

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
“Carlos Rafael Rodríguez Rodríguez”
Facultad de Ingeniería



UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS
INGENIERÍA

**Título: Metodología para la integración de instalaciones solares fotovoltaicas
en edificaciones hoteleras del Caribe.**

Autor: Adiel Fajardo Gonzalo

Tutores:

Ing. Luis Angel Iturralde Carrera.

Ing. Ernesto Molina Santana.

MSc. Reinier Jiménez Borges.

Curso 2021 - 2022

Cienfuegos, Cuba

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, como parte de la culminación de los estudios de la carrera de Ingeniería Mecánica, autorizando además que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial o total; y por tanto no podrá ser presentado en eventos, ni publicado sin la aprobación de la institución y el autor.

Firma del autor.

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

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

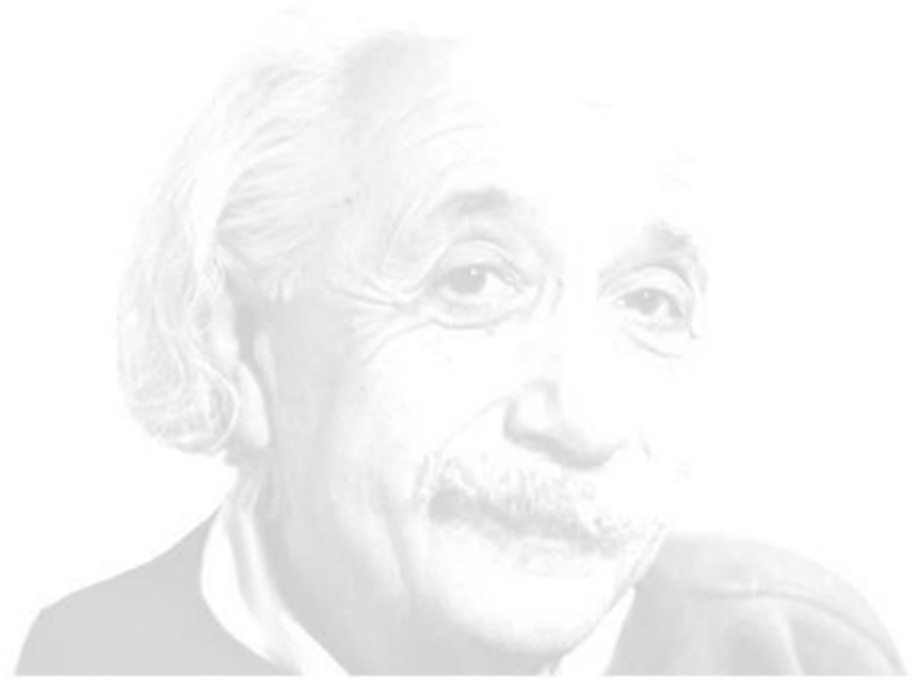
Vice Decano.
Firma.

Firma del Tutor. Nombre y Apellidos.

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

Pensamiento:

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.



Albert Einstein

Dedicatoria

A mi familia, que tanto directa como indirectamente me han apoyado en todo momento, en especial a mis padres, por educarme y enseñarme que el estudio es la mejor manera de crecer en la vida.

Agradecimientos

A mis padres por apoyarme siempre y hacer posibles que haya podido llegar hasta aquí.

A mi novia por su compañía incondicional.

A mis hermanos.

A mis tutores.

Resumen:

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones hoteleras del Caribe. Se propone el análisis energético de la edificación en cuestión para la posterior selección y dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico a instalar, teniendo en cuenta aspectos como el diseño estructural de los soportes de los paneles, el cálculo de la disposición del sistema solar fotovoltaico y el diseño de la red eléctrica del sistema solar fotovoltaico. Se plantea el procedimiento para la evaluación económica tanto para la empresa como para el país. De igual manera se estudia el impacto medioambiental que conlleva la implementación de esta tecnología. Para la realización de este trabajo se utilizan métodos de cálculo tradicionales y simulaciones mediante softwares, obteniendo como resultado un total de 379 módulos fotovoltaicos a instalar entre los tres bloques habitacionales con una potencia de generación de 186.9 MWh/año. El Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) es de aproximadamente 6 años y el Valor Presente Neto (VPN) de la inversión en un intervalo de 25 años es de 1 072 675 829.00CUP. Durante un mismo periodo de tiempo se deja de verter a la atmósfera un total de 5331.9 tCO₂ en términos de combustible no quemado.

Palabras claves: sistemas solares fotovoltaicos, análisis energético, módulo fotovoltaico, evaluación económica, impacto medioambiental.

Summary:

The objective of this work is to develop a methodology for the installation of photovoltaic solar systems in hotel buildings in the Caribbean. The energy analysis of the building in question is proposed for the subsequent selection and dimensioning of the photovoltaic solar system to be installed, taking into account aspects such as the structural design of the panel supports, the calculation of the layout of the photovoltaic solar system and the design of the electrical network of the photovoltaic solar system. The procedure for economic evaluation is proposed for both the company and the country. In the same way, the environmental impact of the implementation of this technology is studied. To carry out this work, traditional calculation methods and software simulations are used, obtaining as a result a total of 379 photovoltaic modules to be installed between the three housing blocks with a generation power of 186.9MWh/year. The Investment Recovery Period (PRI) is approximately 6 years and the Net Present Value (NPV) of the investment in a 25-year interval is 1,072,675,829.00 CUP. During the same period of time, a total of 5,331.9 tCO₂ in terms of unburned fuel is not discharged into the atmosphere.

Keywords: photovoltaic solar systems, energy analysis, photovoltaic module, sizing, economic evaluation, environmental impact.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	11
Problema.....	14
Hipótesis.....	14
Objetivos específicos.....	15
1.1. El cambio climático en la actualidad.....	16
1.2. Matriz energética mundial.....	17
1.3. Matriz energética en Cuba.	18
1.4. Las fuentes renovables de energía como sustitutas de los portadores energéticos tradicionales.....	19
1.4.1. Distintas fuentes renovables de energía.	19
1.4.1.1. Energía Eólica.....	20
1.4.1.2. Nuclear.....	20
1.4.1.3. Hidráulica.....	21
1.4.1.4. Solar térmica.....	21
1.4.1.5. Energía solar fotovoltaica.....	22
1.4.2. ¿Qué es la radiación solar?.....	22
1.4.3. El efecto fotovoltaico.	24
1.5. Las instalaciones fotovoltaicas como alternativa viable para la generación eléctrica.	25
1.5.1. ¿Que son las celdas fotovoltaicas y cómo funcionan?.....	26
1.5.2. Componentes de una instalación fotovoltaica.....	26
1.5.2.1. Panel fotovoltaico:.....	26
<i>Paneles solares mono-cristalinos de celdas de silicio:</i>	27
<i>Paneles solares poli-cristalinos:</i>	27
<i>Paneles solares amorfos (capa fina):</i>	28
1.5.2.2. Regulador de carga.	29
1.5.2.3. Inversores de corriente.	30
Tipos de inversores y usos:	30
1.5.2.4. Seguidores solares.	31
1.5.2.5. Cableado eléctrico.....	32
1.5.2.6. Baterías.	33
1.6. Utilización de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones.....	33
1.7. Comparación entre algunas de las metodologías utilizadas.....	33

1.8. La energía solar fotovoltaica en Cuba.....	36
Conclusiones parciales del capítulo.....	38
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SSFV EN EDIFICACIONES.	39
2.1. Caracterización energética.....	40
2.2. Caracterización del sistema eléctrico del lugar.....	42
2.3. Análisis estructural del sitio.....	42
2.3.1. Revisión de estudios estructurales previos ejecutados a la entidad.	43
2.4. Revisión de la orientación y coordenadas del sitio.....	43
2.5. Clasificación de la disponibilidad de las áreas de la entidad para la posible instalación de Sistemas Solares Fotovoltaicos (SSFV).....	43
2.6. Estudio de sombras en las áreas seleccionadas.	43
2.7. Selección del SSFV a utilizar.....	43
2.7.1. Selección del panel solar. Requisitos a tener en cuenta.	43
2.8. Diseño estructural de los soportes de los paneles.....	43
2.9. Cálculo de la disposición del SSFV.....	52
2.11. Análisis de costos e impacto medioambiental.	63
2.11.1. Análisis de costo para la institución.	63
2.12. Análisis de costo para el país.....	67
2.13. Análisis y aporte medio ambiental.	68
Conclusiones parciales del capítulo	69
CAPITULO 3. ESTUDIO DE CASO EN HOTEL PUNTA LA CUEVA. CIENFUEGOS.	70
3.1. Línea Base Energética (LBen) e Indicador de Desempeño Energético (IDEn) 73	
3.2. Oportunidades de ahorro	76
3.2.1. Climatización:.....	77
3.2.2. Iluminación:	77
3.2.3. Motores eléctricos:	78
3.2.4. Propuesta para la sustitución de equipos.....	78
3.3. Estudio de sombras en las áreas seleccionadas:	78
3.4. Cálculo de resistencia de la propuesta de soporte para el SSFV.	79
3.5. Cálculo de la disposición del SSFV.....	82
3.6. Evaluación económica.....	90
3.6.1. Costos de Inversión.	90
3.6.2. Datos de las tasas a utilizar en la evaluación económica.....	91

3.6.3. Consumos y costos de energía eléctrica de la edificación.	91
3.7. Impacto medioambiental.	94
3.8. Comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos.	95
Conclusiones parciales del capítulo	96
CONCLUSIONES GENERALES.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98
ANEXOS.....	107

Introducción

Son sabidas las consecuencias del cambio climático global en todos los ámbitos de la vida del planeta, cambio que es causado principalmente por la concentración creciente de gases de efecto invernadero (GEI), en especial, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Recientemente se ha confirmado la importancia del uso de energía en la emisión de GEI, tal como se observa en Estados Unidos, donde el uso de energía tiene una participación del 86% del total de producción de GEI (Andrade et al., 2017).

El desarrollo científico, tecnológico y económico requieren altas demandas de energía en la actualidad, se prevé que el gasto energético aumente de forma exponencial, debido al crecimiento de la población y al aumento de la esperanza de vida, además de que la era digital y de las comunicaciones esta cimentada sobre un alto consumo energético, lo que supone un problema a nivel mundial y la necesidad urgente de realizar esfuerzos por investigar sobre energías renovables, de tal forma que permita mitigar los vestigios que el ser humano ha dejado al abusar de los recursos de origen fósil.

Gran parte de la energía renovable obtenida a partir del viento, mareomotriz, geotérmica, biomasa y solar, se convierte posteriormente en energía eléctrica que se distribuirá a la red de suministro eléctrico directamente o a satisfacer demandas independientes. Actualmente, existe un interés mundial por la protección del medio ambiente, la mitigación del impacto que ha generado el hombre sobre él y el uso racional de los recursos naturales. En sintonía con lo anterior, existe también un interés global por incentivar el uso de las energías renovables como medio de disminución de la dependencia por los combustibles fósiles, atenuando los riesgos adicionales, como la progresiva contaminación y el incremento de gases de invernadero, que estos provocan (Ballesteros, 2016).

La energía solar es la fuente de energía más abundante de la Tierra: renovable, disponible, gratuita y en cantidad muy superior a las necesidades energéticas de la población mundial. Sin embargo, su aprovechamiento presenta problemas técnicos y económicos que hacen difícil utilizarla en la práctica (Callisaya, 2012).

Del 100% de la radiación solar, sólo un 51% llega a la Tierra. Sin embargo, un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa, y sólo un 25% penetra directamente hasta la superficie del planeta (Guzmán et al., 2016).

El porcentaje de la energía del sol que llega directamente a la Tierra se aprovecha en alguna medida para el calentamiento de agua, a través de colectores solares, o para producir corriente eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Estas formas de producción de energía son las más respetuosas con el medio ambiente, por lo que reducen la dependencia energética de energías fósiles y contaminantes como el petróleo (Guzmán et al., 2016).

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de equipos eléctricos y electrónicos que producen energía eléctrica a partir de la radiación solar. El principal componente de este sistema es el módulo fotovoltaico, a su vez compuesto por células capaces de transformar la energía luminosa incidente en energía eléctrica de corriente continua. El resto de los equipos incluidos en un sistema fotovoltaico depende en gran medida de la aplicación a la que está destinado (Medina, 2020).

A grandes rasgos los sistemas fotovoltaicos pueden clasificarse en tres grandes grupos: conectados a red, autónomos y de bombeo.

Los sistemas conectados a red producen energía eléctrica para ser inyectada íntegramente a la red convencional. Dado que no deben satisfacer ninguna demanda de consumo de forma directa ni garantizar el mismo, no necesitan incorporar equipos de acumulación de energía. Para permitir el correcto acoplamiento con la red eléctrica estos sistemas incorporan un equipo inversor que adecúa la potencia producida por el generador fotovoltaico a las condiciones de la red convencional. Estos sistemas pueden a su vez ser divididos en sistemas instalados sobre suelo y sistemas en edificación.

Los sistemas sobre suelo, concebidos exclusivamente para producir energía y obtener el rendimiento económico asociado, suelen superar los 100 kW de potencia. Los sistemas en edificación abarcan funciones adicionales a la producción de energía, tales como sustitución de componentes arquitectónicos, efecto estético,

sombreado de acristalamientos, etc. En general, son sistemas más pequeños que los instalados sobre suelo, normalmente de potencias inferiores a los 100 kW.

Los sistemas autónomos abarcan una variedad muy amplia de aplicaciones. Su denominador común es la necesidad de satisfacer una demanda energética determinada. Por esta razón, prácticamente todos los sistemas autónomos incorporan un equipo de acumulación de energía. Estos sistemas pueden ser clasificados en tres grupos por razón de su aplicación asociada: profesionales, electrificación rural y pequeño consumo.

Los sistemas de bombeo emplean la energía eléctrica que produce el generador fotovoltaico para accionar una motobomba que eleva y transporta agua desde un acuífero hasta un depósito o una red de distribución. Para reducir costes y aumentar la fiabilidad, en estos sistemas es frecuente acumular la energía en forma de energía potencial del agua almacenada en el depósito elevado. Las aplicaciones de los sistemas de bombeo incluyen el suministro de agua para consumo humano o animal, el riego de plantaciones individuales o comunitarias y la desalinización del agua extraída con sistemas de ósmosis inversa (Perpiñán, 2013).

Los sistemas solares fotovoltaicos constituyen una alternativa promisorio para el abastecimiento energético de edificaciones. Estos tienen la capacidad de desplegarse en los mismos, tanto en adhesión como en integración arquitectónica, presentan además una reducción de costos consistente (Rabaia et al., 2021). De forma complementaria, la generación fotovoltaica muestra ventajas sociales, como la democratización energética, promoviendo la generación de puestos de trabajo (D'amanzo et al., 2020). En un escenario óptimo, los recursos económicos destinados a la compra de energía podrían ser orientados a financiar empresas de instalación y mantenimiento de los equipos (Marín, 2018).

Consumir energía obtenida en el mismo lugar o muy próximamente es una condición ideal, ambiental y operacionalmente, porque reduce las pérdidas por traslado a la vez que promueve la autonomía energética. En el 2013, en Estados Unidos, el 28,6 % de los sistemas de generación fotovoltaica habían sido instalados en edificaciones, desde residencias hasta edificios industriales. A escala mundial se

estima que entre el 25 al 35 % de los sistemas de generación fotovoltaica, corresponden a instalaciones residenciales (Zalamea, 2017).

Hoy hay un ambiente global propicio para las fuentes renovables de energías, un aumento significativo de la producción mundial paneles fotovoltaicos, así como una fuerte disminución de sus costos; predomina en más del 99 % la energía fotovoltaica conectada a la red eléctrica y se logra la paridad del costo del kWh fotovoltaico con el de la red convencional (Stolik, 2014).

En Cuba la intensidad de la irradiación solar tiene un valor considerable entre 800 y 900W/m² cuando incide perpendicularmente sobre una superficie y más de 5kWh/m² como valor promedio anual. La variación de un lugar a otro del país no es significativa, debido a su posición geográfica alargada de este a oeste y entre los 19.8° y 23.2° de latitud norte (Martín et al., 2018). Tampoco es tan significativa la variación entre el verano y el invierno como en otros países, por lo que en Cuba se puede utilizar la irradiación solar en cualquier lugar y época del año (Cisneros, 2021).

Debido a la situación económica del país y al déficit energético actual, el aprovechamiento de energías renovables, como la fotovoltaica, se ha convertido en una premisa; llevándose a desarrollar grandes proyectos en este campo. El presente trabajo tiene como objetivo elaborar una metodología para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones hoteleras del país.

Problema

La ausencia de una metodología integral para el dimensionamiento de Sistemas Solares Fotovoltaicos que permita aumentar la eficiencia de este y disminuir las emisiones de agentes contaminantes, tomando en cuenta la eficiencia energética mediante la norma ISO 50001, estudios de sombra y diseño de los soportes de estos sistemas.

Hipótesis

El desarrollo e implementación de una metodología para el procedimiento de cálculo de los sistemas solares fotovoltaicos que considere un estudio de sombra, las

variables climatológicas del sitio y una utilización óptima del área, debe permitir un mejor aprovechamiento en el dimensionamiento e instalación de dichos sistemas.

Objetivo general:

Desarrollar una metodología para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones hoteleras del Caribe.

Objetivos específicos

- Estudiar las tendencias nacionales e internacionales de la utilización de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones y principales tecnologías.
- Identificar las herramientas informáticas más comunes para el diseño de estos sistemas.
- Desarrollar una metodología para la integración de estos sistemas en edificaciones, incluyendo criterios económicos y de sostenibilidad ambiental.
- Validar la metodología propuesta en un estudio de caso.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

Este capítulo está encaminado a realizar una revisión del estado de la integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones en la actualidad. Para esto se hace referencia a la situación medioambiental por la que atraviesa el planeta y la ventaja que representa el uso de fuentes de energías renovables. En relación a los sistemas solares fotovoltaicos, se abordan temas como, componentes, principales tecnologías y precios; todo esto con el fin de tener una mayor información, de gran utilidad a la hora de seleccionar las tecnologías a instalar en los generadores fotovoltaicos.

1.1. El cambio climático en la actualidad.

La variación del clima debido al efecto invernadero, producido por las acciones del hombre, es considerado uno de los principales problemas del siglo actual. Esto no solo trae consigo consecuencias ambientales y el aumento de la temperatura media de la Tierra, si no que pone en discordancia los actuales esquemas de producción y consumo que han imperado en el modelo económico de los países desarrollados y al que aspiran las economías en transición, de ahí que se manifieste también como un problema de desarrollo económico, político y social.

Para mitigar el cambio climático es necesario disminuir de forma radical y permanente las emisiones a la atmósfera de los gases de efecto invernadero causados por actividades como los procesos industriales, principalmente, el consumo y producción energética mediante la extracción y combustión de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural).

En este contexto, cabe señalar que el dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmósfera, tanto por condiciones naturales, así

como por la quema de combustibles fósiles a gran escala para efectuar diversas actividades productivas, tales como la generación de electricidad, la cual es responsable de una parte significativa de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, ya que aun cuando se han realizado esfuerzos por desarrollar y aprovechar las energías prevalece todavía la dependencia hacia los hidrocarburos (Ibarra, 2018).

Según el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático -IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) las emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en alrededor del 78% al aumento de emisiones de GEI totales en el periodo de 1970 a 2010, correspondiendo el 47% de forma directa a la generación de energía eléctrica (Ibarra, 2018).

Conforme a las estadísticas presentadas por la Agencia Internacional de Energía, en 2014 las fuentes fósiles representaron el 82% de energía primaria en el suministro global, sobresaltando en la categoría de Energía, la producción de corriente eléctrica, la cual emitió el 42% del total de CO₂ liberado a la atmosfera ese año.

1.2. Matriz energética mundial.

De acuerdo con informes de la Agencia Internacional de la Energía, la demanda mundial de energía creció 2.3% en 2018, casi al doble de la tasa promedio desde 2010, motivada por un crecimiento económico del 3.5%, que no encontró en las opciones con bajas emisiones de carbono la respuesta para satisfacer el aumento de la demanda. China y Estados Unidos son los responsables del 38% de ese crecimiento, por ejemplo, su crecimiento en 2018 es: 1.3% crudo, 4.6% gas, 0.7% carbón, 3.3% nuclear, 3.1% hidroeléctrica, 2.5% biomasa, 4% electricidad y 14% otras renovables.

La participación de los combustibles fósiles en la demanda mundial de energía es del 80%, nivel que se ha mantenido estable durante varias décadas. el crecimiento de la energía nuclear se da principalmente como resultado de la nueva capacidad en China y el reinicio de cuatro reactores en Japón, a nivel mundial, la generación nuclear satisfizo el 7% del aumento en la demanda de energía. La energía renovable

crece con fuerza, en particular en la capacidad y generación de energía solar (32%). El gas natural fue la mayor fuente de crecimiento de energía, impulsado por el aumento de demanda y al cambio de carbón a gas, significativo en China y Estados Unidos y el programa de cambio de carbón a gas en los sectores industriales y residenciales en China en el marco de su política oficial por tener nuevamente un cielo azul (González, 2020).

1.3. Matriz energética en Cuba.

Actualmente Cuba depende en un 96.5% de los combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, esto se desglosa de la siguiente manera: 45% crudo, 18% motores Fuel, 15.1% Fuel térmicas, 14.1% gases acompañantes de la refinación del crudo y un 3.3% Diésel.

Por otra parte, solo el restante 4.5% de la electricidad se produce con fuentes de energía renovables, entre las cuales tenemos: 3.7% biomasa, 0.5% hidráulica, 0.2% sistemas fotovoltaicos y un 0.1% de eólica (Rosa et al., 2021). En la Figura 1 se muestra como se encuentra repartido el uso de los recursos energéticos para la producción de energía eléctrica en Cuba.

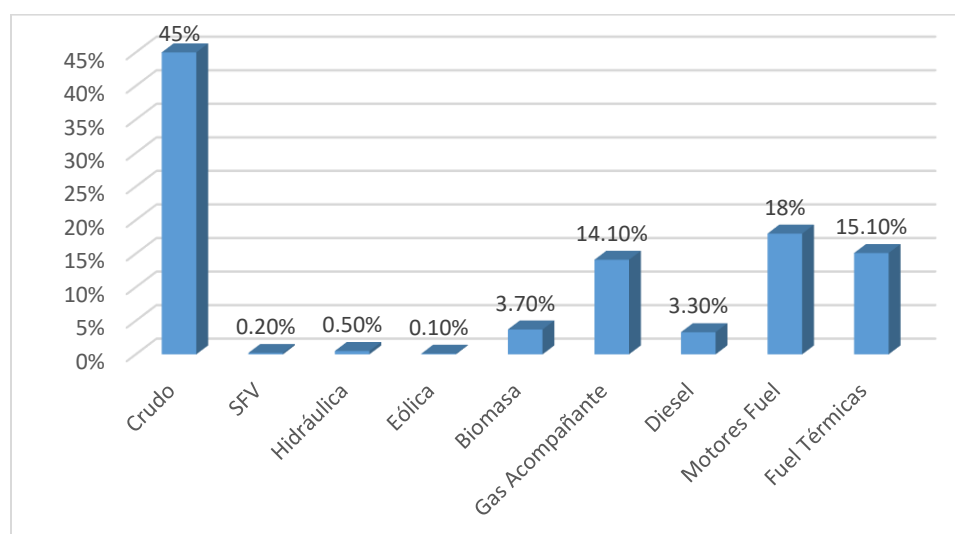


Figura 1. Matriz energética actual cubana. Datos obtenidos de (Rosa et al., 2021).

Como se puede apreciar, la generación de energía a partir de fuentes renovables es considerablemente baja, por lo que teniendo en cuenta la difícil situación energética del país y las condiciones ambientales del mundo en general, el fomento de las fuentes renovables de energía es una necesidad real en la actualidad cubana.

1.4. Las fuentes renovables de energía como sustitutas de los portadores energéticos tradicionales.

Se denomina Energía Renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales.

Las fuentes de energía renovable están en todo nuestro alrededor: agua, viento, sol... Cada día más personas las utilizan como parte de su vida diaria. Las utilizamos para calentar nuestros hogares en épocas frías, para operar nuestros electrodomésticos, ducharnos con agua caliente, irrigar campos con agua para agricultura, etc. (Spiegeler, 2016).

1.4.1. Distintas fuentes renovables de energía.

Las fuentes de energía renovable son formas alternativas de generación energética que aprovechan fuentes de origen renovable como energía hidráulica, eólica, solar, mareomotriz, geotérmica y de las biomasas. A diferencia de las fuentes de generación convencionales, estas permiten la descentralización del sistema de generación y hacen posible la implementación de servicios complementarios o de soporte, a partir de generación distribuida (Cortés et al., 2020).

Las energías renovables se han establecido como una tendencia mundial. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables; iniciativas de políticas aplicadas; un mejor acceso al financiamiento; seguridad energética; cuestiones medio ambientales; demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes; y la necesidad de acceso a una energía modernizada (Barrera et al., 2019).

En Cuba, la energía renovable tiene vital importancia para una economía que importa alrededor del 50% del combustible fósil que consume y cuya producción nacional de crudo, decreció en el año 2015 en un 2,9%. El estado cubano ha aprobado importantes documentos y normativas que contemplan alcanzar para el año 2030, un 24% de generación de energía eléctrica con Fuentes Renovables de Energía. El programa de apoyo a las fuentes renovables de energía en Cuba, financiado por la Unión Europea en el 2018, prevé la instalación de proyectos pilotos y demostrativos utilizando las fuentes renovables de energía, como apoyo al desarrollo local (Barrera et al., 2019).

