Wp.

**Tabla 3.9**

*Características Técnicas de los paneles HT60-156M- 320Wp*

Modelo	HT60-156M- 320Wp
Potencia Máxima (Pmax) en (Wp)	<b>320</b>
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax) en (V)	33,8
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax) en (A)	9,49
Tensión en Circuito Abierto (Voc) en (V)	40,2
Corriente de cortocircuito (Isc) en (A)	10,49
Eficiencia en %	<b>19</b>
Dimensiones (A/A/F)	1 684x1 002x35 mm
Peso	19 Kg
Tipo de Células	Monocrystalino
Tamaño de las Células	158,75x79,375 mm

*Nota:* Tomado de ENF Solar (2020).

### 3.2.2 Orientación de los paneles

Para el diseño de instalaciones solares, es muy importante decidir la orientación de los paneles con el propósito de que los paneles capturen la mayor cantidad de radiación solar posible. Esta orientación puede ser impuesta por el emplazamiento donde se propone instalar los paneles, como es el caso de tejados con cierta orientación, o libre si la ubicación lo permite, como extensiones de terreno llanas (Guerrero, 2019). En este caso los paneles solares son orientados directamente hacia el sur.

### 3.2.3 Cálculos de la instalación de un sistema solar fotovoltaico

La inclinación de los módulos solares se define mediante el ángulo de inclinación  $\beta$ , que es el ángulo que forma la superficie de los paneles con el plano horizontal. Según la investigación realizada por Rodríguez et al. (2012) la latitud de la provincia de Cienfuegos es  $22^\circ$ .

A continuación, en la Tabla 3.10 se muestran los cálculos correspondientes al SSFV en cada una de las instalaciones objeto de estudio.



**Tabla 3.10**

*Cálculo manual del SSFV.*

N°	Parámetro (Unidad)	Ecuación	Magnitud	Observaciones.
3	Cálculo de la componente de la altura (h) del panel (m)	$h = L \cdot \sin \beta$	0,63	
4	Cálculo de la distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo medido horizontalmente. (b) (m).	$b = L \cdot \cos \beta$	1,56	
5	Cálculo del ángulo de incidencia del rayo solar respecto a tierra ( $\theta$ ) (Grados)	$\theta = 180 - 90 - \beta$	68°	
6	Cálculo distancia entre borde superior panel anterior y borde inferior panel posterior (a) (m)	$a = h / \tan \theta$	0,255	Se toma igual a 0,5m para que sirva de pasillo para limpieza y mantenimiento.
7	Distancia mínima entre aristas de paneles para evitar sombras (dmin) (m).	$d_{min} = a + b$	2,06	Se considerará $d_{min} = 2,00$ m para el montaje del sistema
8	Cálculo del número máximo de filas de paneles # máx. filas= Ancho del edificio/Distancia entre paneles.			
9	N°. Máximo de paneles por filas. # máx. Paneles por filas= longitud del edif./ancho del panel.			
10	Número máx. de paneles en la edificación. (N° máx. de paneles) N° máx. paneles=N° de filas*N° de paneles por filas			

N°	Largo (m)	Ancho (m)	N° filas posibles	N° de filas reales	N° de columnas posibles	N° de columnas reales	N° de paneles reales (U)
1	78	15	7,28	7	77,84	77	539
2	72	18	8,74	8	71,86	71	568
3	72	36	17,48	17	71,86	71	1 207
4	66	12	5,83	5	65,87	65	325



5	60	24	11,65	11	59,88	59	649
6	54	15	7,28	7	53,89	53	371
7	54	18	8,74	8	53,89	53	424
8	48	18	8,74	8	47,90	47	376
9	42	18	8,74	8	41,92	41	328
10	42	18	8,74	8	41,92	41	328
11	36	18	8,74	8	35,93	35	280
12	36	24	11,65	11	35,93	35	385
13	36	12	5,83	5	35,93	35	175
14	30	18	8,74	8	29,94	29	232
15	30	12	5,83	5	29,94	29	145
16	30	12	5,83	5	29,94	29	145
17	30	12	5,83	5	29,94	29	145
18	30	12	5,83	5	29,94	29	145
19	24	6	2,91	2	23,95	23	46
20	24	12	5,83	5	23,95	23	115
21	24	12	5,83	5	23,95	23	115
22	24	12	5,83	5	23,95	23	115
23	18	12	5,83	5	17,96	17	85
24	18	12	5,83	5	17,96	17	85
25	18	12	5,83	5	17,96	17	85
26	18	12	5,83	5	17,96	17	85

Obtenido el número máximo de filas y de columnas que se pueden instalar en el área útil de las cubiertas se obtiene un valor de **7 498** paneles.

11	<p>Cálculo de la energía generada. (Eu.) Energía útil generada (kWh/día)</p> $Eu=0,654*HSP*P_N*N$ <p>8 630,5 kWh/día 258,9 MWh/mes 3 106,9 MWh/año</p>
12	<p>Cálculo de la potencia instalada. (Pinst.) (KWp)</p> $P_{inst.}=N*(P_n/1\ 000)$ <p>2 399,36 kWp</p>
13	<p>Disposición (Área/Potencia) (m<sup>2</sup>/kW)</p> $Disp.=Área\ Edif./Pot.\ Instalada$



	7,2	
	La relación de área/potencia está en el rango recomendado para paneles monocristalinos entre 7-9 m <sup>2</sup> /kW, correspondientes a nuestro caso de estudio (Becerra, 2019).	
14	<p style="text-align: center;">Cálculo del número de inversores.</p> <p style="text-align: center;">N° de Inversores=Pot. Demandada/Pot. Inversor (La tabla de los inversores necesarios para la instalación se muestran en el Anexo 13)</p> <p style="text-align: center;">Se seleccionan para el diseño inversores Aotai Electric. (Las especificaciones técnicas del inversor se muestran en el Anexo 14)</p>	
	Son necesarios 26 inversores de 50 kW Son necesarios 18 inversores de 40 kW Son necesarios 4 inversores de 30 kW	Son necesarios 11 inversores de 25 kW Son necesarios 9 inversores de 20 kW Son necesarios 1 inversores de 17 kW

*Nota.* Elaboración propia.

### 3.3 Simulación de sistema de fotovoltaicos en el software PVsyst

#### 3.3.1 Resumen de datos de la simulación

Para el proyecto presente se utiliza modelo HT60-156M- 320Wp.de panel FV, una inclinación de 22 ° y un acimut de 0°. El punto geográfico presenta una latitud de 22.14° norte, -80.45° longitud oeste a una altitud de 8 m y los datos climatológicos fueron obtenidos de una síntesis de datos de la Base de Satélites de la NASA-SEE del 2005.

Para la verificación de los cálculos desarrollados se simula con el "PVsyst" las 26 naves de la empresa, a continuación, se analiza detalladamente los resultados de la simulación de la nave 3, como caso de ejemplo genérico de todas las naves.

En la Figura 3.5 se muestra las características del conjunto de la instalación, se observa que la cantidad módulos son de 1 210 produciendo una potencia total de 387 kWp, con una disposición de 55 en cadenas x 22 en series para un área de 2 042 m<sup>2</sup>, con 7 inversores de 50 kWca.



**Figura 3.5**

*Características del conjunto de la instalación.*

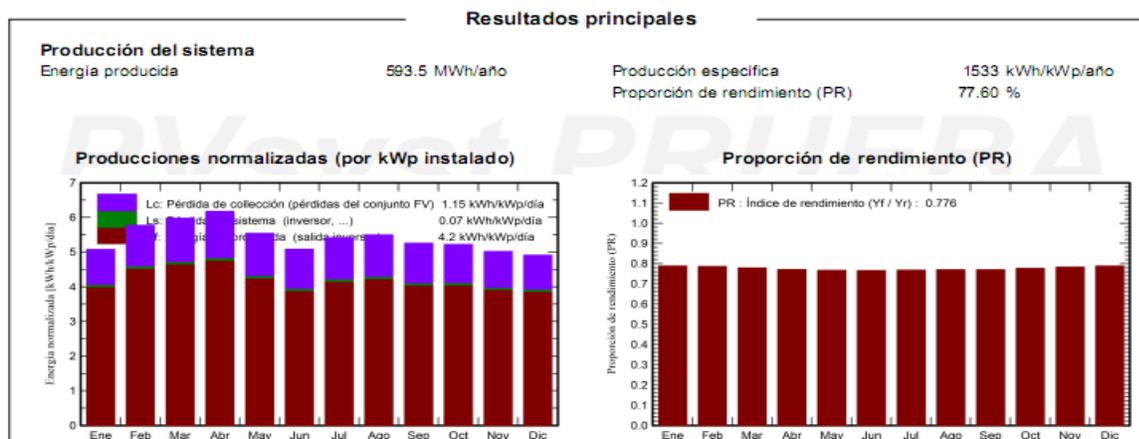
Características del conjunto FV			
<b>Módulo FV</b>		<b>Inversor</b>	
Fabricante	Generic	Fabricante	Generic
Modelo	HT60-156M- 320Wp	Modelo	Aotai_ASP-50KTLC
(Definición de parámetros personalizados)		(Base de datos PVsyst original)	
Unidad Nom. Potencia	320 Wp	Unidad Nom. Potencia	50.0 kWca
Número de módulos FV	1210 unidades	Número de inversores	7 unidades
Nominal (STC)	387 kWp	Potencia total	350 kWca
Módulos	55 Cadenas x 22 En series	Voltaje de funcionamiento	300-950 V
<b>En cond. de funcionam. (50°C)</b>		Proporción Pnom (CC:CA)	1.11
Pmpp	353 kWp		
U mpp	668 V		
I mpp	528 A		
<b>Potencia FV total</b>		<b>Potencia total del inversor</b>	
Nominal (STC)	387 kWp	Potencia total	350 kWca
Total	1210 módulos	Núm. de inversores	7 unidades
Área del módulo	2042 m <sup>2</sup>	Proporción Pnom	1.11

*Nota:* Resultados del software PVsyst 7.1.

En la Figura 3.6 se muestran los resultados principales donde es de destacar que en los meses de mayor producción son desde febrero a marzo y los de menor producción son los de junio, noviembre y diciembre, teniendo una producción anual de energía de 593 MWh/año y una producción específica de 1 533 kWh/kWp/año con una proporción de rendimiento del 77,60 %.

**Figura 3.6**

*Resultados principales*



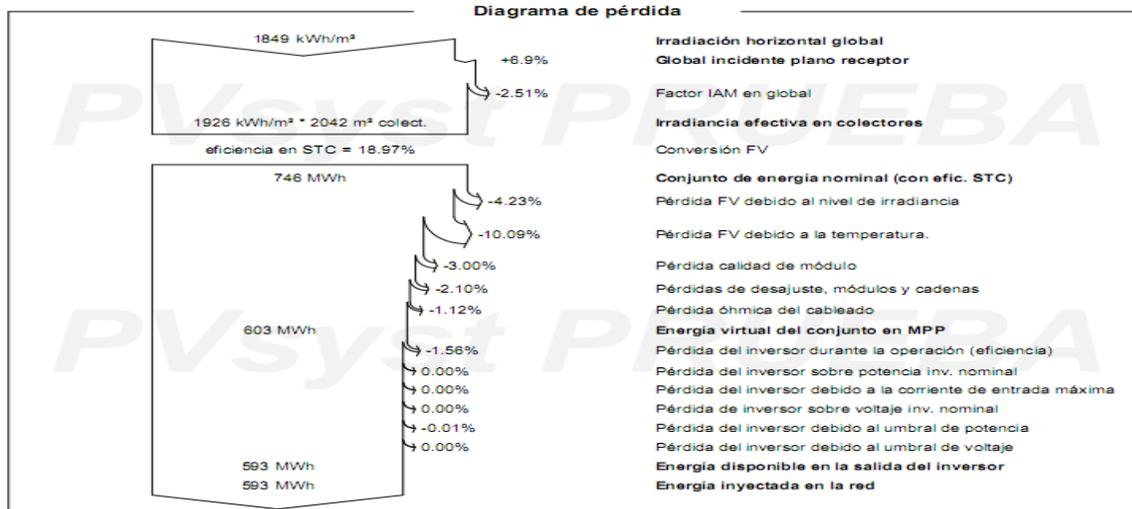
*Nota:* Resultados del software PVsyst 7.1.

