



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería - Facultad de Química
Maestría en Ciencias de la Energía

**Metodología para la integración de sistemas fotovoltaicos en edificaciones utilizando técnicas de inteligencia artificial:
Caso de Estudio**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Master en Ciencias de la Energía

Presenta:

Ing. Luis Angel Iturralde Carrera

Dirigido por:

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz

SINODALES

Dr. Juvenal Rodríguez Reséndiz _____
Presidente

Msc. Raúl Alejandro Martínez Sánchez _____
Secretario

Dr. José Manuel Álvarez Alvarado _____
Vocal

Dr. Nelson Arsenio Castro Perdomo _____
Suplente

Dr. Irineo Torres Pacheco _____
Suplente

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

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

Albert Einstein

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación a mis padres, a mis abuelos, a mis tíos y a todas aquellas personas que me han apoyado incondicionalmente en todo momento en este maravilloso país que me acogió. Asimismo, dedico esta tesis a mis asesores cubanos y mexicanos, cuyos conocimientos y orientación han sido fundamentales en este proceso, y a mis amigos cubanos y mexicanos, quienes han estado a mi lado brindándome su apoyo y amistad.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis principales tutores, el Dr. Juvenal, el Dr. José Manuel, el Dr. Irineo y el Dr. Nelson, por su acertada guía y apoyo en la realización de esta investigación. Su conocimiento y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mi familia, que ha estado a mi lado en todo momento, ya sea desde la distancia o de manera presencial. Su amor y apoyo incondicional han sido una fuente constante de motivación y fortaleza.

A mis amigos, especialmente a el Chino, Erlys, Canela, Miriam y Marianela, por su amistad y apoyo inestimables a lo largo de este proceso.

También deseo expresar mi profundo reconocimiento al CONAHCYT y a México por brindarme la invaluable oportunidad de crecimiento académico y profesional. A mi tutor y a esas personas que saben que fueron parte esencial en este camino.

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD DE ESTUDIANTE:

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras. Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.



Luis Angel Iturrealde Carrera

Resumen

El objetivo central de este trabajo es desarrollar una metodología para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) en hoteles del Caribe. Se propone un análisis de la edificación para seleccionar y dimensionar el SSFV adecuado, considerando aspectos como el diseño de los soportes de los paneles, la disposición del SSFV y la red eléctrica. Posteriormente, se establece un procedimiento para evaluar tanto los aspectos económicos como medioambientales a nivel empresarial y nacional. Se destacan los resultados del estudio energético, donde el uso de machine learning revela la influencia significativa de la variable $HDO * DG$ en el consumo energético del hotel, con un alto coeficiente de determinación (R^2) de 0.97. La propuesta de una línea meta conlleva un ahorro energético sustancial de 1,028 kWh, equivalente al 5.3% respecto a la línea base. Mediante un algoritmo genético se optimiza el ángulo de azimuth del SSFV, resultando en un aumento significativo del 14.75% en la producción de energía fotovoltaica (PV), con mejoras adicionales en la eficiencia y el área de instalación. Se efectúan dos valoraciones económicas: una centrada en el hotel y otra en los potenciales ahorros para el país por la reducción en la compra de combustibles. Los resultados indican un desafío financiero con un tasa interna de retorno negativo del -10%, un período de recuperación: 17 años y un valor actual neto de 20,000 USD para el hotel, mientras que a nivel nacional se proyecta un ahorro considerable de 225,990.8 USD por año. Además, se estima una significativa reducción de emisiones de carbono de 18,751.4 toneladas (tCO_2). Este estudio integral proporciona una visión detallada de los beneficios y la viabilidad de la implementación de SSFV en el sector hotelero del Caribe, destacando su potencial para impulsar la sostenibilidad y la eficiencia energética en la región.

Abstract

The central objective of this work is to develop a methodology for the implementation of solar photovoltaic systems (SSFV) in hotels in the Caribbean. An analysis of the building is proposed to select and size the appropriate SSFV, considering aspects such as the design of the panel supports, the layout of the SSFV and the electrical network. Subsequently, a procedure is established to evaluate both the economic and environmental aspects at the business and national level. The results of the energy study are highlighted, where the use of machine learning reveals the significant influence of the variable $HDO * DG$ on the hotel's energy consumption, with a high coefficient of determination (R^2) of 0.97 . The proposed goal entails a substantial energy saving of 1,028 kWh, equivalent to 5.3% compared to the baseline. Using a genetic algorithm, the azimuth angle of the SSFV is optimized, resulting in a significant increase of 14.75 % in solar energy production, with additional improvements in the efficiency and installation area. Two economic evaluations are carried out: one focused on the hotel and another on the potential savings for the country due to the reduction in fuel purchases. The results indicate a financial challenge with a negative internal rate of return of -10 %, a recovery period of 17 years and an net present value of 20,000 USD for the hotel, while at the national level a considerable savings of 225,990.8 USD per year is projected. In addition, a significant reduction in carbon emissions of 18 751.4 tons (tCO_2) is estimated. This comprehensive study provides a detailed view of the benefits and feasibility of implementing SSFV in the Caribbean hospitality sector, highlighting its potential to drive sustainability and energy efficiency in the region.

Índice general

Resumen

Abstract

Índice

Índice de Figuras

I

Índice de Tablas

III

1. Introducción

1

1.1. Problemática	2
1.2. Justificación	3
1.3. Situación energética a nivel mundial.	3
1.4. Estado actual de las FRE.	5
1.5. La PV.	7
1.6. Situación energética de Cuba.	8
1.7. Situación energética en Cienfuegos.	10
1.7.1. Unidades de generación eléctrica en Cienfuegos.	10

2. Antecedentes

12

2.1. Funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos.	13
2.1.1. Efecto fotoeléctrico.	13
2.1.2. El silicio como semiconductor.	15
2.1.3. Funcionamiento de la célula solar fotovoltaica.	15
2.1.4. Clasificación de los SSFV.	16
2.1.5. Componentes de un SSFV.	17
2.1.6. Estructura del PV.	18
2.2. SSFV en edificios.	18
2.2.1. Factores que influyen en la eficiencia de los SSFV.	20
2.3. Optimización de SSFV utilizando técnicas de IA.	21

3. Hipótesis

25

3.1. Hipótesis	25
--------------------------	----

4. Objetivos

26

4.1. Objetivo General	26
4.2. Objetivos Particulares	26

5. Metodología	27
5.0.1. Metodología para dimensionamiento e integración de SSFV	27
5.0.2. Revisión de estudios estructurales previos ejecutados a la entidad.	30
5.0.3. Revisión de la orientación y coordenadas del sitio.	30
5.0.4. Clasificación de la disponibilidad de las áreas de la entidad para la posible instalación de los SSFV.	31
5.0.5. Selección del SSFV a utilizar.	31
5.0.6. Diseño de los soportes de los PV.	31
5.0.7. Cálculo de la disposición del SSFV.	37
5.0.8. Cálculo del número máximo teórico de paneles fotovoltaicos.	38
5.0.9. Optimización mediante IA.	41
5.0.10. Análisis de costos e impacto medioambiental.	41
5.0.11. Análisis y aporte medio ambiental.	43
6. Resultados y discusión	44
6.1. Caracterización energética de la institución según la etapa de planificación de la norma ISO 50001.	44
6.1.1. Caracterización de la empresa.	44
6.1.2. Situación energética del hotel.	44
6.1.3. Principales portadores energéticos.	45
6.1.4. Análisis del consumo de los principales portadores energéticos del Hotel Punta la Cueva.	45
6.1.5. Censo de carga por áreas del Hotel Punta la Cueva.	47
6.1.6. Estratificación en las habitaciones del Hotel Punta la Cueva.	48
6.1.7. Análisis del comportamiento del consumo de energía eléctrica.	48
6.1.8. Línea Base Energética (LBen) e Indicador de Desempeño Energético (IDEn).	51
6.2. Dimensionamiento y optimización del SSFV.	60
6.2.1. Análisis Estructural del sitio	60
6.2.2. Resultados del cálculo del soporte a utilizar	61
6.2.3. Análisis de las variables climatológicas del sitio donde se encuentra la edificación	62
6.2.4. Clasificación de las áreas del lugar y estudio de sombras .	62
6.2.5. Diseño del SSFV	63
6.3. Discusión: Indicadores de desempeño energético.	79
6.4. Discusión: Optimización del SSFV.	82
7. Conclusiones	85
Referencias	102

Índice de Figuras

1.1. Crecimiento anual de la demanda de energía primaria 2010-2018.	4
1.2. Consumo anual mundial de energía primaria.	4
1.3. Reservas recuperables de petróleo por región.	5
1.4. Reservas recuperables de gas por región.	5
1.5. Evolución de la matriz energética a nivel mundial.	6
1.6. Mayor capacidad de producción de FRE en América Latina y el Caribe, 2021.	6
1.7. Emision de CO_2 de diferentes tipos de tecnologías de FRE.	7
1.8. Total de energías renovables instaladas en el mundo.	8
1.9. Matriz energética planificada para el 2030.	8
1.10. Producción eléctrica en un escenario BAU en GWh por diferentes plantas de energía.	9
2.1. Experimento sobre el efecto fotoeléctrico desarrollado por los científicos alemanes Philipp Lenard y Wilhelm Hallwachs entre 1886 y 1900.	14
2.2. Representación simbólica de las bandas de energía y su estructura.	15
2.3. Esquema de una celda fotovoltaica.	16
2.4. Esquema de una instalación solar fotovoltaica.	17
2.5. Estructura de un panel solar fotovoltaico.	19
2.6. Aplicación de energía fotovoltaica en techos de edificios.	19
5.1. Metodología a utilizar para la integración de SSFV.	27
5.2. Metodología utilizada, basada en la norma ISO 50001.	28
5.3. Medidas que se deben tener en cuenta para estructuras de soporte estáticas convencionales (SSFV).	37
6.1. Matriz de gestión energética.	44
6.2. Diagrama de bloque del uso de los principales portadores energéticos en el Hotel Punta la Cueva.	45
6.3. Diagrama de Pareto correspondiente al año 2018.	46
6.4. Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.	47
6.5. Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.	48
6.6. Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.	48
6.7. Consumo de electricidad y la producción en el tiempo.	49
6.8. Gráfico de control del consumo de electricidad (2018).	50
6.9. Gráfico de control del consumo de electricidad (2019).	50
6.10. Gráfico de dispersión de energía vs producción (HDO) (2018-2019).	51
6.11. Análisis estadístico en R-Studio.	52
6.12. Gráficos del análisis estadístico en R-Studio.	53

6.13. Gráfico de dispersión de energía vs producción (HDO*DG) (2018-2019).	54
6.14. Línea base y línea objetivo de consumo de energía vs HDO*DG (2018-2019).	54
6.15. Línea base y línea objetivo correspondientes a los datos filtrados de consumo de energía vs. HDO*DG (2018-2019).	55
6.16. Indicador de desempeño energético (2018-2019).	56
6.17. Indicador de desempeño energético (2018-2019).	57
6.18. Evaluación económica del reemplazo de luminaria.	59
6.19. Carga de viento aplicada.	61
6.20. Reacciones de apoyo: (a) Carga muerta y (b) Carga del viento.	61
6.21. Análisis de deformación crítica del soporte: (a) Vista 3D y (b) Vista lateral.	62
6.22. Análisis de variables climatológicas.	63
6.23. Estudio de sombras realizado sobre el modelo tridimensional: (a) Malla representativa de las horas solares producidas en los tramos de cubierta de interés y (b) Escala correspondiente al estudio de sombras.	64
6.24. Características técnicas del módulo seleccionado.	65
6.25. Análisis de datos.	66
6.26. Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio.	67
6.27. Gráfico de correlación de los 360 grados.	68
6.28. Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio, desde 0 grados hasta 180 grados.	69
6.29. Gráfico de correlación, datos desde 0 grados hasta 180 grados.	70
6.30. Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio, 180 a 360 grados.	70
6.31. Gráfico de correlación, datos desde 180 grados hasta 360 grados.	71
6.32. Gráfico de correlación, datos con eficiencias (PR) mayor a 91.56.	72
6.33. Resultados de la simulación en Python 3.11.	73
6.34. Convergencia del Algoritmo Genético.	74
6.35. Dimensionamiento del SSFV, software SketchUp 2023.	74
6.36. Análisis del SSFV (PR y generación anual), software PVsyst 7.3.	75
6.37. Arreglo fotovoltaico utilizado: (a) Arreglo 1, 2 y 3 y (b) Arreglo 4 y resumen del sistema.	76
6.38. Diagrama de pérdidas del SSFV , software PVsyst 7.3.	77
6.39. Análisis económico del SSFV.	79
6.40. Diagrama y resultados del análisis medioambiental.	80