Entre las fuentes renovables de energía más utilizadas tenemos:

1.4.1.1. Energía Eólica

La energía eólica es la energía cuyo origen proviene del movimiento de masa de aire es decir del viento.

En la tierra el movimiento de las masas de aire se debe principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de esta, moviéndose de alta a baja presión, este tipo de viento se llama viento geo estrófico.

1.4.1.2. Nuclear

La energía nuclear es la energía en el núcleo de un átomo. Los átomos son las partículas más pequeñas en que se puede dividir un material. En el núcleo de cada átomo hay dos tipos de partículas (neutrones y protones) que se mantienen unidas. La energía nuclear es la energía que mantiene unidos neutrones y protones.

La energía nuclear se puede utilizar para producir electricidad. Pero primero la energía debe ser liberada. Ésta energía se puede obtener de dos formas: fusión nuclear y fisión nuclear. En la fusión nuclear, la energía se libera cuando los átomos se combinan o se fusionan entre sí para formar un átomo más grande. En la fisión nuclear, los átomos se separan para formar átomos más pequeños, liberando energía. Las centrales nucleares utilizan la fisión nuclear para producir electricidad.

1.4.1.3. Hidráulica

La energía hidroeléctrica es electricidad generada aprovechando la energía del agua en movimiento. La lluvia o el agua de deshielo, provenientes normalmente de colinas y montañas, crean arroyos y ríos que desembocan en el océano. Los principales factores de los que depende la generación de energía eléctrica a partir el movimiento del agua son el caudal del flujo y la diferencia de altura. Esto conlleva a que su implementación se limite a lugares específicos, además de depender directamente de las lluvias; durante los periodos de sequía la generación de electricidad puede llegar a ser nula.

1.4.1.4. Solar térmica

La energía solar térmica o termo solar es aquella que aprovecha la energía de los rayos del sol para generar calor de forma limpia y respetuosa con el medio ambiente. A diferencia de otras tecnologías, cuya energía hay que consumirla en el momento de su generación, la solar térmica es una tecnología renovable con capacidad de almacenamiento, capaz de aportar electricidad a la red incluso en horas sin luz solar.

Existen dos sistemas para producir electricidad por energía solar térmica: de alta concentración y de baja concentración. El sistema de baja concentración, el más extendido comercialmente, emplea unos colectores de luz instalados en los tejados de las casas, con los que es posible cubrir las necesidades básicas de un hogar, como calentar agua o dotar de calefacción a las habitaciones

Estos sistemas operan a temperaturas de entre 100 y 400°C. La energía térmica procedente de los rayos solares llega a los captadores, calentando el fluido que circula por su interior (agua con anticongelante). Esta energía en forma de agua caliente llega hasta otro circuito donde se acumula en un depósito hasta poder ser utilizada. Entre sus aplicaciones destacan: el agua caliente sanitaria, la calefacción por suelo radiante, la climatización de piscinas, refrigeración y agua caliente para procesos industriales, entre otros (Spiegeler, 2016).

1.4.1.5. Energía solar fotovoltaica

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores (Spiegeler, 2016).

El establecimiento de un marco regulatorio estable y favorable hacia las energías renovables es de vital importancia para el desarrollo de la fotovoltaica. En los últimos años, las políticas económicas de apoyo a la energía fotovoltaica de los distintos países han ido pasando de retribuciones en forma de tarifas, a otros mecanismos retributivos como son las subastas. Al respecto de estas, dado el grado de aprendizaje alcanzado en la fotovoltaica y su continua reducción de costos, la tecnología se ha convertido en plenamente competitiva frente al resto de tecnologías de generación (Correia, 2020).

1.4.2. ¿Qué es la radiación solar?

La radiación solar es la energía electromagnética que surge de los procesos de fusión del hidrógeno (en átomos de helio) contenido en el sol.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre puede ser directa o dispersa. Mientras la radiación directa incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo de incidencia, la dispersa cae en esa superficie con varios ángulos. Es necesario recordar que cuando la radiación directa no puede dar a una superficie a causa de la presencia de un obstáculo, el área en sombra no se encuentra completamente a oscuras gracias a la contribución de la radiación dispersa. Esta observación tiene importancia técnica para los dispositivos fotovoltaicos, que pueden funcionar incluso solamente con radiación dispersa (Callisaya, 2012).

En la Figura 2 se muestra la descomposición de la radiación solar.

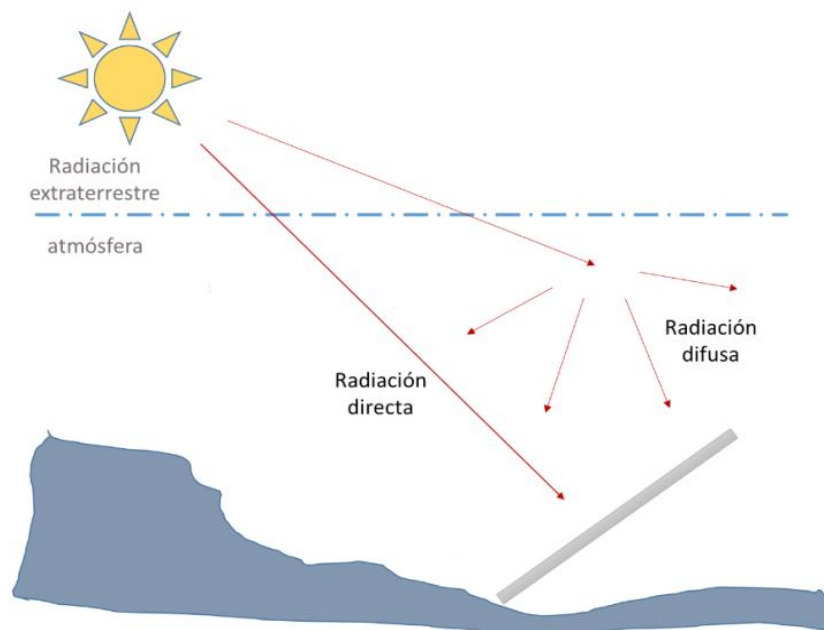


Figura 2. Componentes de la radiación solar. Fuente (Bastos, 2020).

En la Figura 3 se muestra la radiación solar global que incide en todo el mundo como promedio anual, de la cual se puede observar que los países que están sobre y cerca de la línea ecuatorial son sobre los que incide una mayor radiación, debido a que estos países no cuentan con el fenómeno de las estaciones. Cabe detallar que los indicadores de la radiación solar en el mapa están dados en kilowatt hora por metro cuadrado al día (kWh/m^2) (Bastos, 2020).

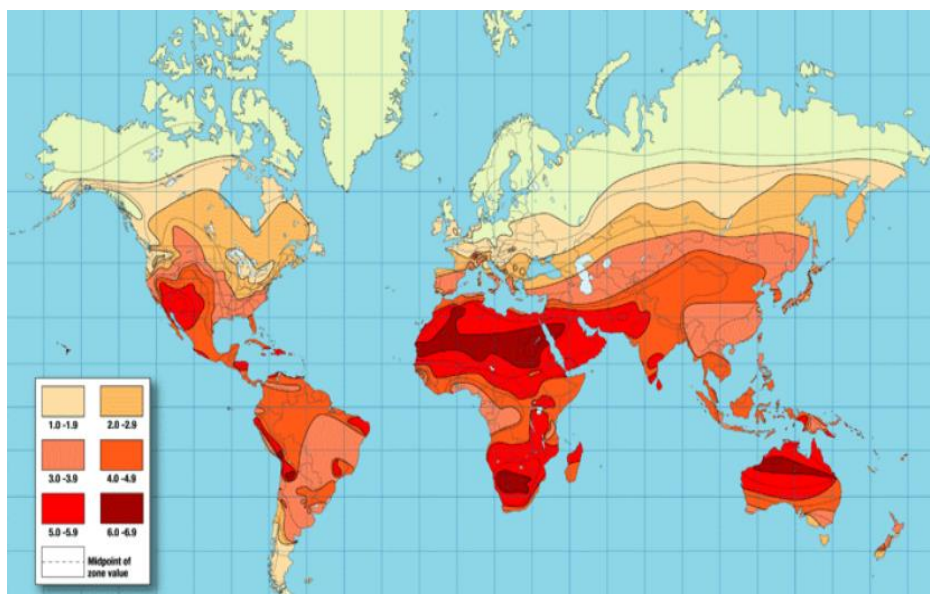


Figura 3. Atlas de la radiación solar mundial como promedio diario en un año. Fuente (Bastos, 2020).

1.4.3. El efecto fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Esto se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las células fotovoltaicas.

Los sistemas fotovoltaicos convierten la luz solar directamente en electricidad, mediante el uso de lo que es conocido como células solares. Una célula solar está hecha de material semiconductor dispuesto en dos capas: P y N. En la Figura 4 se muestra la estructura de una celda fotovoltaica.

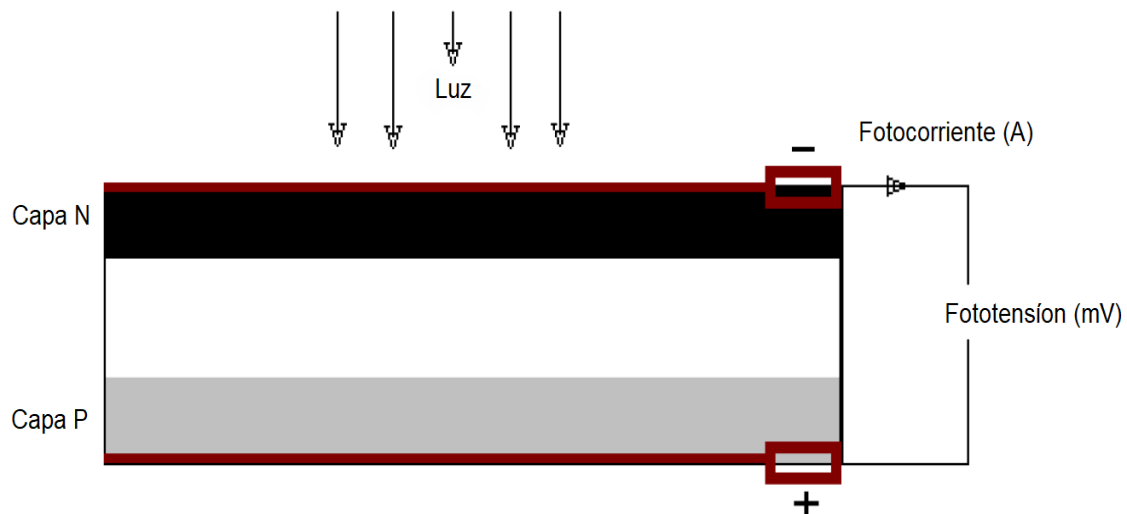


Figura 4. Celda fotovoltaica. Imagen obtenida de (Callisaya, 2012).

Cuando la radiación del sol incide en la célula fotovoltaica en forma de luz solar, la línea de separación entre P y N actúa como un diodo. Los fotones (partículas de luz) con suficiente energía que inciden en la célula provocan que los electrones pasen de la capa P a la capa N.

Un exceso de electrones se acumula en el lado N mientras que en el lado P se produce un déficit. La diferencia entre la cantidad de electrones es la diferencia de potencial o voltaje, que puede ser usado como una fuente de energía.

Con tal de que la luz siga incidiendo en el panel, la diferencia de potencial se mantiene, incluso en días nublados, debido a la radiación difusa de luz (Callisaya & Romay, 2012).

1.5. Las instalaciones fotovoltaicas como alternativa viable para la generación eléctrica.

Tradicionalmente, la generación de electricidad con energía solar empleando sistemas fotovoltaicos, ha estado dirigida al sector rural, donde los altos costos de generación originados principalmente por el alto costo de los combustibles, de operación y mantenimiento en zonas remotas, hacen que la generación solar resulte más económica y viable a largo plazo. Actualmente los sistemas fotovoltaicos se vienen implementando en centros urbanos debido a los altos costos de la energía eléctrica tradicional, a esto se le suman los beneficios ecológicos que esta energía limpia ofrece (Juvinao & Campo, 2021).

Según (Palacios, 2019), La Agencia Internacional de la Energía marcó que la energía solar será la primordial fuente de energía eléctrica mundial en el 2050. Así mismo marcó que China lidera a nivel mundial el uso de energías renovables y en el 2050 será dueño del 37% de la capacidad instalada de energía fotovoltaica en el mundo.

La cantidad de energía que el sol proporciona a la Tierra cada día es suficiente para suplir varias veces toda la demanda energética diaria del planeta. La superficie terrestre recibe unos 3×10^{24} joules al año, es decir, $9,5 \times 10^4$ TW (Terawatt) de energía solar, unas 10.000 veces más de lo que consume toda la población terrestre. Considerando que en el año 2000 el consumo mundial de energía fue de 13 TW y la estimación para el 2050 es de 30 TW, la energía enviada por el sol es excesivamente sobrante (Machado & Miranda, 2015).

La energía solar fotovoltaica constituye una fuente de energía renovable, la cual puede usarse en la generación de electricidad mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos que convierten la radiación solar en electricidad, haciéndola aplicables a múltiples actividades de la vida (Arencibia, 2016).

1.5.1. ¿Que son las celdas fotovoltaicas y cómo funcionan?

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos formados por materiales sensibles a la luz que desprenden electrones cuando los rayos de luz inciden sobre ellos, generando energía eléctrica. Están formados por celdas hechas a base de silicio puro con adición de impurezas de ciertos elementos químicos, siendo capaces de generar cada una de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0.46 a 0.48 Voltios.

Los paneles se colocan en serie para conseguir un voltaje adecuado a la aplicación eléctrica en cuestión o demandada; entonces los paneles capturan la energía solar transformándola directamente en eléctrica en forma de corriente continua, que se almacena en acumuladores, para que pueda ser utilizada fuera de las horas de luz. Los módulos fotovoltaicos admiten tanto radiación directa como difusa, pudiendo generar energía eléctrica incluso en días nublados (Arencibia, 2016).

1.5.2. Componentes de una instalación fotovoltaica.

Los elementos de una instalación fotovoltaica dependerán de si se trata de una instalación conectada a la red o de una instalación aislada. La diferencia entre ambos casos es la manera de gestionar la energía generada.

En las instalaciones aisladas la energía se utiliza directamente o se puede almacenar en baterías solares, en cambio, en una instalación conectada a la red la energía se suministra a la red eléctrica para su distribución (Marín, 2020).

Hay una serie de elementos que siempre o en la mayoría de casos encontraremos en cualquier instalación fotovoltaica. Esos elementos son los siguientes:

1.5.2.1. Panel fotovoltaico:

Es el elemento captador de la radiación solar que transforma esa radiación en electricidad gracias al efecto fotovoltaico. Se compone de células fotovoltaicas, las cuales son las encargadas de esa transformación generando una corriente eléctrica de corriente continua.

Los paneles fotovoltaicos son asociaciones de células fotovoltaicas que se encapsulan entre dos capas, una lámina frontal de vidrio y una capa posterior de polímero termoplástico u otra lámina de cristal. Esta lámina de cristal se utiliza

cuando se desea un módulo con un mínimo de transparencia. Todo este conjunto se enmarca en una estructura de aluminio anodizado, para así aumentar la resistencia mecánica del conjunto y facilitar el anclaje del módulo a las estructuras de soporte.

Generalmente la tecnología fotovoltaica utiliza alguna variación del silicio. En los paneles solares para uso doméstico siempre se usa el silicio. La característica que diferencia las diferentes placas fotovoltaicas es la pureza del silicio utilizado. Cuanta más pureza, mejor alineadas están las moléculas y mejor convierte la energía solar en electricidad. Sabiendo esto, se puede ver que la pureza del silicio también define la eficiencia de las placas, pero cuanto más puro sea, más costosos serán los procesos de fabricación.

Se pueden diferenciar tres tipos de placas fotovoltaicas distintas según su elaboración:

Paneles solares mono-cristalinos de celdas de silicio:

Este tipo de paneles está compuesto por celdas solares de silicio mono-cristalino (mono-Si) y son fáciles de reconocer gracias a su coloración y aspecto uniforme, que indica una alta pureza en silicio. Para conseguir este tipo de celdas, se utilizan bloques de silicio o lingotes de forma cilíndrica.

Para reducir los costes de fabricación de dichas celdas y para optimizar su rendimiento, se recortan los cuatro lados de los bloques cilíndricos y así conseguir láminas de silicio. Es ese corte el que les da su aspecto característico.

Cabe destacar que las células mono-cristalinas son las más eficientes, seguidas de las poli-cristalinas y por último las amorfas.

Paneles solares poli-cristalinos:

Las células poli-cristalinas tienen la ventaja de ser más asequibles que las mono-cristalinas ya que su fabricación es menos costosa. Al ser menos laboriosas a la hora de su fabricación, tienen menos tolerancia al calor, por lo que su eficiencia también es inferior, y eso es algo a tener muy en cuenta en los paneles solares.

Se estima que el límite de eficiencia de este tipo de paneles es como máximo del 16%, fundamentalmente por la menor cantidad de silicio que contienen. Las altas temperaturas provocan efectos muy negativos en estos paneles por lo que no son muy habituales en zonas muy cálidas.

Para obtener este tipo de paneles, el silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado. Posteriormente se enfría y se corta en láminas cuadradas. Es por eso que su aspecto no tiene nada que ver con el acabado redondeado de las monocristalinas.

Paneles solares amorfos (capa fina):

Un panel solar de capa fina funciona igual que los paneles cristalinos pero su elaboración es completamente distinta. Estos paneles son mucho más fáciles de fabricar y de automatizar, ya que necesitan menos material activo y por eso su coste es mucho menor.

También tienen una gran facilidad para realizar módulos flexibles con una eficiencia óptima en un amplio rango del espectro.

La tecnología del silicio amorfo (a-Si) tiene una eficiencia considerablemente menor que los cristalinos, y eso es debido a la mala calidad del silicio utilizado. Su estructura interna dificulta la recolección de corriente eléctrica.

A diferencia de los paneles solares cristalinos, las placas solares de silicio amorfo no son células individuales unidas. Su elaboración consiste en una lámina cortada a medida en la que se pueden observar unas tiras delgadas que separan las células, creadas y conectadas entre sí durante la elaboración del propio módulo.

En la tabla 1 se muestran los paneles solares fotovoltaicos más eficientes actualmente en el mercado.

Tabla 1. Los paneles solares fotovoltaicos más eficientes actualmente en el mercado.

Modelo	Pot prom	Potencia	Teg células	Nº células	Precio (USD)
Sunpower SPR-X21-345	214	345Wp	monocristalino	96	449.00
Panasonic VBHN325SJ47	194	325Wp	monocristalino	96	305.00
Aleo X59	184	310Wp	monocristalino	60	357.00
QCellsQ.Peak- G4.1 305	176	305Wp	monocristalino	96	295.00
REC 280TP	171	280Wp	policristalino	120	189.00

Fuente: Elaboración propia, 2022.

1.5.2.2. Regulador de carga.

Este dispositivo electromecánico o electrónico, según el tipo de interruptor de control (si es electrónico, es un transistor), evita sobrecargas o descargas excesivas a la batería, puesto que los daños podrían ser irreversibles. Además, debe asegurar que el sistema siempre trabaje en el punto de máxima potencia, o lo más cerca posible (Marín, 2020).

La función principal de este componente es de controlar el estado de carga de la batería, asegurando así la vida útil de la misma:

- Controla el nivel de carga y descarga de la batería.
- Evita la sobrecarga de la batería, impidiendo el entregar de corriente desde el módulo FV a la misma cuando ya está cargada. Esto también asegura que el voltaje de la batería no sea mayor a lo permitido en los equipos conectados.
- Evita la descarga profunda de la batería, cortando la entrega de corriente a las cargas de consumo cuando la batería ya alcanzo el límite bajo de voltaje.

1.5.2.3. Inversores de corriente.

El inversor es el componente que se encarga de convertir la corriente continua generada en corriente alterna. Una vez transformada se puede inyectar en la red eléctrica o en la red interior. Dependiendo de su aplicación los podemos clasificar en dos grupos, inversores de baterías e inversores de conexión a red.

Tipos de inversores y usos:

Inversores de aislada (con baterías): para instalaciones sin conexión a la red eléctrica. Convierte la corriente continua de las baterías a corriente alterna para alimentar los consumos necesarios. Se pueden diferenciar tres tipos:

- **Inversor de aislada:** sirven para transformar la corriente continua en alterna y alimentar, por ejemplo, electrodomésticos. Tienen varios sistemas de protección contra la sobretensión, cortocircuito de salida y excesiva temperatura.
- **Inversor cargador:** incorporan un cargador interno capaz de cargar la batería usando una fuente de alimentación de 220V externa. Una de las ventajas que ofrece es que se independiza de las condiciones meteorológicas pudiendo funcionar en días de lluvia o nublados. También, al tener una fuente externa de alimentación, tiene más capacidad de alimentación y requiere de menos paneles solares, por lo tanto, se abarata la instalación.
- **Inversores 3 a 1:** incorporan inversor de baterías, regulador de cargas y cargador de baterías. Este tipo de inversores gestionan toda la información de la instalación. Pueden visualizar tanto la energía procedente de los paneles solares como el estado de la batería y la energía de salida. Su fácil instalación y su reducido coste y volumen hacen que sean cada vez más demandados.

Inversores de conexión a red: estos inversores están equipados con seguidores del punto de máxima potencia para maximizar la producción de energía solar. Es por eso que se deben utilizar con paneles solares de 60 células. La energía es transformada a alterna y mediante un mecanismo llamado algoritmo de bucle de

enganche de fase sincronizan la corriente alterna de salida con la corriente alterna de la red eléctrica.

Así pues, esa energía puede ser consumida por la vivienda o ser inyectada a la red eléctrica para su venta. Dentro de este grupo podemos distinguir dos inversores distintos:

- Inversor de autoconsumo directo: transforman la corriente continua en alterna y es inyectada directamente en la vivienda o inmueble donde este la instalación. La tensión de inyección es ligeramente superior a la de la red eléctrica, lo cual produce que la energía inyectada sea consumida con prioridad. De esta forma la demanda de energía será abastecida con la energía solar, a no ser que la demanda sea superior a la energía solar producida, donde se suplirá por la energía de la red. Si la producción de energía solar es superior a la demanda, se verterán los excedentes a la red de distribución.
- Inversor de autoconsumo con batería: la diferencia con los anteriores es que estos son capaces de almacenar los excedentes en las baterías para consumirla posteriormente. También son conocidos como gestores energéticos o inversores híbridos ya que están interconectados con la red eléctrica y además son capaces de gestionar la energía de los paneles solares y de las baterías.

Una de las funciones que debe cumplir cualquier inversor solar es la de regular el valor de la tensión de salida. Esto se consigue básicamente de tres distintas formas:

- regulando la tensión antes del inversor (convertidores DC/DC).
- regulando la tensión en el propio inversor mediante un sistema de control. (variando el ángulo de fase, mediante modulación de ancho de pulso (PWM)).
- regulando a la salida del inversor (mediante un auto-transformador).

1.5.2.4. Seguidores solares.

Los seguidores solares son unos mecanismos que tienen la función de orientar la posición de los paneles fotovoltaicos, consiguiendo la mejor orientación de los mismos respecto de la posición del sol. Es un factor que ayuda a mejorar el

rendimiento de la instalación, y su uso es bastante habitual en la producción de energía solar.

Se pueden diferenciar diferentes tipos de seguidores solares:

- Seguidores solares en dos ejes, la superficie del panel se mantiene siempre perpendicular al sol.
- Seguidores solares en un eje polar, la superficie del panel solar gira sobre un eje que está orientado al sur, con un ángulo de inclinación equivalente a la latitud. El giro se ajusta con el objetivo de posicionar la normal a la superficie coincidente con el meridiano terrestre que contiene al Sol.
- Seguidores solares en un eje azimutal, donde la superficie gira sobre un eje vertical con un ángulo igual a la latitud. Igual que el anterior, en este el giro se ajusta también para que la normal a la superficie coincida con el meridiano que contiene al Sol.
- Seguidores solares en un eje horizontal, la superficie gira sobre un eje horizontal y está orientado en dirección norte-sur. El mecanismo de giro funciona igual que los dos anteriores.

1.5.2.5. Cableado eléctrico.

El cableado eléctrico es el elemento que se encarga de transportar la energía eléctrica desde su generación, para su posterior transporte y distribución. Su dimensionamiento viene marcado por el criterio más restrictivo, la máxima diferencia de potencial o la intensidad máxima admisible.

Lógicamente, en las instalaciones solares conectadas a la red es necesario un cableado mucho mayor que en las instalaciones aisladas. En el segundo caso, solo es necesario transportar la energía de forma local, normalmente a las baterías eléctricas.

En las grandes instalaciones fotovoltaicas se transforma directamente la energía solar en electricidad. Necesita unos cables aptos para soportar temperaturas elevadas y todo tipo de condiciones climáticas.

Como se puede ver, hay diferentes tipos de cableado según su funcionalidad y las prestaciones necesarias que deben cubrir. Cada tipo de instalación está sometido a condiciones distintas, tanto climáticas como condiciones energéticas (tensión, corriente...). Lo importante es saber escoger el cableado más adecuado para cada instalación con la máxima vida útil (Marín, 2020).

1.5.2.6. Baterías.

Las baterías son el componente encargado de almacenar la energía para consumirla en el momento en que no se produce o cuando se demande más potencia de la que producen los paneles. Este componente siempre que se instale debe tener acoplado un inversor cargador, que la cargue y que la distribuya.