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama de perdidas desglosada por factores, primero se muestra la eficiencia de los paneles que es de un 18,97 % logrado una producción de energía de 746 MWh, luego se detalla las perdidas por los diferentes sistemas, obteniéndose como resultado final una producción de energía de 593 MWh.



Figura 3.7

Diagrama de pérdidas.



Nota: Resultados del software Pvsyst 7.1.

Para el resto de las naves se realiza la simulación mostrada anteriormente en la nave 3, los resultados obtenidos mediante la simulación de las 26 naves se muestran a continuación en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11

Resumen de la Simulación de las Naves por Pvsyst

Nº	Paneles	Potencia (kWp)	Inversores	Potencia (kWca)	Potencia total(kWca)	Energía producida (MWh/año)	Rendimiento(%)
1	540	173	5	33	165	264,6	77,53
2	567	181	5	33	165	277,9	77,55
3	1210	387	7	50	350	593,5	77,6
4	320	102	2	50	100	156,9	77,57
5	651	208	4	50	200	319,2	77,57
6	374	120	4	27	108	183	77,43
7	420	134	4	33	132	205,8	77,52
8	378	121	3	36	108	185,4	77,6
9	330	106	3	30	90	161,8	77,58
10	330	106	3	30	90	161,8	77,58
11	280	89,6	3	27	81	137,1	77,47
12	380	122	4	40	120	186,2	77,52
13	180	57,6	5	10	50	87,55	76,95
14	231	73,9	5	12	60	110,7	75,84



15	144	46,1	4	10	40	70,04	76,95
16	144	46,1	4	10	40	70,04	76,95
17	144	46,1	4	10	40	70,04	76,95
18	144	46,1	4	10	40	70,04	76,95
19	48	15,36	2	7	14	23,39	77,08
20	120	38,4	5	7	35	58,47	77,08
21	120	38,4	5	7	35	58,47	77,08
22	120	38,4	5	7	35	58,47	77,08
23	84	26,88	2	12	24	40,85	76,93
24	84	26,88	2	12	24	40,85	76,93
25	84	26,88	2	12	24	40,85	76,93
26	84	26,88	2	12	24	40,85	76,93
<b>Total</b>	<b>7 511</b>	<b>2 403,58</b>	<b>98</b>			<b>3 673,81</b>	

*Nota.* Elaboración propia.

### 3.3.2 Comprobación de los resultados obtenidos.

Para comprobar los resultados obtenidos con el cálculo manual teórico se hizo uso de la modelación a través del PVsyst 7.0.12. Los resultados básicos para el desarrollo de esta comparación se encuentran en la tabla 3.12.

**Tabla 3.12**

*Comparación entre cálculo manual teórico y simulación.*

<b>Campos de comparación</b>	<b>PVsyst</b>	<b>Manual teórico</b>
<b>Cantidad módulos</b>	<b>7 511</b>	7 498
<b>Energía obtenida (MWh/año)</b>	<b>3 673,81</b>	3 106,9
<b>(MWh/mes)</b>	<b>306</b>	258,9
<b>(kWh/día)</b>	<b>10 065</b>	8 630,5
<b>Potencia instalada (kWp)</b>	<b>2 403,58</b>	2 399,36

*Nota.* Elaboración propia

Se observa que los valores de diferencia calculados son menores de 5 %, producto a la exactitud con la que trabaja el software PVsyst 7.1, el que utiliza una mayor cantidad de variables de fuentes meteorológicas, por lo que son utilizados los valores arrojados por el software para el cálculo ambiental y económico.



Una vez obtenida la energía generada por el SSFV se analiza en que porcentaje dicho sistema satisface el consumo real de las entidades. En la Tabla 3.13 se muestra que

**Tabla 3.13**

*Porcentaje de energía satisfecha.*

Energía generada SSFV (MWh/mes)	Consumo máximo registrado (MWh/mes)	% de energía satisfecha
306	7 903	3,87

*Nota.* Elaboración propia

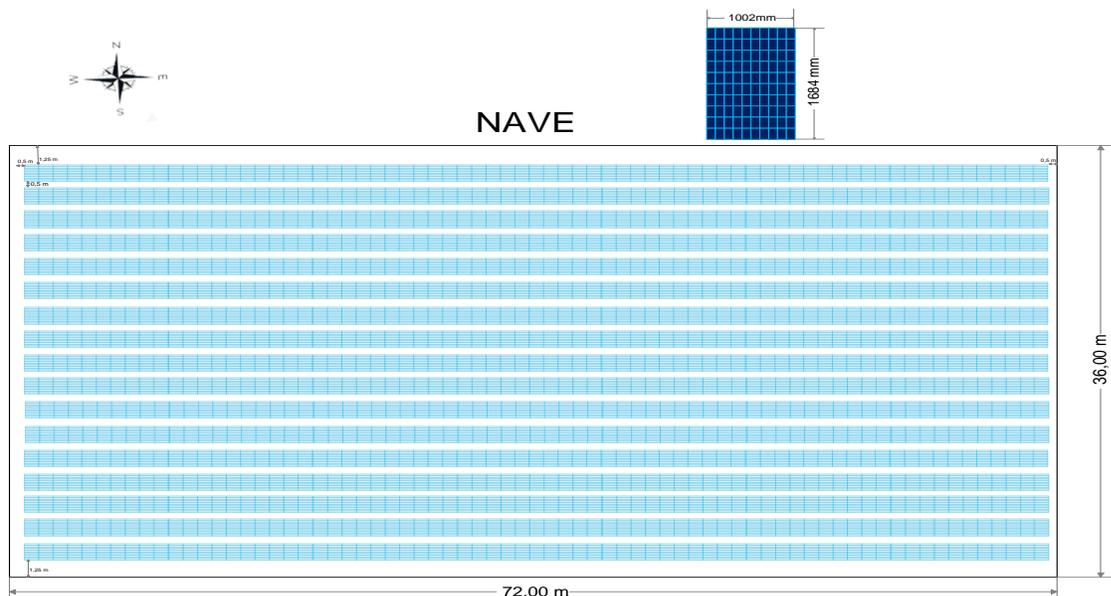
**3.4 Cálculo de resistencia de la edificación.**

Teniendo en cuenta lo planteado en (Construcción, 1978) para la comprobación de resistencia de la edificación al realizar el montaje del sistema fotovoltaico, se analiza solamente la nave 3, ya que esta es la de mayor cantidad de paneles 1 210 y envergadura.

En la Figura 3.8 se muestra un plano con las dimensiones de la nave, distancia de sus pasillos entre filas, pasillos extremos de la nave y su orientación con respecto al sol.

**Figura 3.8**

*Plano de la Nave 3.*



*Nota.* Elaboración propia



Esta área se caracteriza por poseer 2 592 m<sup>2</sup> de superficie, sobre la cual se instalarán 1 210 paneles solares, 202 mesas de fijación, 808 apoyos para las mesas y en esta se tendrá en consideración el peso total de todo el cableado, los tornillos de fijación a utilizar en general.

Todo el peso por unidad de área que se colocara sobre nave 3 incluyendo en ello el peso de enrajonado y de la capa de papel asfáltico que se encuentran ya incluidas en la cubierta de la edificación para su impermeabilización.

Según la NC 283:2003, deben de ser menor que el valor de la carga de utilización permisible de 300 kg/m<sup>2</sup> según el tipo de edificación "Girón" ya visto en capítulo anterior y que será tomado como el valor permisible de resistencia de la edificación a las cargas en la cubierta de la misma (Ver tabla 3.14)

### Tabal 3.14

*Cargas sobre la edificación.*

Producto	Cantidad	Peso (kg)	Densidad	Espesor	Total de carga (Kg/m <sup>2</sup> )
Enrajonado	-	-	18 Kg/m <sup>2</sup> /cm	5 cm	90
Capa asfáltica	2	-	5 Kg/m <sup>2</sup>	-	50
Estructura metálica	202	46 056	7 Kg/m <sup>2</sup>	-	17,77
Paneles solares	1 210	22 990	-	-	8,87
Dados de apoyo	808	6 565	-	-	2,53
Cableado	3 529 m	1 008	-	-	0,39
Tornillos	-	606	-	-	0,23
Total					169,79

*Nota.* Elaboración propia

El valor de carga de utilización es 169,79 Kg/m<sup>2</sup> < 300 Kg/m<sup>2</sup> valor mínimo permisible para las edificaciones tipo "Girón", por lo que se puede afirmar que la edificación resistirá las cargas que tributará el sistema de paneles solares.

**Conclusiones parciales del capítulo III.**

1. El SSFV queda instalado en un área de 17 224 m<sup>2</sup> de cubierta en 26 naves, con un total de 7 511 paneles fotovoltaicos del tipo HT60-156M- 320Wp.
2. El SSFV es capaz de generar 306 MWh/mes y un máximo de 7 903 MWh/mes, lo cual debería satisfacer un 3,87 % de la máxima demanda de la empresa.
3. El estudio de resistencia de la edificación a las cargas del SSFV muestra que puede ser colocado el sistema sobre la cubierta ya que las cargas originadas con valores de 170 kg/m<sup>2</sup> son inferiores a las cargas de resistencia de las edificaciones tipo “Girón” que alcanzan valores en el orden de 300 kg/m<sup>2</sup>.



# **CAPÍTULO IV**



## Capítulo IV: Evaluación económica y ambiental del uso del sistema fotovoltaico en las cubiertas de las Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”

### 4.1 Evaluación económica y medio ambiental del anteproyecto técnico del sistema fotovoltaico propuesto

Para la realización de la evaluación económica se tiene en consideración todos los gastos asociados a la instalación de la tecnología fotovoltaica en cuanto a: paneles, mesas de fijación, cableado, tornillería e inversores; además de tener en consideración factores como: el impuesto del banco, inflación, tasa de descuento y el período de vida útil de los paneles, para así poder conocer de forma más certera el periodo de tiempo en que se recupera la inversión y las ganancias que trae consigo. La metodología a emplear en el presente epígrafe es definida en el epígrafe 3.2.1.

Los valores de las tasas están dados en la Tabla 4.1 según la Dirección General de Tesorería del Banco Central de Cuba en las Circulares 5/2011 y 2/2012. El impuesto sobre la ganancia es del 35%, según artículo 97 de la Ley 113 publicada en la Gaceta Oficial No. 053 Ordinaria de 21 de noviembre de 2012.

**Tabla 4.1**

*Valores de las tasas de interés anual.*

Período tiempo	Tasa de interés anual (%)	Tasa mínima (%)	Tasa máxima (%)
Hasta 36 meses	7,5	6,5	8,5
Hasta 60 meses	8	7	9

*Nota:* Tomado de TradingEconomic (2020).

La tasa de inflación ha sido tomada de TradingEconomic (2020) y su magnitud ha variado entre 5,00 a 5,90. Se considera la tasa de descuento de 8% y el margen de riesgo de 3%.

Para el análisis económico se toman los valores mencionados en el epígrafe 1.5 del Capítulo I de la presente investigación, referidos a los costos de instalación de un SSFV en diferentes regiones del mundo. Por lo que se decide trabajar con cuatro variantes y se determina el costo de la instalación en cada establecimiento teniendo en cuenta la potencia del SSFV (Ver Tabla 4.2)



**Tabla 4.2**

Costo de la instalación fotovoltaica.