Índice de Tablas

1.1. Análisis y perspectivas de las principales variables a trabajar en la investigación.	3
2.1. Comparación de metodologías y estudios de integración de SSFV y SST en edificaciones, parte 1.	22
2.2. Comparación de metodologías y estudios de integración de SSFV y SST en edificaciones, parte 2.	23
2.3. Análisis de las principales técnicas de IA aplicadas a la Energía Solar.	24
6.1. Consumo de los portadores energéticos en el año 2018.	46
6.2. Consumo de los portadores energéticos en el año 2019.	46
6.3. Consumo por área de la energía eléctrica.	47
6.4. Parámetros de análisis del método de regresión lineal múltiple.	56
6.5. Estadísticas de regresión.	57
6.6. Análisis de los indicadores de desempeño energético más utilizados en la industria hotelera.	81
6.7. Datos estadísticos obtenidos del estudio sobre las principales variables que afectan la eficiencia de un SSFV.	83

CAPÍTULO 1

Introducción

En la actualidad, se están investigando diversas alternativas de energías limpias con el fin de disminuir el efecto invernadero y desarrollar sistemas de producción sostenibles. Entre estas opciones, la PV y otras fuentes renovables son particularmente recomendadas para la captura de carbono a nivel local y para mejorar la adaptación al cambio climático [1, 2].

La aplicación de fuentes de energía renovable (FRE) va en crecimiento. De todas las opciones disponibles, la energía solar se destaca como la más prometedora, gracias a su carácter no contaminante [3]. El mercado de la PV ha experimentado un ascenso significativo, impulsado por el deterioro ambiental, la disminución de la calidad del aire y el incremento en los precios de los combustibles fósiles [4, 5, 6].

La efectividad de un SSFV está condicionada por el clima de la ubicación donde se instale [7, 8]. Los mismos han experimentado un desarrollo acelerado y actualmente se han consolidado como fuentes de energía cruciales, debido al agotamiento de los combustibles fósiles. Por esta razón, los gobiernos nacionales y estatales en muchos países están promoviendo iniciativas para su implementación, no solo en terrenos abiertos, sino también en los techos de los edificios. Esto se debe principalmente a las ventajas de producir energía directamente en el lugar donde se instalarán los módulos fotovoltaicos [9].

En el ámbito de la PV, existen diversas tecnologías con diferentes niveles de eficiencia y costos de implementación. Los módulos fotovoltaicos de silicio monocristalino y policristalino son los más utilizados comercialmente, siendo los monocristalinos los más eficientes. Sin embargo, la eficiencia especificada de estos paneles se determina en condiciones de laboratorio controladas [10].

Las condiciones ambientales de cualquier región del mundo suelen ser muy diferentes de las condiciones controladas del laboratorio en las que se especificaron los paneles solares. Por este motivo, se han realizado diversas investigaciones a nivel global para estudiar cómo las distintas variables ambientales de cada región afectan el rendimiento de los módulos fotovoltaicos [10].

Debido a la importancia que tiene hoy para Cuba, México y el mundo la utilización de la energía solar este trabajo tiene como objetivo elaborar una metodología para la instalación de SSFV en edificaciones, que la misma será novedosa por la utilización de softwares, dentro de estos se aplicará técnicas de inteligencia artificial para optimizar el área y la producción del mismo.

1.1. Problemática

El cambio climático es una situación peligrosa que afecta a la población mundial. Casi el 80 % de la energía mundial total es producida por combustibles fósiles. Además de encontrar fuentes de energía verde, es de suma importancia disminuir el porcentaje de consumo total de energía [11].

La optimización del uso de la energía en Cuba ha sido una prioridad fundamental para el país, ya que no solo fomenta el crecimiento de la economía nacional, sino que también mejora la calidad de vida de la población. Con la Revolución Energética del 17 de enero del 2006, se impulsó un proceso que permitiría mejorar el bienestar de la sociedad, el empleo racional y razonable de la energía, el desarrollo económico y la conservación y cuidado de medio ambiente, donde en los últimos años se ha evidenciado el mayor progreso.

Los edificios comerciales y residenciales juntos consumen una fracción significativa del uso total de energía. En los EE. UU., esta fracción llegó al 41 %, mientras que en India fue del 37 % en 2016. La electricidad alimenta nuestros sistemas de calefacción y refrigeración, nuestros hornos y estufas, la iluminación y nuestros refrigeradores y congeladores dentro de estos edificios. Cualquier electrodoméstico o equipo en mal estado, mientras está en funcionamiento, puede generar altos costos de energía [12].

Las investigaciones realizadas por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA) sugieren que los edificios desperdician un promedio del 30 % de la energía que consumen. Un análisis de 2012 realizado por el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (LLNL) sugirió que EE. UU. tiene solo un 39 % de eficiencia energética. Se necesitan estrategias para ayudar a aumentar la eficiencia energética en los edificios, especialmente en el caso de edificios más antiguos donde los electrodomésticos tienen una mayor probabilidad de fallar [12].

En los últimos años, el uso de energía fotovoltaica ha reemplazado la energía procedente de combustibles fósiles con el fin de proporcionar energía para un crecimiento justificado. pero la baja eficiencia de los sistemas solares es un obstáculo para el desarrollo integral del uso de esta fuente limpia e inagotable. Por lo tanto, la ganancia de energía de los PV es muy importante. Los PV se utilizan en dos tipos de paneles fijos y sistemas de seguimiento solar. Sin embargo, debido a la sencillez de instalación, se utilizan más los paneles [13].

Pero los paneles con seguimiento solar tienen más eficiencia y se han desarrollado muchos sistemas para seguir el sol. Además del tipo de este sistema, la calidad, la temperatura de las células solares, los inversores, los convertidores y el aumento de la cantidad de radiación solar son muy importantes para aumentar la eficiencia de los PV, ver Tabla 1.1 [13].

Por lo tanto la incógnita científica es determinar si se puede aumentar la eficiencia de un SSFV y disminuir las emisiones de agentes contaminantes creando una metodología que tome en cuenta la eficiencia energética mediante la norma ISO 50001 y la optimización del área de la edificación mediante técnicas

Variable, magnitud o parámetro	Tipo	Valor Nominal	Alcance	Tolerancia permitida
Consumo de energía (kWh)	Entrada	100 %	85 % (ahorro del 15 %)	-
Irradiación (kWh/m ² /día)	Entrada	5	0-6.5	± 3
Área (m ²)	Entrada	Disponible	10 % (aumento)	-
Ángulo de inclinación (grados)	Proceso	20	0-75	± 10
Azimut (grados)	Proceso	0 (con respecto al sur)	0-360	± 50
Producción de energía (kWh)	Salida	5-10 % (aumento de la producción)	15 % (aumento de la producción)	-

Tabla 1.1: Análisis y perspectivas de las principales variables a trabajar en la investigación.

de inteligencia artificial.

1.2. Justificación

1.3. Situación energética a nivel mundial.

De acuerdo con [14], la disponibilidad de energía eléctrica y térmica es crucial para cualquier país. Históricamente, los combustibles fósiles han dominado históricamente el mercado energético, satisfaciendo más del 70 % de la demanda energética mundial. Sin embargo, en los últimos años, este dominio ha disminuido debido al crecimiento de las energías renovables, que han tenido un impacto notable en el desarrollo sostenible de las naciones .

A nivel mundial, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) siguen aumentando gradualmente, especialmente aquellas originadas por la producción de energía a partir de combustibles fósiles y los procesos industriales. Estas emisiones se mantuvieron estables entre 2014 y 2016, representando aproximadamente el 70 % del total global de emisiones de GEI. Este periodo de estabilidad marcó un cambio respecto a la tendencia de aumento anual previa, lo que sugiere una desconexión con el crecimiento económico, ya que el Producto Interno Bruto (PIB) global experimentó un incremento anual del 2 % al 3 % en los últimos años [15].

La estabilidad de las emisiones en los sectores energético e industrial entre 2014 y 2016 fue impulsada por la reducción en el uso de carbón en China y Estados Unidos, así como por el aumento en la generación mediante FRE. Sin embargo, según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), estas emisiones aumentaron un 1.4 % en línea con el crecimiento económico global del 3.7 % y un aumento del 2.1 % en la demanda de energía. Esto se atribuyó a precios

bajos de los combustibles fósiles y a esfuerzos limitados en eficiencia energética. Sin embargo, se observa un cambio en esta dinámica con el resurgimiento del crecimiento en las emisiones [15] 1.1.

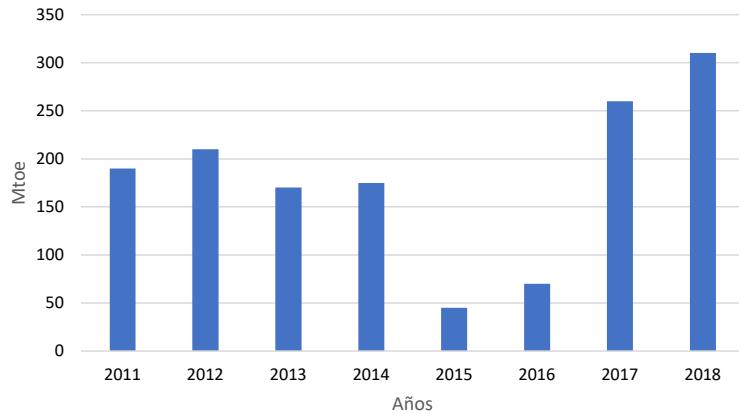


Figura 1.1: Crecimiento anual de la demanda de energía primaria 2010-2018.

Las figuras 1.2, 1.3 y 1.4 muestran el comportamiento del consumo mundial de energías primarias y las reservas recuperables de petróleo y gas por regiones respectivamente. Tomado de [16].

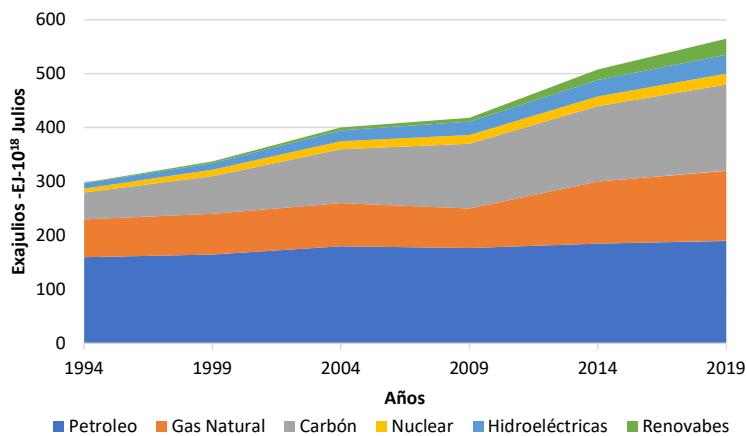


Figura 1.2: Consumo anual mundial de energía primaria.