1.6. Utilización de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones.

Los sistemas fotovoltaicos integrados a edificios (Gallipoliti, 2019) se configuran como pequeños generadores de energía dispersos en áreas urbanas y presentan varias ventajas, entre las que se encuentran la de no necesitar espacio adicional para su instalación, no requerir inversiones adicionales para infraestructura, tiene bajo costo de montaje y mantenimiento, y no producen contaminación ambiental. Se puede concretar como un sistema de generación para uso exclusivo del edificio con elementos de almacenamiento (baterías) para periodos sin electricidad, o también puede aportar el excedente que no utilice a la Red eléctrica de su comunidad. Esta forma de implementar sistemas fotovoltaicos conectados a red permite mejorar significativamente la calidad de energía en aquellas redes que se encuentran sobrecargadas por el aumento en el consumo y que han sido dimensionadas sin considerar la creciente demanda de energía eléctrica existente.

1.7. Comparación entre algunas de las metodologías utilizadas.

Para este análisis se utiliza la tabla 2 y se tienen en cuenta tres de las metodologías consultadas en el presente trabajo, las cuales están propuestas por, (Callisaya, 2012), (Becerra, 2019), (Albo, 2021), (Benítez & Tello, 2018), (Albert, 2020), (González et al., 2022), (Guzmán et al., 2017), (Molina & González, 2022).

Tabla 2: Comparación entre las distintas metodologías consultadas.

Referencia	Análisis energético.	Análisis de sombras.	Dimensionamiento del SSFV.	Evaluación económica.	Evaluación del impacto medio-ambiental.
(Callisaya, 2012)	Hace un levantamiento de los consumidores energéticos de la instalación para obtener la demanda diaria de la institución.	No tiene en cuenta el análisis de las sombras producidas objetos alrededor de los módulos, solo contempla el número de horas solares pico.	Se realiza en función de la demanda energética de la instalación y no se enfoca en aprovechar todo el potencial fotovoltaico que brinda la edificación, por eso la cantidad de componentes a utilizar depende de la energía que se necesita generar.	No tiene en cuenta ningún aspecto económico. Se limita únicamente a resolver un problema energético en la edificación.	No evalúa el impacto medio-ambiental del proyecto.
(Becerra, 2019)	Determina el consumo por mes de la institución durante todo el año.	Analiza las sombras producidas por los propios módulos fotovoltaicos y el tiempo de radiación efectiva diaria para la producción de energía.	Para el cálculo del número de paneles a instalar tiene en cuenta el tamaño de los módulos y la distancia mínima entre ellos para lograr la menor superposición de sombras posibles. A partir de dicho número de paneles se determina la capacidad de generación para la selección de los demás dispositivos.	Tiene en cuenta el Periodo de Recuperación de la Inversión y el Valor Presente Neto en un periodo de 25 años.	Contempla la cantidad de combustible que se deja de quemar para así determinar la cantidad de CO ₂ dejado de emitir a la atmosfera.
(Albo, 2021)	Asume la energía consumida por la institución como la contratada por la misma, por lo que no toma en cuenta consumos mayores.	Tiene en cuenta el tiempo de incidencia de la radiación solar y la sombra producida por objetos cercanos.	A partir del estudio de sombras determina los lugares más convenientes para ubicar los módulos fotovoltaicos y en dependencia del espacio disponible determina la cantidad y la disposición. Con esta información se procede a la selección de los demás componentes.	Tiene en cuenta el Periodo de Recuperación de la Inversión y el Valor Presente Neto en un periodo de 25 años.	No evalúa el impacto medioambiental del proyecto.

Fuente: Confección propia (2022).

Tabla 2: Comparación entre las distintas metodologías consultadas (Continuación).

Referencia	Análisis energético.	Análisis de sombras.	Dimensionamiento del SSFV.	Evaluación económica.	Evaluación del impacto medio-ambiental.
(Benítez & Tello, 2018)	Se registra el consumo eléctrico por horas del día y se delimitan los momentos en de mayor y menor consumo.	Se analiza el comportamiento de la radiación solar durante todos los meses del año sin tener en cuenta las sobras producidas por objetos cercanos.	Se realiza en función de la demanda energética de la instalación y no se enfoca en aprovechar todo el potencial fotovoltaico que brinda la edificación, por eso la cantidad de componentes a utilizar depende de la energía que se necesita generar.	Hace un análisis detallado del costo de la inversión y a partir del dinero ahorrado determina el tiempo de recuperación de la inversión.	Considera la reunión de emisiones de CO_2 a la atmosfera por mes.
(Albert, 2020)	Teniendo en cuenta el consumo anual de la institución y los días en los que se el consumo eléctrico es significativo, se hace un balance del consumo energético por día.	Se analiza el comportamiento de la radiación solar durante todos los meses del año sin tener en cuenta las sombras producidas por objetos cercanos.	Se realiza en función de la demanda energética de la instalación, la cantidad de componentes a utilizar depende de la energía que se necesita generar.	Determina el periodo de recuperación de la inversión. Teniendo en cuenta el costo de la inversión inicial y los costos de mantenimiento .	No solo se limita determinar la reducción de las emisiones de CO_2 a la atmosfera, sino que también evalúa la influencia sobre los ecosistemas próximos.
(González et al., 2022)	Analiza el consumo mensual de energía eléctrica en horario pico.	No toma en cuenta la incidencia de la radiación solar ni el estudio de las sombras provocadas por objetos cercanos.	El dimensionamiento del sistema se realiza a partir del espacio disponible para la instalación de los módulos. Una vez determinado el número de paneles, se seleccionan los demás componentes.	No toma en cuenta ningún aspecto económico.	No evalúa el impacto medio-ambiental del proyecto.

Fuente: Confección propia (2022).

Tabla 4: Tabla 2: Comparación entre las distintas metodologías consultadas (Continuación).

Referencia	Análisis energético.	Análisis de sombras.	Dimensionamiento del SSFV.	Evaluación económica.	Evaluación del impacto medio-ambiental.
(Guzmán et al., 2017)	Analiza el consumo mensual de energía eléctrica.	No tiene en cuenta las magnitudes de la radiación incidente en la zona ni se realizan estudios de sombras.	El dimensionamiento del sistema se realiza a partir del espacio disponible para la instalación de los módulos.	Solo se analiza el ahorro que supone a la empresa en términos de energía no consumida de la red eléctrica.	Analiza la cantidad de CO_2 dejada de emitir a la atmósfera.
(Molina & González, 2022)	Analiza detalladamente el consumo diario de la entidad por mes y determina los meses de mayor demanda energética.	Analiza la radiación solar incidente sobre la zona y realiza un estudio de sombra para determinar las ubicaciones más convenientes de los módulos fotovoltaicos.	Aprovecha al máximo el espacio disponible, obteniendo una propuesta de disposición con la mayor cantidad de módulos fotovoltaicos posibles, con el fin de que la generación eléctrica sea máxima.	Toma en cuenta el ahorro por energía no consumida de la red eléctrica y por otra parte también evalúa el ahorro en términos de combustible no quemado para la generación.	Analiza la cantidad de CO_2 dejada de emitir a la atmósfera al año.

Fuente: Confección propia (2022).

1.8. La energía solar fotovoltaica en Cuba.

En Cuba la utilización de la energía solar da respuesta a las exigencias energéticas de cara al desarrollo sostenible. En este sentido, cada metro cuadrado del territorio cubano recibe un promedio diario de 5 kWh/m², en el transcurso de un año, equivalente a la energía química acumulada en un litro de petróleo. Con el

aprovechamiento, tanto directo como indirecto, de la energía solar se pueden satisfacer todas las necesidades energéticas.

Entre las tendencias más difundidas actualmente se encuentran los sistemas fotovoltaicos integrados a edificios, los que incrementan su presencia en entornos urbanos. Son eficientes, desde el punto de vista energético, porque generan electricidad en el mismo lugar que se consume, atenuando significativamente las pérdidas por distribución. Las cubiertas ofrecen mayor potencial de integración en términos de producción energética, por ser las superficies mejor situadas y de mayor extensión, libres de obstáculos y restricciones (Domínguez et al., 2019).

Investigadores de la Universidad Tecnológica de La Habana están investigando celdas solares desde hace más de 3 décadas. Aunque en la isla no se producen celdas solares, si cuenta con una línea de montaje de paneles fotovoltaicos y el Combinado de Componentes Electrónicos en Pinar del Río. Las primeras instalaciones fotovoltaicas de impacto social en Cuba fueron los 460 consultorios médicos de las familias electrificados en áreas rurales a partir de 1987. Hasta el 2013 un total de 1 876 salas de televisión y video se habían electrificado con paneles solares para el disfrute de la población rural en zonas de difícil acceso. Así mismo, 2 361 escuelas se electrificaron en el marco del Programa Audiovisual con cerca de 5 000 instalaciones para la iluminación, televisión, video y uso de computadora. Los conjuntos de técnicas fotovoltaica son compatibles con la generación distribuida de electricidad. Su tiempo de recuperación energética es relativamente corto y su incidencia ambiental es muy pequeño comparado con las fuentes no renovables de energía. Esta tecnología es un importante pilar para alcanzar una matriz energética que garantice un suministro sostenible y seguro de energía (Bravo, 2015).

En Cuba, la generación fotovoltaica ha cubierto aproximadamente el 0,2% de las necesidades energéticas del país. Cuando este tipo de fuente es menor que un 10% de la generación total, no es importante el pronóstico de la misma a corto plazo, pero cuando supera este umbral, se hace necesario pronosticar la contribución de este tipo de fuentes para poder operar correctamente el sistema. Por esta razón es necesario comenzar a investigar esta temática para el desarrollo de modelos de

pronóstico de la generación de electricidad a corto plazo con sistemas fotovoltaicos para las condiciones de Cuba (Gómez et al., 2021).

Conclusiones parciales del capítulo.

1. Las instalaciones fotovoltaicas en edificaciones presentan alta eficiencia, pues se consume la energía en el mismo lugar donde se genera, minimizando las pérdidas por la distribución. Cuba es un escenario idóneo para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos, los niveles de radiación solar son elevados durante todo el año.
2. La revisión de las metodologías utilizadas arrojó que algunas no tienen en cuenta todo el potencial de las edificaciones para la generación eléctrica, otras no realizan estudios de posibles sombras sobre las superficies donde se instalaran los módulos fotovoltaicos. Por otra parte, muchas de ellas no tienen en cuenta el impacto medioambiental de dichos proyectos. Por tanto, es necesario una metodología que integre el mayor número de criterios posibles para el correcto dimensionamiento de un Sistema Solar Fotovoltaico.

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SSFV EN EDIFICACIONES.

La utilización de una metodología confiable es imprescindible para el diseño de cualquier instalación. Para la integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones, es necesario una metodología que tenga en cuenta los aspectos constructivos del sistema, así como el dimensionamiento y selección de cada uno de los componentes de la instalación.

El siguiente apartado consiste en evaluar cada aspecto para la instalación de un sistema solar fotovoltaico, mediante cálculos manuales, quedando creada así, una metodología para futuros proyectos de integración de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones. Para ello se desarrolló una secuencia de pasos con un orden lógico que posteriormente fue complementada con las ecuaciones que fuesen necesarias.

Cabe aclarar que, para la veracidad de esta metodología, que todas estas ecuaciones fueron extraídas de referencias confiables, entre las que tenemos: (Benítez & Tello, 2018), (Albert, 2020), (Perpiñán, 2013), (Becerra, 2019), (Dobrovolski, 1970), (Callisaya, 2012), (Monteagudo & Crespo, 2021), (Albo, 2021), (ABB, 2019), (Álvarez et al., 2021).

2.1. Caracterización energética.

La metodología parte de una caracterización energética que incluye una revisión energética basado en un modelo de gestión de la energía compatible con la norma ISO 50001. La figura 5 muestra dicho modelo de gestión de energía.

En la Figura 5 se muestra el Modelo de Gestión de la Energía ISO 50001.

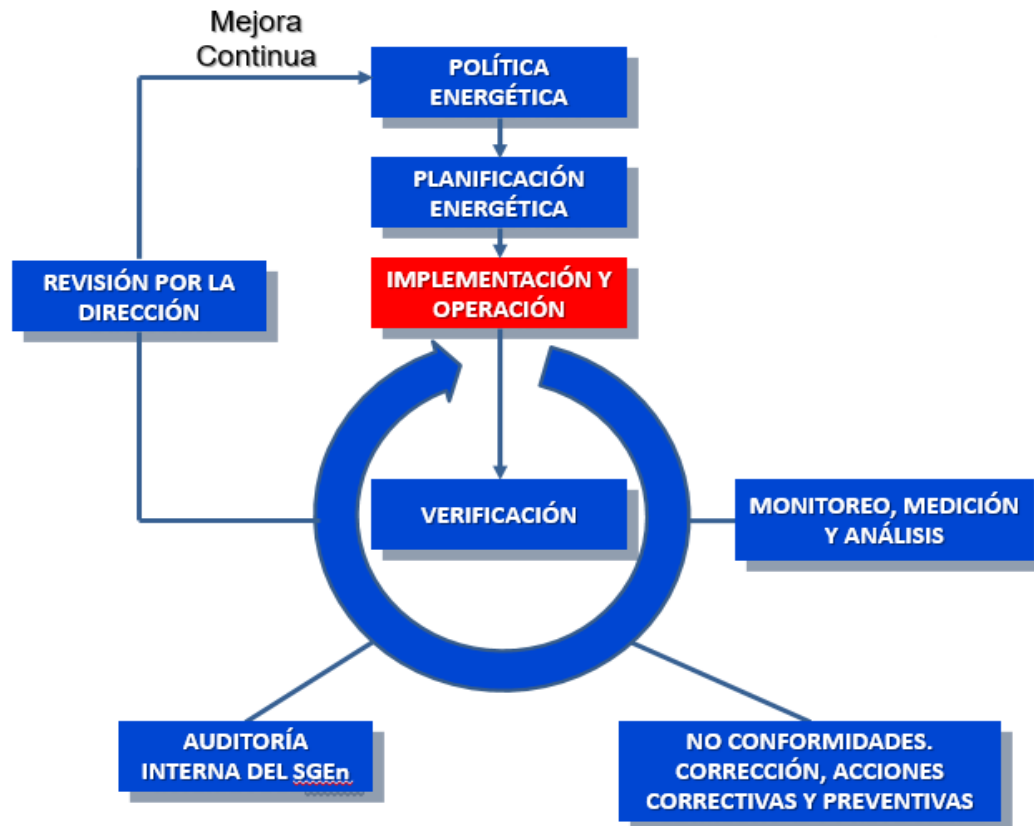


Figura 5. Modelo de Gestión de la Energía ISO 50001. Fuente (Monteagudo & Sánchez, 2021)

Analizar el uso y consumo de energía.

- Gráfico de Energía y Producción Vs. Tiempo.

Cálculo de la variable Grados Días.

Los grados día (DG_d) se pueden definir como las necesidades de calefacción o refrigeración (en grados Celsius o Kelvin) necesarias para alcanzar la zona de

confort, acumuladas en un determinado periodo de tiempo, generalmente un mes, aunque puede ser semanal o incluso horario (Álvarez et al., 2018).

Para un día, los grados-día se determinan como ecuación 1:

$$DG_d = (T_d - T_r) \quad (\text{Ec.1})$$

Para un mes, los grados día se determinan como ecuación 2:

$$DG = \sum DG_d \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

DG_d = Grados día del día.

DG = Grados día del mes.

T_d = Temperatura promedio de cada día del mes (°C).

T_r = Temperatura de referencia.

A la hora de utilizar la ecuación 1 se tienen en cuenta solo los valores de $(T_d - T_r) > 0$.

Cálculo del indicador de rendimiento energético.

El indicador de desempeño energético es una herramienta para controlar el consumo de energía en los diferentes meses del año. La curva trazada a partir de la línea base energética describe el comportamiento óptimo del hotel. Valores por debajo de la curva muestran un buen comportamiento y por encima de ella un mal desempeño energético. El Indicador de desempeño energético teórico (IDEnt) para la entidad se obtiene de relacionar la ecuación de energía de la organización entre la variable independiente, en el caso de análisis el producto de los Días-Grados y las Habitaciones-Días Ocupado (HDO), (Ec.3).

$$IDEnt = \frac{Et}{DG * HDO} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

E_t = Energía total.

DG = Días-Grados.

HDO = Habitaciones-Días Ocupado.

- Gráfico de Control de la Energía Eléctrica.
- Gráfico de Tendencia de la Energía Eléctrica.

Identificar las áreas de uso significativo de energía y de consumo.

- Estratificación.
- Diagrama de Pareto.

Identificar oportunidades para la mejora del desempeño energético.

- *Guía de la Supervisión Energética.*
- *Manual de Procedimientos del Diagnóstico Energético y Socioambiental de la TGTEE.*
- *Analizar objetivos que tenga la institución de cubrir su demanda con energía solar fotovoltaica.*

2.2. Caracterización del sistema eléctrico del lugar.

- Revisión de la tarifa eléctrica de la institución.
- Verificación de la potencia contratada y del factor de potencia.
- Levantamiento de las cargas instaladas.
- Comportamiento del consumo histórico de la institución y de las cargas instaladas.
- Caracterización de fuentes de energías alternativas a la red.

2.3. Análisis estructural del sitio.

Se evalúan las características estructurales de la edificación para determinar si resistirá las cargas de los componentes que se desean instalar.

2.3.1. Revisión de estudios estructurales previos ejecutados a la entidad.

- En caso de ausencia de dicho estudio solicitarlo a entidades competentes.

2.4. Revisión de la orientación y coordenadas del sitio.

Se deben verificar la orientación y coordenadas del sitio. Para ello se utilizan softwares e informaciones con las que cuente la entidad.

2.5. Clasificación de la disponibilidad de las áreas de la entidad para la posible instalación de Sistemas Solares Fotovoltaicos (SSFV).

Se debe verificar el área con la que se cuenta para la instalación del SSFV. Para ello se analizan los lugares útiles donde sea posible dicha instalación.

2.6. Estudio de sombras en las áreas seleccionadas.

- Mediante cálculos manuales.
- Mediante softwares especializados:
 - Pvsyst
 - Sketchup
 - Sunny Design

2.7. Selección del SSFV a utilizar.

2.7.1. Selección del panel solar. Requisitos a tener en cuenta.

- Dimensiones para relacionar con el área disponible.
- Masa del panel solar para relacionar con las características estructurales del lugar.
- Características eléctricas del panel para relacionar con la posible demanda a cubrir.
- Análisis de la relación área vs potencia del panel.
- Tecnología del panel solar fotovoltaico a relacionar con las características climáticas del sitio.

2.8. Diseño estructural de los soportes de los paneles.

Estudio de las características climáticas de la institución.

Las características del clima influyen en la eficiencia y rendimiento del sistema solar fotovoltaico. Para la zona en la cual se centra el proyecto, es importante contar con la información meteorológica. Especialmente, contar con la información de la

radiación solar que se presenta en el lugar para beneficiar el funcionamiento del sistema que se desea implementar (Benítez & Tello, 2018).

También es importante conocer la influencia de los vientos sobre las estructuras para los cálculos de resistencia al viento. Estos datos se pueden encontrar en centros meteorológicos o basándose en softwares de diseños.

- **Selección del tipo de estructura.**

La estructura es el elemento encargado de fijar los paneles al terreno o tejado de la instalación, pueden ser de los siguientes tipos (Albert, 2020):

Coplanares: Para paneles que se colocan pegados a la cubierta. Permiten aprovechar mejor el espacio disponible en la cubierta y son la solución más estética y con menor impacto visual.

Estructura triangular: Se utilizan para corregir la inclinación y la orientación de los paneles cuando la posición de la cubierta no es la idónea, aumentando la radiación recibida por los paneles y por consiguiente la producción eléctrica.

Seguidores solares: Se trata de estructuras móviles, de uno o dos ejes, que varían la orientación de los paneles en función de la posición solar. Son instalaciones más complejas, pero pueden llegar a aumentar hasta un 30% la producción eléctrica en emplazamientos de elevada radiación directa. Hay varios tipos:

- Dos ejes: Mantienen la superficie del panel perpendicular al Sol.
- Un eje polar: Se ajusta el giro de un eje de tal forma que la normal a la superficie del panel coincida con el meridiano terrestre que contiene al Sol.
- Un eje azimutal: Se ajusta el giro de un eje para hacer coincidir la normal a la superficie con el meridiano local que contiene al Sol.
- Un eje horizontal: Se ajusta el giro sobre un eje horizontal y orientado en

dirección norte-sur, de tal forma que la normal a la superficie del panel coincida con el meridiano terrestre que contiene al Sol.

Estructuras estáticas: En estas estructuras el módulo se fija en una posición y no se cambia, son las más utilizadas y las adecuadas para techos e integración arquitectónica.

Estructura a dos aguas Este – Oeste: Se fijan dos módulos, uno dirección Este y otro Oeste, permitiendo un mayor tiempo de aprovechamiento de la radiación solar.

- **Selección del ángulo de inclinación del módulo con respecto a la superficie que se va instalar.**

Como es habitual en los sistemas fotovoltaicos, la orientación del generador debe ser hacia el horizonte Sur en el hemisferio Norte (y hacia el horizonte Norte en el hemisferio Sur). La inclinación del generador debe ser tal que maximice la producción anual, de forma que estará comprendida entre la que prima la producción en los meses invernales y la que favorece la generación en verano. Una recomendación sencilla consiste en inclinar el generador 10° menos que la latitud del lugar. Es posible obtener valores más precisos con la ecuación 4, en la que los ángulos de inclinación y latitud están en grados. En cualquier caso, es necesario que la inclinación no se encuentre por debajo de 15° para permitir que la suciedad acumulada pueda ser retirada por la lluvia (Perpiñán, 2013).

$$B_{op} = 3.7 + 0.69 * |\varphi| \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

B_{op} = ángulo de inclinación óptima

φ = latitud del lugar

- **Determinar el azimut de los módulos solares.**

La orientación del panel es una de las decisiones que influye directamente en la eficiencia de la instalación, esta consiste en posicionar adecuadamente el panel

solar con relación al astro rey. Este tema ha sido ampliamente estudiado en los últimos años (Albo, 2021).

La orientación de los módulos se debe indicar a partir del uso del ángulo azimuth de la desviación con respecto a la dirección sur (para las localizaciones que se encuentren en el hemisferio norte) o con respecto a la dirección norte (para localizaciones que se encuentran en el hemisferio sur) (ABB, 2019).

Los valores positivos de los ángulos azimuth muestra una orientación que tiende al oeste mientras que los valores negativos tienden al este.

Se obtienen buenos resultados cuando los módulos son orientados de sur-este o sur-oeste con una desviación de hasta un máximo de 45 grados hacia la dirección sur.

Mayores desviaciones pueden ser compensadas por medio de un ligero alargamiento de la superficie de los módulos (ABB, 2019).

- **Cálculo de soporte de la estructura:**

Para el dimensionamiento y cálculo de la estructura de soporte se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Peso de la estructura.
- Peso propio del panel.
- Carga en las vigas.
- Carga por acción del viento.
- Cálculo de resistencia de las uniones.

Estos cálculos se pueden realizar mediante:

Software especializado Autodesk Inventor Profesional.

Para los cálculos de soporte de la estructura se utilizan diferentes softwares dependiendo de la empresa o diseñador del sistema fotovoltaico. Estos softwares realizan un análisis de la estructura mediante un sistema hiperestático en donde se

le plasman las cargas estáticas como la del propio peso del panel y también se le agregan cargas dinámicas como la fuerza ejercida por el viento, llegando esta, a ser variable. Estos softwares también realizan los cálculos pertinentes de las uniones realizadas en la estructura, ya sean atornilladas u mediante soldaduras, aparte de tener en cuenta los contrapesos y sistemas de anclajes. En esta metodología se opta por usar el sistema Autodesk Inventor el cual ha sido utilizado como herramienta de cálculo de precisión en varios artículos científicos en el cual se utiliza como fuente de obtención de energía los módulos fotovoltaicos:

- Un análisis del vehículo bi-híbrido eléctrico alimentado por energía solar en comparación con los vehículos con motor IC utilizando análisis de gráficos con I (Reddy et al., 2022).
- Rastreador de programación de doble eje con un algoritmo adaptativo para una fuerte dispersión del rayo de sol (Saymbetov et al., 2021).
- Implementación del movimiento de fabricantes al laboratorio de energía renovable: estudio de caso del modelo fotovoltaico de seguimiento automático (Afif et al., 2019).
- Investigación del rendimiento óptico y eléctrico de sistemas fotovoltaicos-térmicos truncados 3X sin imágenes de baja concentración (Chandan et al., 2020).
- Mejora del rendimiento de un sistema de refrigeración basado en desecantes mediante la mitigación de la iluminación no uniforme en las unidades térmicas fotovoltaicas acopladas de baja concentración (Chandan et al., 2022).
- SMOFIM : Máquina de pescado ahumado basado en energía solar fotovoltaica con filtro de escape reduciendo los contaminantes CO, CO₂ Y HC como un esfuerzo para la mejorar la economía de la comunidad de pescadores en TRISIK BEACH (Setiawan et al., 2018).

- **Cálculos manuales.**

El peso de la estructura de soporte del panel se obtiene mediante softwares a partir del volumen del material utilizado y las propiedades del mismo.