Potencia (kWp)= 2 403,58			
Costo China (USD)	Costo Italia (USD)	Costo Japón (USD)	Costo Cuba(Copextel) (USD)
1kW=1 130 USD	1kW=1 580 USD	1kW=2 230 USD	1kW=2 550 USD
2 716 045,4	3 797 656	5 359 983	6 129 129

Nota. Elaboración propia.

**4.2 Costo evitado de energía eléctrica del SEN por suplir energía eléctrica desde el SSFV.**

Conociendo el ahorro generado por el SSFV se puede determinar el ingreso monetario por la siguiente ecuación:

$$C_{eEE\ SEN} = CGM * C_{uEE} = \frac{kWh}{año} * \frac{\$}{kWh} = \frac{\$}{año}$$

Donde:

CGM. - capacidad de generación y entrega del SSFV. (kWh/año)

CuEE. - Costo unitario de energía eléctrica pagado al SEN en horario diurno. (\$/kWh).

La tarifa A1 eléctrica de acuerdo al Manual de consumidores (2017) para la empresa que es de 0,2275 \$/kWh,

$$C_{eEE\ SEN} = 3\ 673\ 810 \frac{kWh}{año} * 0,2275 \frac{\$}{kWh} = 835\ 791 \frac{\$}{año}$$

A continuación, en la Tabla 4.3 se muestran los principales resultados obtenidos del análisis económico del proyecto. En el anexo 15 se pueden apreciar las hojas de Excel y gráficos detallados de los indicadores de factibilidad económica.

**Tabla 4.3**

Evaluación económica de instalar los SSFV.

Ingreso Por Concepto De Ahorro/Año= 835 791USD				
Gastos= 125 368.65USD				
Datos	China	Italia	Japón	Copextel
Costo de instalación (USD)	2 716 045,4	3 797 656	5 359 983	6 129 129
Depreciación (USD)	108 641	151 906	214 399	245 165
Valor Actual Neto (USD)	3 760 720	2 875 338	1 596 452	966 846
Tasa Interna de Retorno (TIR)	9%	2%	-8%	-15%



Período de recuperación de la Inversión (PRI)	7 años	10 años	16 años	19 años
---	--------	---------	---------	---------

*Nota.* Elaboración propia.

Del análisis anterior se obtiene que para la entidad la opción de inversión más favorable es la ofrecida por China, con los mayores valores de valor actual neto (VAN) de 3 760 720 \$ y un menor período de recuperación de la inversión (PRI) de 7 años, de ser conseguido los precios iniciales en el rango dado, es la aconsejada a realizar ya que el (VAN) supera el costo de la inversión y el periodo de recuperación representa el 28% de su vida útil total de 25 años, con una Tasa Interna de Retorno del 9%.

La propuesta del precio de Italia presenta un (VAN) de 2 875 338 \$ al cabo de los 25 años, inferior a la inversión inicial de 3 797 656 \$ y un Período de Recuperación de la Inversión (PRI) de 10 años, con una TIR de (2%). Estos indicadores no hacen atractiva la inversión.

La propuesta de Japón tiene un VAN al cabo de los 25 años de 1 596 452 \$ inferior notablemente a la Inversión inicial de 5 359 983 \$, un Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) de 16 años y una TIR de (-15%). Estos indicadores desaconsejan realizar esta inversión. Sin embargo; la oferta actual de COPEXTEL en Cuba es la menos favorable, pues presenta los valores más bajos de VAN y el mayor PRI, de 19 años estos indicadores no aconsejan realizar la inversión.

### 4.3 Análisis y aporte medio ambiental

Este aspecto es de gran importancia ya que, debido al auge de las tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica, en conjunto a los esfuerzos que se han llevado a cabo tanto internacional como nacionalmente para la disminución del uso de los combustibles fósiles para producir energía eléctrica, los cuales tienen marcadas influencias negativas en la contaminación ambiental; la fomentación del uso de la tecnología fotovoltaica es una de las principales fuentes energética nacional que tiene gran importancia dada la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> hacia la atmósfera.

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

$$\text{Combustible ahorrado} = (E \cdot g) / 1000$$

$$\text{Combustible ahorrado} = (3\,673\,810 \cdot 0,236) / 1000 = 867 \text{ t/año}$$



Donde:

E: energía generada, kWh/año.

g: es el consumo específico de combustible de los grupos electrógenos; se escoge la peor condición, o sea aquel que ahorrará menos y es igual a 236 g/kWh o 0,236 kg/kWh.

Por tanto, a partir del combustible ahorrado se puede obtener la cantidad de CO<sub>2</sub> dejado de emitir a la atmósfera en t/año por la ecuación:

$$\text{CO}_2 \text{ no emitido} = (\text{Combustible ahorrado} * k) / \rho$$

$$\text{CO}_2 \text{ no emitido} = (867 * 3,119) / (0,9781) = 2\,764,7 \text{ t/año}$$

Donde:

K: coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO<sub>2</sub> no vertidas a la atmósfera y que es igual a 3,119 kg/l.

ρ: densidad del combustible y es igual a 0,9781 kg/l.

Utilizando la expresión se determina que la cantidad de CO<sub>2</sub> dejada de emitir a la atmósfera es de 2 764,7 t/año, lo que evidencia el aporte al mejoramiento medioambiental que trae consigo la instalación del sistema fotovoltaico.



### Conclusiones parciales del capítulo IV

1. El SSFV generando una energía eléctrica de 3 673 810 KWh/año, que al precio de 0,2275 \$/kWh representa un ahorro del 3,87 % del consumo de la entidad y económicamente una reducción en el pago de energía eléctrica de 835 791 \$/año.
2. El período de recuperación de la inversión en el SSFV de la empresa es de 7 años; con una inversión de 2 716 045,4 \$ y un VAN de 3 760 720 \$ en un período de 25 años de servicios y una TIR de 9%.
3. Con la energía generada en el SSFV se dejan de quemar 867t/año de combustible diésel, lo que equivale a una reducción de 2 764,7 t/año de CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir a la atmósfera.



# **CONCLUSION ES GENERALES**



### Conclusiones generales

- 1- Las cubiertas ofrecen el mayor potencial de integración de paneles solares en edificios, por ser las superficies mejor situadas y de mayor extensión, libres de obstáculos y restricciones, además de no ocupar terrenos cultivables. En nuestro país se han llevado a cabo varios proyectos, referidos en la presente investigación, con resultados positivos en la implementación de paneles solares en techo.
- 2- La Refinería de Cienfuegos tiene como los mayores consumidores las plantas de procesos con un consumo de energía eléctrica que representa un 60%. EL mayor consumo que se observó fue de 7 903 MWh/mes y el mínimo de 1 077 MWh/mes.
- 3- El estudio de resistencia de la edificación a las cargas del SSFV muestra que puede ser colocado el sistema sobre la cubierta ya que las cargas originadas con valores de  $170 \text{ kg/m}^2$  son inferiores a las cargas de resistencia de las edificaciones tipo "Girón" que alcanzan valores en el orden de  $300 \text{ kg/m}^2$ .
- 4- El SSFV queda instalado en un área de  $17\,224 \text{ m}^2$  de cubierta en 26 naves, con un total de 7 511 paneles fotovoltaicos del tipo HT60-156M- 320Wp, el cual es capaz de generar 306 MWh/mes lo cual debería satisfacer un 3,87 % de la máxima demanda de la empresa.
- 5- Con la generación de 3 673 810 KWh/año a partir del SSFV a instalar, se logra una reducción en el pago de energía eléctrica de 835 791 \$/año. El período de recuperación de la inversión en el SSFV de la empresa es de 7 años; con una inversión de 2 716 045,4 \$ y un VAN de 3 760 720 \$ en un período de 25 años de servicios y una TIR de 9%.
- 6- Con la energía generada en el SSFV se dejan de quemar 867 t/año de combustible diesel, lo que equivale a una reducción de 2 764,7 t/año de  $\text{CO}_2$  que se dejan de emitir a la atmósfera.



**RECOMENDACI**



### **Recomendaciones**

1. Proponer a la Refinería Camilo Cienfuegos continuar los estudios de SSFV en las naves restantes que faltaron en el estudio que posee dicho organismo.
2. De ser favorables los resultados proponer al organismo la extensión a nivel nacional.
3. Realizar el cálculo de la carga producida por los vientos en la resistencia mecánica de cubierta de edificaciones a solicitudes de cargas de sistemas fotovoltaicos
4. Elaborar una propuesta de reutilización o deposición de los paneles solares, una vez terminada su vida útil.



# **BIBLIOGRAFÍ**



### Bibliografía

- Aguilera, L. G. S., y Guerrero, O. J. M. (2020). Propuesta de un Sistema de Monitoreo y Detección de Fallas en un Sistema Fotovoltaico. *ReserchGate*.
- Alvarez, R. (2018). *Estudio de variantes para estructuras soportes de paneles solares en la CUJAE*. . Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”
- Autosolar. (2020). Energía Solar Fotovoltaica. from <https://autosolar.es/blog/energia-solar-fotovoltaica>
- Banyeres, L. J. (2019). *Generación de energía solar fotovoltaica*: Marcombo.
- Barón, D. A., y Amaya, C. E. (2020). *Diseño de un sistema solar fotovoltaico para suplir la iluminación en vallas publicitarias de la empresa Efectimedios SA*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- Becerra, R. (2019). *Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico en la Delegación Provincial de Materiales de la Construcción*. Cienfuegos. (Trabajo de Diploma), Universidad de Cienfuegos.
- Benavides, J. (2013). Observatorio de Energía Renovable para América Latina y el Caribe. *ONUDI, Consultoría energía renovable en Colombia*.
- Benito, G., y Ruiz, K. (2018). *Análisis beneficio-costos de la implementación de un sistema de energía solar fotovoltaica en el campus Aguas Claras de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, Meta*. Universidad Santo Tomás
- Berrío, L., y Zuluaga, C. (2014). Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: unarevisión en el contexto energético mundial. *Ingeniería y Desarrollo*, 32(2), 369-396.
- Bjork, I., Connors, C., Welch, T., Shaw, D., y Hewitt, W. (2014). *Promovido el desarrollo de las energías renovables*.
- Buenaventura, M., Fierro, Y., y Segura, C. D. (2019). *Evaluación del potencial energético, solar fotovoltaico de las cubiertas de los edificios de la sede ciencia de la salud de la Universidad Cooperativa de Colombia, sede Villavicencio*. Universidad Cooperativa de Colombia.
- Calderón, M. (2019). Sistemas Solares Fotovoltaicos para autoconsumo. *Revista científica Ingeniería y Ciencia de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar*, 2(16).
- Carbonell, M. (2020). Precios y costes de paneles fotovoltaicos from <https://Coste paneles fotovoltaicos 2020.htm>