La contaminación ambiental mundial es alarmante, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles y la mala gestión energética, especialmente en países subdesarrollados. Los países más contaminantes suelen ser las principales potencias económicas. Sin embargo, hay un desarrollo significativo de fuentes de energía renovable y una mejor gestión energética, con énfasis en la eficiencia energética, particularmente en estos países [17].

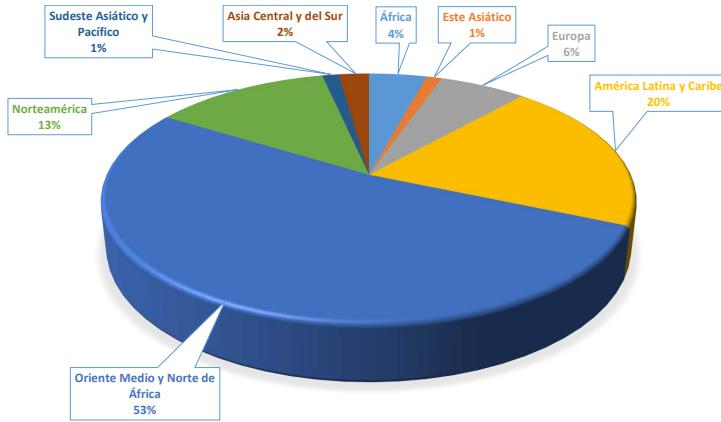


Figura 1.3: Reservas recuperables de petróleo por región.

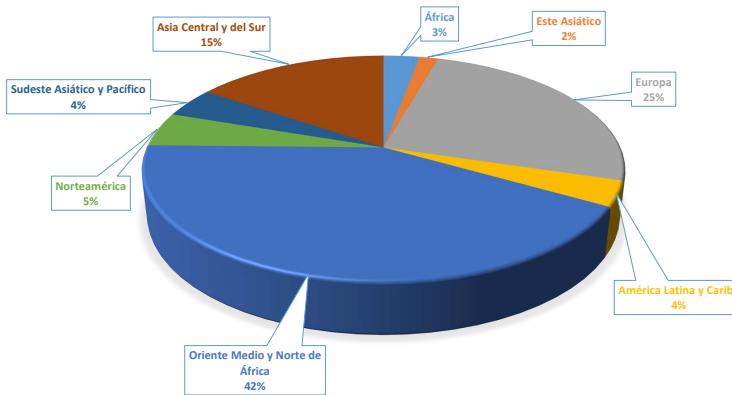


Figura 1.4: Reservas recuperables de gas por región.

1.4. Estado actual de las FRE.

El año pasado, la energía solar y eólica crecieron un 23 % y un 14 %, respectivamente, alcanzando juntas más del 10 % de la generación eléctrica mundial. En 2021, las fuentes de electricidad limpia generaron el 38 % de la electricidad global, superando al carbón, que aportó el 36 %. En la disminución de el calentamiento global a 1.5 °C, es necesario que la energía solar y eólica mantengan un crecimiento anual combinado del 20 % hasta 2030, una tasa similar a la observada en la última década [18, 16].

Actualmente, estas fuentes de electricidad son más económicas y su integración en las redes energéticas es cada vez más eficiente. En 50 países, más del 10 % de la electricidad proviene de estas fuentes, y en tres países, superan el 40 %. Esto demuestra claramente que estas tecnologías están funcionando con éxito [18, 19].

El gráfico siguiente, que usa los umbrales y los datos de la IEA, remarca la escala de la transición eléctrica, ver figura 1.5:

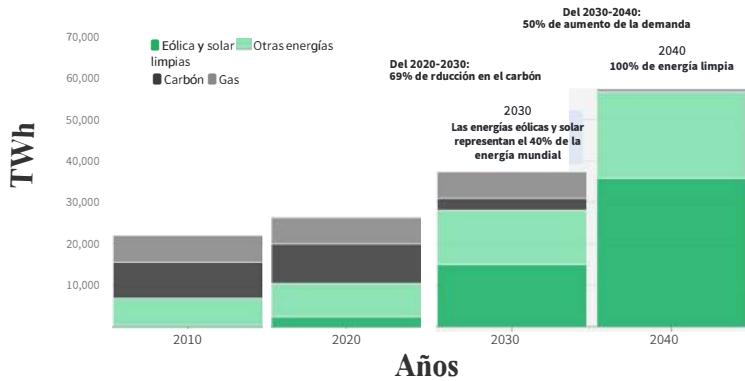


Figura 1.5: Evolución de la matriz energética a nivel mundial.

Aunque la PV es una de las fuentes de energía limpia de más rápido crecimiento, el informe de la IEA sobre alcanzar cero emisiones netas para 2050 señala que un cuarto del crecimiento de la electricidad limpia provendrá de otras tecnologías. Estas tecnologías no compiten con la energía solar, sino que la complementan, proporcionando estabilidad a la red energética para contrarrestar la variabilidad solar. La falta de desarrollo en estas tecnologías complementarias dificultará la reducción de emisiones necesarias para 2030. Según la IEA, eliminar las emisiones de carbono sin bioenergía ni CCS es posible, pero probablemente aumentaría los costos de alcanzar una energía libre de carbono.

El estado actual de las FRE en América Latina está dada por [16] en la figura 1.6:

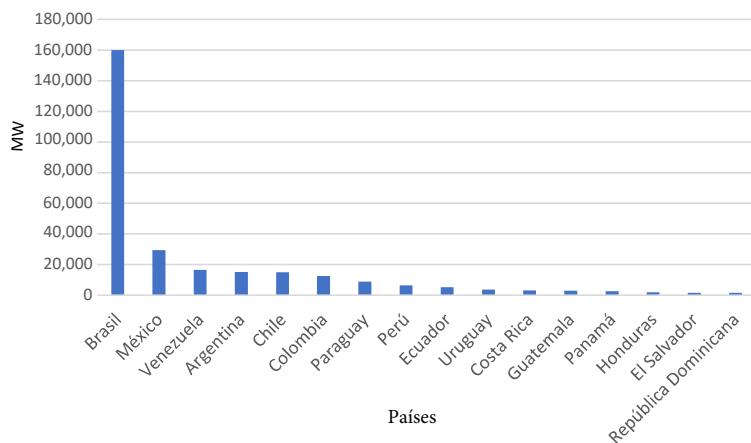


Figura 1.6: Mayor capacidad de producción de FRE en América Latina y el Caribe, 2021.

1.5. La PV.

En la Figura 1.7 se muestra la emisión de CO_2 durante el ciclo de vida de varios tipos de tecnologías de FRE, donde se ve a la PV como una de las más ecológicas.

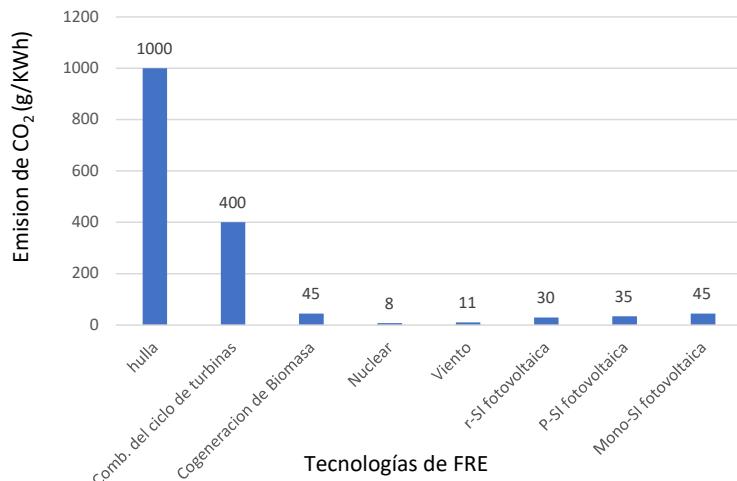


Figura 1.7: Emisión de CO_2 de diferentes tipos de tecnologías de FRE.

A pesar de que la economía mundial se triplicará para 2060, esto no puede lograrse sin que las fuentes de energía renovables crezcan al menos siete veces la tasa de crecimiento actual. El informe estadístico de IRENA de 2019 ha informado de que las FRE, en general, han aumentado un 7.4 % en capacidad con un valor neto de 176 GW en 2019, de los cuales el 54 % se instaló en Asia solo, siendo el 90 % de ellos nuevas capacidades de energía solar y eólica. Las FRE están dominando las nuevas instalaciones eléctricas en el mundo, ha alcanzado alrededor del 70 % en 2019, [20].

Al revisar más de cerca a las tecnologías renovables y sus estadísticas de crecimiento recientes, podemos ver que el mundo está increíblemente interesado en los sistemas de energía solar, con casi el 60 % del crecimiento de la capacidad total de las FRE en 2019 de 98 GW, como se muestra en la Figura 1.8, [20].

Los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios (BIPV) incorporan módulos fotovoltaicos en las cubiertas o fachadas de los edificios, cumpliendo una doble función como material de construcción y generador de energía. Esto permite ahorrar en materiales y costos de energía, disminuyendo el uso de combustibles fósiles y la emisión de gases dañinos para la capa de ozono, además de ofrecer diseños arquitectónicos innovadores. Los BIPV suelen ser más económicos que los sistemas fotovoltaicos tradicionales con estructuras de montaje separadas.

Aunque la mayoría de los sistemas BIPV están conectados a la red eléctrica, también pueden operar de manera aislada. La producción de energía en estos sistemas reduce las pérdidas de transmisión y distribución, y permite a los propietarios ahorrar en facturas eléctricas al disminuir los picos de consumo.

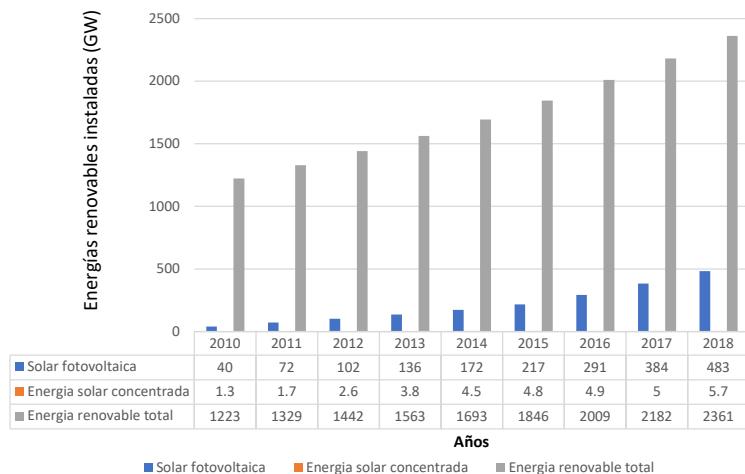


Figura 1.8: Total de energías renovables instaladas en el mundo.

Además, los edificios que generan su propia energía renovable alivian la carga sobre los generadores de energía tradicionales.

1.6. Situación energética de Cuba.

En 2030 se planean recursos de producción de energía renovable para consiste en una capacidad térmica de biomasa de aproximadamente 1400 MW y 700 MW de capacidad solar fotovoltaica. Las cuotas estimadas de las diferentes FRE generada en 2030 se representan en la figura 1.9.