- **Peso propio de los paneles**

El peso propio de los paneles fotovoltaicos se considera como un añadido al peso propio de la estructura. Este peso propio de los paneles si debe determinarse manualmente la ecuación 5 (Álvarez et al., 2021).

$$P = \frac{\text{peso de un panel (N)}}{\text{área(m}^2\text{)}} \quad (\text{Ec.5})$$

- **Carga en las vigas**

La carga para cada una de las vigas debe tener en cuenta el peso propio del panel, accesorios y calibre del cableado empleado. De acuerdo con los datos necesario para la determinación de la carga es usada la ecuación 6 (Álvarez et al., 2021).

$$N = \left(\frac{P_{p+a} * T_p}{L_v} \right) + W_c \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

N = carga sobre la viga

P_{p+a} = peso propio del panel más accesorios

T_p = total de paneles sobre la viga

L_v = longitud de las vigas

W_c = peso lineal del calibre del conductor

- **Carga por la acción del viento**

La velocidad de los vientos que inciden sobre la parte frontal de los paneles de determina mediante la ecuación 7: (Becerra, 2019).

$$V_f = V * \cos\varphi \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

V = velocidad del viento

φ = ángulo entre la dirección del viento y el panel

- **Fuerza de los vientos sobre los paneles**

Para determinar la fuerza que ejercen los vientos sobre los paneles se utiliza la ecuación 8 (Becerra, 2019).

$$F = \rho * C_{di} * A * \frac{V_f^2}{2} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

ρ =Densidad del aire a nivel del mar

C_{di} = Coeficiente de resistencia de superficies planas

A = Área proyectada del panel

V_f = Velocidad frontal de los vientos

- **Cálculo de carga de los vientos haciendo uso de NC 285:2003 "Carga de vientos. Método de Cálculo".**

La presión de viento sobre los paneles y las estructuras de fijación se obtiene a partir de la ecuación 9 (Becerra, 2019).

$$q = q_{10} * C_t * C_h * C_s * C_r * C_f * C_{ra} \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

q_{10} = Presión básica característica del viento para una recurrencia de 25 años.

$$q_{10} = \frac{V_v^2}{1.6 * 10^3} \quad (\text{Ec.10})$$

V_v = velocidad del viento en el territorio.

C_t = coeficiente de recurrencia para 25 años.

C_s = coeficiente de sitio considerando sitio expuesto.

C_h = coeficiente de altura.

C_r = coeficiente de ráfaga.

Cra = coeficiente de reducción de área.

Cf = coeficiente de forma.

- **Cálculo de Resistencia de las uniones**

Para el cálculo de las uniones roscadas en la estructura de soporte del panel se utiliza como bibliografía el libro de elementos de máquinas Dobrovolski, el método de cálculo es para uniones roscadas sin tensado previo en su montaje.

En este caso la falla principal es la rotura del tornillo a tracción por lo que la condición de resistencia está dada por la ecuación 11:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4*P}{\pi*[\sigma_{adm \ rot}]}} \quad (Ec.11)$$

Donde:

d_1 = diámetro del tornillo hasta el exterior del filete (diámetro nominal)

P = carga axial a la que está sometida la unión

$[\sigma_{adm \ rot}]$ = tensión admisible de rotura

Es evidente que además de la rotura a tracción del tornillo pueden ocurrir otras fallas, como el cizallamiento de la cabeza del tornillo, el cizallamiento de la rosca del tornillo, el cizallamiento de la rosca de la tuerca, la flexión o el aplastamiento de las espiras de la rosca.

El cálculo al cizallamiento de la cabeza del tornillo (ecuación 12) se realiza para evitar que esta se cizalle por la superficie cilíndrica de diámetro “ d_0 ”.

$$\sigma_{cort} = \frac{P}{0.5*\pi*d_0*h} < [\sigma_{adm \ cort}] \quad (Ec.12)$$

Donde:

σ_{cort} = tensión cortante ejercida

d_0 = diámetro del tornillo hasta la base del filete

h = altura de la cabeza del tornillo

$[\sigma_{adm\ cort}]$ = tensión admisible cortante

El cálculo de las espiras de la rosca a cortante se determina mediante la ecuación 13.

$$\sigma_{cort} = \frac{P}{0.5*\pi*d_1*\beta*H} < [\sigma_{adm\ cort}] \quad (Ec.13)$$

Donde:

H = altura de la rosca

β = coeficiente de relleno de la altura de la rosca ($\beta = 1$ para roscas triangulares)

Para el cálculo de las espiras a flexión (ecuación 14) se asume que estas desplegadas son una viga en voladizo, la carga repartida en la superficie de la espira se sustituye por la fuerza concentrada $\frac{P}{z}$ (z – número de espiras de la rosca) y aplicada a la mitad de la altura de trabajo de la espira ($l = \frac{t'_2}{2}$).

$$\sigma_{flex} = \frac{3*P*t'_2}{z*\pi*d_1*b} < [\sigma_{adm\ flex}] \quad (Ec.14)$$

Donde:

σ_{flex} = tensión de flexión ejercida

t'_2 = la mitad de la altura de trabajo de la espira

b = distancia teórica entre los filetes

$[\sigma_{adm\ flex}]$ = tensión admisible de flexión

2.9. Cálculo de la disposición del SSFV.

- **Determinar ubicación de los módulos fotovoltaicos proyectados sobre el área (Número de filas y columnas y espacio entre las mismas).**

El cálculo de la distancia mínima de separación entre las distintas filas de módulos solares que componen el generador fotovoltaico se realiza para que no se produzcan sombras de unos módulos sobre otros. En la Figura 6 se muestran todas las medidas que se deben tener en cuenta para estructuras de soporte estáticas convencionales (Becerra, 2019).

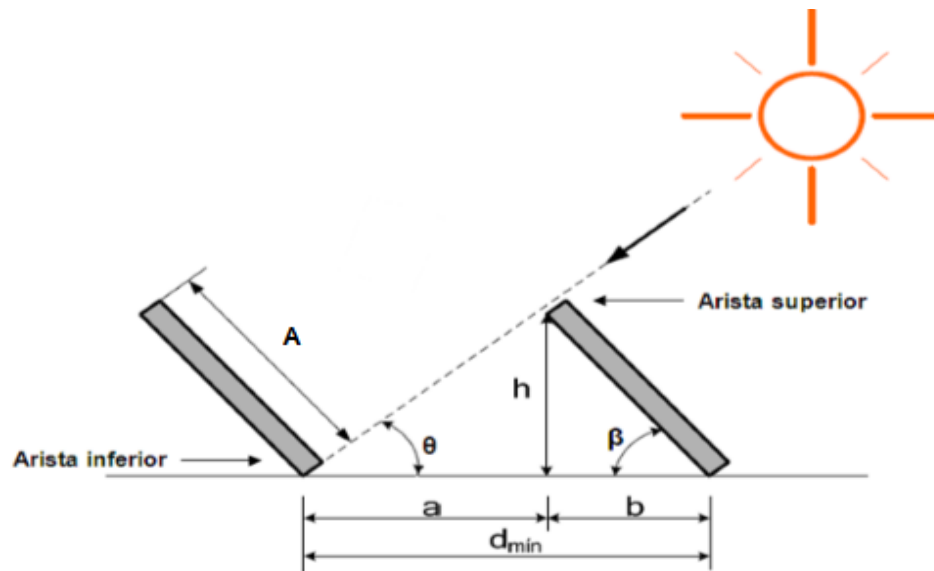


Figura 6. Medidas que se deben tener en cuenta para estructuras de soporte estáticas convencionales. Fuente (Becerra, 2019).

Donde:

$d_{mín}$ = 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).

β = grado de inclinación del panel respecto a la horizontal, ($^{\circ}$).

θ = ángulo de la sombra respecto a la horizontal, ($^{\circ}$).

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).

Con el grado de inclinación del panel y la longitud del panel, se calcula la altura solar al mediodía mediante la ecuación 15 (Becerra, 2019).

$$h = \text{sen}\beta * A \quad (\text{Ec.15})$$

Con los mismos datos se calcula la distancia (b) en la ecuación 16.

$$b = \text{cos}\beta * A \quad (\text{Ec.16})$$

Considerando el ángulo de inclinación del panel y los ángulos rectos que se forman, se complementan los demás ángulos y se determina que el ángulo θ (Becerra, 2019).

Con el valor del ángulo θ y la altura h se calcula la distancia a en la ecuación 17.

$$a = \frac{h}{\tan\theta} \quad (\text{Ec.17})$$

Al ser (a) la distancia mínima entre la arista superior de un panel y la arista superior del otro con respecto a la horizontal, esta se puede normalizar a un valor mayor en caso de que sea muy pequeño, para asegurar que no ocurra interferencia entre paneles y facilitar el acceso por los pasillos para la limpieza y mantenimiento (Becerra, 2019).

En la ecuación 18 se suma la distancia (a) más la distancia (b) para obtener la distancia mínima entre aristas inferiores de paneles, para evitar la sombra sobre otro panel.

$$d_{\min} = a + b \quad (\text{Ec.18})$$

En la Figura 7 se representa la distancia mínima entre paneles en la fila.

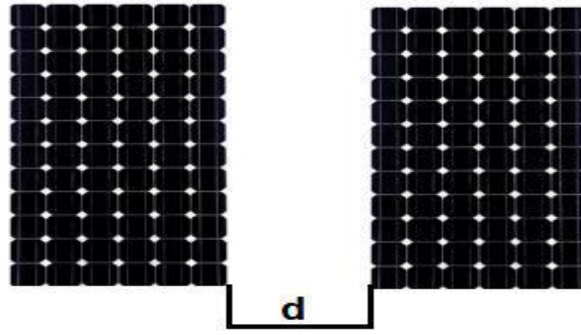


Figura 7. Distancia mínima entre paneles en la fila. Fuente (Becerra, 2019).

La distancia mínima entre paneles en la fila se determina mediante la ecuación 19.

$$d = d_{min} - A \quad (\text{Ec.19})$$

Esta magnitud también puede ser normalizada para asegurar que no ocurra interferencia entre paneles y facilitar el acceso por los pasillos para la limpieza y mantenimiento (Becerra, 2019).

Cálculo del número máximo teórico de paneles fotovoltaicos

Una vez calculada la separación mínima que debe haber entre filas de paneles ($d_{mín}$), se procede a calcular el número de estas que se podrán colocar sobre el área útil de las azoteas, mediante la siguiente ecuación 20:

$$\text{Número máximo de filas de paneles} = \frac{\text{Ancho de la edificación}}{\text{Distancia entre paneles}} \quad (\text{Ec.20})$$

Conocidas las dimensiones de los paneles solares y el área máxima a ocupar, en cada fila podrán colocarse el número determinado por la expresión 21:

$$\text{Número máximo de paneles por filas} = \frac{\text{Largo de la edificación}}{\text{Ancho del panel}} \quad (\text{Ec.21})$$

Comprobación de las distancias reales

Es necesario comprobar la distancia entre paneles, para garantizar la no existencia de sombra sobre áreas efectivas de generación eléctrica del panel para garantizar la distancia mínima, la limpieza y el mantenimiento (Becerra, 2019).

Con la ecuación 22 se procede a calcular la distancia entre filas:

$$Dist\ fila = Nf * b + Npa * a \quad (Ec.22)$$

Donde

Nf = número de filas

Npa = número de pasillos a lo ancho

b = distancia de la arista inferior del panel a la arista superior del mismo respecto a la horizontal

a = distancia de la arista superior de un panel a la arista inferior del otro respecto a la horizontal

Con la ecuación 23 se procede a calcular la distancia entre columnas:

$$Dist\ columna = Nc * L + Npl * d \quad (Ec.23)$$

Donde

Nc = número de columnas

Npl = número de pasillos a lo largo

L = longitud del panel

d = distancia entre paneles

- **Mediante softwares especializados:**

Para el estudio de sombras en las áreas seleccionadas para obtener resultados de la disposición del sistema fotovoltaico a seleccionar, siempre se puede realizar por cálculos manuales, pero la calidad del cálculo mejora sustancialmente cuando se usa software potente que realizan los cálculos con más precisión y sobre un espectro del día más amplio. Estos softwares son ampliamente reconocidos en el mundo, entre los cuales por la aplicación como herramientas fiables de simulación de sombras se encuentran:

- ❖ **Pvsyst**

- Análisis y diseño de sistemas solares fotovoltaicos utilizando el software Pvsyst (Baqir & Channi, 2022).

- Diseño y análisis de un sistema solar en red utilizando el software PVsyst para aplicaciones comerciales (Abdul et al., 2022).

❖ Sketchup

- Diseño asistido por computadora y mejora de la eficiencia basada en simulación de la primera ciudad solar egipcia (Haggag et al., 2021).
- Evaluación de viabilidad de la adopción de energía solar fotovoltaica distribuida y materiales de cambio de fase en edificios residenciales multifamiliares (Gassar & Cha, 2022).

❖ Sunny Design

- Evaluación del rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas en exteriores y estimación de software comercial en climas cálidos y secos (Othman & Hatem, 2022).
- Planificación óptima de sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento de baterías para el sector residencial conectado a la red: revisión, desafíos y nuevas perspectivas (Khezri et al., 2022)

2.10. Diseño de la red eléctrica del SSFV.

- **Cálculo y selección de los inversores según la potencia nominal instalada en el SSFV.**

La cantidad de inversores que hacen falta para la instalación se determina mediante la ecuación 24: (Becerra, 2019).

$$\text{Número de inversores} = \frac{Pd}{P_{inversor}} \quad (\text{Ec.24})$$

Donde:

Pd = potencia que demanda la edificación

La selección del inversor y de su dimensionamiento se lleva a cabo de acuerdo con la potencia nominal del generador fotovoltaico. A partir de la potencia nominal del generador fotovoltaico ($P_{DC\ PV\ GEN}$) según la distribución de la radiación de la energía solar en el lugar de instalación y de acuerdo con las condiciones de instalación. El

diseñador tomará la decisión de si el inversor será sobredimensionado ($P_{DC\ Máx\ Inverter} > P_{DC\ PV\ GEN}$) o de tamaño insuficiente ($P_{DC\ Máx\ Inverter} < P_{DC\ PV\ GEN}$). En caso de que el inversor sea de tamaño insuficiente, cuando la potencia generada sea superior a la que normalmente se estima, el inversor limitará automáticamente la potencia de salida (ABB, 2019).

La tasa máxima de potencia de DC del inversor $P_{DC\ Máx\ Inverter}$, de acuerdo con la eficiencia del inversor, define la relación máxima de potencia de del inversor AC. La eficiencia del inversor se encuentra influenciada por el porcentaje de la potencia de salida que el inversor tiene definida y el voltaje del arreglo fotovoltaico (ABB, 2019).

- **Cálculo y selección del banco de baterías.**

Capacidad necesaria de la batería

La capacidad de la batería se determina mediante la ecuación 25: (Callisaya, 2012).

$$C_{bat}(Wh) = \frac{E * D}{Pd} \quad (Ec.25)$$

Donde

E = es la energía total necesaria que hay que suministrar teniendo en cuenta las pérdidas globales

D = número de días de autonomía de la instalación

Pd = es la profundidad de descarga de la batería

La capacidad de la batería se convierte de (Wh) a (Ah) mediante la ecuación 26:

$$C_{bat}(Ah) = \frac{C_{bat}(Wh)}{V_{bat}(V)} \quad (Ec.26)$$

- **Configuración de las cadenas fotovoltaicas (string).**

Determinación del número máximo de módulos fotovoltaicos en cadena

El máximo número de módulos fotovoltaicos conectados en serie (ecuación 29) que pueden ser conectados al inversor es definido en base a considerar que el voltaje de la cadena siempre se va a encontrar por debajo del voltaje máximo a la entrada del inversor.

En caso de que el voltaje de la cadena exceda el voltaje de entrada del inversor, puede ocurrir daños en el inversor debido al sobre-voltaje al que es expuesto (ABB, 2019).

$$N_{MAX \text{ módulos}} \leq \frac{V_{MAX \text{ inversor}}}{V_{OC \text{ MAX módulo}}} \quad (\text{Ec.27})$$

Donde:

$N_{MAX \text{ Module}}$ = máximo número de módulos fotovoltaicos conectados en serie por cada cadena.

$V_{MAX-Inverter}$ = máximo voltaje permitido a la entrada del inversor.

$V_{OC-MAX \text{ Module}}$ = máximo voltaje de circuito abierto del módulo fotovoltaico

Determinación del voltaje máximo de la cadena fotovoltaica $V_{OC \text{ MAX String}}$

El voltaje máximo de circuito abierto de la cadena ($V_{OC \text{ MAX String}}$) a la temperatura más baja que puede ser lo esperado en el lugar de la instalación fotovoltaica podría calcularse con la ecuación 28:

$$V_{MAX \text{ cadena}} = N_{MAX \text{ módulos}} * V_{OC \text{ MAX módulo}} \quad (\text{Ec.28})$$

Determinación de la cantidad mínima de módulos fotovoltaicos en cadena:

En caso de que el voltaje de cadena sea menor que el voltaje mínimo del punto de máxima potencia del inversor, entonces puede que el inversor no sea capaz de realizar el seguimiento o incluso generar pérdidas durante su operación.

El mínimo número de módulos fotovoltaicos conectados en serie (ecuación 29) que pueden ser conectados en el inversor es definido a partir de considerar que se está operando con el voltaje de cadena mínimo en las condiciones de punto de máxima potencia (ABB, 2019).

$$N_{\min mod} \geq \frac{V_{\min MPPT inversor}}{V_{MPP \min módulo}} \quad (\text{Ec.29})$$

El número de módulos fotovoltaicos por cadena no deben:

- Exceder el máximo número de módulos fotovoltaicos por cadena.
- No debe ser menor al mínimo número de módulos fotovoltaicos por cadena.

Determinación de la corriente máxima de los módulos fotovoltaicos

La corriente de corto-circuito es proporcional con la temperatura de la celda y posee su máximo valor a la máxima temperatura de la celda. Por tanto, este máximo se puede determinar a partir de los siguientes datos:

- Temperatura máxima a la que se espera que opere la instalación fotovoltaica.
- Corriente de corto circuito del módulo fotovoltaico ante las STC.
- Coeficiente de temperatura del módulo fotovoltaico.

Las fórmulas para calcular $I_{SC MAX}$ son:

$$I_{SC MAX módulo} = I_{SC STC} * [1 - \alpha * (25 - T_{cell})] \quad (\text{Ec.30})$$

o

$$I_{SC MAX módulo} = I_{SC STC} - \alpha' * (25 - T_{cell}) \quad (\text{Ec.31})$$

Donde:

T_{cell} = temperatura más baja que se puede esperar en el lugar de instalación fotovoltaica.

$I_{SC STC}$ = corriente de cortocircuito del módulo fotovoltaico en condiciones de prueba estándar.

α = coeficiente de variación de la corriente en función de la temperatura y depende de la tipología de módulo fotovoltaico; se mide en [%/K].

α' = coeficiente de variación de la corriente en función de la temperatura y depende de la tipología de módulo fotovoltaico; se mide en [mA/K].

Además, la IEC 60364-7-712 propone una fórmula simplificada:

$$I_{SC\ MAX\ módulo} = K * I_{SC\ STC} \quad (Ec.32)$$

Donde:

K = factor de corrección y su valor mínimo es 1,25; se incrementará para tener en cuenta situaciones ambientales.

Determinación de la corriente máxima en la cadena:

En una serie de conexiones de módulos la corriente no se suma; la corriente total en una cadena de módulos fotovoltaicos conectados en serie es igual a la corriente generada por un único módulo. Sobre la base de lo anterior, la corriente máxima de la cadena fotovoltaica es ($I_{SC\ MAX\ string}$) es igual a la corriente máxima del módulo fotovoltaico $I_{SC\ MAX}$ (ABB, 2019).

$$I_{SC\ MAX\ módulo} = I_{SC\ MAX\ cadena} \quad (Ec.33)$$

Determinación del número de cadenas:

Suponiendo que se llevó a cabo un dimensionamiento correcto del inversor de acuerdo con la potencia nominal del generador fotovoltaico, tan pronto como se defina el número de módulos por cadena, el número de cadenas por inversor debe ser verificado.

En el caso de inversores de cadena con MPPT independiente, el número máximo de cadenas conectadas en paralelo que podría conectarse al único canal de entrada de DC del inversor se define en función de la suposición de que la corriente de cortocircuito de la cadena ($I_{SC\ MAX}$) está siempre por debajo de la corriente de entrada máxima del inversor (ABB, 2019).

$$N_{MAX\ módulos} \leq \frac{I_{max\ input}}{I_{SC\ MAX\ cadena}} \quad (Ec.34)$$

En el caso de inversores de cadena o un inversor central con un solo MPPT, el número máximo de cadenas conectado en paralelo que podría conectarse al

inversor se define en base a la suposición de que el ($I_{SC\ MAX}$) siempre está por debajo de la corriente de entrada máxima del inversor.

$$N_{MAX\ cadena} \leq \frac{I_{max\ inversor}}{I_{SC\ MAX\ cadena}} \quad (Ec.35)$$

En el caso del inversor central, la determinación del número de cadena debe realizarse también para la caja combinadora. En cualquier caso, el nivel máximo de corriente de los componentes utilizados en las cajas combinadoras (conectores, interruptor, fusibles) y el inversor debe ser adecuado para el número de cadenas conectadas (ABB, 2019).

- **Cálculo de la generación del SSFV proyectado mediante:**

- ❖ **Softwares Pvsyst**

- ❖ **Sunny Design.**

Para el cálculo de la generación del SSFV proyectado existen varias maneras para ejecutar ese cálculo desde el uso del término de horas solares pico hasta el uso de modelos basados en la información presentada por el fabricante de los módulos fotovoltaicos y los inversores. Entre los programas recomendados para llevar a cabo este cálculo con precisión encontramos el caso de PVSyst y Sunny Design como ya habíamos mencionado anteriormente. También se puede utilizar:

- ❖ **Helioscope referenciado por los trabajos:**

- Avance de las herramientas de simulación específicas para sistemas solares fotovoltaicos flotantes: análisis comparativo del rendimiento energético medido y simulado en el campo (Manoj Kumar et al., 2022).
- Diseño y optimización del sistema fotovoltaico de minirred para países en desarrollo (Chaware et al., 2021).
- Diseño y análisis de simulación de 1 MWp de sistema fotovoltaico conectado a la red flotando sobre el lago Nasser (Elshafei et al., 2021).

- ❖ **HOMER utilizado en:**

- Análisis previo a la instalación a través de "PVsyst" y "HOMER Pro" para

diseñar y simular un sistema fotovoltaico conectado a la red solar de 50 kWp para la electrificación de áreas rurales, India.(Ahirwar et al., 2021).

- Evaluación del rendimiento de una planta fotovoltaica de 20 MW en un clima cálido utilizando datos reales y herramientas de simulación (Bentouba et al., 2021).
- Diseño óptimo de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico con la red nacional utilizando HOMER: un estudio de caso en Kerkennah, Túnez (Mallek et al., 2022).

- **Cálculos manuales.**

Para el análisis de generación energética del sistema fotovoltaico se utiliza la ecuación 36: (Becerra, 2019).

$$E_G = N * P_{pp} * I_{si} * 0.753 \quad (\text{Ec.36})$$

Donde

P_{pp} = potencia pico del panel

N = número de paneles

I_{si} = irradiación solar incidente sobre los paneles

Potencia instalada

La potencia instalada se calcula a partir de la ecuación 37: (Becerra, 2019).

$$P_{inst} = N * \left(\frac{P_{pp}}{1000} \right) \quad (\text{Ec.37})$$

Disposición de área/potencia

La disposición área/potencia se determina con la ecuación 38:

$$E_G = \frac{A_t}{P_{inst}} \quad (\text{Ec.38})$$

2.11. Análisis de costos e impacto medioambiental.

2.11.1. Análisis de costo para la institución.

Para el desarrollo del análisis de costos se siguen los criterios dados por: (Becerra, 2019), (Monteagudo & Crespo, 2021).

Para la realización de la evaluación económica se tendrán 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 los siguientes factores: 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 recuperará la inversión y las ganancias que traerá consigo (Becerra, 2019).

Todo el cálculo económico estará realizado para las menores condiciones de radiación y horas solares pico, donde la capacidad de generación y entrega del SSFV será mínima y para el consumo máximo registrado en un día.

Conociendo el ahorro generado por el SSFV y la tarifa eléctrica aplicada a la institución, se puede determinar el ingreso monetario por la ecuación 39:(Becerra, 2019).

$$\text{Ingreso} = \text{Electricidad generada} * \text{Tarifa eléctrica} \quad (\text{Ec.39})$$

Ingresos anuales

Para la determinación del ingreso en el año se tiene en cuenta los días que se trabaja y los días que no, ya que el ingreso en los días no laborables, está asociado a la generación del SSFV que será inyectada a la red del SEN con una tarifa de venta determinada. Conociendo todas estas condiciones se puede proceder al cálculo de los ingresos anuales definidos como ingresos por ahorro a los producidos en los días laborables e ingresos por exportación a los no laborables (Becerra, 2019).

Ingreso por ahorro.

$\text{Ingreso ahorro} = \text{Elect gen en días laborables} * \text{Tarifa eléctrica} * \text{Días laborables}$ (Ec.40)

Ingreso por exportación.

$\text{Ingreso exp} = \text{Elect gen en días no laborables} * \text{Tarifa eléctrica} * \text{Días no laborables}$
(Ec.41)

Ingreso total.

$\text{Ingreso total} = \text{Ingreso ahorro} + \text{Ingreso exp}$ (Ec.42)

Determinación del Período Simple de Recuperación (PSRI).