- Carratalá, P., y Sales, E. (2017). Herramientas de soporte para instalaciones fotovoltaicas. *Universitat Juame*.
- CEEMA. (2020). Potencialidades de generación fotovoltaica en cubiertas de naves de la Empresa de Tecnología de Avanzada de la Construcción, MICALUM Cienfuegos.
- CEPAL. (2013). *Energía: una visión sobre los retos y oportunidades en América Latina y el Caribe* (CAF Ed.).
- CEPAL. (2020). Estrategia Energética Sustentable 2030 de los países del SICA. *Sistema de Integración centroamericana*.
- Cerdá, D. (2020). *Diseño de la instalación eléctrica para una electrolinera con aporte de energía solar fotovoltaica*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chivelet, N. M. (2011). Los módulos fotovoltaicos en la edificación: posibilidades y directrices de diseño. *Técnica industrial*(296), 26-35.
- Gaceta Oficial Ordinaria de la República de Cuba, No. 053 C.F.R. (2012).
- Construcción, M. d. I. (1978). *Sistema Constructivo Girón. Especificaciones Técnicas*. La Habana, Cuba: CEDITEC.
- Cornejo, H. (2014). Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el Centro Materno Infantil de la Universidad de Piura. *Repositorio Institucional Pirhua*.
- Correia. (2020). *Anteproyecto de Sistema Solar Fotovoltaico en Empresa MICALUM*. (Tesis de grado), Universidad de Cienfuegos.
- Cortés, C. L. C., Gómez, G. S. G., Londoño, F. B., Quintero, S. X. C., y González, N. G. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: caso de estudio Manizales. *TecnoLógicas*, 23(47), 1-21.
- Contrato de servicios–cuentas asociadas a tarjetas red para colaboradores, Circular No.5 C.F.R. (2011).
- Tasas de Interés activas para créditos de pesos cubanos aplicables a personas naturales y jurídicas, Circular No.2 C.F.R. (2012).
- Cubadebate. (2019). Cuba impulsa parques solares para elevar cuota de energía renovable. *Cubadebate*.
- Cubahora. (2019). Energía renovable: presente y futuro del desarrollo sostenible, *CUBAHORA*.
- de las Heras León, M. (2018). *Mantenimiento de instalaciones solares fotovoltaicas. ENAE0108*: IC Editorial.
- Dután, G. R. (2019). Impacto sobre las protecciones eléctricas al instalar sistemas solares fotovoltaicos en una red de distribución con nivel de potencia de 0.460 KWp. *Universidad*



- catolica de Cuenca.*
- EPIA. (2011). Catálogo de fallos comunes y prácticas inadecuadas en la instalación y mantenimiento de sistemas fotovoltaicos PVTRIN WP2\_D2.6\_.
- Escobar, D. I. (2013). *Estudio técnico-económico para la implementación masiva de sistemas solares fotovoltaicos para los estratos cinco y seis de la ciudad de Cali*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Espinosa, M., Céspedes, A., y Doval, Y. (2020). La Agenda 2030, las estrategias energéticas en España y Cuba. Calidad de vida de los adultos mayores. *Novedades en Población*, 66-81.
- Europe, S. P. (2019). Global Market Outlook For Solar Power 2019–2023. *Solar Power Europe, Brussels, Belgium, Tech. Rep.*
- Europe, S. P. (2020). Global Market Outlook For Solar Power 2020–2024. *Solar Power Europe, Brussels, Belgium, Tech. Rep.*
- Extremera, D. (2019). Cuba: Entran en vigor nuevas normas jurídicas para el desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía, *Cubadebate*. Retrieved from <https://ModificantarifaselectricasparaelsectorresidencialypreciosdelgaslicuadodepetroleoCubadebate.htm>
- Finalé, P. (2019). Costos de sistemas solares fotovoltaicos. Cienfuegos: COPEXTEL S.A.
- Fuertes, A. (2019). *Dimensionamiento de una instalación de energía solar fotovoltaica en un instituto de educación secundaria*. Universitat Politècnica de València.
- García, A. (2019). La energía que renueva a Cuba, *Granma*.
- García, I. (2016). Diagnóstico del mercado de paneles solares en Cuba. from <https://www.gestiopolis.com/diagnostico-del-mercado-paneles-solares-cuba/>
- García, R. (2019). *Implementación de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red en la empresa INPUD*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas.
- Gómez, A. (2020). *Metodología e implementación de detección de falla para un sistema fotovoltaico basado en datos*. Uniandes.
- González, A. (2016). *Diseño de un parque solar fotovoltaico conectado a la red en techos del despacho provincial de Villa Clara*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería ....
- González, D. (2016). *Análisis para la conexión de PSFV de Rodas y otros propuestos a la red de la barra de Yaguaramas* (Tesis de Grado), Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Granma. (2019). Hospital santiaguero posee mayor parque fotovoltaico sobre cubierta de Cuba,



*Granma.*

- Guerrero, J. (2019). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (S. A. editorial síntesis Ed.).
- Guzmán, M., Soto, C. R., Águila, I., y Torres, J. M. (2017). Procedimiento para instalación de un sistema fotovoltaico sobre techos en la corporación cuba ron sa. *Centro azúcar*, 44(1), 70-81.
- Hernández Morales, C., Monteagudo Yanes, J. P., Dala, H. E., y Jiménez Borges, R. (2020). Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico en hotel universitario de posgrado en la Universidad de Cienfuegos. *Revista Universidad y Sociedad*.
- IRENA. (2015). *Renewable Cost Database*
- IRENA. (2017). *Almacenamiento de electricidad y energías renovables: costos y mercados hasta 2030*.
- IRENA. (2020). How Falling Costs Make Renewables a Cost-effective Investment. from <https://www.irena.org/newsroom/articles/2020/Jun/How-Falling-Costs-Make-Renewables-a-Cost-effective-Investment>
- IRENA. (2020). *Renewable power generation costs in 2019*
- Labrador, L. (2018). Cuba apuesta por el cambio en su matriz energética, *Granma*.
- Laino, L. D. (2008). Un Análisis de la Política Energética en Cuba. *Población y Desarrollo*(35), 45-62.
- Looney, B. (2020). *Full report–BP statistical review of world energy 2020*: BP plc, London.
- López. (2009). *Guía de integración solar fotovoltaica*: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- López, Puente, R., Bon, R., y Moller, J. (2014). *Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca*. (Tesis de Maestría), Chihuahua.
- López, H., Puente, R., Bon, R., y Moller, J. (2014). Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca: Chihuahua.
- López, J. (2019). *Diseño de un sistema fotovoltaico para autoconsumo conectado a red en la Empresa Viettel Perú SAC ubicado en Trujillo-La Libertad*. Universidad nacional "PEDRO RUIZ GALLO".
- López , W. G. (2018). *Diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica para la Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito*. Quito. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20127>
- Marin, D. (2018). *Integración arquitectónica de sistemas solares activos y pasivos en edificios*



- industriales. Caso estudio Cuenca - Ecuador.* (Trabajo previo a la obtención del título de Arquitecto), Universidad De Cuenca.
- Marín, L. (2018). Plan de mantenimiento preventivo y mejora del rendimiento de una instalación de energía solar para producción de ACS.
- Menéndez, M. (2020). Cuba en el camino de renovar su matriz energética. from <https://Cubaenelcaminoderenovarsumatrizenergética-Cuba-Opciones-SemanarioeconómicoyfinancierodeCuba.htm>
- Mesones, P. F. (2019). *Dimensionamiento y selección de un sistema solar fotovoltaico de conexión a red para el restaurante "El zarco" ubicado en la ciudad de Cajamarca.* universidad nacional "PEDRO RUIZ GALLO".
- MINEM. (2019). *Energías Renovables.* Retrieved from <https://www.minem.gob.cu/>.
- Montero, J. (2016). *Arquitectura y energía fotovoltaica. Integración arquitectónica de la energía fotovoltaica.* (Trabajo Fin de Grado), Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
- Morales, C. H., Yanes, J. P. M., Dala, H. E., y Borges, R. J. (2020). Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico en Hotel Universitario de Posgrado en la Universidad de Cienfuegos. *Universidad y Sociedad, 12(6)*, 163-169.
- Muñoz, E. (2017). Energía solar. *São Paulo.*
- Nación, P., y Morrone, A. (2019). Energía solar fotovoltaica.
- Navarro, S., y Romero, E. (2020). *Simulación y análisis energético de sistemas solares fotovoltaicos para generación distribuida en el Distrito Metropolitano de Quito.* Universidad de Quito.
- NC 283: 2003. DENSIDAD DE MATERIALES NATURALES, ARTIFICIALES Y DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCION COMO CARGA DE DISEÑO. ONN, La Habana, Cuba.
- Newsolar. (2018). Proyectos Solares Fotovoltaicos conectados a la red. (On Grid). from <https://newsolar.cl/proyectos-solares-fotovoltaicos-conectados-a-la-red/>
- Obrero, J. (2011). Componentes de una instalación solar fotovoltaica: McGraw-Hill, <http://www.mcgrawhill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf> ....
- Ochoa, L. (2018). *Diseño preliminar de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red(SFVCR) para la Base de Aseguramiento del Banco Popular de Ahorro (BPA)de la provincia de Cienfuegos.* (Tesis de grado), Universidad de Cienfuegos.
- ONEI. (2016). Electricidad en Cuba indicadores seleccionados: Oficina Nacional de estadística e Información.



- ONEI. (2017). Electricidad en Cuba indicadores seleccionados: Oficina Nacional de estadística e Información.
- ONEI. (2018). Electricidad en Cuba indicadores seleccionados: Oficina Nacional de estadística e Información.
- ONEI. (2019). Electricidad en Cuba indicadores seleccionados: Oficina Nacional de estadística e Información.
- ONEI. (2020). Electricidad en Cuba indicadores seleccionados: Oficina Nacional de estadística e Información.
- Ortiz, J. D. (2013). Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico de pequeña escala. *Visión electrónica*, 7(1), 103-117.
- Palacios, S. (2019). Análisis de las ventajas competitivas del uso de energía solar fotovoltaica en el proceso educativo de la IE Cristo Rey–Talara–2019.
- Pérez, P. (2013). *Instalación fotovoltaica en nave industrial para autoconsumo conectada a la red eléctrica*. (Trabajo de maestría ), Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia: UPC.
- Perpiñán, O. (2018). Energía solar fotovoltaica. *Online*. Disponible en <https://oscarperpinan.github.io/esf/ESF.pdf>. [Accedida: 10-Aug-2018].
- PNUD. (2019). Fuentes Renovables de Energía como apoyo al Desarrollo Local (FRE-DL). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Universidad de Sancti Spíritus (UNISS).
- Potosinos, U. (2019). Energía solar fotovoltaica. *revupotosinos Universitarios Potosinos*, 25.
- Radiorebelde. (2019). Zona Especial de Desarrollo Mariel estimula empleo de energías renovables, *RadioRebelde*. Retrieved from <https://www.radiorebelde.cu/boletin/zona-especial-desarrollo-mariel-estimula-empleo-energias-renovables-20190620/>
- Ramírez, E. B. R., Siabato, A. I. B., y Orduz, M. G. (2017). Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare, Colombia. *RIAA*, 8(1), 239-248.
- Ribeiro, J. (2015). *Integración de sistemas fotovoltaicos en edificios de oficinas en bajas latitudes: estudio del balance energético aplicado a Brasil*. (Tesis Doctoral ), Universidad Politécnica de Madrid
- Rodríguez. (2002). Evolución y cambios en el Sector Energético de Cuba en los años noventa. *Revista Momento Económico*(121).
- Rodríguez, Vázquez, A., Vilaragout, M., Sarmiento, A., Díaz, R., Santos, A., y Sánchez, G. (2012). Evaluación y criterios para la instalación de 1 MWp de FV conectados a la red



- en Cantarrana, municipio y provincia de Cienfuegos. *Informe Técnico, Archivo de datos digitales del CIPEL*, 35-36.
- Rodríguez, S. (2016). *Procedimiento para el diagnóstico energético en los municipios. Caso de estudio en el municipio de Cienfuegos, consejos populares de Punta Gorda y Junco Sur*. (Tesis de Grado), Universidad de Cienfuegos.
- Rodríguez, S. (2019). *Integración de las potencialidades energéticas al desarrollo local del municipio de Cienfuegos*. (Tesis de maestría), Universidad de Cienfuegos.
- Romero, A. (2020). *Diseño de una instalación de energía solar fotovoltaica de conexión a red para cocina M® en Valencia*. Universidad de Valencia.
- Sabogal, C. C., y León, E. (2018). *Estudio de factibilidad para implementar proyectos para generación solar fotovoltaica en pequeñas empresas colombianas con el fin de acceder a los beneficios de la Ley 1715 de 2014*. Universidad Distrital Francisco José De Calda.
- Santacruz, J. (2017). Análisis de inversión basado en indicadores de evaluación VAN y TIR y aplicación del sistema de amortización francesa.
- Santos, R. D., Gerard, H., Fernández, M. C., y Acosta, B. (2012). 'Sistema Fotovoltaico Conectado a la Red Eléctrica, Su Diseño'. Paper presented at the presentado en II Congreso Cubano de Ingeniería Eléctrica, La Habana, Cuba.
- Solar, E. (2020). Solar Cells Manufacturers Directory. *Company Directory*. from <https://es.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/35317>
- Solargis. (2018). Map, Global Horizontal Irradiation.
- Stapleton, G., y Neill, S. (2012). *Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation*: Routledge.
- Stolik, D. (2019). *Energía fotovoltaica para Cuba* (Cubasolar Ed.).
- Stolik, D. (2021 ). VIGILANCIA TENOLOGICA FV 11.
- SYSTEMS, C. R. T. (2020). Sistema solar fotovoltaico en techo. from <https://www.crtsgroup.com/es/>
- Tarazona, Y. (2020). Estudio de Viabilidad de un Sistema Solar Fotovoltaico que Genera Electricidad Para dar Iluminación a las Viviendas Rurales del Municipio de El Playón. *Universidad de Santander*.
- Torres Casas, J. D. (2019). *Planificación solar urbana y diseño de sistemas solares fotovoltaico en viviendas de la provincia de Ferreñafe, para satisfacer la creciente demanda eléctrica*. (Tesis de grado), UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO".
- TradingEconomic. (2020). Cuba - Tasa de inflación. from <https://es.tradingeconomics.com/cuba/inflation-cpi>.