MATRIZ ELÉCTRICA PARA EL 2030

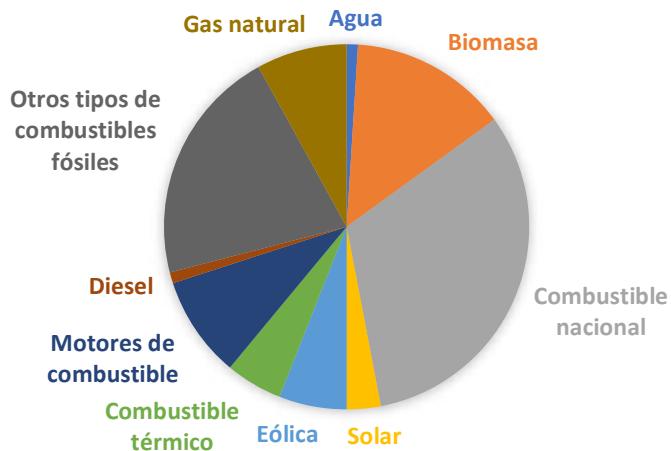


Figura 1.9: Matriz energética planificada para el 2030.

Cuba se encuentra en la encrucijada del desarrollo futuro de su suministro de energía. Cuba puede optar por impulsar su próximo crecimiento en consumo

de energía con combustibles convencionales, o puede elegir utilizar sus abundantes FRE.

La generación de electricidad por los diferentes tipos de plantas de energía en el caso de que Cuba se mantenga con un escenario BAU (“business as usual”, “negocios como siempre”) se muestra en la figura 1.10. La línea “Nuevas tecnologías +” significa un ciclo combinado con unidades de gas natural y plantas de motores alimentados con fuel oil ligero y dieseloil.

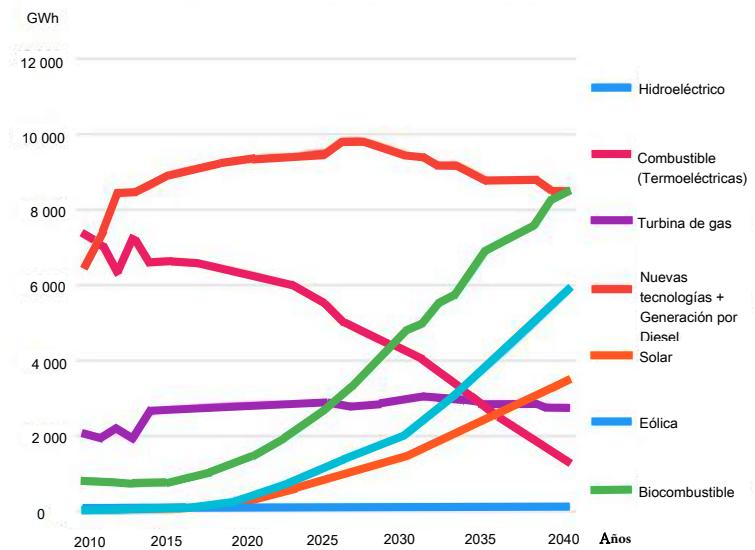


Figura 1.10: Producción eléctrica en un escenario BAU en GWh por diferentes plantas de energía.

La generación de energía tiene que seguir fluctuaciones instantáneas en la demanda eléctrica. Con el aumento de la proporción de un suministro intermitente renovable, la producción de energía controlable tiene que ser capaz de subir y bajar con un rango de operación más alto y una tasa de cambio en comparación con la estructura del sistema convencional [21].

Cuba tiene un potencial significativo para una producción de energía 100 % por FRE. El país dispone de vastos recursos solares (más de 170,000 MW) y eólicos (alrededor de 19,000 MW). Además, puede aprovechar una gran cantidad de biomasa proveniente de residuos agrícolas y forestales, así como cultivos energéticos. También cuenta con suficientes recursos hidroeléctricos, incluyendo áreas con más de 300 metros de desnivel, ideales para almacenamiento hidroeléctrico. Estos cinco recursos principales—solar fotovoltaico, eólico, biomasa, hidroeléctrico y almacenamiento hidroeléctrico—pueden proporcionar toda la electricidad que Cuba necesita [21].

Teniendo en cuenta los resultados de este primer análisis y el futuro desarrollo de la política climática global y la volatilidad en el mercado mundial del petróleo crudo, una decisión a seguir una transformación del sistema energético

hacia una 100 % renovable. El suministro de energía ofrece una serie de ventajas significativas sobre una estrategia basada en combustibles fósiles:

1- Reducirá masivamente el consumo de divisas para importaciones de energía fósil en el rango de 400 a 500 millones USD/año.

2- Aumentará sustancialmente el crecimiento económico de Cuba debido al hecho de que las importaciones pueden ser sustituidas por las fuentes nacionales de energía renovable.

3- Reducirá masivamente las emisiones de CO_2 de Cuba al alrededor de 50 millones de toneladas por año (esto comparado con un suministro de energía basada en combustible fósil).

4- Reducirá masivamente la contaminación del aire local debido al uso de electricidad verde limpia en la producción de energía, transporte, hogares, industria y comercio sector.

5- Permitirá el acceso directo a las fundaciones internacionales de financiación de energía renovable para ayudar en la transición al 100 % sistema de energía renovable [21].

1.7. Situación energética en Cienfuegos.

El consumo de energía en la provincia Cienfuegos está constituido fundamentalmente por la energía eléctrica, el diesel, la gasolina y el gas licuado. La mayor demanda le corresponde a la energía eléctrica y aunque en el 2013 se observa un crecimiento, en el 2014 disminuye en comparación con años anteriores, le sigue el diesel que se comporta de manera similar, pero en menor medida. La gasolina va en descenso y el gas licuado se mantiene estable [22, 23].

1.7.1. Unidades de generación eléctrica en Cienfuegos.

En Cienfuegos se encuentra enclavada la Termoeléctrica: Carlos Manuel de Céspedes (ETE) organización que pertenece a la Unión Nacional Eléctrica (UNE), por su generación, su ubicación, su alta eficiencia y disponibilidad, representa un pilar fundamental en el Sistema Electro-energético Nacional (SEN), y está designada por el Despacho Nacional de Carga (DNC) para llevar la frecuencia del sistema [22, 23].

La ETE con una potencia instalada de 316 MW, integrada por 2 unidades o bloques de generación de tecnología japonesa (HITACHI) de 158 MW cada uno. Las unidades de Cienfuegos representan el 12 % de las unidades térmicas del país, a la generación de energía eléctrica se integran en período de zafra los CAI de la provincia siendo estos:

1. CAI Antonio Sánchez, Municipio Aguada de Pasajeros.
2. CAI 14 de Julio, Municipio Rodas.
3. CAI 5 de Septiembre, Municipio Rodas.
4. CAI Elpidio Gómez, Municipio Palmira.
5. CAI Ciudad Caracas, Municipio Lajas.

Un elemento importante es el uso de las FRE las cuales han ido en aumento, destacándose en la provincia un crecimiento significativo de la biomasa cañera y la PV de aquí la importancia de la correcta utilización de la misma.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

La norma ISO 50001:2018 es una herramienta valiosa para las organizaciones que buscan optimizar su uso de la energía y reducir su impacto ambiental, al mismo tiempo que pueden lograr beneficios económicos y operativos significativos [24, 25]. Por otro lado, existen varios indicadores utilizados para la gestión energética en edificios y hoteles, siendo los más comunes $\frac{\text{kWh} \cdot \text{año}}{\text{m}^2}$ y $\frac{\text{kWh}}{\text{persona}}$ según [26, 27, 28]. Estos indicadores no consideran el tipo de turismo, la época del año y el tipo de clima. Los indicadores con una correlación de $R^2 > 0.6$ se consideran indicadores potenciales, y aquellos con $R^2 > 0.8$ son indicadores potencialmente fuertes [27, 29, 30, 31].

Un módulo fotovoltaico está estructurado por células solares fotovoltaicas. Estas celdas se pueden conectar en configuraciones en serie y/o paralelo para estructurar un módulo *PV*. La eficiencia de estas celdas y módulos se degrada con el aumento de la temperatura [32]. A medida que la temperatura del módulo *PV* o de la celda *PV* aumenta, la corriente de cortocircuito aumenta, pero el voltaje de circuito abierto y el factor de llenado de las celdas disminuye en una proporción más significativa que los cambios producidos sobre la densidad de corriente. Entonces, estas modificaciones de proporción significan disminuir la energía que generan estos componentes *PV* [33]. A medida que la luz solar directa ingresa a las celdas *PV*, su temperatura operativa aumenta debido a la energía concentrada entregada por el sol a esta superficie. Por lo tanto, el rendimiento eficiente de las celdas se ve muy afectado cuando hay condiciones de luz solar concentrada sobre su superficie [34, 35, 36]. Además, la sombra parcial en las instalaciones fotovoltaicas afecta sustancialmente a su eficiencia y a la vida útil de los módulos. Esta situación puede producir puntos calientes en las superficies de los módulos, lo que resulta en daños irreversibles [37, 38, 39].

Según estudios realizados por [40, 41, 42, 43], la orientación de las SSFV es un aspecto fundamental relacionado con su eficiencia. Cuando hay una desviación de 48° en el ángulo de azimut del valor óptimo asociado a la ubicación analizada, se puede producir alrededor del 5 % de pérdidas de energía, y en los casos en que no se alcanza el ángulo de inclinación óptimo, una desviación de 21° puede producir una pérdida de energía del 6-7 % [44].

Es fundamental estudiar la viabilidad de cualquier SSFV antes de instalarlo en función de su rendimiento estimado. Se reportan diferentes métodos para estimar y evaluar el desempeño de *PVSS* en la bibliografía revisada. Estos métodos de estimación pueden utilizar herramientas de modelado numérico o eléctrico o analizar parámetros geográficos del sitio. Lo más eficiente es el uso de simulación basada en el modelado de energía como se hace en los softwares

PVsyst, SketchupPro®, RETScreen y S/ISS/FO [45, 46, 47, 48, 49, 50].

2.1. Funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos.

En esta sección se mostrará que es el efecto fotoeléctrico y como se descubrió. En que influyen los materiales sobre la conducción de la electricidad, así como los tipos de PV existentes.

2.1.1. Efecto fotoeléctrico.

En 1887 el físico Heinrich Rudolf Hertz cuando experimentaba con ondas electromagnéticas descubrió que los arcos eléctricos producidos entre 2 esferas cargadas con alta tensión eran mayores (en distancia) cuando se iluminaba la superficie de al menos una de estas con otra fuente de energía. Hertz llegó a la conclusión de que la luz amplificaba los arcos eléctricos, hoy sabemos por la naturaleza de los fotones que en realidad estos facilitan la emisión de los electrones. Esta idea no tuvo mucho impacto ya que Thomas Edison descubrió el efecto de emisión termiónica en la que al calentar suficientemente un metal este puede emitir energía en forma de electrones. La cuestión de Hertz era de que sus esferas no tenían una temperatura suficiente para la emisión termiónica [51].

Seguido de Hertz este efecto fue minuciosamente investigado por los científicos alemanes Philipp Lenard y Wilhelm Hallwachs entre 1886 y 1900. Crearon un fototubo al vacío con un ánodo y un cátodo, le conectaron una fuente de diferencia de potencial (una batería) que creara un campo eléctrico del ánodo al cátodo. Al incidir una corriente al cátodo crea una corriente sobre el circuito desde. La corriente se mide con un galvanómetro acoplado al sistema, que detecta las variaciones de la intensidad de la misma, esto permitió apreciar el efecto directo del aumento de la corriente al aumentar la intensidad de luz cuando incidía en el cátodo [51].

La figura 2.1 muestra el experimento sobre el efecto fotoeléctrico desarrollado por los científicos alemanes Philipp Lenard y Wilhelm Hallwachs entre 1886 y 1900 [51]. Donde: E=campo eléctrico, v_0 =potencial de frenado, G=galvanómetro.