Se emplea en aquellos casos en que los ahorros anuales son constantes, el PSRI en años será: (Monteagudo & Crespo, 2021).

$$PSRI = \frac{\text{Inversión en capital}}{\text{Ahorros anuales netos}}$$
 (Ec.43)

Por la poca profundidad de esta evaluación, es aconsejable emplear el método del Periodo Simple de Recuperación de la Inversión únicamente como un primer filtro rápido de las posibles inversiones y emplear métodos más confiables para evaluar en detalle proyectos con buenas perspectivas.

Cálculo del interés simple.

Un capital colocado en el banco genera un nuevo capital, pero siempre sobre la magnitud del capital inicial depositado y nunca sobre la magnitud del interés ganado (No hay capitalización). La ecuación 44 plantea como se determina el interés simple (Monteagudo & Crespo, 2021).

$$F = \sum_{i=1}^n p(1 + r)_i$$
 (Ec.44)

Donde

p = cantidad presente de dinero

i = año para el que se desea determinar el valor futuro

r = tasa de interés

Cálculo del interés compuesto.

Un capital colocado en el banco genera un nuevo capital, pero siempre sobre la magnitud del capital inicial depositado más la magnitud del interés ganado (Hay capitalización). Se determina por la ecuación 45:

$$F = P[1 + 3r + 3r^2 + r^3] \quad (\text{Ec.45})$$

Evaluación del valor del dinero a través del tiempo.

Para la evaluación del valor del dinero se utiliza la ecuación 46.

$$F = P(1 + r)^i \quad (\text{Ec.46})$$

Determinación del flujo de caja.

El flujo de caja es la diferencia neta entre beneficios y costos en cada uno de los años, refleja el dinero real en caja. Este se determina por la ecuación 47:

$$Fc_i = (I_i - G_i - Dep) * \left(1 - \frac{t}{100}\right) + Dep \quad (\text{Ec.47})$$

Donde

I = ingresos en el año i

G = gastos en el año

Dep = depreciación del equipamiento, que se determina por la ecuación 48;

$$Dep = \frac{\text{costo del equipo}}{\text{vida útil estimada(años)}} \quad (\text{Ec.48})$$

t = tasa de impuesto sobre la ganancia

Determinación de la tasa de interés real (R)

Es el interés que tiene en cuenta los efectos de la inflación. La inflación o devaluación del dinero, reflejada por un aumento de los precios en el mercado, puede incluirse en el análisis de inversiones calculando una tasa de interés real (tasa en moneda constante) mediante la relación de Fisher (Monteagudo & Crespo, 2021). Esta se determina con la ecuación 49:

$$R = \left(\frac{1+r}{1+f} \right) - 1 \quad (\text{Ec.49})$$

Donde

r = tasa de interés bancaria

f = tasa de inflación, fracción

Determinación del valor presente neto.

Se determina el Valor Presente Neto (VPN) haciendo uso de la ecuación (50). Se calcula el valor presente neto de los flujos de caja proyectados para todos los años durante el período de evaluación del proyecto (Monteagudo & Crespo, 2021).

$$VPN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1+D)^i} \quad (\text{Ec.50})$$

Donde

K_0 = inversión inicial

Fc = flujo de caja

D = tasa de descuento real utilizada

Determinación de la Tasa Interna de Retorno (TIR)

Se define como aquella tasa de descuento que reduce a cero el Valor Presente Neto.

La TIR representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, de forma tal que, al finalizar el período de evaluación o vida útil, el saldo no recuperado sea igual a cero (Monteagudo & Crespo, 2021).

Analíticamente la TIR se determina como:

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{Fc_i}{(1+TIR)^i} \quad (\text{Ec.51})$$

Como se puede observar, esta ecuación no se puede resolver directamente, sino que se requiere de un análisis iterativo para obtener el valor de la TIR.

Determinación del Período Real de Recuperación de la Inversión (PRI)

Es el tiempo en que se recupera la inversión inicial para una tasa de descuento D considerada. Se calcula como el momento para el cual el VPN se hace cero. Se determina a partir de la ecuación 52 (Monteagudo & Crespo, 2021).

$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^{PRI} \frac{Fc_i}{(1+D)^i} \quad (\text{Ec.52})$$

Para obtener el valor del PRI se le van adicionando gradualmente a la inversión inicial los flujos de caja anuales hasta que el resultado sea cero, en ese momento se ha recuperado la inversión.

Relación Costo - Beneficio (RCB)

Se determina como la relación entre el Valor Presente Neto de los Costos VPNC y el Valor Presente Neto de los Beneficios VPNB (ecuación 53).

$$RCB = \frac{VPNC}{VPNB} \quad (\text{Ec.53})$$

En la determinación del VPNC hay que sumar al valor de los costos anuales descontados, el valor de la inversión inicial sin descontar.

- **Revisión de precio del SSFV.**

Para la realización de la evaluación económica se tendrán 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 los siguientes 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 recuperará la inversión y las ganancias que traerá consigo.

2.12. Análisis de costo para el país.

Para la realización de la evaluación económica se tendrán 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 los siguientes 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 período de tiempo en que se recuperará la inversión y las ganancias que traerá consigo.

Se analiza el comportamiento del mercado para determinar la cantidad de divisa ahorrada según la cantidad de combustible dejado de utilizar para la generación de energía eléctrica aportada por la instalación fotovoltaica.

2.13. Análisis y aporte medio ambiental.

- Analizando el problema en cuanto a combustible dejado de quemar para producir la misma cantidad de energía.
- Por tanto, a partir del combustible ahorrado se puede obtener la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera en t/año.

Cantidad de combustible ahorrado.

Analizando el problema en cuanto a combustible dejado de quemar para producir la misma cantidad de energía, este se puede calcular mediante la ecuación 54: (Becerra, 2019).

$$\text{Combustible ahorrado} = \frac{E * g}{1000} \quad (\text{Ec.54})$$

Donde

E = energía generada, kWh/año

g = consumo específico de combustible de los grupos electrógenos

Cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera.

A partir del combustible ahorrado se puede obtener la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera en t/año por la ecuación 55:

$$CO_2 \text{ no emitido} = \frac{\text{Combustible ahorrado} * k}{\rho} \quad (\text{Ec.55})$$

Donde

K = coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO₂ no vertidas a la atmósfera

ρ = densidad del combustible

Conclusiones parciales del capítulo

1. En el capítulo se presentó una metodología para el correcto dimensionamiento y selección de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red. La misma pretende unificar una serie de criterios para dicho dimensionamiento. Esta metodología incluye, tanto el cálculo manual, como el cálculo por softwares informáticos. Para este caso, la metodología va a ser evaluada a través de softwares, ya que permite una mayor rapidez en la obtención de los resultados para el caso de estudio propuesto.

CAPITULO 3. ESTUDIO DE CASO EN HOTEL PUNTA LA CUEVA. CIENFUEGOS.

Para la validación de la metodología propuesta, se realiza un estudio de caso en la instalación hotelera Punta la Cueva.

En el estudio del consumo energético y las Habitaciones-Días Ocupadas, se analizó el proceso de prestación de servicios y se encontraron las oportunidades de mejoras del desempeño energético vinculadas al control operacional, a ajustes de parámetros operacionales y la inversión de tecnologías.

Se comprobó que la entidad cubre sus necesidades energéticas con el uso de cuatro portadores energéticos: electricidad, diésel, gasolina y gas licuado y se obtuvo la estructura de consumo de los portadores energéticos para el año 2019 (Figura 8), en el que se infiere que el mayor consumo dentro del hotel es la electricidad representando el 96.30% con respecto a los demás portadores. Se toma en cuenta este año y no uno más próximo ya que producto de la Covid 19 los años siguientes se comportaron de forma irregular.

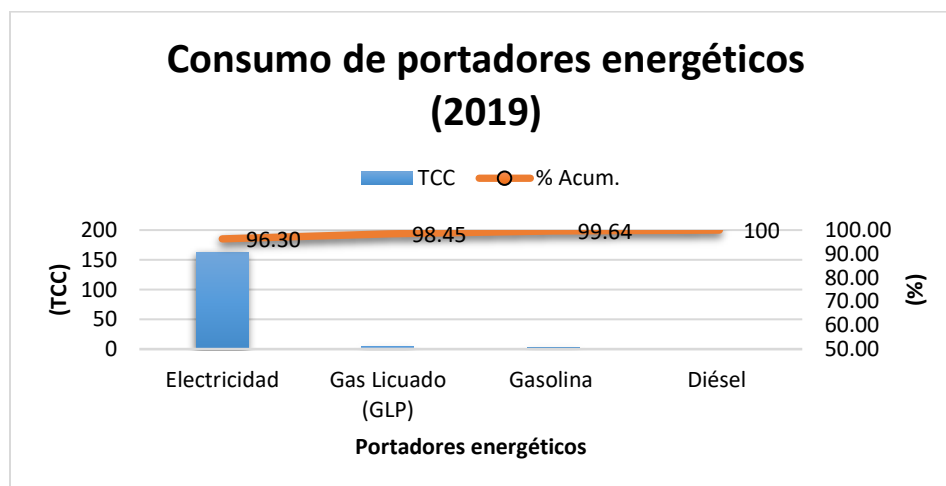


Figura 8: Estructura de consumo de los portadores energéticos para el año 2019.
Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

Se evidenció que la energía eléctrica en la instalación está distribuida en siete áreas: habitaciones, servicios, cocina, complejo, administrativa, exteriores y almacenes. La Figura 9 muestra la estratificación de los consumos y porcentos acumulativos del uso de la energía eléctrica, en el que se puede apreciar que el mayor consumo de electricidad del hotel se encuentra en las habitaciones representando este el 71.26% con respecto a las demás áreas de la instalación. Para completar el análisis de la ley 80/20 de Pareto, es decir qué áreas representan el 80% del consumo de energía eléctrica dentro del hotel se pueden incluir las áreas de servicios y cocina, entre estas representan más del 84% del consumo de electricidad del hotel.

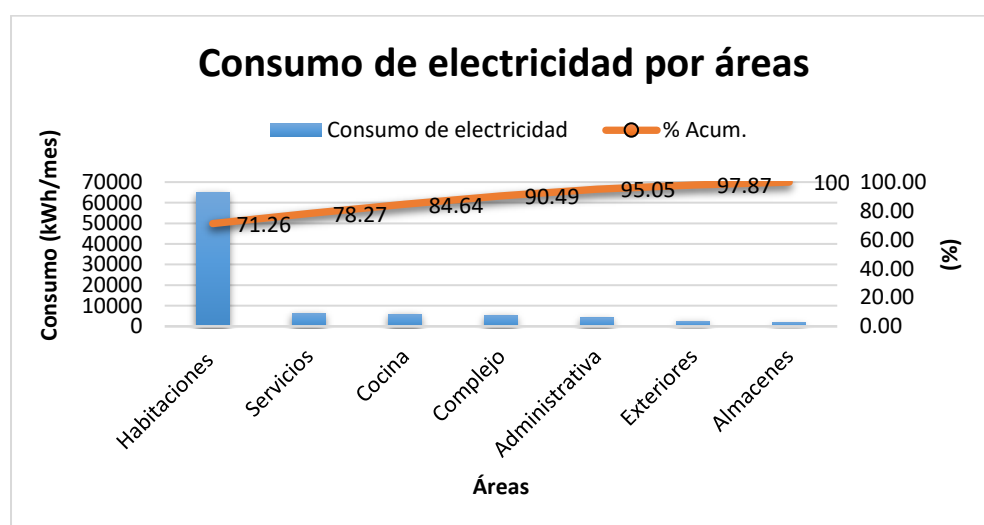


Figura 9: Estructura del consumo eléctrico por áreas. Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

Se realizó la estratificación en el área de habitaciones a partir de la capacidad energética instalada en equipos, capacidad de procesamiento en las máquinas y horas de encendidos de los equipos, que permitió determinar que los equipos mayores consumidores de energía eléctrica son los Split de 1 ton con un 92,64% con respecto a los demás consumidores. Esto se debe a su cantidad y a la alta potencia que poseen los mismos, otros factores que pueden incidir son su atraso tecnológico, la falta de mantenimiento, el mal uso de estos y las altas temperaturas durante la mayoría del año en Cuba.

En el estudio del consumo energético y la producción en la empresa (Figura 10) se comprobaron constantes variaciones de la producción (HDO) y el consumo de energía eléctrica (kWh) como una de las causas del uso no eficiente de la energía eléctrica en el proceso productivo.

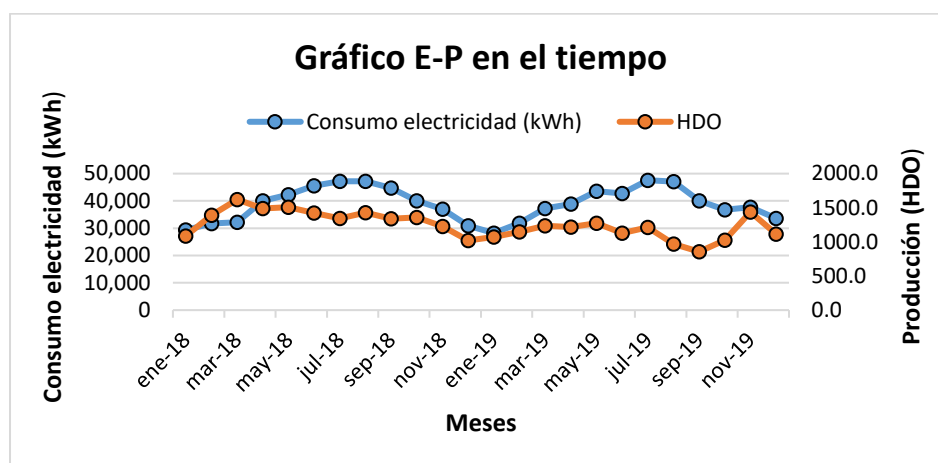


Figura 10: Consumo de electricidad y la producción en el tiempo. Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

Estas variaciones en el comportamiento de la producción con respecto al consumo en los años analizados se deben a:

- De enero-18 a marzo-18 existió un incremento de la producción y del consumo (temporada alta).
- De marzo-18 a septiembre-18 hubo un aumento significativo del consumo y una disminución de las HDO, esto generalmente se corresponde por el aumento de las temperaturas y de los servicios que no conllevan hospedaje al predominar el turismo nacional.
- De septiembre-18 a enero-19 se observa una disminución del consumo y la producción debido a formar parte de la temporada baja.
- De enero-19 a septiembre-19 existe una correspondencia entre el comportamiento de ambas variables.
- De septiembre-19 hasta el final del año existe primero un aumento de la HDO y una disminución del consumo, esto pudo estar dado por ahorros energéticos y

por el tipo de turismo. En la segunda etapa hay una disminución de ambas variables.

3.1. Línea Base Energética (LBen) e Indicador de Desempeño Energético (IDEn)

Para la presentación de la Línea Base Energética (LBen) preliminar se decidió analizar el consumo de energía eléctrica y las HDO en el periodo 2018-2019 tal y como se observa en la Figura 11. En dicha figura se presenta la ecuación del consumo para ambos años, la cual es $y = 6.2066x + 31145$ con un nivel de correlación R^2 de 0,0378. Este valor representa una baja correlación entre las variables analizadas y la ecuación del modelo propuesto (se considera un buen nivel de correlación para valores de R^2 superiores a 0.75). La energía no asociada a la producción fue de 31 145 kWh, representando más del 80% del total de la energía consumida por la empresa.

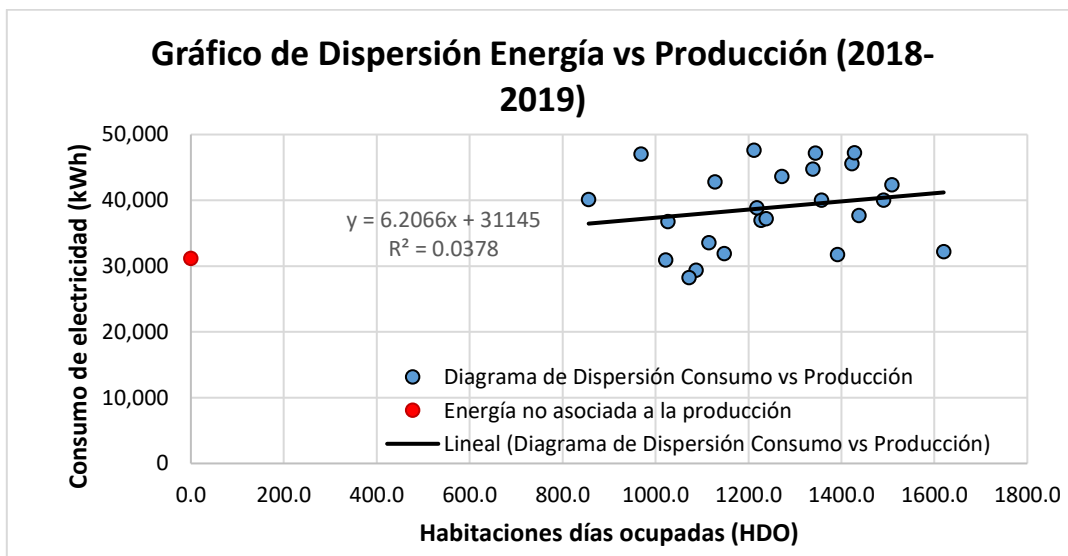


Figura 11: Gráfico de dispersión de energía vs producción (HDO) (2018-2019).
Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

La baja correlación existente entre el consumo de electricidad y las HDO se debe a los tipos de servicio que brinda el hotel, el mismo es un hotel de paso, principalmente para turismo nacional y servicios a empresas, servicios de pasadía y fiestas en la

piscina. También los servicios de coctelera en su bar-lobby climatizado y su salón de fiesta y reuniones. Otros servicios son los de gastronomía tanto a turistas de paso como a sus trabajadores. Tampoco estos indicadores tienen en cuenta el tipo de turismo, la época del año y el tipo de clima de nuestro país.

No se consideró aplicar la técnica de filtrado de datos debido a la baja correlación entre el consumo y las HDO por lo que se supone esta no alcance el valor de correlación de 0,75 recomendado. En numerosos trabajos se ha demostrado este bajo nivel de correlación para estas variables presentadas anteriormente, sin embargo, la mayoría de los investigadores coinciden en que la variable Días Grados (DG) tiene una influencia marcada en el consumo de energía de la instalación si la climatización es el servicio de mayor consumo del hotel. Es necesario entonces incorporar los DG como variable influyente en el consumo energético.

En la Figura 12 se muestra el gráfico de correlación entre las habitaciones días ocupadas y días grados (HDO-DG) y el consumo de energía eléctrica (kWh). El gráfico se obtiene a partir de los registros históricos correspondientes a los años 2018 y 2019. Como se puede observar el valor de correlación supera los 0.75 por lo que se puede considerar correcto.

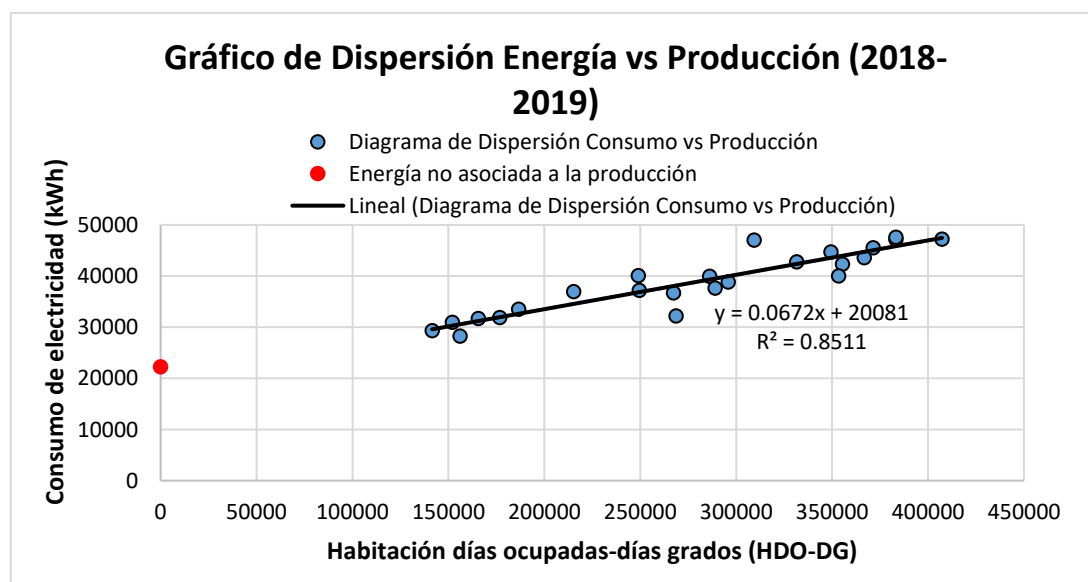


Figura 12: Gráfico de dispersión del consumo de energía vs la producción (HDO*DG) (2018-2019). Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

Para lograr una mejora en la correlación del gráfico anterior se le realizó un filtrado del 8,33% de los datos. Para lo cual fue obtenido una nueva línea base y a su vez la línea meta correspondiente para este caso. Resultados:

- La línea base energética tiene como ecuación $y = 0.0657x + 20\,500$ y correlación $R^2 = 0.93$.
- La línea meta tiene como ecuación $y = 0.0647x + 19\,412$ y correlación $R^2 = 0.97$.
- Con la línea meta obtenida se observa una mejora en la correlación de los datos y una disminución de un 5.3% de la energía no asociada a las habitaciones, es decir 1088 kWh de energía ahorrada.

Estos resultados se pueden observar en la Figura 13.

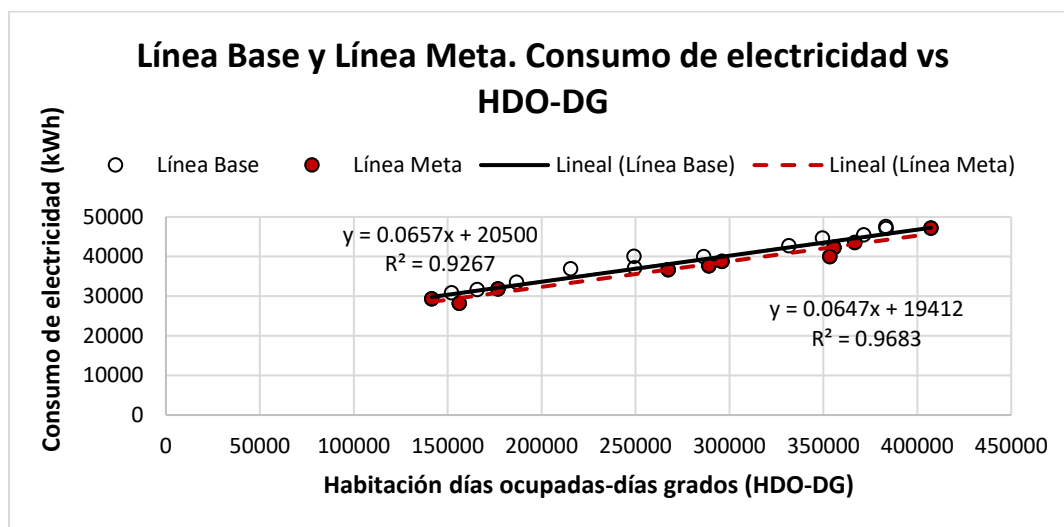


Figura 13: Línea base y línea meta correspondientes a los datos filtrados del consumo de energía vs HDO-DG (2018-2019). Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

Como se muestra en la Figura 13 el valor de correlación (R^2) de la línea meta energética es de 0.97 aproximadamente, es decir se puede pretender la incorporación de esta línea meta como la futura línea base energética del hotel.

A partir de esta línea meta se obtuvo el indicador de desempeño meta, el mismo se muestra en la Figura 14.

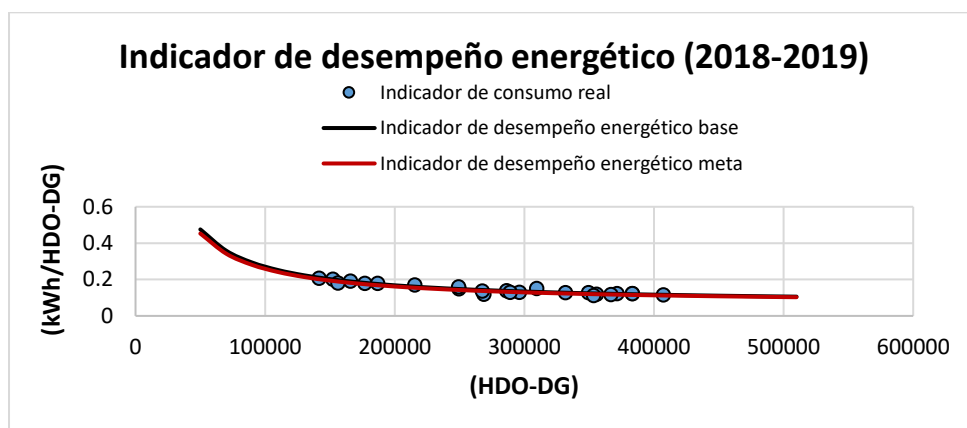


Figura 14: Gráfico del indicador de desempeño energético (2018-2019). Fuente: Elaboración propia, abril 2021.