- Uzquiano, C., Sullivan, M., y Sandy, X. (2015). Capacitación e instalación de sistemas fotovoltaicos en las Comunidades de Carmen del Emero y Yolosani: IICA Programa Alianza en Energía y Ambiente con la Región Andina.
- Vallejo, D., Dávila, R., Soria, R., y Ordóñez, F. (2020). Evaluación del potencial técnico y económico de la tecnología solar fotovoltaica para la microgeneración eléctrica en el sector residencial del Distrito Metropolitano de Quito. *Revista Técnica" energía"*, 17(1), 80-91.
- Vargas, J., y Ortega, J. (2020). Evaluación técnico ambiental para la implementación de un sistema fotovoltaico. *Publicaciones e Investigación*, 14(1), 1-16.
- Veloz, G. (2020). Con uso de paneles fotovoltaicos en los sectores residencial y estatal, Holguín incrementará la generación de electricidad *Granma*.
- Yilén, C. (2019). Fuentes de energía renovables : más desarrollo, más eficiencia, *CUBAHORA*.

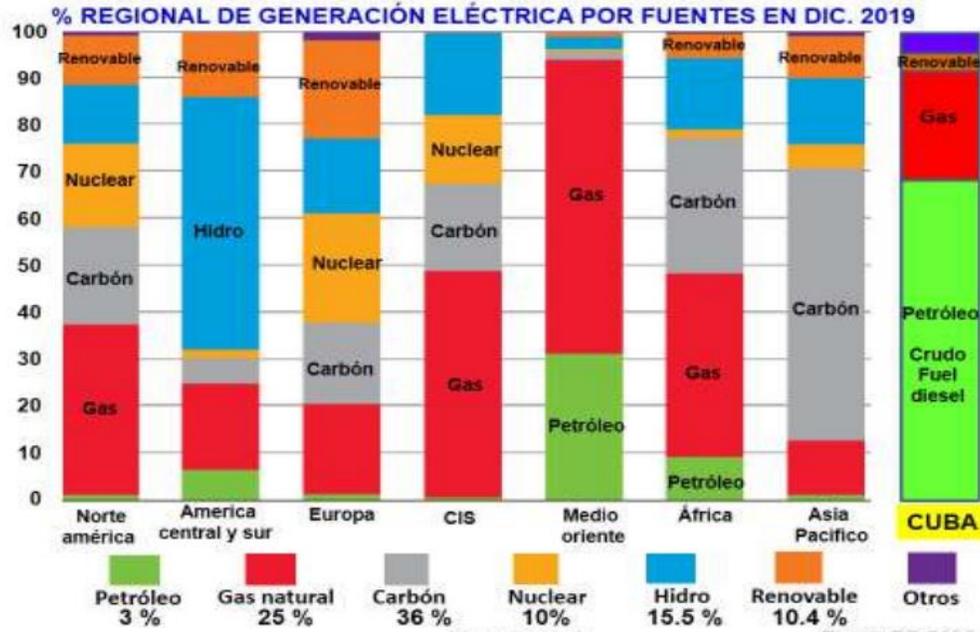


**ANEXOS**



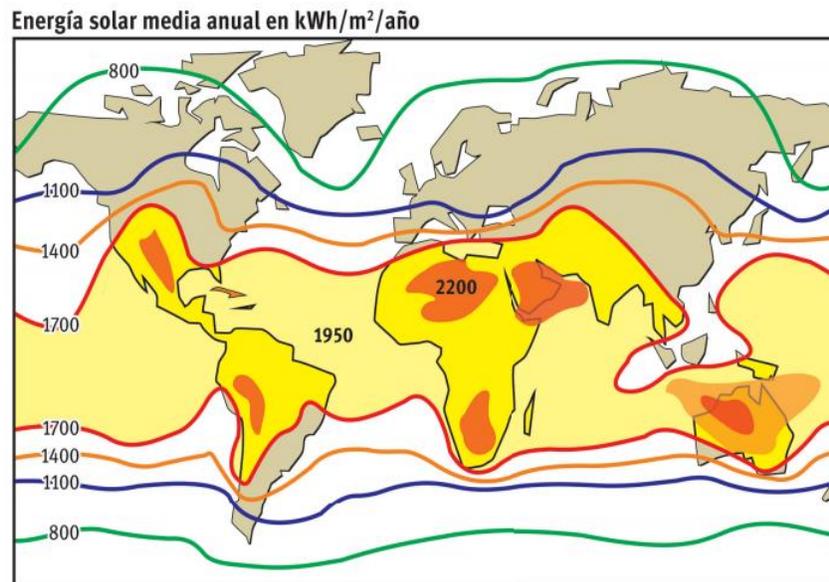
Anexos

Anexo 1: Energía producida en las diferentes regiones del mundo a partir de diferentes fuentes. Fuente: (Stolik, 2021 )



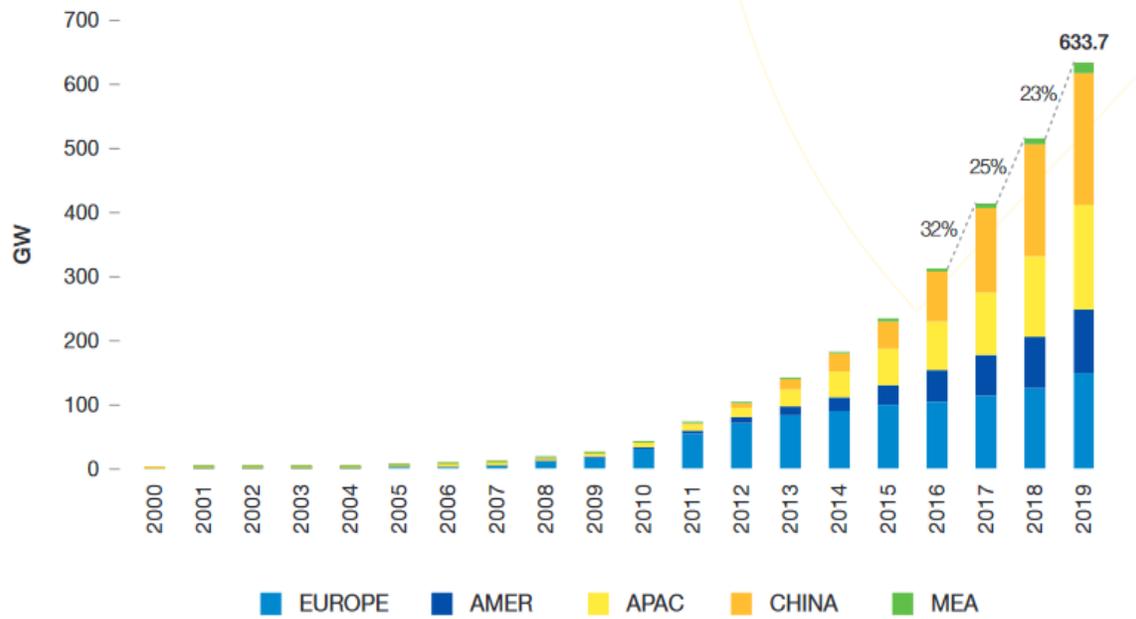


**Anexo 2: Distribución promedio anual de radiación solar. Fuente: (Stolik, 2019).**



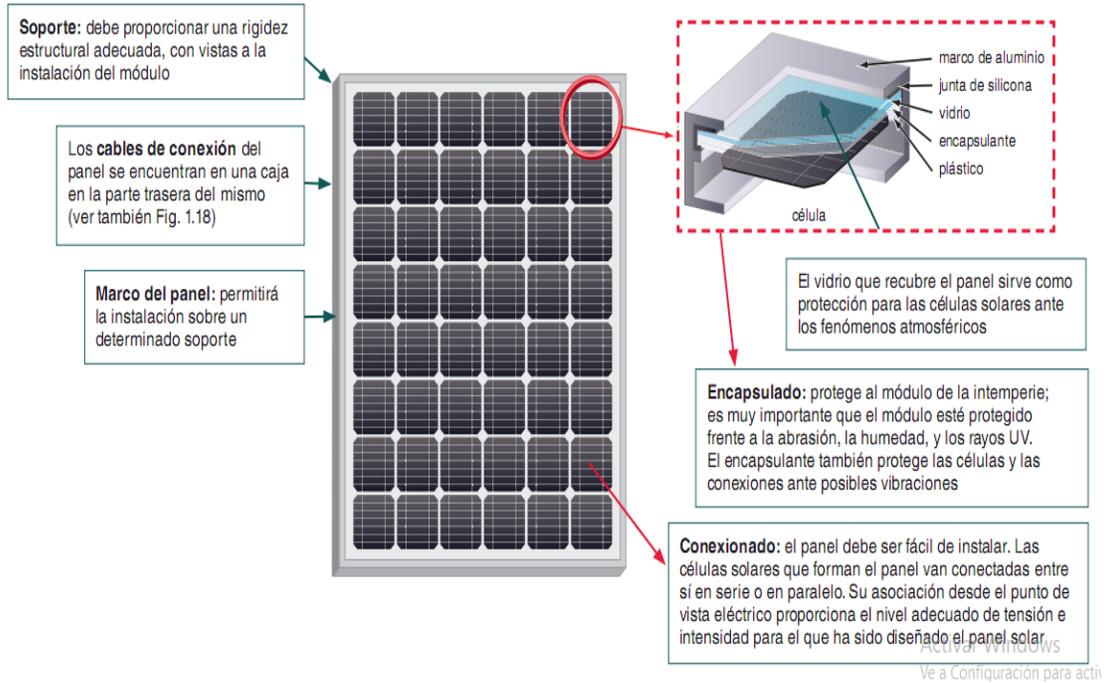


Anexo 3: Capacidad total de SSFV instalados en el mundo 2000-2019. Fuente: (Europe, 2020)