Cuando en 1905 Albert Einstein logró el análisis del efecto fotoeléctrico, basándose en una hipótesis del científico Max Planck que postuló que la luz interactúa con la materia mediante unos mini paquetes de energía electromagnética llamados, representado esta postulación mediante la ecuación 2.1, [51, 52]:

$$E = h * f = \frac{h * c}{\lambda} \quad (2.1)$$

Einstein explica que cuando un fotón interactúa con un electrón este intercambio de energía electromagnética es de todo o nada, no es una transferencia

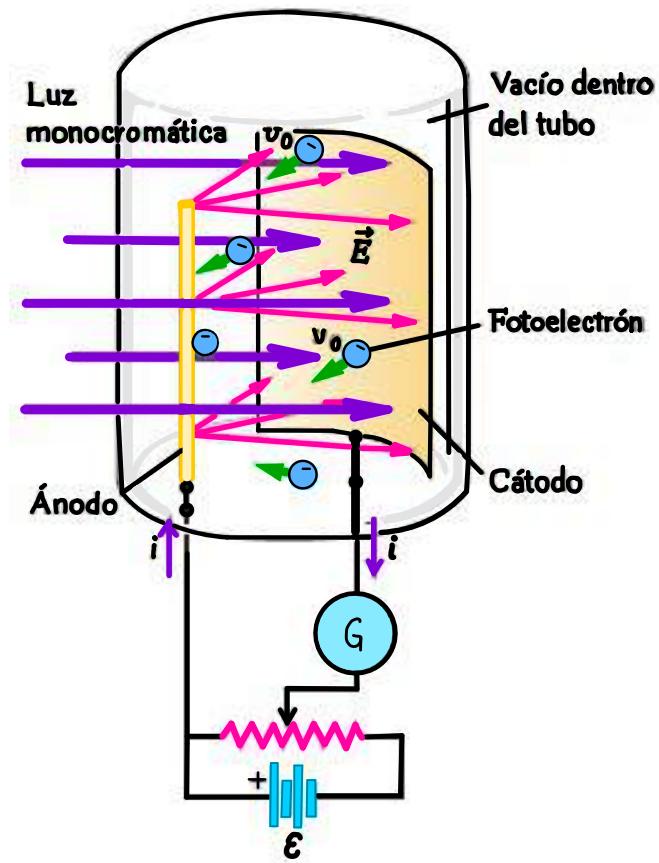


Figura 2.1: Experimento sobre el efecto fotoeléctrico desarrollado por los científicos alemanes Philipp Lenard y Wilhelm Hallwachs entre 1886 y 1900.

continua de energía en la que se va acumulando hasta el punto en el que el electrón adquiere suficiente como para salir de su nivel. Esta energía necesaria para que el electrón escape de su nivel se llama “función de trabajo” ϕ [51, 52].

Para expresar la energía cinética de los electrones, se puede ver la ecuación 2.2, [51, 52]:

$$K = \frac{m * v^2}{2} = h * f - \phi \quad (2.2)$$

Pero para expresar correctamente la energía del electrón se usa una magnitud “llamada electronvoltio” eV. De tal manera el efecto fotoeléctrico puede resumirse en la ecuación 2.3, [51, 52]:

$$eV_0 = h * f - \phi \quad (2.3)$$

2.1.2. El silicio como semiconductor.

Para entender cómo el silicio, material esencial en los paneles solares presentados en esta tesis, es fundamental conocer el concepto de bandas de energía. Supongamos que tenemos una gran cantidad de átomos de silicio ubicados a suficiente distancia entre ellos para que sus interacciones sean despreciables. En estas condiciones, cada átomo tiene un diagrama de niveles de energía idéntico que se mantiene constante en todo el sistema.

A medida que las funciones de onda de los electrones de valencia se extienden sobre un mayor número de átomos y se vuelven menos localizadas, las energías correspondientes también se ajustan. Algunas energías aumentan y otras disminuyen en distintos grados, provocando que los estados de valencia, que anteriormente tenían un nivel de energía definido, formen una banda con muchos niveles de energía muy cercanos entre sí. Entre estas bandas adyacentes existen brechas donde no hay niveles de energía permitidos. En cambio, los electrones internos de un átomo se ven mucho menos afectados por la proximidad de otros átomos, por lo que sus niveles de energía permanecen relativamente constantes [53, 54].

Las diferencias entre las bandas de energía determinan la naturaleza del material: sea conductor, aislante o semiconductor en el caso del silicio [51]. La figura 2.2 ayuda a entender este concepto:

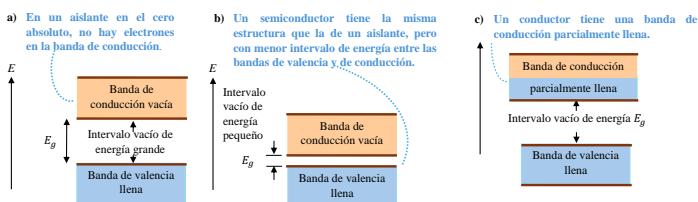


Figura 2.2: Representación simbólica de las bandas de energía y su estructura.

2.1.3. Funcionamiento de la célula solar fotovoltaica.

Los paneles están constituidos por una gran placa de cristal de algún semiconductor, usualmente silicio [55, 56, 57, 52, 51]. Este cristal presenta 3 regiones:

-la “región tipo p” que tiene una muy baja concentración de electrones en su estructura, dejando “huecos” en su estructura cristalina. Esta deficiencia de electrones se logra dopando directamente la placa con elementos impuros como el boro que tiene menos electrones de valencia que el silicio, de esta manera el cristal al tener menos electrones de valencia en su estructura actúa como si estuviera cargado positivamente [55, 56, 57, 52, 51].

-la “región tipo n” que contiene una alta concentración de electrones en su estructura, esto se logra dopando la región con sustancias que tengan más

electrones de valencia que el silicio, como por ejemplo el fosforo, de esta manera 1 o más electrones quedan libres de moverse. De esta forma se crea una región con una alta concentración de electrones cargándola negativamente [55, 56, 57, 52, 51].

-La interacción entre estas dos regiones crea una zona en la que los electrones de la placa n migran hacia la zona desplazando una fracción de los huecos de la zona p hasta la zona n creando una zona límite entre las 2 regiones que no tienen electrones libres. Esta región se denomina “región de agotamiento”. Por la propia migración de electrones, la zona entre la región límite y la zona n se carga ligeramente de huecos que actúan como carga positiva y la región tipo p se carga negativamente [55, 56, 57, 52, 51].

Cuando la luz del sol penetra y llega a la región de agotamiento, los fotones empiezan a interactuar con los electrones permitiéndoles escapar de su nivel y se empiezan a generar huecos y electrones libres, de esta manera por la propia migración de electrones, la zona entre la región límite y la zona p se vuelve a cargar positivamente y la región n negativamente. Este fenómeno genera una diferencia de potencial la cual se aprovecha para al conectar un conductor entre la región tipo p y la n se genera una corriente continua [55, 56, 57, 52, 51]. En la Figura 2.3 se puede ver la estructura de la celda fotovoltaica.

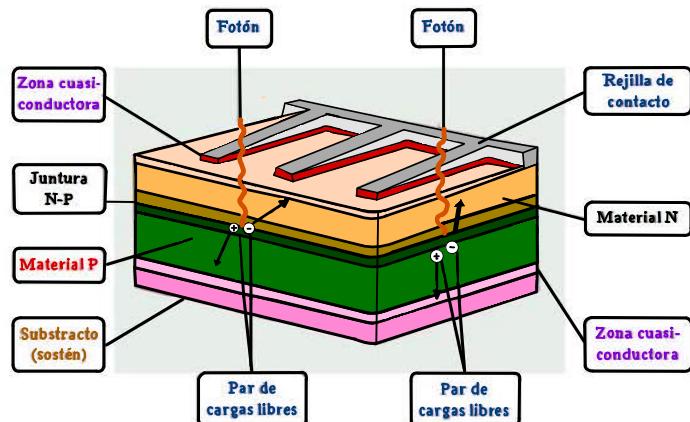


Figura 2.3: Esquema de una celda fotovoltaica.

2.1.4. Clasificación de los SSFV.

Los SSFV, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

1. Aislados.
2. Conectados a la red.

Los sistemas aislados, al no estar conectados a la red eléctrica, generalmente incorporan sistemas de almacenamiento de energía para compensar

la variabilidad de la generación solar. Durante el día, cuando el sol brilla y se produce energía solar, esta energía se utiliza para alimentar las baterías de almacenamiento. Esto es esencial porque la demanda de energía del usuario tiende a ser mayor en las horas de la tarde y noche, cuando la generación solar es limitada o nula. Por lo tanto, es crucial dimensionar adecuadamente el SSFV para garantizar una alimentación constante durante las horas de radiación solar [58, 59, 52].

Los sistemas conectados a la red generalmente carecen de sistemas de almacenamiento de energía, ya que la electricidad producida durante las horas de radiación solar se suministra directamente a la red eléctrica. Durante períodos de poca o nula radiación solar, la carga eléctrica se obtiene de la red. Esta configuración garantiza una mayor fiabilidad en términos de continuidad del servicio en comparación con los sistemas no conectados a la red, ya que en caso de avería, los sistemas conectados a la red pueden obtener energía de forma alternativa a través de la red eléctrica [58, 59, 52].

2.1.5. Componentes de un SSFV.

Un SSFV consiste en matrices y combinaciones de paneles fotovoltaicos, un controlador de carga (DC a DC), un inversor DC (corriente directa) a AC (corriente alterna), medidor de potencia, interruptores y lo más importante una batería o una matriz de baterías dependiendo del tamaño de el sistema. El panel fotovoltaico demostró resultados prometedores en diferentes aplicaciones, especialmente aquellos alejados de la red [20, 52].

La figura 2.4 muestra un esquema general de un SSFV. El panel fotovoltaico genera una salida de CC regulada por la carga controlador y almacenado en la batería. Una vez necesario, la energía almacenada en la batería se invierte a CA a través del inversor (CC/CA) para Carga de CA, o de otra manera alimenta directamente una carga de CC. Se utiliza un medidor de potencia para registrar y medir el flujo de electricidad que alimenta la carga.

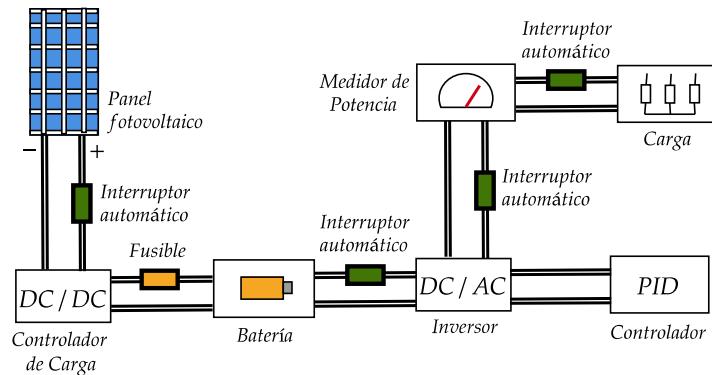


Figura 2.4: Esquema de una instalación solar fotovoltaica.

Aunque, muchas personas consideran que los sistemas fotovoltaicos no

tienen requisitos de mantenimiento, es porque solo necesitan una limpieza adecuada de vez en cuando, cuando se instalan en sitios con clima arenoso o polvoriento ya que tiene un efecto sustancial en su rendimiento.