En la implementación y operación se identificaron las necesidades de formación, se definió el plan y se estableció un registro. Además, se logró que la organización brinde información interna de su Sistema de Gestión Energética (SGEn): desempeño energético, ahorro o desviaciones, logros alcanzados por área o procesos y se implementó el proceso que permite a toda persona que trabaje para, o en nombre de, la organización hacer comentarios o sugerencias para la mejora del SGEn. Según los estudios consultados de (Plasencia et al., 2014), (Álvarez et al., 2018), (Martín, 2019), (Borroto & Monteagudo, 2006), (Cabrera, 2019) y (Jiménez, 2016), el indicador de desempeño energético posee comportamientos similares.

3.2. Oportunidades de ahorro

Las oportunidades de ahorro están hechas con el propósito de brindarle a la dirección del hotel y a la cadena hotelera Islazul soluciones para disminuir el consumo de sus principales portadores energéticos, en este caso nos enfocamos en la energía eléctrica que es el mayor portador consumido por la instalación. De esta manera el hotel aumentara su eficiencia y a la vez sus ganancias.

3.2.1. Climatización:

- 1- Limpiar los evaporadores periódicamente. Comprobar el correcto funcionamiento del sistema de descarche.
- 2- Limpiar los filtros de los equipos de climatización semanalmente.
- 3- Reducir las entradas de aire exterior mediante adecuada hermeticidad de las puertas, empleo de brazos hidráulicos y reducir el tiempo de apertura de las puertas mediante medidas organizativas.
- 4- Ajustar los termostatos en locales climatizados a 24 °C.
- 5- Apagar los equipos de climatización en habitaciones vacías.
- 6- Utilización de cortinas en ventanas y puertas para disminuir la ganancia de calor.
- 7- La selección de las habitaciones, sin afectar la calidad del cliente, se debe priorizar en aquellas habitaciones que tenga menor carga térmica en función de la temporada, incluyendo una programación de las condiciones del hotel que prioricen aquellas que tienen menor consumo, evitando de manera óptima el derroche de energía eléctrica ya que esta es el área más consumidora del hotel.
- 8- Sustituir los Split comunes por los de tecnología inverter que estos son mucho más eficientes.
- 9- Sustituir los aires acondicionados en el área gerencial por Split inverter según la capacidad requerida.

3.2.2. Iluminación:

- 1- Aprovechar el máximo la luz natural, colocando papel traslucidos en ventanas y puertas de vidrio, dejando pasar la luz y rechazando el calor.
- 2- Seccionalizar circuitos de iluminación para compartimentar su uso.
- 3- Iluminar puntos específicos en lugar de iluminar fondos.
- 4- Pintar paredes, techos, y columnas de colores claros.
- 5- Disminuir la altura de las lámparas.
- 6- Cambiar señales de salida de incandescentes a diodos emisores de luz (LED).

3.2.3. Motores eléctricos:

- 1- Selección apropiada de los motores eléctricos en las bombas de suministro de agua del hotel principalmente en la piscina.
- 2- Lograr los mayores períodos de operación del motor y su carga a la máxima eficiencia (75 - 95 % de su potencia nominal).
- 3- Verificar las reparaciones de los motores rebobinados.
- 4- Valorar la sustitución de motores antiguos o de uso intensivo por normalizados de alta eficiencia.
- 5- Mantener en buen estado los medios de transmisión motor - carga, así como los cojinetes del motor.

3.2.4. Propuesta para la sustitución de equipos

Para aumentar la eficiencia energética y el ahorro de la energía eléctrica, se realizó el estudio de la sustitución de la luminaria de las áreas exteriores del hotel, las mismas poseen 80 bombillos marca Illumenova (CFL, 15W, 6500k, 120V/60Hz, E27), la propuesta es sustituirlos por bombillos marca Gedeme (Bulbos LED, E27, 9W) de comercialización nacional en las tiendas mayoristas.

3.3. Estudio de sombras en las áreas seleccionadas:

Para el estudio de sombras se utiliza el programa Sketchup, puesto que este software facilita la generación de un modelo tridimensional de la instalación, el análisis de la incidencia solar sobre las superficies y de las posibles sombras que se pueden producir sobre los módulos fotovoltaicos. En esta simulación se tomaron en cuenta los pasillos para garantizar una mayor accesibilidad para el mantenimiento de las instalaciones. En la Figura 15 se representa el comportamiento del nivel de incidencia de la radiación solar en el día considerando la trayectoria del sol en función de los obstáculos presentes, en la misma se observa que el color marrón (las áreas de mejores condiciones para la instalación del SSFV y las recomendadas como áreas disponibles para la instalación de los paneles fotovoltaicos) abarca toda la superficie de la cubierta. El análisis permitió seleccionar la mayor área disponible para lograr la mayor eficiencia del sistema con respecto a la incidencia de las sombras en los paneles fotovoltaicos.

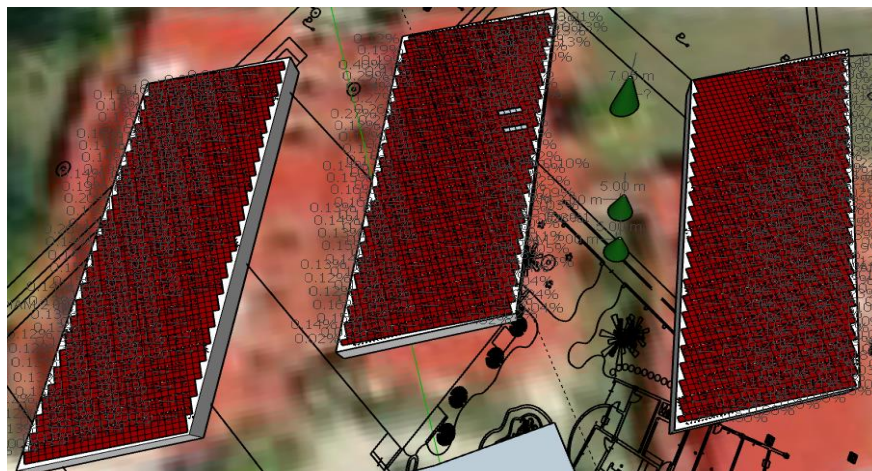


Figura 15: Comportamiento del nivel de incidencia de la radiación solar en el día considerando la trayectoria del sol en función de los obstáculos presentes.

3.4. Cálculo de resistencia de la propuesta de soporte para el SSFV.

Luego de hacer indagaciones sobre las características constructivas de los bloques habitacionales se verificó la capacidad de las edificaciones para resistir las cargas del sistema solar fotovoltaico. En la Figura 16 se muestra el diseño elaborado mediante el programa (SOLIDWORKS) de la estructura de soporte de los paneles solares fotovoltaicos. Los resultados de las simulaciones son proporcionados en el informe aportado por el programa y están dados en el Anexo 3.

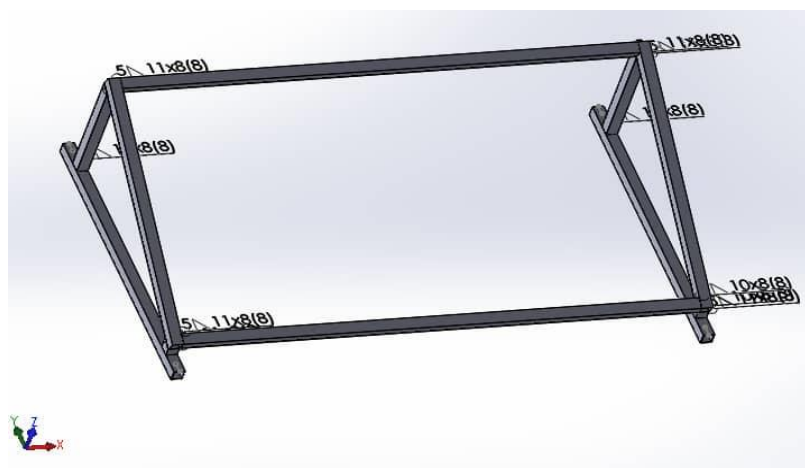


Figura 16: Diseño de la estructura de soporte de los paneles solares fotovoltaicos. Fuente: confección propia (SOLIDWORKS)2022.

En la Figura 17 se muestran las propiedades de material utilizado para la fabricación de la estructura de soporte.

Propiedades de material

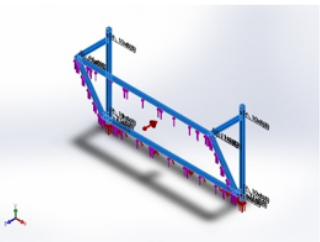
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Acero aleado fundido Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: $2.41275 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Límite de tracción: $4.48083 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de Poisson: 0.26 Densidad: 7300 kg/m^3 Módulo cortante: $7.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ Coefficiente de dilatación térmica: $1.5 \times 10^{-5} / \text{Kelvin}$	Sólido 1(Cortar-Extruir1)(Pieza 2 con ángulo 22.26-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(Pieza 2 con ángulo 22.26-2), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(Pieza con ángulo 22.26-1), Sólido 1(Cortar-Extruir1)(Pieza con ángulo 22.26-2), Sólido 1(Saliente-Extruir3)(Pieza1 Base-1), Sólido 1(Saliente-Extruir3)(Pieza1 Base-2), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza3-1), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza3-2), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza5-1), Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pieza5-2)
Datos de curva:N/A		

Figura 17: Propiedades de material utilizado para la fabricación de la estructura de soporte. Fuente: confección propia (SOLIDWORKS)2022.

En la Figura 18 se muestran las tenciones que actúan sobre la estructura de soporte, las cuales se encuentran en un rango entre 15167.1 N/m² y 2.8814e+008 N/m²

las cuales se encuentran en un rango entre 15167.1 N/m² y 2.8814e+008 N/m²

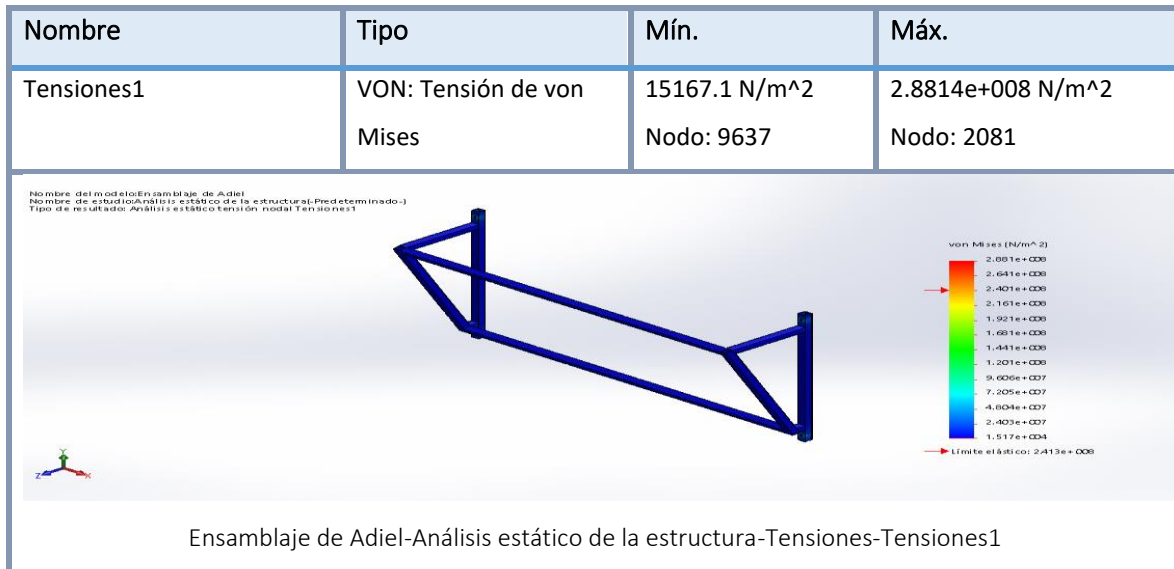


Figura 18: Tenciones que actúan sobre la estructura de soporte. Fuente: confección propia (SOLIDWORKS)2022.

En la Figura 19 se puede observar el comportamiento de los desplazamientos de las vigas en la estructura de soporte. El desplazamiento máximo en dicho soporte es de 0.18547mm, valor sumamente pequeño, lo que indica que la estructura no fallará ante las cargas a las que estará sometida.

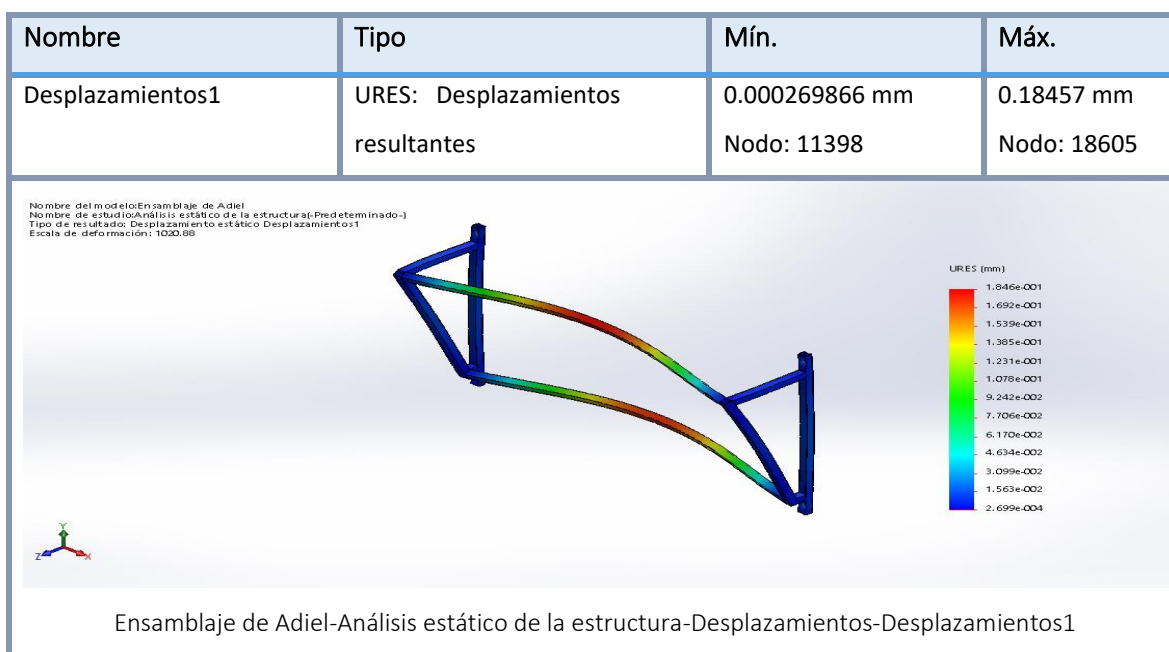


Figura 19: Comportamiento de los desplazamientos de las vigas en la estructura de soporte. Fuente: confección propia (SOLIDWORKS)2022.

3.5. Cálculo de la disposición del SSFV.

En la Figura 20 se muestra el modelo tridimensional representativo de la institución en su totalidad y la propuesta disposición de los paneles solares fotovoltaicos ubicado en los tres bloques habitacionales. En esta se tomaron en cuenta los pasillos para garantizar una mayor accesibilidad para el mantenimiento de las instalaciones. Los resultados de las simulaciones son proporcionados en el informe aportado por el Sketchup Pro-21 y están dados en el Anexo 1.

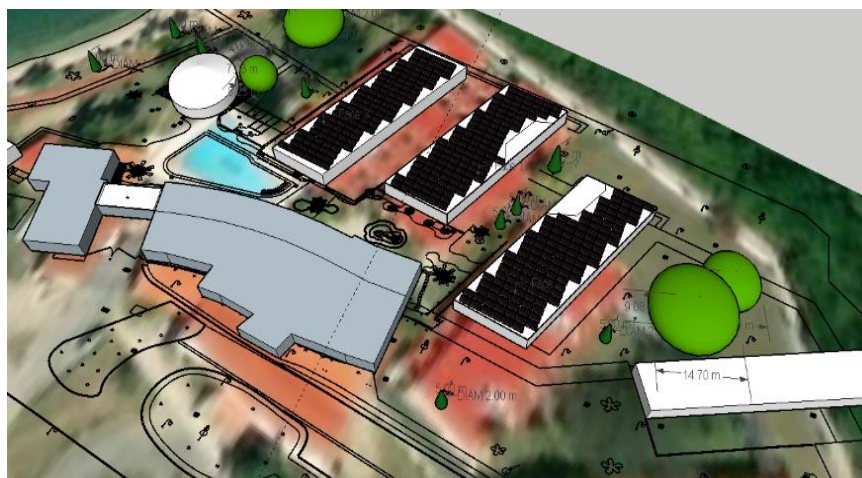


Figura 20: Estructura de la institución en su totalidad y la disposición de los paneles solares fotovoltaicos ubicado en los tres bloques habitacionales.
Fuente: Confección propia (Sketchup Pro-21) 2022.

Se propone la instalación de un total de 379 paneles solares fotovoltaicos modelo DSM-380MP, con una potencia pico de generación de 380Wp. En la Tabla 5 se muestran los resultados referentes a las características de los módulos propuestos a montar sobre las superficies identificadas.

Tabla 5. Resultados de los módulos solares en cada grupo (agrupados por la misma inclinación, Azimuth y modelo de panel)

Resultados de cada cara de los módulos solares									
Caras	Modelo	Nº de Paneles	Pot. Pico (Wp)	Potencia (kWp)	Peso (kg)	Azimut	Inclinación	Inclinación relativa	Perdida por sombras (%)
1	Panel DSM-380	123	380.00	46.74	2644.50	176.96	22.26	22.26	0.18
2	Panel DSM 380	130	380.00	49.40	2795.00	176.96	22.26	22.26	0.50
3	Panel DSM-380	126	380.00	47.88	2709.00	176.96	22.26	22.26	0.11

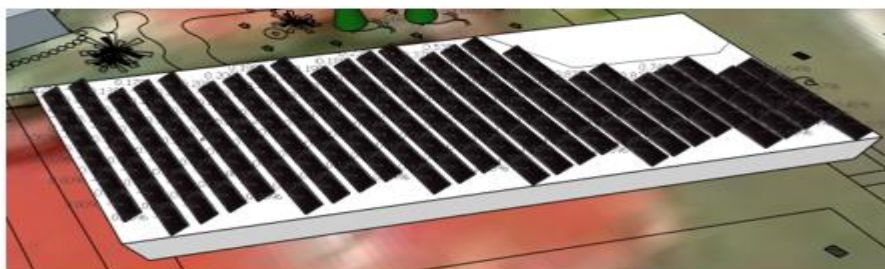
Fuente. Realizado mediante Sketchup Pro-21. 2022.

En la Figura 21 se muestra la disposición de los paneles sobre las cubiertas en el orden respectivo a la (Tabla 3).

Bloque 1.



Bloque 2.



Bloque 3.



Figura 21: Disposición de los paneles sobre las cubiertas. Fuente: Confección propia (Sketchup Pro-21) 2022.

Utilizando el programa Sketchup Pro-21 se analiza el comportamiento de las sombras sobre los paneles, en este aspecto se tienen en cuenta las sombras producidas por los propios paneles. En la Tabla 6 se muestran las pérdidas estimadas por sombreado sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos en (%) respecto a la cantidad de horas de sol que reciben los paneles.

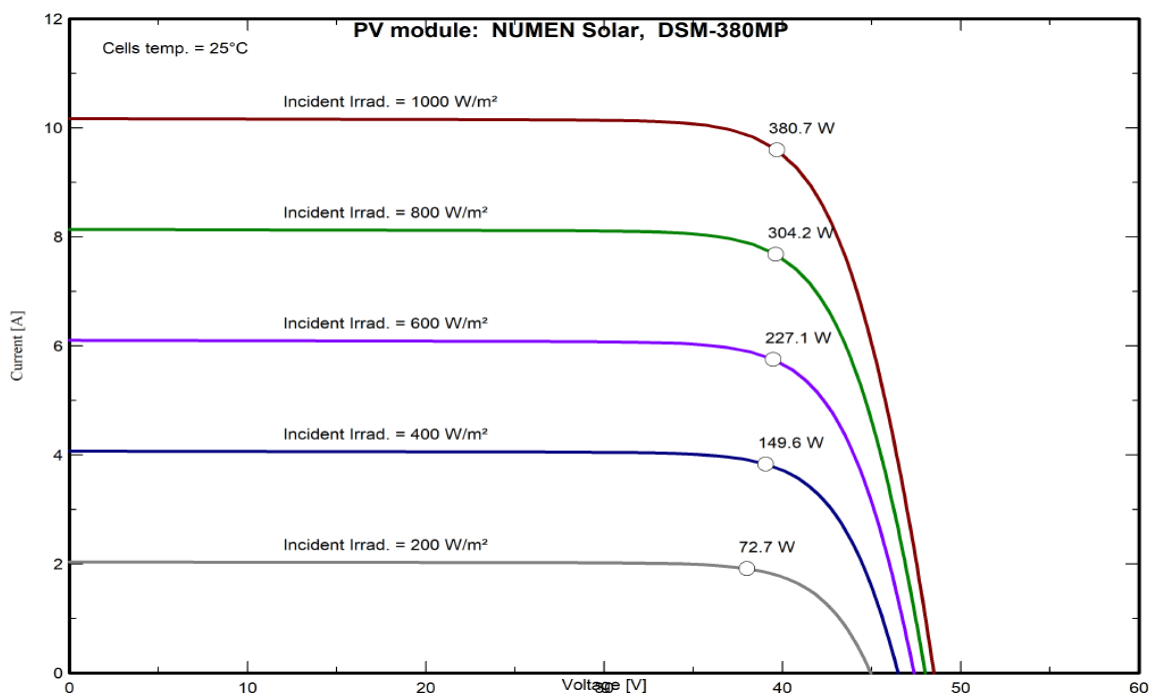
Tabla 6. Pérdidas de sombreado mensuales en (%).

Pérdidas por sombra mensuales (%)												
Cara	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	0.83	0.19	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.11	0.08	0.90
2	1.29	0.75	0.51	0.23	0.13	0.09	0.07	0.10	0.27	0.54	0.75	1.37
3	0.58	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.03	0.67
Aproxim.	0.90	0.32	0.18	0.09	0.05	0.03	0.02	0.04	0.11	0.25	0.29	0.98

Fuente. Realizado mediante Sketchup Pro-21. 2022.

Para obtener una estimación de la generación de los arreglos fotovoltaicos propuestos, se realiza una simulación del sistema solar fotovoltaico apoyándonos del programa PVsyst.7.1.0. En la tabla 6 se muestran las estimaciones realizadas por el PVsyst a partir de los datos que se introdujeron previamente para su modelado dentro del programa, mientras que en la tabla 7 se muestran los resultados de dicha simulación donde se aprecia que el sistema solar fotovoltaico es capaz de entregar 186.9MWh/año y que los meses de mayor producción son los comprendidos entre mayo y septiembre. Los resultados de las simulaciones son proporcionados en el informe aportado por el programa y están dados en el Anexo 2.

Tabla 6. Estimaciones realizadas por el PVSyst a partir de los datos que se introdujeron previamente para su modelado dentro del programa.



Fuente. Realizado mediante PVSyst.7.1.0.

Tabla 7. Resultados de la simulación con PVsyst.7.1.0 del SSFV

Balances y resultados principales

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray MWh	E_User MWh	E_Solar MWh	E_Grid MWh	EFrGrid MWh
Enero	112.9	54.55	19.71	139.2	128.4	16.26	28.24	9.32	6.583	18.92
Febrero	116.7	56.16	21.62	135.9	126.1	15.73	31.88	10.39	5.008	21.49
Marzo	154.7	69.58	23.77	165.9	154.1	18.90	37.19	12.65	5.861	24.54
Abril	159.0	84.32	24.55	158.3	146.4	17.96	38.85	13.33	4.250	25.51
Mayo	156.0	85.00	26.41	146.0	133.9	16.34	43.61	13.25	2.737	30.35
Junio	150.3	78.61	26.74	136.2	124.9	15.25	42.78	12.59	2.322	30.19
Julio	160.8	86.50	27.31	148.0	136.1	16.56	47.59	14.09	2.110	33.50
Agosto	155.4	82.55	27.16	151.7	140.1	17.02	47.03	14.07	2.584	32.96
Septiembre	123.7	73.33	25.64	126.6	116.3	14.28	40.09	11.35	2.620	28.74
Octubre	115.8	53.10	25.12	130.8	121.4	14.91	36.73	10.06	4.521	26.67
Noviembre	109.7	53.01	22.30	132.1	121.8	15.27	37.65	11.13	3.825	26.52
Diciembre	106.9	48.24	21.64	135.3	123.6	15.55	33.55	10.32	4.906	23.23
Año	1621.7	824.95	24.35	1706.1	1572.9	194.02	465.18	142.55	47.328	322.63

Leyendas

GlobHor Irradiación horizontal global

DiffHor Irradiación difusa horizontal

T_Amb Temperatura ambiente

GlobInc Global incidente plano receptor

GlobEff Global efectivo, corr. para IAM y sombreados

EArray Energía efectiva a la salida del conjunto

E_User Energía suministrada al usuario

E_Solar Energía del sol

E_Grid Energía inyectada en la red

EFrGrid Energía de la red

Fuente. Realizado mediante PVsyst.7.1.0.

En la Figura 22 se muestra el comportamiento del factor de rendimiento (relación entre la productividad final y de referencia de la instalación) que se encuentra para todos los meses del año en el intervalo recomendado (0,74-0,80) según (González et al., 2022). Se puede apreciar que la proporción de rendimiento presenta una disminución en los meses comprendidos entre mayo y septiembre, esto se debe a que la temperatura influye en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos (a mayor tempera, menor eficiencia). Sin embargo, estos son los meses de mayor producción de energía, dado que en estos meses la altura solar es mayor por lo que la radiación incide de la forma más perpendicular posible y con más fuerza.