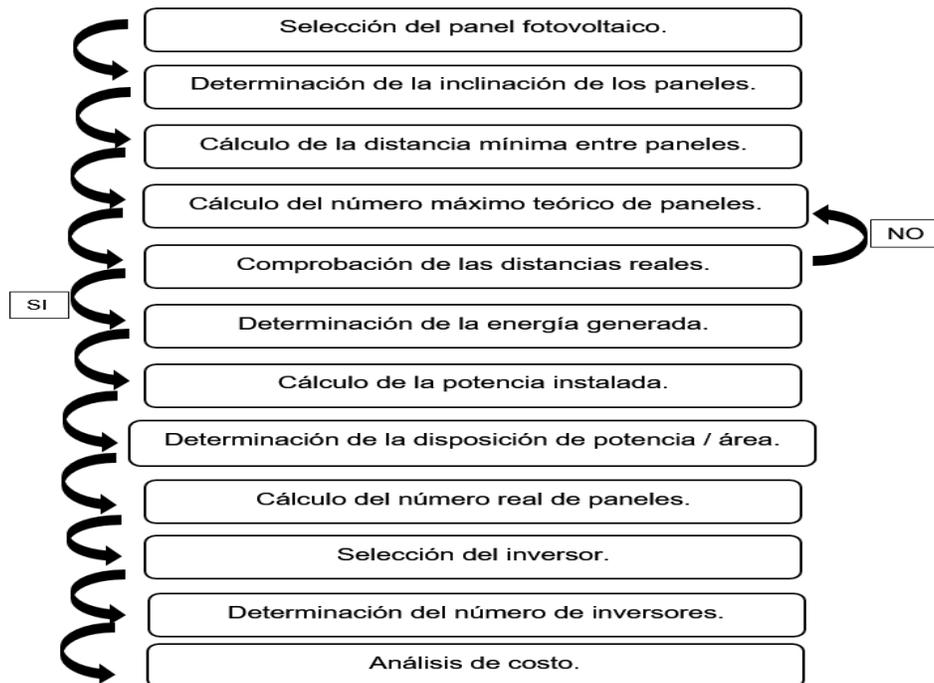
## Anexo 4: Constitución de un módulo fotovoltaico. Fuente: (Obrero, 2011)

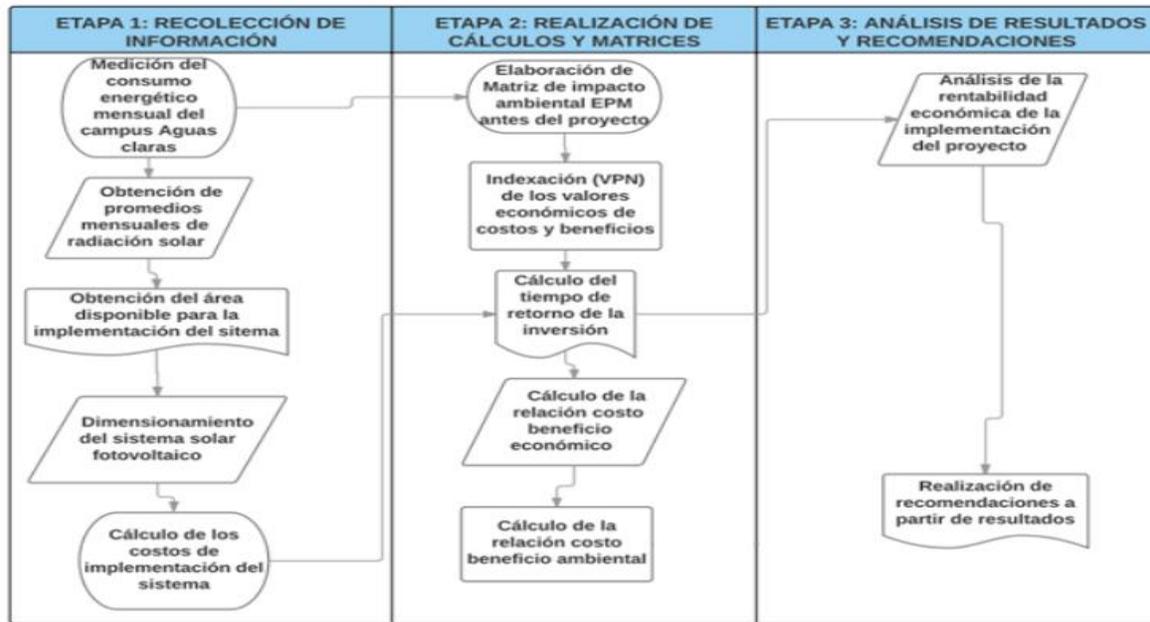




### Anexo 5: Secuencia de cálculo del Sistema Solar Fotovoltaico. Fuente: (Hernández Morales et al., 2020)

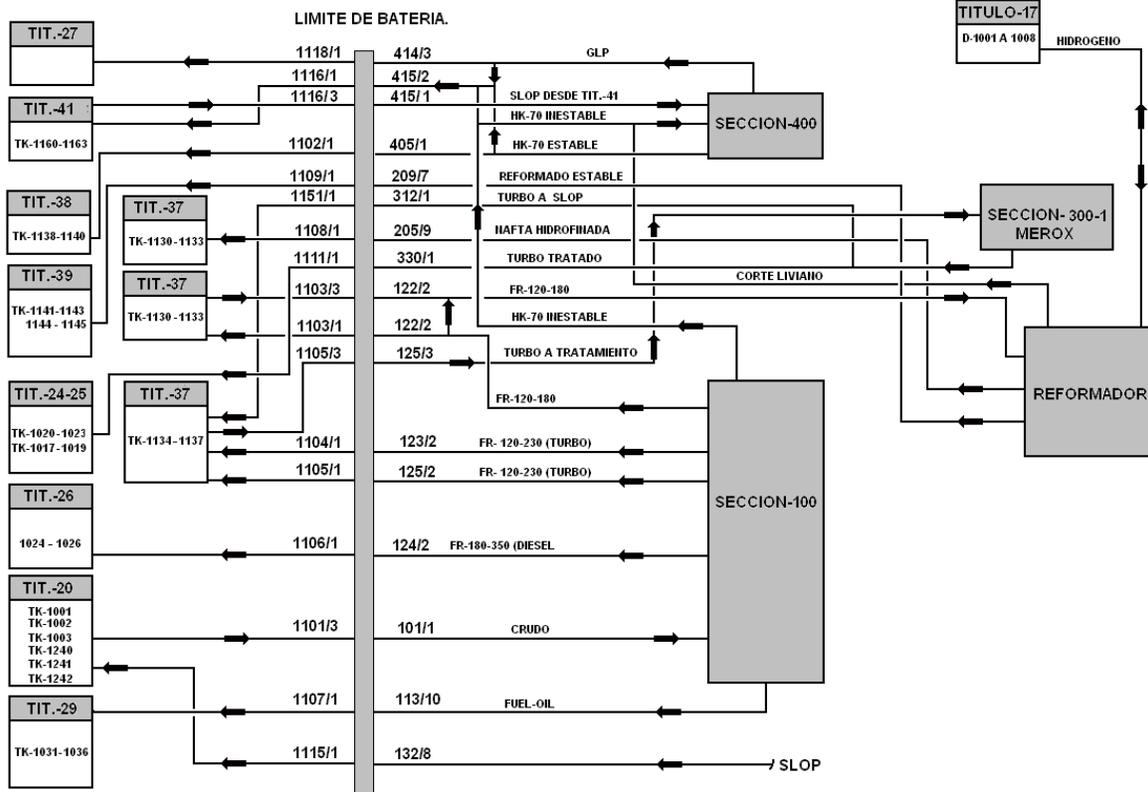
N°	Parámetro (Unidad)	Ecuación	Observaciones.
1	Selección del panel fotovoltaico.	(sin ecuación) s/e	Recomendación del fabricante en Cuba.
2	Angulo de inclinación del panel ( $\beta$ )	s/e	El ángulo ( $\beta$ )=Latitud del lugar. Para Cienfuegos $\beta=22^\circ$ . La Unión Eléctrica en Cuba considera $\beta=15^\circ$ .
3	Cálculo de la componente de la altura (h) del panel (m)	$h = L * \text{sen } \beta$	
4	Cálculo de la distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo medido horizontalmente. (b) (m).	$b = L * \text{cos } \beta$	
5	Cálculo del ángulo de incidencia del rayo solar respecto a tierra ( $\theta$ ) (Grados)	$\theta = 180 - 90 - \beta$	
6	Cálculo distancia entre borde superior panel anterior y borde inferior panel posterior (a) (m)	$a = h / \text{tg } \theta$	Se toma igual a 0,5m para que sirva de pasillo para limpieza y mantenimiento.
7	Cálculo de la distancia mínima entre paneles ( $d_{\text{min}}$ ) (m)	$d_{\text{min}} = a + b$	Se considerará $d_{\text{min}} = 2,00$ m para el montaje del sistema
8	Cálculo del número máximo de filas de paneles	$\# \text{ máx. filas} = \text{Ancho del edificio} / \text{Distancia entre paneles.}$	Se decide colocar 3 filas de paneles.
9	N°. Máximo de paneles por filas.	$\# \text{ máx. paneles por filas} = \text{long. edif.} / \text{ancho del panel.}$	Se limitan a 40 paneles por fila.
10	Número máx. de paneles en la edificación. (N° máx. de paneles)	$N^\circ \text{ máx. paneles} = N^\circ \text{ de filas} * N^\circ \text{ de paneles por filas}$	
11	Cálculo de la energía generada. (Eu.) Energía útil generada (kWh/día)	$Eu = 0,654 * HSP * P_n * N$	Dónde: Eu. - Energía útil generada (kWh/día); 0,654. Factor que toma en cuenta rendimientos y suciedad.; HSP. - Hora Solar Pico de la región. (Para Cienfuegos es 5,6) $P_n$ . - Potencia nominal del panel FV. (kW/panel) N.- Número de paneles.
12	Cálculo de la potencia instalada. ( $P_{\text{inst.}}$ ) (KWp)	$P_{\text{inst.}} = N * (P_n / 1000)$	
13	Disposición (Area/Potencia) (m <sup>2</sup> /kW)	$A / P_{\text{ot.}} = \text{Area Edif.} / P_{\text{ot.}} \text{ Instalada}$	(Ver tabla 3)
14	Cálculo del número de inversores.	$N^\circ \text{ de Inversores} = P_{\text{ot.}} \text{ Demandada} / P_{\text{ot.}} \text{ Inversor}$	Se decide incluir dos inversores del tipo Sunny Tripower 25000TL. Ver figura 3 y características técnicas en el anexo1.

**Anexo 6: Pasos a seguir para el diseño del SSFV. Fuente: (Becerra, 2019)**

**Anexo 7: Ruta metodológica para el cálculo de un SSFV. Fuente: (Benito y Ruiz, 2018)**



**Anexo 8: Interrelación entre plantas. Fuente: Refinería Cienfuegos S.A.**  
**INTERRELACION ENTRE PLANTAS.**





Anexo 9 Vista del techo de la S-800(Panel de Control de la combinada). Fuente: Refinería Cienfuegos S.A.