Una vez fuera de la fase de fabricación y totalmente instalados, los sistemas fotovoltaicos están completamente instalados seguro para el medio ambiente; no producen ningún ruido, ni emiten ningún gas tóxicos o de efecto invernadero. El objetivo general para la mejora de la energía solar fotovoltaica es mejorar la eficiencia de las células para reducir el costo general de la tecnología, así como mejorar la tecnología de fabricación asociada a ella. El dimensionamiento de los SSFV son claves a la hora de evaluar la eficiencia de los mismos, por lo que se debe tener en cuenta muchos factores tanto del equipamiento como del exterior [20, 16].

2.1.6. Estructura del PV.

Las células fotovoltaicas (o células solares) son dispositivos que convierten la luz energía de cualquier fuente a energía eléctrica. En la estructura fotovoltaica se combinan diferentes componentes. A través del boceto presentado en la figura 2.5, los diferentes componentes de un panel fotovoltaico pueden ser reconocidos.

Partiendo de abajo, encontramos el plástico respaldo (o hoja posterior), que es la superficie blanca característica de módulos fotovoltaicos, compuestos por Tedlar (fluoruro de polivinilo) y tereftalato de polietileno. Subiendo encontramos dos láminas de etileno acetato de vinilo (EVA) que incorpora el semiconductor, que puede variar dependiendo del tipo de panel, es un polímero conformado por unidades de etileno y acetato de vinilo que se usa para la encapsulación de las células de silicio. Finalmente, se encuentra una capa de vidrio colocada por encima como forma de protección primaria.

Todas estas capas están intercaladas dentro de un marco de aluminio para que la caja de conexiones está conectada. En algunos casos, un antirreflectante es añadido sobre la superficie de vidrio.

2.2. SSFV en edificios.

Los edificios son responsables de aproximadamente el 40 % del consumo energético mundial y el 36 % de las emisiones de CO_2 . A medida que se busca electrificar la demanda energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático, es crucial identificar nuevas áreas para la generación con FRE [60].

El área del techo de los edificios del mundo y las extensiones de techo asociadas son aproximadamente $223 * 10^9 m^2$ y se espera que se dupliquen aproximadamente para 2050. Con la producción fotovoltaica, el diseño de nuevos edificios con un consumo de energía casi o neto cero ha demostrado ser factible

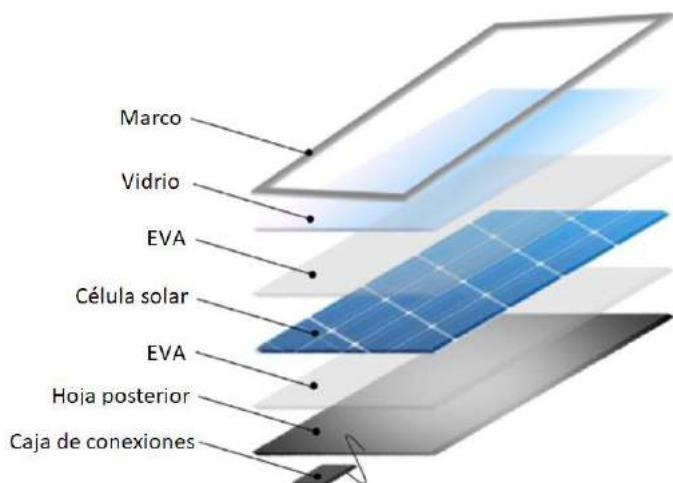


Figura 2.5: Estructura de un panel solar fotovoltaico.

en todo el mundo, pero persisten las preocupaciones de aplicación, en particular para los edificios existentes [61].

Teniendo en cuenta la antigüedad, la ineficiencia y la lentitud de la renovación del parque inmobiliario, los edificios existentes tienen un gran potencial para lograr ahorros de energía. La modernización es un factor clave para alcanzar los objetivos europeos (UE) de Energía y Clima para 2030 (reducir el 55% de las emisiones de agentes contaminantes, mejora del 33% de la eficiencia energética, aumento del 32% de las FRE) con vistas a ser el primer continente neutro para el clima en 2050. La Figura 2.6 muestra ejemplos de aplicación de PV en edificaciones [61].



Figura 2.6: Aplicación de energía fotovoltaica en techos de edificios.

La aplicación de sistemas solares fotovoltaicos en los techos de edificios ha sido sustancialmente profundizada a pesar de ser una tecnología emergente. Dando consigo a la creación de los edificios verdes modernos que cuentan con paneles integrados en su fachada y techo de manera natural, propiamente integrado en el proyecto de diseño original del edificio.

Las aplicaciones de paneles solares fotovoltaicos a edificios se pueden ver reflejado en los siguientes trabajos científicos:

1. Hacia el logro de la mejor solución para utilizar paneles solares fotovoltaicos para edificios residenciales en áreas urbanas [62].
2. Una edificación Net Zero utilizando PV: un estudio de caso en un edificio educativo [63].
3. Optimización tecno económica para sistemas fotovoltaicos de techo amigables con la red: un estudio de caso de edificios comerciales en Columbia Británica [64].
4. Análisis tecno económico y optimización multiobjetivo de un novedoso sistema de energía de edificios basado en energía solar; Un esfuerzo por alcanzar el verdadero significado de los edificios de energía cero [65].
5. Mejora del rendimiento y termografía infrarroja (IR) del panel solar fotovoltaico que utiliza la refrigeración posterior del aire residual del sistema de aire acondicionado centralizado del edificio [66].
6. Diseño óptimo de sistemas fotovoltaicos en azotea conectados a la red: una visión general y un nuevo enfoque con aplicación a edificios educativos en climas áridos [67].
7. Determinación de la inclinación óptima y el ángulo azimutal del sistema BiSPVT junto con su rendimiento debido a la sombra de los edificios adyacentes [68].
8. Una revisión de los diseños y el rendimiento de los sistemas fotovoltaico-térmicos integrados (BIPVT) de edificios basados en fachadas [69].
9. Una nueva aplicación de la toma de decisiones multicriterio en la tecnología energética en edificios tradicionales: un estudio de caso de Isfahán [70].

2.2.1. Factores que influyen en la eficiencia de los SSFV.

1. Las temperaturas en Cuba son predominantemente altas durante todo el año, lo que provoca una disminución en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos.
2. La radiación solar en Cuba tiende a ser difusa debido a la alta humedad relativa que prevalece en el país.
3. La ubicación de la mayoría de los hoteles en Cuba cerca de las playas puede afectar la eficiencia de los PV instalados, ya que están expuestos a la corrosión debido a la proximidad al mar.
4. Las instalaciones fotovoltaicas en zonas rurales de Cuba están propensas a la acumulación de suciedad, como polvo, tierra y polen, lo que disminuye la eficiencia de los PV.
5. La eficiencia de las instalaciones fotovoltaicas en Cuba puede verse afectada por el rendimiento de los inversores, ya que no siempre se utilizan los de mayor rendimiento en el país.

6. El Acimut, lo recomendado es que se encuentren ubicados hacia el Sur, pero no siempre se tiene esa posibilidad.
7. Ángulo de inclinación lo recomendado es que sea igual a la latitud del país, pero en realidad debería variar en dependencia de los meses del año.

2.3. Optimización de SSFV utilizando técnicas de IA.

La eficiencia de los SSFV se ve comprometida por numerosos factores, como son la disposición y orientación del sistema, el sombreado, el clima, el diseño del colector térmico, tipo de cubierta de vidrio, métodos de suministro de fluidos y método de enfriamiento; tipo de fluido y caudal [71, 72, 73, 74, 75]. Por lo cual ya se realizan los sistemas solares fotovoltaicos y térmicos integrados a edificaciones *BiPVT*.

Según [76, 77, 78, 79] se han introducido diferentes técnicas de optimización para estimar los parámetros de los SSFV; a saber, el algoritmo genético (GA), la optimización de la búsqueda de patrones (PS), el sistema inmunológico artificial (AIS), el algoritmo de forrajeo bacteriano (BFA), el recocido simulado (SA), Evaluación diferencial (DE), optimización de caos paralelo de escala mutativa (MPCOA), algoritmo basado en búsqueda de armonía (HS), algoritmo de optimización de enjambre de abejas artificiales (ABSO), colonia de abejas artificiales (ABSO), Algoritmo de polinización de flores (FPA), Algoritmo de Levenberb – Marquard con recocido simulado (LMSA), Cuckoo Search (CS), Algoritmo híbrido de polinización de flores con polinizador de abejas (BFPPA), el Algoritmo de Fireworks (FA) y la Optimización Basada en el Aprendizaje de la Enseñanza Oposicional Generalizada (GOTLBO). Sin embargo, estos algoritmos aún requieren algunas modificaciones para encontrar el parámetro más optimizado para diferentes módulos solares fotovoltaicos. Aún no se ha encontrado el algoritmo más eficiente para detectar el valor optimizado de los parámetros de los SSFV.

La inteligencia artificial (IA) es una de las áreas en la investigación más destacadas, debido a su capacidad para automatizar sistemas para mejorar su eficiencia. Permite que los sistemas aprendan, razonen y tomen decisiones, al igual que los humanos, entrenándolos con un conjunto de instrucciones complejas [80, 81, 82].

Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran las principales investigaciones realizadas en el ámbito de la integración de SSFV en edificaciones:

La Tabla 2.3 muestra los principales métodos de optimización, análisis y predicción en SSFV, donde se realizó un estudio comparativo de los mismos.

Ref.	Análisis Energético	Análisis de sombras y eficiencia	Integración de SST y SSFV	Evaluación económica y medioambiental
[83]	Analiza el consumo mensual de energía eléctrica. Sin tomar en cuenta indicadores de desempeño energético.	No tiene en cuenta las magnitudes de la radiación incidente en la zona ni se realizan estudios de sombras.	Solo SSFV	Solo se analiza el ahorro que supone a la empresa en términos de energía no consumida de la red. Analiza la cantidad de CO_2 dejada de emitir a la atmósfera.
[84]	Analiza el consumo diario de energía eléctrica. Sin tomar en cuenta indicadores de desempeño energético.	No tiene en cuenta las sombras producidas por objetos cercanos. Ni toma en cuenta los rangos de trabajo más eficientes de los inversores.	Solo SSFV	Determina el periodo de recuperación de la en cuenta el costo de la inversión inicial y los costos de mantenimiento. Determinar la reducción de las emisiones de CO_2 que también evalúa la influencia sobre los ecosistemas próximos.
[85]	Analiza el consumo diario de energía mensual en horario pico. Sin tomar en cuenta indicadores de desempeño energético.	No tiene en cuenta las sombras producidas por objetos cercanos. Ni toma en cuenta una estructura eficiente del arreglo fotovoltaico.	Solo SSFV	No toma en cuenta ningún aspecto económico. No evalúa el de la inversión inicial y los impacto medio-ambiental del proyecto.
[86]	No posee	No posee	La integración se realiza en un mismo dispositivo.	No posee
[87]	No posee	Estudio su eficiencia mediante varios arreglos.	Ánalisis BiPVT sin optimización.	No posee
[88]	Se estudió el comportamiento eléctrico y térmico examinando los efectos de los controladores de temperatura, utilizando el perfil de consumo diario de agua caliente, la temperatura ambiente, la temperatura de la celda y los ángulos de pendiente.	Este trabajo verifica, analiza y compara un nuevo componente de SST que creado y programado en base a especificaciones factuales en el entorno TRNSYS y construyó un modelo dinámico de sistema SST.	La integración que se realiza es en un solo dispositivo.	No posee

Tabla 2.1: Comparación de metodologías y estudios de integración de SSFV y SST en edificaciones, parte 1.