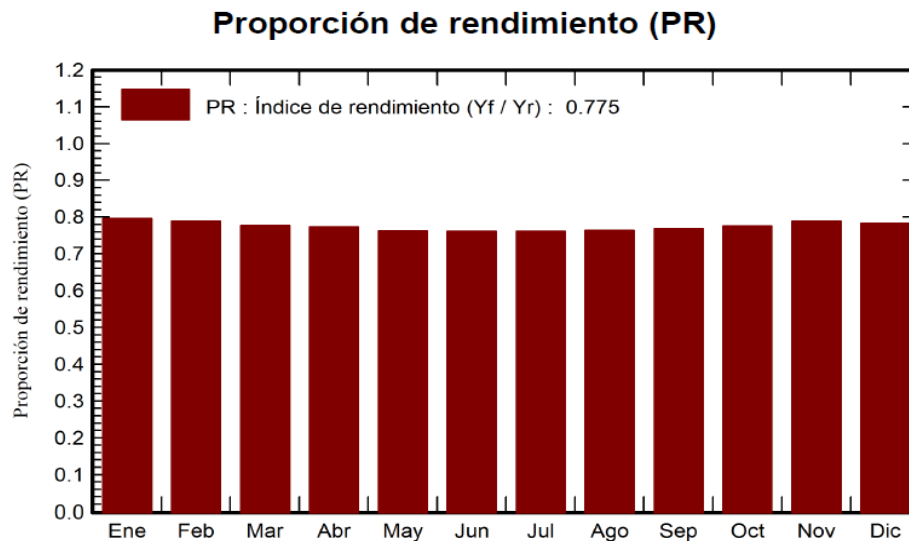


Figura 22: Comportamiento del factor de rendimiento. Fuente: Confección propia (PVsyst.7.1.0) 2022.

En la Figura 23 se puede observar el comportamiento de la producción de energía a la salida del inversor y las pérdidas en el mismo y de la instalación.

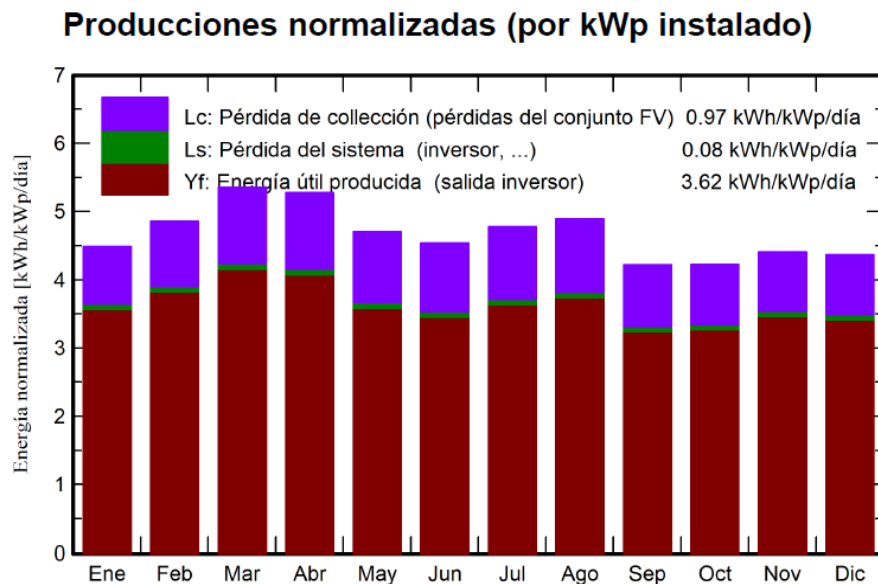


Figura 23: Gráfico de Producciones Normalizadas. Fuente: Confección propia (PVsyst.7.1.0) 2022.

La Figura 24 muestra el balance del comportamiento de las variables que intervienen en la producción de energía de la instalación. De igual forma, en el diagrama de la figura se puede observar que el porcentaje más grande de pérdidas se debe al incremento de la temperatura.

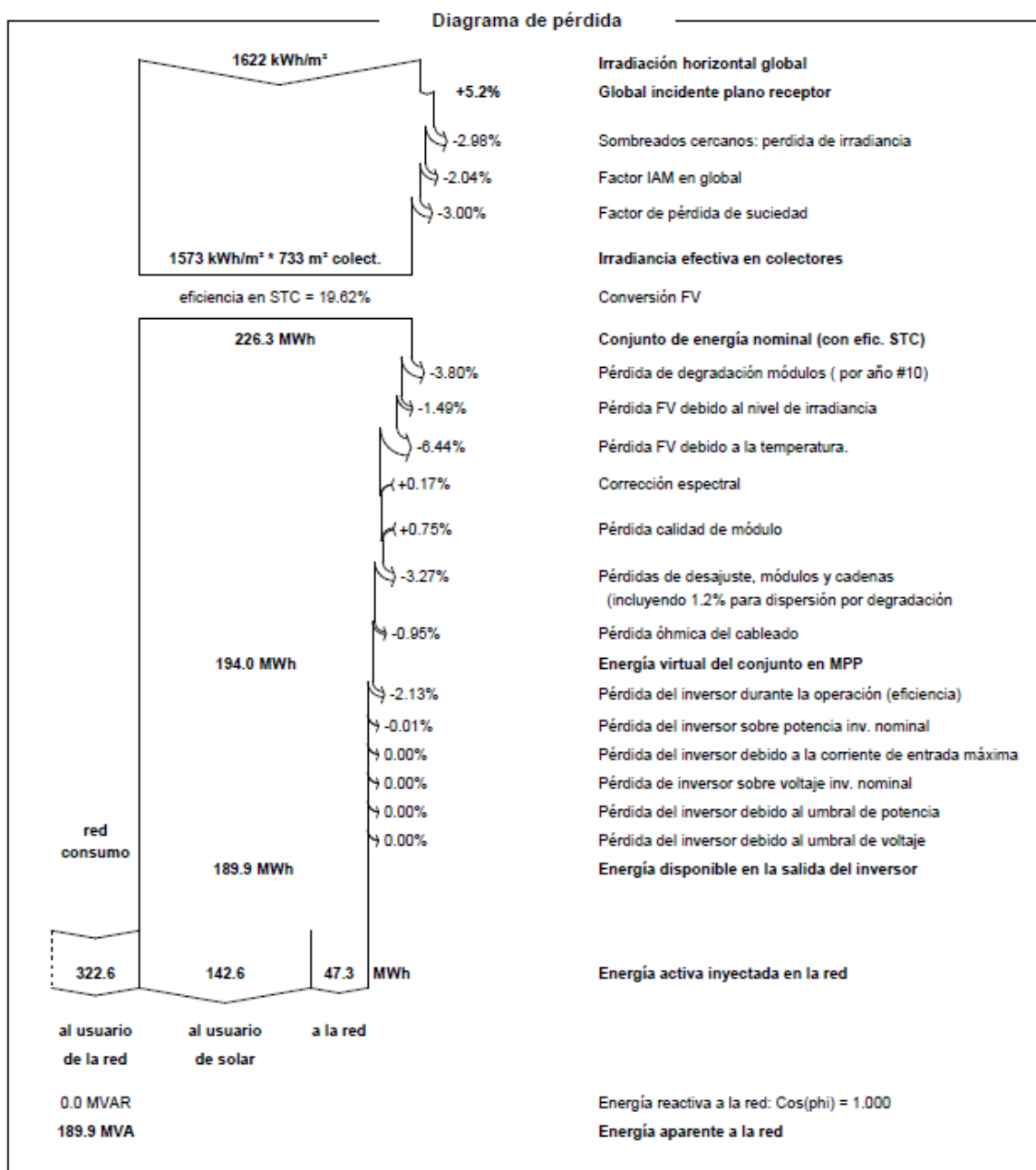


Figura 24: Diagrama de pérdidas del sistema. Fuente: Confección propia (PVsyst.7.1.0) 2022.

3.6. Evaluación económica.

La evaluación económica se realiza con el objetivo de demostrar factibilidad económica de llevar a cabo la inversión en este tipo de fuente de energía renovable. Según (Albo, 2021) para ello se necesita considerar los siguientes aspectos:

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

Durante la gestión para recaudar la información pertinente para dicha evaluación, no fue posible obtener todos los datos de forma precisa, por lo que se utilizaron porcentajes estimados en algunos datos.

3.6.1. Costos de Inversión.

La entidad suministradora dedicada a la instalación y montaje de sistemas solares fotovoltaicos en nuestra provincia es COPEXTEL S.A. Al realizar contactos con dicha entidad para obtener información relacionada con los costos de inversión para este tipo de tecnologías, se constató que la entidad tiene definido un costo de instalación de 55 000 \$CUP/kWp. Debido a que dicha entidad incluye en ese precio el servicio completo, se procede al cálculo de un costo de inversión que no aborde determinados servicios. El valor inicial de la inversión obtenido es de 5 245 591.98 CUP.

En la tabla 9 se muestra el costo unitario en CUP de dos de los principales componentes de la instalación fotovoltaica.

Tabla 9. Costo unitario de los paneles e inversores utilizados.

Unidad	Costo unitario CUP
Inversor Fotovoltaico SMA 20000TL-30	132452.606
Panel fotovoltaico DSM-38	5382.07

Fuente. Confección propia (2022).

3.6.2. Datos de las tasas a utilizar en la evaluación económica.

Los valores de las tasas están dados en la tabla 10 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 10. 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

Fuente. Confección propia (2022).

La tasa de inflación ha sido tomada de Trading Economic (Economic Indicators, 2022) y su magnitud se encuentra alrededor de los 37.24. Se considera la tasa de descuento de 8% y el margen de riesgo de 3%.

3.6.3. Consumos y costos de energía eléctrica de la edificación.

El hotel Punta la Cueva consume aproximadamente 209200kWh/año en el horario diurno. En la Figura 25 se muestra el consumo de energía eléctrica y la generación del sistema solar fotovoltaico que se desea instalar por mes.

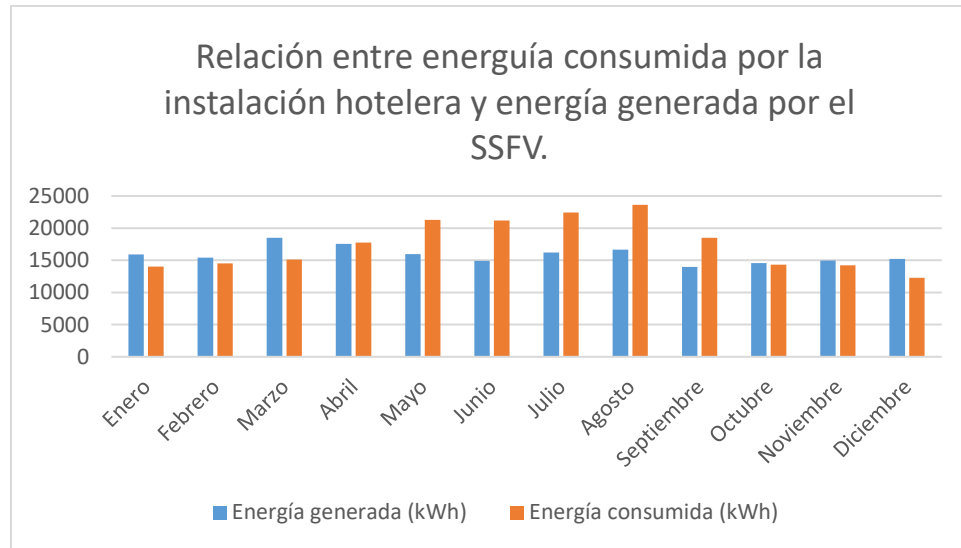


Figura 25. Consumo de energía eléctrica y la generación del sistema solar fotovoltaico que se desea instalar por mes. Fuente. Confección propia (2022).

La tabla 11 muestra el costo anual de la energía eléctrica entregada al SEN por el sistema solar fotovoltaico.

Tabla 11. Costo anual de la energía eléctrica entregada al SEN por el sistema solar fotovoltaico.

Concepto	Unidad	Costo Unitario de energía. (SEN y SSFV)	Costo anual de energía. (CUP)	Ingresos anuales suministro energía. (CUP)
	kWh/año	\$/kWh	\$/año	\$/año
Consumo y costo evitado de energía eléctrica del SEN por suplir energía eléctrica desde el SSFV.	139572.00	2.4464	341448.9408	341448.9408
Energía anual generada por el SSFV.	186900.00	2.4464	457232.00	-
Costo anual de la energía eléctrica entregada al SEN por el SSFV.	47328.00	3.7808	178937.7024	178937.7020
Costo total de la energía generada.	186900.00		520386.6432	520386.6432

Fuente. Confección propia (2022).

En la Figura 26 se muestra el valor presente neto de la inversión al cabo de 25 años.

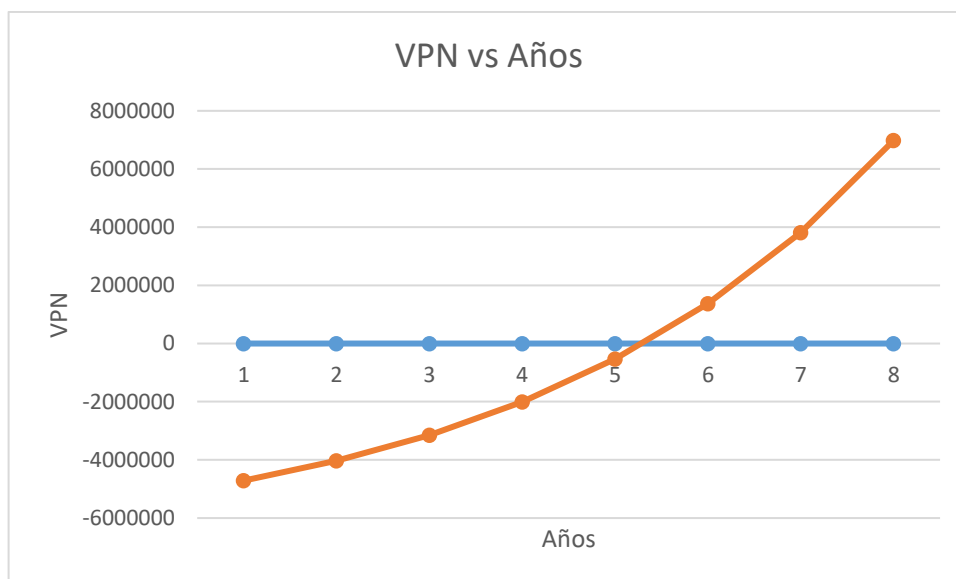


Figura 26. Valor presente neto de la inversión al cabo de 25 años. Fuente. Confección propia (2022).

Como se observa en la Figura 27, la inversión inicial (5 245 591.98 CUP), presenta un VAN de 1 072 675 829 CUP; superior en más de \$1 000 000 000 (a la inversión inicial) al cabo de los 25 años. El Periodo de Recuperación de la inversión (PRI) es de 5.4 años y una Tasa Interna de Retorno de 41%. Esta inversión resulta ser sin duda, de gran factibilidad para la instalación. En el anexo 4 se muestran los resultados de la evaluación económica en su totalidad.

3.7. Impacto medioambiental.

En la Figura 27 se puede apreciar el balance de emisiones de CO_2 en un periodo de 30 años, sobresaltando que se deja de emitir a la atmosfera un total de 5331.9 t CO_2 .

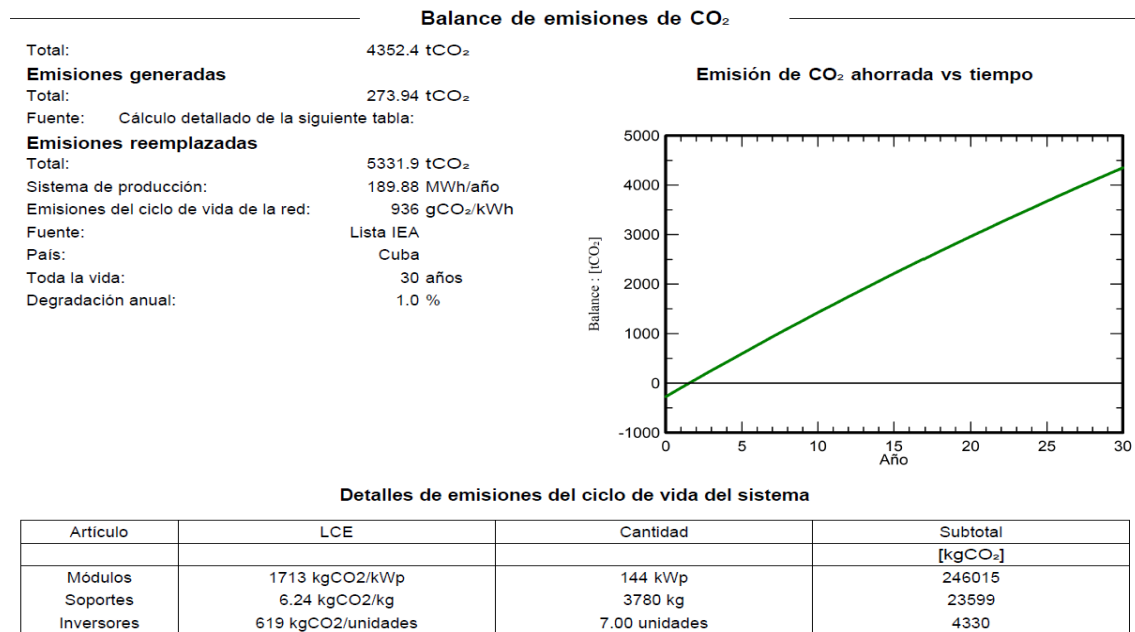


Figura 27. Balance de emisiones de CO₂ en un periodo de 30 años. Fuente: Confección propia (PVsyst.7.1.0) 2022.

3.8. Comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos.

La tabla 12 muestra una comparación de los resultados del presente trabajo con los de la metodología propuesta por (González et al., 2022). En la misma se puede observar que la metodología propuesta en el presente trabajo arroja resultados más eficientes en cuanto al aprovechamiento de la radiación solar.

Tabla 12: Comparación de los resultados del presente trabajo con los de la metodología propuesta por (González et al., 2022).

Metodologías	Propuesta en este trabajo.	(González et al., 2022)
Número de módulos	379	891
Módulo utilizado	DSM-380	DSM-270
Capacidad de generación	186.9MWh/año	363.96 MWh/año
Proporción de rendimiento	0.775	0.771
Periodo de Recuperación de la Inversión	5 años y 4 meses	13 años

Fuente: Confección propia (2022).

Conclusiones parciales del capítulo

- Se validó la metodología propuesta mediante un estudio de caso en la instalación hotelera Punta la Cueva.
- La entidad cubre sus necesidades energéticas con el uso de cuatro portadores energéticos: electricidad, diésel, gasolina y gas licuado. De los cuales el mayor consumo durante los años 2017 y 2018 de le atribuye a la energía eléctrica.
- Se plantearon oportunidades de ahorro en la entidad con respecto a: climatización, iluminación y motores eléctricos.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los sistemas solares fotovoltaicos constituyen una alternativa promisorio para el abastecimiento energético de edificaciones. Consumir energía obtenida en el mismo lugar o muy próximamente es una condición ideal ambiental y operacionalmente, porque reduce las pérdidas por traslado a la vez que promueve la autonomía energética.
2. En Cuba la intensidad de la irradiación solar tiene un valor considerable entre 800 y 900W/m² cuando incide perpendicularmente sobre una superficie y más de 5kWh/ m² como valor promedio anual, lo que convierte a nuestro país en un escenario propicio para la utilización de sistemas solares fotovoltaicos para la generación eléctrica.
3. Para la selección y dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se propuso una metodología donde se implementó el método de cálculos manuales, complementado con referencias de trabajos en los que se utilizan softwares, para facilitar el trabajo y evaluar los resultados. Entre las herramientas informáticas más comunes para el diseño de estos sistemas podemos encontrar: Pvsyst, Sketchup, Sunny Design y Autodesk Inventor Profesional.
4. La metodología propuesta se validó mediante un estudio de caso en una instalación hotelera del país. En la cubierta de los tres bloques habitacionales existe la posibilidad de instalar un total de 379 módulos fotovoltaicos modelo DSM-380MP, con una capacidad de generación de 186.9MWh/año. El análisis de sombra arrojó que los tres bloques habitacionales promedian menos de un 0.30% de pérdidas por sombras con respecto a la radiación incidente durante todo el año.
5. El Periodo de Recuperación de la Inversión inicial es de aproximadamente 6 años, y el Valor Presente Neto (VPN) de la inversión en un intervalo de 25 años es de 1 072 675 829.00CUP. Por lo que resulta factible el proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Asea Brown Boveri, (ABB), (2019). *Photovoltaic plants Cutting edge technology. From sun to socket* [Manual].

<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A3277&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Abdul, K., Rahman, F., Nahid, I., Abedin, Z., & Mannan, M. (2022). *Design and Analysis of an On-Grid Solar System Using PVsyst Software for Commercial Application.*

Afif, R. A., Pfeifer, C., & El-Khozondar, H. J. (2019). Implementation of maker movement to renewable energy laboratory: Case study of auto-tracking photovoltaic model. *2019 IEEE 7th Palestinian International Conference on Electrical and Computer Engineering (PICECE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/PICECE.2019.8747226>

Ahirwar, P., Kori, A. K., & Kapoor, S. (2021). Pre-Installation Analysis via “PVsyst” & “HOMER Pro” to Design & Simulate a 50kWp Solar Grid-Tied PV System for Rural Area Electrification, India. *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECOT)*, 388-394. <https://doi.org/10.1109/ICEECOT52851.2021.9708056>

Albert, E. (2020). *Instalación de placas solares en una nave industrial para autoconsumo.* <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/44273>

Albo, P. D. (2021). *Propuesta de evaluación y montaje de un Sistema Solar Fotovoltaico para la Universidad de Cienfuegos.* Universidad Carlos Rafael Rodríguez.

Álvarez, A. L., Jiménez, R., & Iturralde, L. A. (2021). *Propuesta de evaluación y montaje de un Sistema Solar Fotovoltaico para la Universidad de Cienfuegos.* Universidad Carlos Rafael Rodríguez.

Álvarez, M. A., Cabello, J. J., Sousa, V., Sagastume, A., Haeseldonckx, D., & Vandecasteele, C. (2018). *Experiencias en la utilización de información*

meteorológica para el pronóstico y control del consumo de electricidad en hoteles.

Asociación Española de Climatología.

<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9949>

Andrade, H. J., Arteaga, C. C., & Segura, M. A. (2017). *Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima*
http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561

Arencibia, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 17(9), 1-4.

Ballesteros, V. (2016). Panorama mundial de las energías renovables e importancia de la energía solar fotovoltaica. *Revista Científica*, (26), 194-203.

Baqir, M., & Channi, H. K. (2022). Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software. *Materials Today: Proceedings*, (48), 1332-1338.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.029>

Barrera, E. L., Palmero, J., Echevarría, M. del C., Gómez, B., & Isaac, J. L. (2019). IDENTIFICACIÓN DE ESCENARIOS RELEVANTES PARA EL APROVECHAMIENTO DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN EL MUNICIPIO LA SIERPE. *Centro Azúcar*, 46(4), 19-27.

Bastos, D. C. (2020). *Análisis y estimación de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta usando métodos de estadística inferencial y técnicas de inteligencia artificial*.
<http://alejandria.ufps.edu.co/descargas/tesis/1161169.pdf>.
<http://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/4507>

Becerra, R. M. (2019). *Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico en la Delegación Provincial de Materiales de la Construcción. Cienfuegos*. Universidad Carlos Rafael Rodríguez.

- Benítez, A. C., & Tello, I. D. (2018). *Estudio De Factibilidad De La Implementación De Un Sistema Solar Fotovoltaico En La Finca Villa Catalina*.
<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/15474>
- Bentouba, S., Bourouis, M., Zioui, N., Pirashanthan, A., & Velauthapillai, D. (2021). Performance assessment of a 20 MW photovoltaic power plant in a hot climate using real data and simulation tools. *Energy Reports*, (7), 7297-7314.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.082>
- Borroto, A. E., & Monteagudo, J. P. (2006). *Gestión y Economía Energética*. Editorial Universidad de Cienfuegos. http://www.energytec-solutions.com/linked/gesti_n_y_econom_a_energ_tica.pdf
- Bravo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro Azúcar*, 42(4), 14-25.
- Cabrera, M. D. (2019). *Estudio energético en el hotel Punta "La Cueva" Cienfuegos basado en la norma NC ISO 50 001*. [Tesis de grado]. Universidad de Cienfuegos.
- Callisaya, A., & Romay, M. [Tutor. (2012). *Calculo y diseño de un sistema solar fotovoltaico auxiliar para el hospital de La Asunta—Sud Yungas* [Thesis].
<http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/9631>
- Chandan, Baig, H., ali Tahir, A., Reddy, K. S., Mallick, T. K., & Pesala, B. (2022). Performance improvement of a desiccant based cooling system by mitigation of non-uniform illumination on the coupled low concentrating photovoltaic thermal units. *Energy Conversion and Management*, 257, 115438.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115438>
- Chandan, Dey, S., Sujana, P., Reddy, K. S., & Pesala, B. (2020). Optical and electrical performance investigation of truncated 3X non-imaging low concentrating photovoltaic-thermal systems. *Energy Conversion and Management*, 220, 113056.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113056>

- Chaware, A. V., Dambhare, S. S., Pathan, V., & Mistry, G. (2021). Design and Optimization of Mini-grid PV System for Developing Country. *2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPS52420.2021.9670199>
- Cisneros, C. A., Menéndez, A., Moralobo, M., Trinchet, F., & Fernandez, C. (2021). Evaluación técnico-económica preliminar de la producción de electricidad a partir de plantas termosolares en Cuba. *Scielo*, 42(1).
- Correia, N. (2020). *Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico, Empresa MICALUM*. Universidad de Cienfuegos.
- Cortés, C. L., Gómez, G. S., Betancur, F., Carvajal, S. X., & Guerrero, N. (2020). Análisis experimental del desempeño de un sistema solar fotovoltaico con inversor centralizado y con microinversores: Caso de estudio Manizales. *TecnoLógicas*, 23(47), 3-23. <https://doi.org/10.22430/22565337.1403>
- D'amanzo, M., Mercado, M. V., Ganem Karlen, C., (2020). 10 PREGUNTAS DE LOS EDIFICIOS ENERGÍA CERO: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE. *Revista hábitat sustentable*, 10(2), 24-41. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.02>
- Dobrovolski, V. (1970). *Elementos de Máquinas*. Mir.
- Domínguez, A., Jáuregui, S., & Beltrán, J. (2019). SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED PARA ALIMENTAR LA DIVISIÓN TERRITORIAL COPEXTEL CIENFUEGOS. ANTEPROYECTO Y SIMULACIÓN. *Centro Azúcar*, 46(4), 39-49.
- Economic Indicators. (2022). *Heatmap—Economic Indicators By Country*. <https://tradingeconomics.com/matrix>
- Elshafei, M., Abdelrazik, S., & Elshenawy, A. (2021). *Design and Simulation Analysis of 1 MWp Grid Connected Photovoltaic System Floating over Lake Nasser by using PV SYST Software*.