### VISTA FRONTAL

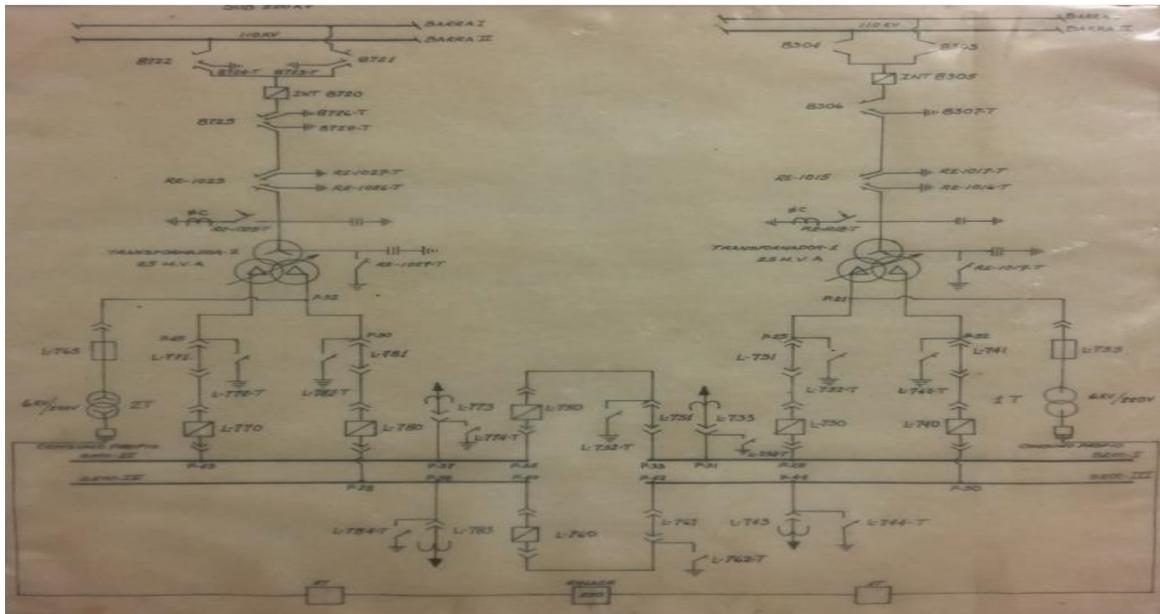


### VISTA LATERAL



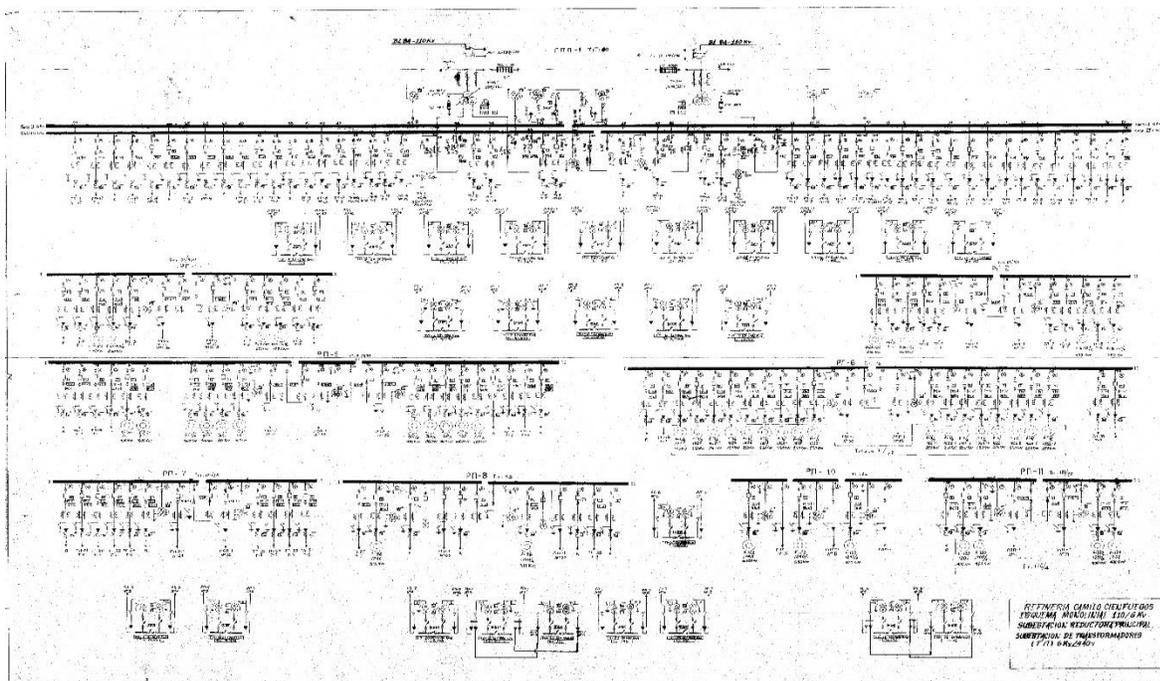


Anexo 10: Diagrama Unifilar principal de Refinería Cienfuegos S.A. Fuente: Refinería Cienfuegos S.A



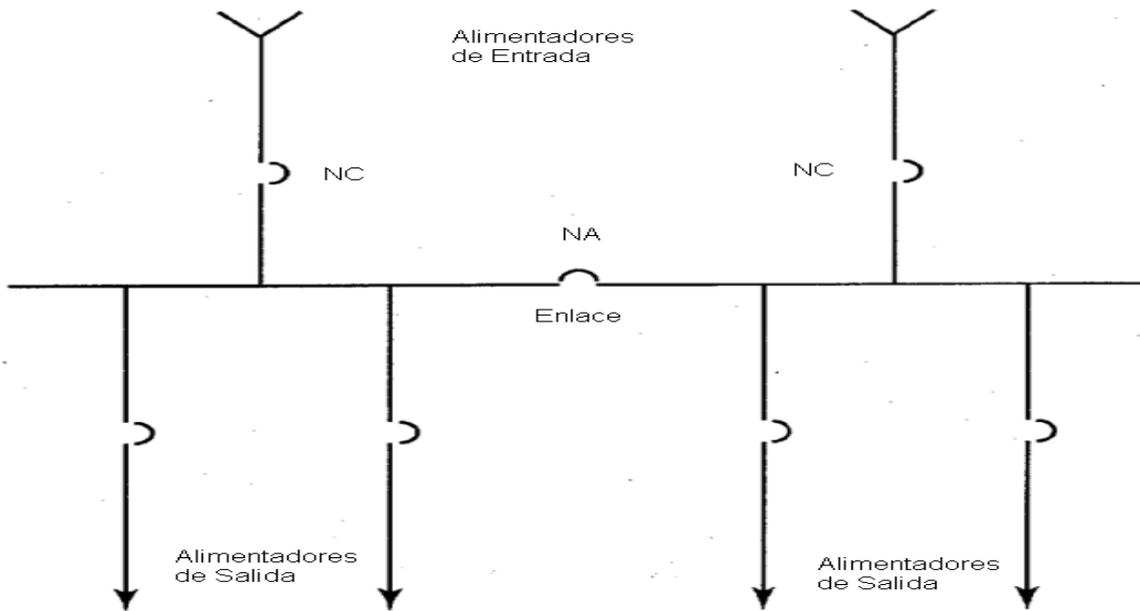


## Anexo 11: Esquema general monolinial de la Refinería Cienfuegos S.A. Fuente: Refinería Cienfuegos S.A





Anexo 12: Sistema Radial con Secundario Selectivo. Fuente: Refinería Cienfuegos S.A





**Anexo 13: Resumen de inversores necesarios para la instalación del SSFV. Fuente:  
Elaboración propia**

N° de Nave	Número de filas	Número de columnas	Total de Paneles(U)	Potencia instalada(kW)	Potencia del inversor(kW)	Cantidad de inversores	Total de inversores real (U)
1	7	77	539	172.48	50	3.4496	4
2	8	71	568	181.76	50	3.6352	4
3	17	71	1207	386.24	50	7.7248	8
4	5	65	325	104	40	2.6	3
5	11	59	649	207.68	50	4.1536	5
6	7	53	371	118.72	40	2.968	3
7	8	53	424	135.68	50	2.7136	3
8	8	47	376	120.32	40	3.008	3
9	8	41	328	104.96	40	2.624	3
10	8	41	328	104.96	40	2.624	3
11	8	35	280	89.6	50	1.792	2
12	11	35	385	123.2	40	3.08	3
13	5	35	175	56	20	2.8	3
14	8	29	232	74.24	25	2.9696	3
15	5	29	145	46.4	25	1.856	2
16	5	29	145	46.4	25	1.856	2
17	5	29	145	46.4	25	1.856	2
18	5	29	145	46.4	25	1.856	2
19	2	23	46	14.72	17	0.86	1
20	5	23	115	36.8	20	1.84	2
21	5	23	115	36.8	20	1.84	2
22	5	23	115	36.8	20	1.84	2
23	5	17	85	27.2	30	0.90	1
24	5	17	85	27.2	30	0.90	1
25	5	17	85	27.2	30	0.90	1
26	5	17	85	27.2	30	0.90	1



## Anexo 14: Características de los inversores ASP-17-20-25-30-40-50KHF Aotai Electric de 17-20-25-30-40-50kW. Fuente: (ENF Solar, 2020)

Technical Data					
Input	17KTLC	20KTLC	System data	17KTLC	20KTLC
Max. DC input power	18700W	22000W	Max. efficiency	98%	
Max. DC input voltage	900V		Euro. efficiency	97.5%	
Max. DC input current	2x20A		Humidity range	0-95% non-condensing	
MPPT voltage range	250-800V		Cooling type	Air cooling	
Recommended MPP operating voltage	650V		Temperature range	-25--+60°C	
No. of MPPT	2		Power consumption at night	< 1W	
Max. no. of strings per MPPT	3		Max. working altitude	4000m(Operation with derating above 2000m)	
<b>Output</b>			Display	Two line LCD/Two LEDs/ One voice operated switch	
Rated output power	17000W	20000W	Communication interface	RS485/CAN bus/WiFi(optional)	
Max. output power	18.7KVA	22KVA	<b>Mechanical data</b>		
Max. output current	27A	32A	Dimensions (WxHxD)	445x680x240mm	
Rated grid voltage	400V		Weight	42Kg	
Grid voltage range	310-450Vac		Protection class	IP65	
Rated grid frequency	50Hz/60Hz		<b>Standard</b>		
Grid frequency range	47-51.5Hz/57-61.5Hz		Grid-connected standard	NB/T32004-2013; GB/T19964-2012	
THD	< 2% (Under the rated power)		Safety standard	NB/T32004-2013; IEC 62109-1/2	
Power factor	0.9 leading ~ 0.9 lagging		Electromagnetic compatibility	IEC 61000-6-2/4	
DC current injection	< 0.5% (Under the rated power)				