Ref.	Análisis Energético	Análisis de sombras y eficiencia	Integración de SST y SSFV	Evaluación económica y medioambiental
[89]	No posee	Se estudian dos modelos de sistemas en un solo dispositivo y logran un aumento de la temperatura de salida de 15,77 % utilizando turbuladores esféricos en la parte del SST.	No posee un estudio por separado y una tecnología depende totalmente de la otra.	Según el análisis económico, el período de recuperación de la inversión de la secadora osciló entre 2.98 y 3.51 años.
[90]	No posee	Los resultados muestran que al aumentar el caudal másico de nanofluido, la temperatura de la celda fotovoltaica y la temperatura de salida del nanofluido disminuyen, por lo que aumenta la eficiencia del SSFV y disminuye la del SST.	Es un sistema integrado en un solo dispositivo.	Realiza un análisis energético-exergético-económico muy productivo.

Tabla 2.2: Comparación de metodologías y estudios de integración de SSFV y SST en edificaciones, parte 2.

Ref.	Técnica de IA utilizada	Área de aplicación en Energía Solar
[91, 92, 93]	Algoritmo genético (GA)	Optimización de la distribución de electricidad, mejoras del sistema MPPT, integración de fuentes renovables.
[94, 95, 96]	Optimización de la búsqueda de patrones (PS)	Optimización de la relación corriente-voltaje de trabajo de los módulos, de microrredes de fuentes renovables (FR) integradas. Trabajo y análisis con parámetros parásitos.
[97, 98, 99]	Recocido simulado (SA)	Predicción de eficiencia en SST. Optimización en la red del SSFV.
[100, 101]	Algoritmo basado en búsqueda de armonía (HS)	Optimización del MPPT. Predicciones de variables climatológicas.
[102, 103, 104]	Algoritmo de optimización de enjambre de abejas artificiales (ABSO)	Control de carga para SSFV. Optimización de SSFV mediante estimación de producción, estudios de sombreado y parámetros parásitos.
[105, 106, 107]	Algoritmo de polinización de flores (FPA)	Optimización de flujos de energía en FR integradas. Análisis del rendimiento en SSFV mediante el dimensionamiento.
[108, 109, 110]	Optimización Basada en el Aprendizaje de la Enseñanza Oposicional Generalizada (GOTLBO)	Estimación de los principales parámetros de SSFV. Optimización en el dimensionamiento. Eficiente para el estudio de fallas.

Tabla 2.3: Análisis de las principales técnicas de IA aplicadas a la Energía Solar.

Hipótesis

3.1. Hipótesis

El desarrollo e implementación de una metodología para el procedimiento de cálculo preciso de la eficiencia del sistema solar fotovoltaico que considere un estudio de sombra y de las variables climatológicas del sitio, optimiza el área en cuestión hasta en un 10 % mediante técnicas de inteligencia artificial con respecto a lo normado.

Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología donde mediante inteligencia artificial se optimice el área para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos en edificaciones.

4.2. Objetivos Particulares

- Determinar los principales portadores energéticos y lograr la mayor eficiencia energética mediante el diseño de un indicador de desempeño energético que modele el consumo de la institución.
- Identificar las herramientas informáticas más comunes para el diseño de estos sistemas utilizando métodos de inteligencia artificial para la optimización de los mismos.
- Desarrollar una metodología para la integración de estos sistemas en edificaciones, incluyendo la optimización del área mediante métodos de inteligencia artificial, criterios económicos y de sostenibilidad ambiental.
- Validar la metodología propuesta en un estudio de caso.

CAPÍTULO 5

Metodología

El siguiente apartado consiste en evaluar cada aspecto para la instalación del SSFV, mediante cálculos manuales los cuales son tomados como referencia para el diseño de los softwares de trabajo, quedando creada así, una metodología para futuros proyectos de integración de estos sistemas en edificaciones. Para ello se desarrolló una secuencia de pasos con un orden lógico que posteriormente fue complementada con las ecuaciones que fuesen necesaria.

5.0.1. Metodología para dimensionamiento e integración de SSFV

Cabe aclarar que, para la veracidad de esta metodología, que todas estas ecuaciones fueron extraídas de referencias confiables, entre las que tenemos: [111, 112, 85, 113, 114, 22, 115, 116, 117, 118, 119].

La metodología incluye un análisis energético de la instalación para identificar y proponer las principales oportunidades de ahorro, con el objetivo de reducir el consumo y desarrollar un indicador de desempeño energético. Se llevarán a cabo estudios de resistencia estructural del edificio y se diseñarán los soportes de los paneles solares de acuerdo con las condiciones y características específicas del lugar. También se considerarán las particularidades del sistema eléctrico existente. Posteriormente, se realizará el dimensionamiento y la optimización del sistema integrado en su conjunto, evaluando su viabilidad económica y ambiental, ver Figura 5.1.

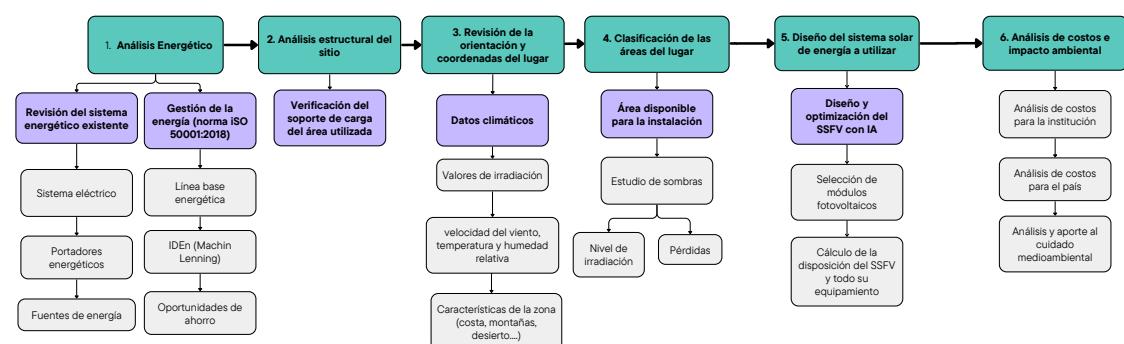


Figura 5.1: Metodología a utilizar para la integración de SSFV.

Caracterización energética de la institución.

La Norma ISO 50001:2018 se fundamenta en el ciclo de mejora continua Planificar - Hacer - Verificar - Actuar (PDCA), integrando la gestión energética en las prácticas diarias de las organizaciones.

La metodología seguida en esta investigación se fundamenta en la etapa de planificación de la norma ISO 50001:2018 [60], ver figura 5.2, enfocada específicamente en la revisión energética para analizar usos y consumos de energía, identificar áreas de uso significativo de energía e identificar las principales oportunidades de mejora energética.

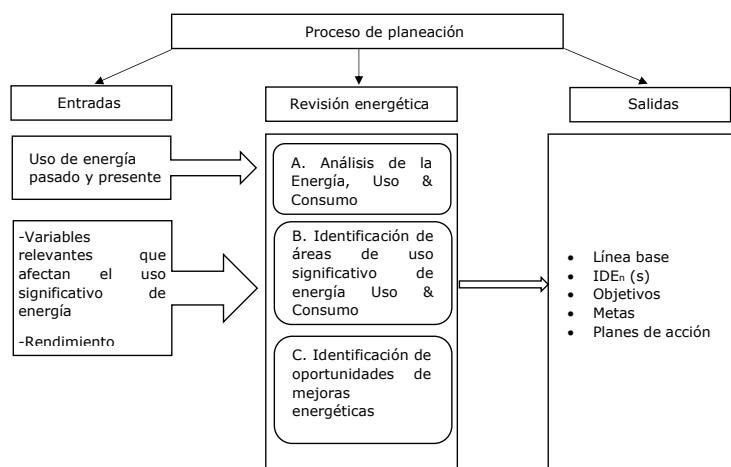


Figura 5.2: Metodología utilizada, basada en la norma ISO 50001.

Requisitos generales.

El hotel se compromete a garantizar la satisfacción de las expectativas de sus clientes en todas sus instalaciones turísticas y a través del desempeño de su personal, enfatizando la hospitalidad, los valores éticos y culturales. Prioriza la mejora constante de la calidad de sus servicios mediante la implementación de Sistemas de Gestión de la Calidad ISO 9000 centrados en la eficiencia y eficacia de los procesos, el compromiso de sus empleados y su capacitación continua, siempre con un enfoque en la protección del medio ambiente.

Estudio de consumo y producción de energía en la empresa.

La presente investigación aborda el estudio de la etapa de Planificación Energética según la Norma ISO 50001:2018, con el objetivo de definir las líneas energéticas base y meta, así como el indicador de desempeño energético para la instalación.

Para ello, partimos de realizar una búsqueda bibliográfica sobre los principales indicadores de gestión energética utilizados para este tipo de estudios

en instalaciones hoteleras, llegando a la conclusión de que los indicadores actuales de gestión energética para hoteles están bien estudiados. Sin embargo, este estudio pretende incorporar la variable Día-Grados en el Habitación-Días-Ocupados (HDO) para establecer una correcta línea base e indicador del desempeño energético. Para ello en primer lugar se procede a identificar y evaluar los usos significativos de energía en la institución teniendo en cuenta también la operación, modo de operación y parámetros de control que afectan el funcionamiento de los equipos con los que cuenta la entidad en los años 2021, 2022 y 2023.

Luego se continúa con el desarrollo de la metodología de acuerdo a los estándares de gestión energética en su etapa de revisión, obteniendo como principal resultado una línea base energética y una línea meta con un Coeficiente de Determinación (R^2) superior al de las demás. En estudios reportados en la literatura con otros indicadores de desempeño energético, se realiza un cálculo mediante el método de regresión lineal con múltiples variables para cotejar con los resultados obtenidos. Además, la investigación pretende presentar las oportunidades de ahorro de la instalación de manera general y destaca la mejora que traería la sustitución de las luminarias que posee la entidad por bombillas LED, así como su justificación económica.

Línea base y meta energética.

Se calcularán las líneas base y meta energética mediante el procesamiento de los datos con Machine Learning, con el objetivo de obtener una mayor presición y rapidez en la respuesta. Con estos resultados se podrá predecir y evaluar el comportamiento y las posibles mejoras en el consumo de energía en el hotel mediante la eficiencia energética y a su vez es la base para el diseño del indicador de desempeño energético.

Cálculo de la variable Grados Días.

Los grados día (DG_d) representan las demandas de calefacción o refrigeración (medidas en grados Celsius o Kelvin) requeridas para mantener un ambiente confortable durante un periodo específico, típicamente un mes, aunque también pueden ser calculadas semanal o incluso horariamente [31].

Para un día, los grados-día se determinan como ecuación 5.1:

$$DG_d = (T_d - T_r) \quad (5.1)$$

Para un mes, los grados día se determinan como ecuación 5.2:

$$DG = \sum DG_d \quad (5.2)$$

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 (18 °C).

Corresponde a la temperatura media en edificios típicos. Cuando se utiliza la ecuación 5.1, solo se tienen en cuenta los valores de $(T_d - T_r) > 0$.

Cálculo del indicador de rendimiento energético.

El EnPI es una herramienta para controlar el consumo de energía en diferentes meses del año. La curva trazada a partir de la línea base energética describe el comportamiento óptimo del hotel. Los valores por debajo de la curva muestran un buen rendimiento y un mal rendimiento energético por encima de ella. El Indicador Teórico de Rendimiento Energético (EntPI) para el hotel se obtiene relacionando la ecuación energética con la variable independiente de las organizaciones, en el caso de análisis del producto de Grados-Día y HDO, ver ecuación 5.3.

$$EntPI = \frac{E_t}{DG * HDO} \quad (5.3)$$

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

- Solicitar a la empresa un estudio estructural o de características constructivas de la empresa.
- En caso de ausencia de dicho estudio solicitarlo a entidades competentes.