- Forget, A. (2011). *Manual de diseño de sistemas fotovoltaicos aislados*.
- Gallipoliti, V. A. (2019). CONTEXTO Y PAUTAS DE INTERVENCION DE TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA EN EDIFICIOS DE LA REGION NEA. *Arquitecto*, (14), Art. 14.
<https://doi.org/10.30972/arq.0144155>
- Gassar, A. A. A., & Cha, S. H. (2022). Feasibility assessment of adopting distributed solar photovoltaics and phase change materials in multifamily residential buildings. *Sustainable Production and Consumption*, 29, 507-528.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.001>
- Gómez, M. A., Gómez, J. R., Lorenzo, J. V., Fonte, R., García, Z. (2021). Pronóstico de la generación eléctrica de sistemas fotovoltaicos. Un inicio en Cuba desde la universidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(1), 253-265.
- González, A. L. Á., Carrera, L. A. I., Borges, R. J., Yanes, J. P. M., & Muñoz, M. G. (2022). Potencialidades de generación fotovoltaica sobre cubiertas de edificaciones en una instalación hotelera. *Universidad y Sociedad*, 14(3), Art. 3.
- González, R. (2020). *Matriz energética mundial y el cambio climático: Estado actual—*
Hdl:20.500.12010/15654.
<https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/handle/20.500.12010/15654>
- Guzmán, T. de J., Araya, F., Castro, G., & Obando, J. M. (2016). Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: Producción más limpia y eficiencia energética. *Scielo*, (29). https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822016000900046&script=sci_arttext
- Guzmán, M., Soto, C. R., Águila, I., & Torres, J. M. (2017). Procedimiento para instalación de un sistema fotovoltaico sobre techos en la corporación cuba ron s.a. *Centro Azúcar*, 44(1), 70-81.
- Haggag, A., Aboshosha, A., & Azouz, M. (2021). Computer-Aided Design and Simulation-Based Efficiency Improvement of the First Egyptian Solar City. *2021 22nd*

- International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 491-496.
<https://doi.org/10.1109/MEPCON50283.2021.9686277>
- Ibarra, R. (2018). El impulso de las energías renovables en la lucha contra el cambio climático a través de los certificados ambientales en el sector eléctrico mexicano. *Scielo*, 51(152). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0041-86332018000200569&script=sci_arttext
- Jiménez, R. (2016). *Planificación energética según NC ISO 50001 en el hotel Palacio Azul*. Universidad de Cienfuegos.
- Juvinao, D. D. L., & Campo, B. J. V. (2021). Sistema fotovoltaico como alternativa sostenible para el funcionamiento de una alcaldía municipal. *Prospectiva*, 19(1), Art. 1. <https://doi.org/10.15665/rp.v19i1.2530>
- Khezri, R., Mahmoudi, A., & Aki, H. (2022). Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (153), 111763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111763>
- Machado, C. T., & Miranda, F. S. (2015). Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. *Revista Virtual de Química*, 7(1), Art. 1. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150008>
- Mallek, M., Elleuch, M. A., Euch, J., & Jerbi, Y. (2022). Optimal design of a hybrid photovoltaic–wind power system with the national grid using HOMER: A case study in Kerkennah, Tunisia. *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 725-729. <https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.9765310>
- Manoj Kumar, N., Chakraborty, S., Kumar Yadav, S., Singh, J., & Chopra, S. S. (2022). Advancing simulation tools specific to floating solar photovoltaic systems – Comparative analysis of field-measured and simulated energy performance.

- Sustainable Energy Technologies and Assessments*, (52), 102168.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102168>
- Marín, J. M. (2020). *Estudio de viabilidad de una instalación fotovoltaica para autoconsumo en una nave industrial*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/329359>
- Martín, A. M., Leyva, G., Ríos, J. M., & Medinilla, F. (2018). Evaluación multicriterio de proyectos energéticos renovables en Sancti Spíritus, Cuba. *Cofin Habana*, 12(2), 18-34.
- Martín, G. (2019). *Caracterización energética del hotel Iberostar Daiquirí*. [Tesis de grado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas].
<https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/11873/Martin%20Guerra%20c%20%20Giubel.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Medina, E. C. (2020). *Determinación del diseño muestral para evaluar la intención de implementar energía solar en edificios residenciales en la localidad de Usaqué en Bogotá*. <https://repository.libertadores.edu.co/handle/11371/2803>
- Molina, E., & González, M. (2022). *Proyecto Técnico Instalación Fovoltaica Fábrica de Pienso de Cienfuegos*.
- Monteagudo, J. P., & Crespo, G. (2021). *Evaluación Económica de Proyectos de Ahorro de Energía*.
- Othman, R., & Hatem, T. M. (2022). Assessment of PV technologies outdoor performance and commercial software estimation in hot and dry climates. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130819. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130819>
- Palacios, S. J. (2019). Análisis de las ventajas competitivas del uso de energía solar fotovoltaica en el proceso educativo de la I.E. Cristo Rey – Talara – 2019.
Repositorio Institucional - UCV.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/49243>
- Perpiñán, O. (2013). *ENERGÍA SOLAR Fovoltaica*.

- Plasencia, D. C. M. Á.-G., Saidel, D. C. M. A., & Neto, D. C. A. H. (2014). Evaluación post-ocupacional: Herramienta para la implementación de la norma ISO 50001 en edificios. *Universidad y Sociedad*, 6(2), Art. 2. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/156>
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K.-J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, (754), 141989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>
- Reddy, K. C., K, V. K., Dinesh, N., Das, S., Prajwal, & Anand, A. (2022). A review of solar powered electric Bi-hybrid vehicle compared with IC Engine Vehicles using graph analytics with AI. *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, 605-609. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716463>
- Rosa, E. R., Contreras, A. M., Herrero, R. F., Herrera, I., & Ruíz, M. (2021). *Uso del análisis del ciclo de vida en la evaluación ambiental de la matriz energética cubana*. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/12813>
- Saymbetov, A., Mekhilef, S., Kuttybay, N., Nurgaliyev, M., Tukymbekov, D., Meiirkhanov, A., Dosymbetova, G., & Svanbayev, Y. (2021). Dual-axis schedule tracker with an adaptive algorithm for a strong scattering of sunbeam. *Solar Energy*, (224), 285-297. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.024>
- Setiawan, R. J., Fauzi, I., & Enja, M. (2018). *SMOFIM: SMOKE FISH MACHINE BASED ON SOLAR PHOTOVOLTAIC INTEGRATED ANDROID MOBILE IoT (Internet of Things) WITH EXHAUST FILTER REDUCING CO, CO2 AND HC POLLUTANTS AS AN EFFORT TO IMPROVE THE ECONOMY OF THE FISHERMEN COMMUNITY AT TRISIK BEACH*. *Jurnal Ilmiah Penalaran dan Penelitian Mahasiswa Volume (2)*, 42-51.

- Spiegeler, C., & Cifuentes, J. I. (2016). *Definición e información de energías renovables*.
<http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/>
- Stolik, D. (2014). *La energía FV: oportunidad y necesidad para Cuba*.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842014000200005&script=sci_arttext&tlng=pt
- Zalamea, E. F., Barragán, E. A., & Marín, D. S. (2018). POTENCIAL FOTOVOLTAICO EN TECHUMBRE DE EDIFICIOS INDUSTRIALES DE ALTA DEMANDA ENERGÉTICA, EN ZONAS ECUATORIALES. *Revista hábitat sustentable*, 8(1), 28-41. <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.03>
- Zalamea, E., & Quesada, F. (2017). Criterios de integración de energía solar activa en arquitectura. Potencial tecnológico y consideraciones proyectuales. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 19(1), 56-69. <https://doi.org/10.14718/revarq.2017.19.1.1018>

ANEXOS

Anexo 1. Resultado de la simulación con Sketchup para el estudio de sombras.

Faces analysis

Faces global results					
Solar panels	NºP.	P. power (Wp)	P.weight (kg)	Power (kWp)	Shading L. (%)
Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	379	380.00	21.50	144.02	0.27

Results for solar modules in each face									
Face	Model	NºP.	P. power (Wp)	Power (kWp)	Weight (kg)	Azimuth	Tilt	Relative tilt	Shading L (%)
1	Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	123	380.00	46.74	2644.50	176.96	22.26	22.26	0.18
2	Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	130	380.00	49.40	2795.00	176.96	22.26	22.26	0.50
3	Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	126	380.00	47.88	2709.00	176.96	22.26	22.26	0.11

Monthly Shading Losses (%)												
Face	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	0.83	0.19	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.11	0.08	0.90
2	1.29	0.75	0.51	0.23	0.13	0.09	0.07	0.10	0.27	0.54	0.75	1.37
3	0.58	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.03	0.67
Mean	0.90	0.32	0.18	0.09	0.05	0.03	0.02	0.04	0.11	0.25	0.29	0.98

Groups analysis

Groups global results				
Solar panels	NºP.	P. power (Wp)	Power (kWp)	Shading L. (%)
Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	379	380.00	144.02	0.27

Results for solar modules in each group (grouped by same tilt, azimuth and panel model)							
Group	Model	NºP.	P. power (Wp)	Power (kWp)	Azimuth	Tilt	Shading L. (%)
1	Panel de celdas de silicio mono-cristalino PERC:DSM-380MP-72	379	380.00	144.02	176.96	22.26	0.27

Monthly Shading Losses (%)												
Group	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	0.90	0.32	0.18	0.09	0.05	0.03	0.02	0.04	0.11	0.25	0.29	0.99
Mean	0.90	0.32	0.18	0.09	0.05	0.03	0.02	0.04	0.11	0.25	0.29	0.99

Anexo 2. Resultado de la simulación con PVsyst.7.1.0. para el dimensionamiento de la red eléctrica.



PVsyst V7.1.7

VC3, Fecha de simulación:
10/11/22 15:59
con v7.1.7

Proyecto: Puntas las Cuevas

Variante: Nueva variante de simulación

Resumen del proyecto

Sitio geográfico

Punta Gorda

Cuba

Situación

Latitud 22.12 °N
Longitud -80.43 °W
Altitud 18 m
Zona horaria UTC-5

Configuración del proyecto

Albedo 0.20

Datos meteo

Punta Gorda

Meteonorm 7.3 (1991-2005), Sat=100% - Sintético

Resumen del sistema

Sistema conectado a la red

Simulación para el año n° 10

Tablas en un edificio

Orientación campo FV

Plano fijo

Inclinación/Azimut 22 / -3 °

Sombreados cercanos

Sombreados lineales

Necesidades del usuario

Valores mensuales

Información del sistema

Conjunto FV

Núm. de módulos

Pnom total

378 unidades

144 kWp

Inversores

Núm. de unidades

Pnom total

Proporción Pnom

7 unidades

119 kWca

1.207

Resumen de resultados

Energía producida 189.9 MWh/año

Energía aparente 189.9 MVAh

Producción específica 1322 kWh/kWp/año

Proporción rend. PR 77.48 %

Fracción solar (SF) 30.64 %

Tabla de contenido

Portada	1
Resumen de proyectos y resultados	2
Parámetros generales, Características del conjunto FV, Pérdidas del sistema.	3
Definición del sombreado cercano - Diagrama de iso-sombreados	5
Resultados principales	6
Diagrama de pérdida	7
Gráficos especiales	8
Costo del sistema	9
Balance de emisiones de CO ₂	10

Parámetros generales

Sistema conectado a la red

Orientación campo FV

Orientación

Plano fijo

Inclinación/Azmut 22 / -3 °

Tablas en un edificio

Configuración de cobertizos

Núm. de cobertizos 379 unidades

Tamaños

Espaciamiento cobertizos 1.36 m

Ancho de colector 0.99 m

Proporc. cob. suelo (GCR) 72.9 %

Ángulo límite de sombreado

Ángulo límite de perfil 40.3 °

Modelos usados

Transposición Perez

Difuso Perez, Meteonorm

Circunsolar separado

Horizonte

Horizonte libre

Sombreados cercanos

Sombreados lineales

Necesidades del usuario

Valores mensuales

Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Mayo	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Año	
28.2	31.9	37.2	38.8	43.6	42.8	47.6	47.0	40.1	36.7	37.6	33.6	465	MWh/mes

Punto de inyección de red

Factor de potencia

Cos(phi) (principal) 1.000

Características del conjunto FV

Módulo FV

Fabricante

NUMEN Solar

Modelo

DSM-380MP

(Definición de parámetros personalizados)

Unidad Nom. Potencia

380 Wp

Número de módulos FV

378 unidades

Nominal (STC)

144 kWp

Módulos

21 Cadenas x 18 En series

En cond. de funcionam. (50°C)

Pmpp

131 kWp

U mpp

645 V

I mpp

202 A

Potencia FV total

Nominal (STC)

144 kWp

Total

378 módulos

Área del módulo

733 m²

Área celular

668 m²

Inversor

Fabricante

SMA

Modelo

Sunny Tripower 17000TL-30

(Definición de parámetros personalizados)

Unidad Nom. Potencia

17.0 kWca

Número de inversores

7 unidades

Potencia total

119 kWca

Voltaje de funcionamiento

275-800 V

Proporción Pnom (CC:CA)

1.21

Potencia total del inversor

Potencia total

119 kWca

Núm. de inversores

7 unidades

Proporción Pnom

1.21

Pérdidas del conjunto

Pérdidas de suciedad del conjunto

Fracción de pérdida 3.0 %

Factor de pérdida térmica

Temperatura módulo según irradiancia

Uc (const) 29.0 W/m²K

Uv (viento) 0.0 W/m²K/m/s

Pérdidas de cableado CC

Res. conjunto global 53 mΩ

Fracción de pérdida 1.5 % en STC

Pérdida de calidad módulo

Fracción de pérdida -0.8 %

Pérdidas de desajuste de módulo

Fracción de pérdida 2.0 % en MPP

Pérdidas de desajuste de cadenas

Fracción de pérdida 0.1 %

Pérdidas del conjunto

Módulo de degradación media

Año n° 10
 Factor de pérdida 0.4 %/año
 Desajuste debido a la degradación
 Dispersión Imp RMS 0.4 %/año
 Dispersión Vmp RMS 0.4 %/año

Factor de pérdida IAM

Efecto de incidencia (IAM): Recubrimiento Fresnel AR, $n(\text{vidrio})=1.526$, $n(\text{AR})=1.290$

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.999	0.987	0.962	0.892	0.816	0.681	0.440	0.000

Corrección espectral

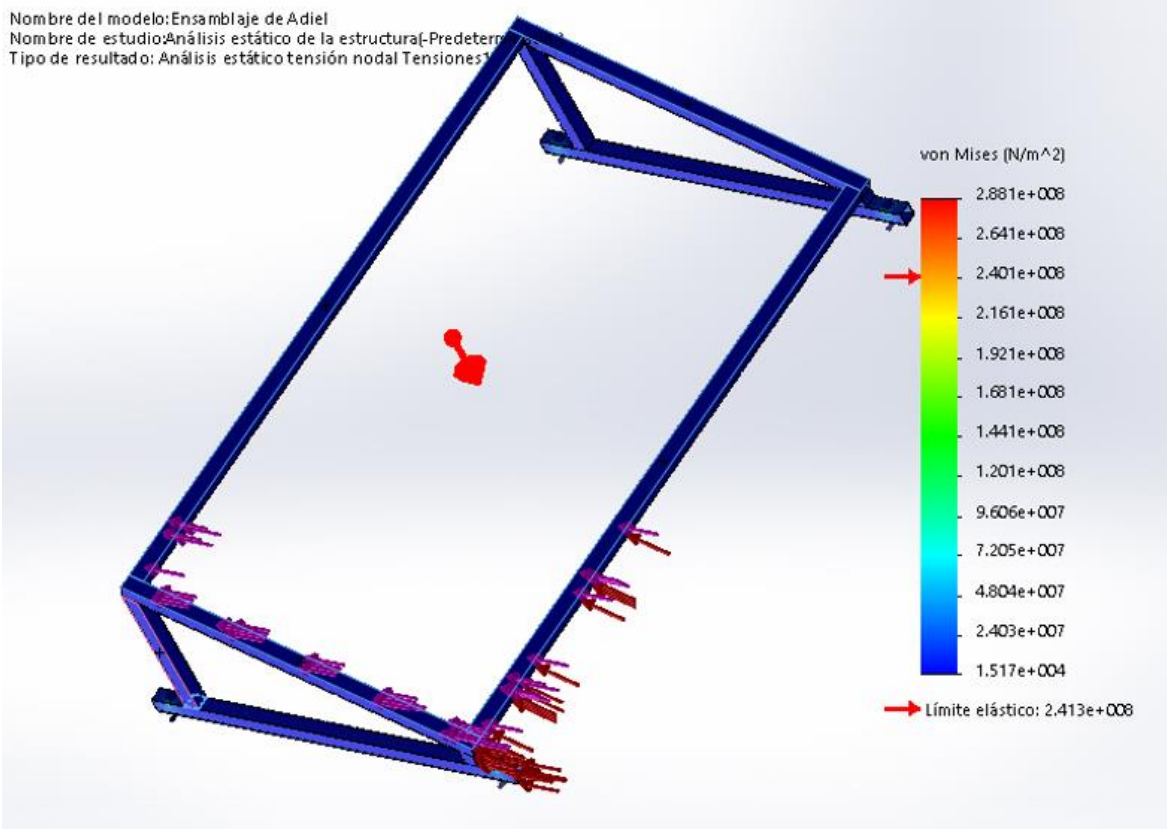
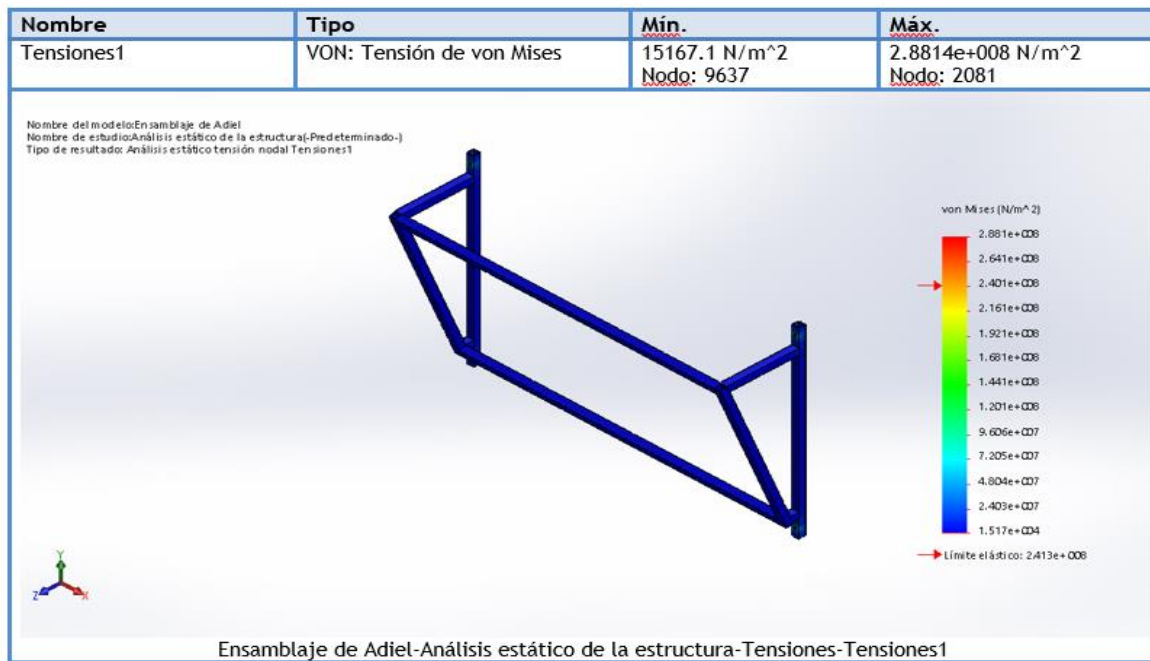
Modelo FirstSolar

Agua precipitable estimada a partir de la humedad relativa

Conjunto de coeficientes	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Monocrystalline Si	0.85914	-0.02088	-0.0058853	0.12029	0.026814	-0.001781

Anexo 3. Resultado del análisis de la estructura de soporte con SOLIDWORKS.

Resultados del estudio



Anexo 4. Cálculo económico en Excel.

Análisis de costos					
Ingreso					
Electricidad generada				186900	kWh
Tarifa eléctrica				2.4464	Cup/kWh
Ingreso				457232.16	Cup
Ingreso por ahorro					
Electricidad generada en el año para el autoconsumo				139572	kWh/año
Tarifa eléctrica				2.4464	Cup/kWh
Ingreso por ahorro				341448.9408	CUP/año
Ingreso por exportación					
Electricidad generada para la exportación				47328	kWh/año
Tarifa eléctrica				3.7808	Cup/kWh
Ingreso por exportación				178937.7024	CUP/año
Ingreso total					
Ingreso por ahorro				341448.9408	CUP/año
Ingreso por exportación				178937.7024	CUP/año
Ingreso total				520386.6432	CUP/año
Determinación del período simple de recuperación					
Inversión en capital				5245591.98	CUP
Ahorros anuales netos				520386.6432	CUP/año
Determinación del período simple de recuperación PSRI				10.08018182	
Cálculo del interés simple					
Cantidad presente de dinero p				5245591.98	CUP
Año para el que se desea determinar el valor futuro i				25	Año
Tasa de interés r				2.25	%
Interés simple F				17048173.94	CUP
Usar esta ecuación para el interés simple				$\sum_{i=1}^n p(1+r)^i$	
Cálculo del interés compuesto					
Cantidad presente de dinero P				5245591.98	
Tasa de interés r				2.25	
Interés compuesto F a los 3 años				180071337.2	
Evaluación del valor del dinero a través del tiempo					
Cantidad presente de dinero P				5245591.98	
Tasa de interés r				2.25	
Año para el que se desea determinar el valor futuro i				25	
Evaluación del valor del dinero a través del tiempo F				3.2876E+19	

Determinación del flujo de caja				
Ingresos en el año I			520386.64	CUP/año
Gastos en el año G			0	CUP/año
Tasa de impuesto sobre la ganancia t			35	%
Costo del equipo			5245592	CUP
Vida útil estimada (años)			25	años
Depreciación del equipamiento Dep			209823.68	CUP/año
Flujo de caja Fci			411689.61	CUP/año
Determinación de la tasa de interés real				
Tasa de interés r			2.25	%
Tasa de inflación f			37.24	%
Determinación de la tasa de interés real R			-0.254955	%
Determinación del valor presente neto				
Flujo de caja Fci			411689.61	CUP
Inversión inicial Ko			5245592	CUP
Margen de riesgo %			3	%
Tasa de descuento real utilizada D			-0.224955	
Determinación del valor presente neto VPN			1.063E+03	CUP
Usar esta ecuación para el valor presente neto				
			$VPN = -Ko + \sum_{i=1}^n \frac{Fci}{(1+D)^i}$	
Determinación de la Tasa Interna de Retorno				
Flujo de caja Fci			411689.61	
Inversión inicial Ko			5245592	
Determinación de la Tasa interna de retorno TIR			41%	
Usar esta ecuación para el TIR				
			$0 = -Ko + \sum_{i=1}^n \frac{Fci}{(1+TIR)^i}$	
Determinación del Período Real de Recuperación de la Inversión				
Flujo de caja Fci			411689.61	
Inversión inicial Ko			5245592	
Tasa de descuento real utilizada D			-0.224955	
Determinación del Período Real de Recuperación de la Inver:			5.5	Años
Usar esta ecuación para el PRI				
			$0 = -Ko + \sum_{i=1}^{PRI} \frac{Fci}{(1+D)^i}$	
Determinación de la relación costo beneficio				
Valor Presente Neto de los Costos VPNC			1.073E+03	
Valor Presente Neto de los Beneficios VPNB			1.252E+14	
Relación Costo-Beneficio (RCB)			8.565E-06	