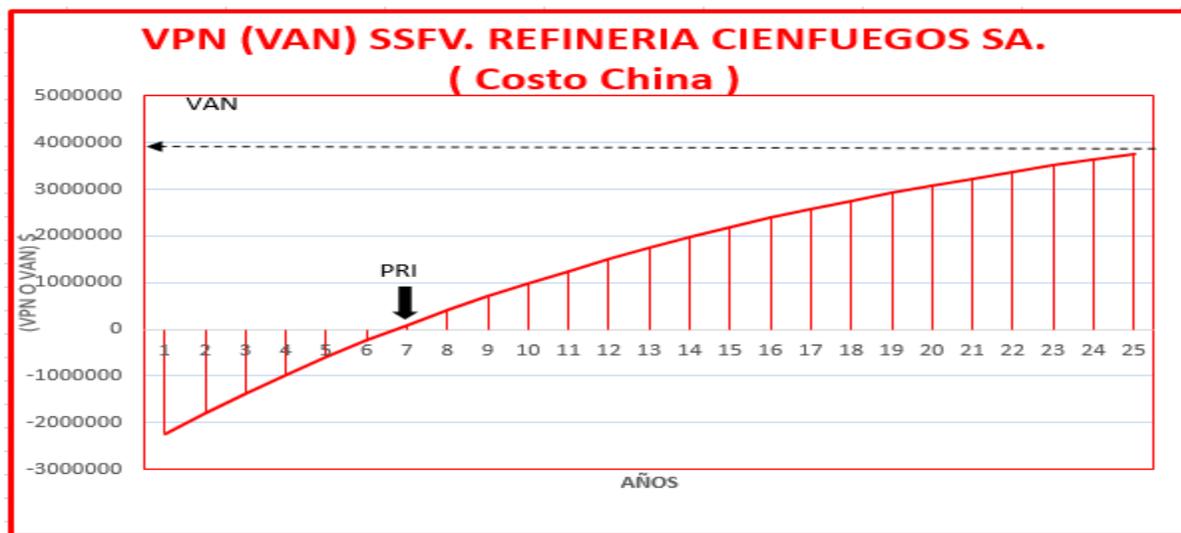
Technical Data									
Input	22KTLC	25KTLC	30KTLC	40KTLC	System data	22KTLC	25KTLC	30KTLC	40KTLC
Max. DC input power	24200W	27500W	33000W	44000W	Max. efficiency	98.7%			
Max. DC input voltage	1000V				Euro. efficiency	98%			
Max. DC input current	2x33A				Humidity range	0-95% non-condensing			
MPPT voltage range	280-950V				Cooling type	Intelligent air cooling			
Recommended MPP operating voltage	650V				Temperature range	-25--+60°C			
No. of MPPT	2				Power consumption at night	< 1W			
Max. no. of strings per MPPT	5				Max. working altitude	4000m(Operation with derating above 2000m)			
<b>Output</b>					Display	Two line LCD/Two LEDs/ One voice operated switch			
Rated output power	22000W	25000W	30000W	40000W	Communication interface	RS485/CAN bus/WiFi(optional)			
Max. output power	24.2KVA	27.5KVA	33KVA	44KVA	<b>Mechanical data</b>				
Max. output current	35A	40A	48A	48A	Dimensions (WxHxD)	620x970x260mm			
Rated grid voltage	400V	400V	400V	480V	Weight	65Kg	72Kg		
Grid voltage range	310-480Vac	310-480Vac	310-480Vac	422-528Vac	Protection class	IP65			
Rated grid frequency	50Hz/60Hz				<b>Standard</b>				
Grid frequency range	47-51.5Hz/57-61.5Hz				Grid-connected standard	NB/T32004-2013; GB/T19964-2012			
THD	< 2% (Under the rated power)				Safety standard	NB/T32004-2013; IEC 62109-1/2			
Power factor	0.8 leading ~ 0.8 lagging				Electromagnetic compatibility	IEC 61000-6-2/4			
DC current injection	< 0.5% (Under the rated power)								





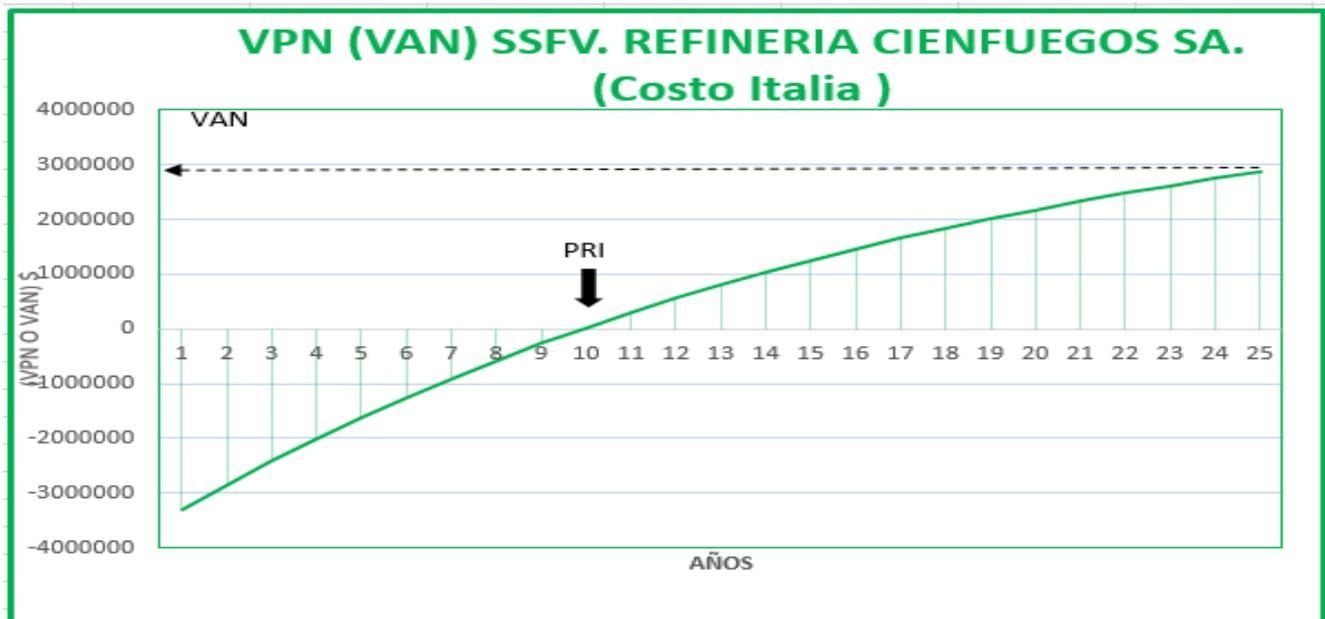
**Anexo 15: Análisis económico de la inversión de SSFV del caso de estudio. Fuente:  
Elaboración propia.**

CHINA						
N°	Datos iniciales	0	1	2	24	25
1	Ingresos (I), \$		835791	835791	835791	835791
2	Gastos (G), \$		125368.65	125368.65	125368.65	125368.65
3	Costo inversión (Ko)	-2716045				
4	Tasa de descuento (r), %		8	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35
8	Vida útil estimada, años		25	25	25	25
Resultados						
9	Años	0	1	2	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		108641.82	108641.82	108641.82	108641.82
11	Flujo de caja (Fc), \$		499799.16	499799.16	499799.16	499799.16
12	Tasa de descuento real (R)		0.0285714	0.0285714	0.0285714	0.0285714
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0.0585714	0.0585714	0.0585714	0.0585714
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0.9446694	0.8924002	0.2551032	0.2409882
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		472144.96	446020.88	127500.38	120445.71
16	Flujo descontado acumulado (Fda), VPN, \$	-2716045	-2243900	-1797880	3640275.2	3760720.9



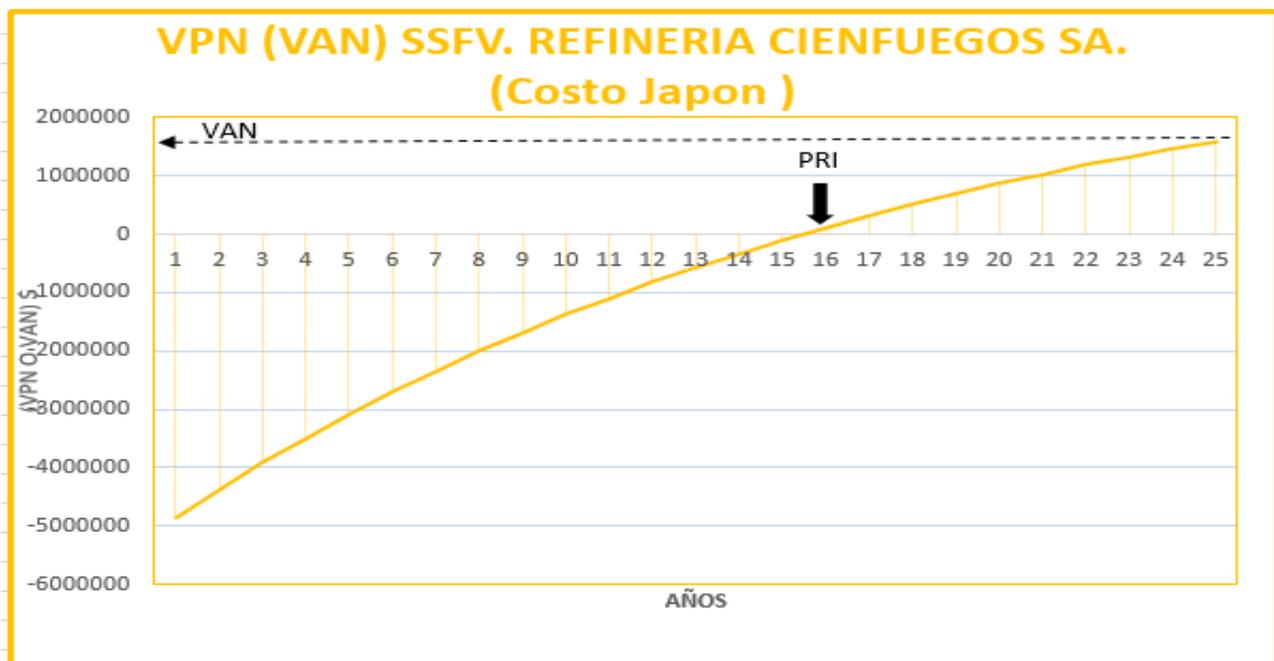


Italia						
N°	Datos iniciales	0	1	2	24	25
1	Ingresos ( I ), \$		835791	835791	835791	835791
2	Gastos (G), \$		125368.65	125368.65	125368.65	125368.65
3	Costo inversión (Ko)	-3797656				
4	Tasa de descuento (r) , %		8	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35
8	Vida util estimada, años		25	25	25	25
Resultados						
9	Años	0	1	2	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		151906.24	151906.24	151906.24	151906.24
11	Flujo de caja (Fc), \$		514941.712	514941.712	514941.712	514941.712
12	Tasa de descuento real (R)		0.02857143	0.02857143	0.02857143	0.02857143
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0.05857143	0.05857143	0.05857143	0.05857143
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0.94466937	0.89240021	0.25510324	0.24098821
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		486449.66	459534.092	131363.297	124094.883
16	Flujo descontado acumulado (Fda),VPN, \$	-3797656	-3311206.34	-2851672.25	2751243.75	2875338.64





Japón						
N°	Datos iniciales	0	1	2	24	25
1	Ingresos ( I ), \$		835791	835791	835791	835791
2	Gastos (G), \$		125368.65	125368.65	125368.65	125368.65
3	Costo inversión (Ko)	5359983	-			
4	Tasa de descuento (r) , %		8	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35
8	Vida útil estimada, años		25	25	25	25
Resultados						
9	Años	0	1	2	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		214399.32	214399.32	214399.32	214399.32
11	Flujo de caja (Fc), \$		536814.29	536814.29	536814.29	536814.29
12	Tasa de descuento real (R)		0.02857143	0.02857143	0.02857143	0.02857143
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0.05857143	0.05857143	0.05857143	0.05857143
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0.94466937	0.89240021	0.25510324	0.24098821
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		507112.014	479053.185	136943.063	129365.916
16	Flujo descontado acumulado (Fda),VPN, \$	5359983	-	-4373817.8	1467086.73	1596452.64





Copextel						
N°	Datos iniciales	0	1	2	24	25
1	Ingresos ( I ), \$		835791	835791	835791	835791
2	Gastos (G), \$		125368.65	125368.65	125368.65	125368.65
3	Costo inversión (Ko)	6129129	-			
4	Tasa de descuento (r) , %		8	8	8	8
5	Tasa de inflación (f), %		5	5	5	5
6	Margen de riesgo, %		3	3	3	3
7	Tasa de impuesto (t), %		35	35	35	35
8	Vida útil estimada, años		25	25	25	25
Resultados						
9	Años	0	1	2	24	25
10	Depreciación (Dep), \$		245165.16	245165.16	245165.16	245165.16
11	Flujo de caja (Fc), \$		547582.334	547582.334	547582.334	547582.334
12	Tasa de descuento real (R)		0.02857143	0.02857143	0.02857143	0.02857143
13	Tasa de descuento real con margen (D)		0.05857143	0.05857143	0.05857143	0.05857143
14	Factor de descuento (Fdesc.)		0.94466937	0.89240021	0.25510324	0.24098821
15	Flujo de caja descontado (Fd), \$		517284.256	488662.59	139690.026	131960.888
16	Flujo descontado acumulado (Fda),VPN, \$	6129129	-5611844.74	-5123182.15	834886.013	966846.9