5.0.3. Revisión de la orientación y coordenadas del sitio.

Para instalar paneles solares de manera eficiente, es esencial realizar una revisión del sitio que incluya lo siguiente:

- Identificar la ubicación exacta del sitio.
- Determinar la orientación solar adecuada hacia el sur (hemisferio norte) o norte (hemisferio sur).
- Consultar datos de radiación solar, temperatura y vientos históricos.
- Identificar y cumplir con las regulaciones y permisos locales.

5.0.4. Clasificación de la disponibilidad de las áreas de la entidad para la posible instalación de los SSFV.

Estudio de sombras en las áreas seleccionadas.

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

5.0.5. Selección del SSFV a utilizar.

Selección del PV.

- Dimensiones para relacionar con el área disponible.
- Masa del panel solar para relacionar con las características estructurales del lugar.
- Características eléctricas del SSFV 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.

5.0.6. Diseño de los soportes de los PV.

Estudio de las características climáticas de la institución.

Las condiciones climáticas tienen un impacto significativo en la eficiencia y desempeño de los SSFV. Por lo tanto, es crucial disponer de datos meteorológicos precisos, especialmente en cuanto a la radiación solar en la ubicación específica del proyecto, para optimizar el funcionamiento del sistema propuesto [22, 85].

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 de los paneles solares es responsable de asegurar su fijación al terreno o tejado de la instalación. Los tipos de estructuras disponibles son:

- Coplanares: Colocan los PV pegados a la cubierta, optimizando el espacio disponible y ofreciendo una solución estética con menor impacto visual.
- Estructura triangular: ajusta la inclinación y orientación de los paneles solares en casos donde la cubierta no es óptima, lo que resulta en un aumento de la radiación recibida y, en consecuencia, en una mayor producción eléctrica.
- Seguidores solares: son sistemas móviles con uno o dos ejes que adaptan la orientación de los paneles solares en función de la posición del sol, lo que puede incrementar la producción eléctrica hasta en un 30 % en regiones con alta radiación directa.
- Estructuras estáticas: Los módulos se fijan en una posición fija, sin cambios. Son las más comunes y adecuadas para techos e integración arquitectónica.
- Estructura a dos aguas Este-Oeste: Fijan dos módulos en direcciones Este y Oeste, permitiendo un mayor aprovechamiento de la radiación solar durante más tiempo.

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

Se puede lograr una mayor precisión utilizando la ecuación 5.4, donde los ángulos de inclinación y latitud están expresados en grados. Sin embargo, es importante asegurarse de que la inclinación no sea menor a 15° para permitir que la lluvia retire la suciedad acumulada [2, 22, 85].

$$B_o = 3.7 + 0.69 * |\phi| \quad (5.4)$$

Donde:

B_o =ángulo de inclinación.

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 [2, 22, 85].

La orientación de los módulos se determina utilizando el ángulo de desviación azimuthal con respecto a la dirección sur (en el hemisferio norte) o con respecto a la dirección norte (en el hemisferio sur) [2, 22, 85].

Los valores positivos de los ángulos azimuth muestran 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.

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 os contrapesos y sistemas de anclajes. En esta metodología de 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 y térmicos:
 - Un análisis del vehículo bi-híbrido eléctrico alimentado por energía solar en comparación con los vehículos con motor IC utilizando análisis de gráficos con IA [120].

- Rastreador de programación de doble eje con un algoritmo adaptativo para una fuerte dispersión del rayo de sol [121].
- Implementación del movimiento de fabricantes al laboratorio de energía renovable: estudio de caso del modelo fotovoltaico de seguimiento automático [122].
- Investigación del rendimiento óptico y eléctrico de sistemas fotovoltaicos térmicos truncados 3X sin imágenes de baja concentración [123].
- Mejora del rendimiento de un sistema de refrigeración basado en dese- cantes mediante la mitigación de la iluminación no uniforme en las unidades térmicas fotovoltaicas acopladas de baja concentración [123].
- SMOFIM : Maquina de pescado ahumado basado en energía solar fotovoltaica con filtro de escape reduciendo los contaminantes CO, CO_2 y HC como un esfuerzo para la mejorar la economía de la comunidad de pescadores en TRISIK BEACH [124].

Peso propio de los paneles.

Mediante la ecuación 5.5 se calcula el peso de los paneles.

$$P = \frac{P_p}{A} \quad (5.5)$$

Donde:

A=área.

P_p =Peso de un panel solar.

Carga en las vigas.

Mediante la ecuación 5.6 se calcula la carga de las vigas.

$$N = \frac{P(p+a) * T_p}{L_v} + W_c \quad (5.6)$$

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 5.7:

$$V_f = V * \cos(\phi) \quad (5.7)$$

Carga por la acción del viento.

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 5.8.

$$F = \rho * C_d * A * \frac{V_f^2}{2} \quad (5.8)$$

Donde:

ρ -Densidad del aire a nivel del mar.

C_d -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 las ecuaciones 5.9 y 5.10.

$$q = q_{10} * C_j * C_a * C_k * C_p * C_w * C_{ea} \quad (5.9)$$

Donde:

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

$$q_{10} = \frac{V_v^2}{1.6 * 10^3} \quad (5.10)$$

Donde:

V_v -velocidad del viento en el territorio.

C_j -coeficiente de recurrencia para 25 años.

C_k -coeficiente de sitio considerando sitio expuesto.

C_a -coeficiente de altura.

C_p -coeficiente de ráfaga.

C_{ea} -coeficiente de reducción de área.

C_w -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 será (ecuación 5.11):

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 * P}{\sigma_a * \pi}} \quad (5.11)$$

Donde:

d_1 -diámetro del tornillo hasta el exterior del filete (diámetro nominal).

P -carga axial a la que está sometida la unión.

$[\sigma_a]$ -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 se realiza para evitar que esta se cizalle por la superficie cilíndrica. (ecuación 5.12 y 5.13).

$$\sigma_c = \frac{P}{0.5 * d_0 * h * \pi} < \sigma_a \quad (5.12)$$

Donde:

σ_c : Tensión cortante ejercida.

d_0 : Diámetro del tornillo hasta la base del filete.

h : Altura de la cabeza del tornillo.

$[\sigma_a]$: Tensión admisible cortante.

Tensión de corte:

$$\sigma_c = \frac{P}{0.5 * d_1 * H * \pi * \beta} < \sigma_a \quad (5.13)$$

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 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 ($l = \frac{t_2}{2}$), ver ecuación 5.14.

$$\sigma_f = \frac{3 * P * t_2}{d_1 * \pi * z * b} < \sigma_a \quad (5.14)$$

Donde:

σ_f -tensión de flexión ejercida.

t_2 -la mitad de la altura de trabajo de la espira.

b -distancia teórica entre los filetes.

$[\sigma_a]$ -tensión admisible de flexión.

5.0.7. 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).
- Determinar ubicación de los módulos térmicos proyectados sobre el área (Número de filas y columnas y espacio entre las mismas).

Se lleva a cabo un cálculo para determinar la distancia mínima de separación entre las filas de PV dentro del SSFV, con el objetivo de evitar que se produzcan sombras de unos módulos sobre otros. En la Figura 5.3 se muestra todas las medidas que se deben tener en cuenta para estructuras de soporte estáticas convencionales.

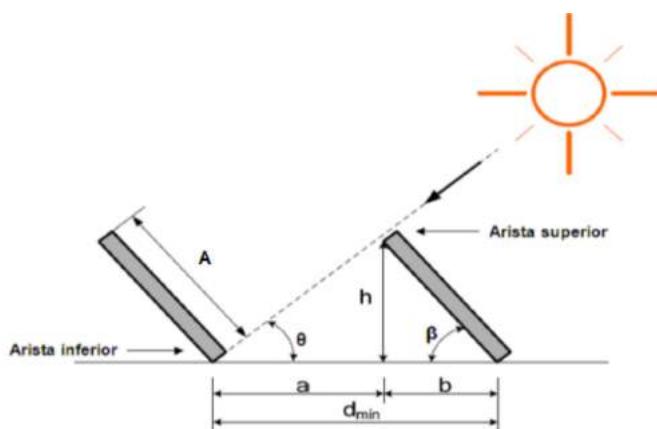


Figura 5.3: Medidas que se deben tener en cuenta para estructuras de soporte estáticas convencionales (SSFV).

Donde:

d_{\min} -distancia mínima entre aristas del PV, (m).

A -ancho del panel, (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 5.15.

$$h = \operatorname{sen}(\beta) * A \quad (5.15)$$

Con los mismos datos se calcula la distancia (b) en la ecuación 5.16.

$$b = \cos(\beta) * L \quad (5.16)$$

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 .

Con el valor del ángulo θ y la altura h se calcula la distancia a en la ecuación 5.17.

$$a = \frac{h}{\tan(\theta)} \quad (5.17)$$

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.

En la ecuación 5.18 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.

$$d_m = a + b \quad (5.18)$$

La distancia mínima entre paneles en la fila se determina mediante la ecuación 5.19.

$$d = d_m - A \quad (5.19)$$

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.

5.0.8. Cálculo del número máximo teórico de paneles fotovoltaicos.

Una vez calculada la separación mínima que debe haber entre filas de paneles (d_m), se procede calcular el número de estas que se podrán colocar sobre el área útil de las azoteas, mediante la siguiente ecuación (ecuación 5.20):

$$A = \frac{B}{C} \quad (5.20)$$

Donde:

A -Número máximo de filas de paneles.

B -Ancho de la edificación.

C -Distancia entre paneles.

Conocidas las dimensiones de los paneles solares y el área máxima a ocupar, en cada fila podrán colocarse el número determinado por la siguiente expresión (ecuación 5.21):

$$D = \frac{E}{F} \quad (5.21)$$

Done:

D -Número máximo de paneles por filas.

E -Largo de la edificación.

F -Ancho del panel.

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 [125].
 - Diseño y análisis de un sistema solar en red utilizando el software PVsyst para aplicaciones comerciales [126].
- Sketchup
 - Diseño asistido por computadora y mejora de la eficiencia basada en simulación de la primera ciudad solar egipcia [127].
 - Evaluación de viabilidad de la adopción de energía solar fotovoltaica distribuida y materiales de cambio de fase en edificios residenciales multifamiliares [128].
- Sunny Design
 - Evaluación del rendimiento de las tecnologías fotovoltaicas en exteriores y estimación de software comercial en climas cálidos y secos [129].
 - Planificación óptima de sistemas solares fotovoltaicos y de almacenamiento de baterías para el sector residencial conectado a la red: revisión, desafíos y nuevas perspectivas [130].

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 5.22:

$$J = \frac{P_d}{P_i} \quad (5.22)$$

Donde:

J -Número de inversores.

P_d -potencia que demanda la edificación.

P_i -potencia del inversor.

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 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 o de tamaño insuficiente. 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 [22].

La tasa máxima de potencia de DC del inversor, 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 [22].

Cálculo de la generación del SSFV proyectado mediante:

- Software 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. También se pueden 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 [131].
 - Diseño y optimización del sistema fotovoltaico de minirred para países en desarrollo [132].
 - Diseño y análisis de simulación de 1 MWp de sistema fotovoltaico conectado a la red flotando sobre el lago Nasser [133].

- HOMER utilizado en:

- Análisis previo a la instalación a través de "PVsyst" "HOMER Pro" para diseñar y simular un SSFV conectado a la red solar de 50 kWp para la electrificación de áreas rurales, India [134].
- Evaluación del rendimiento de un SSFV de 20 MW en un clima cálido utilizando datos reales y herramientas de simulación [135].
- Diseño óptimo de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico con la red nacional utilizando HOMER: un estudio de caso en Kerkennah, Túnez [136].

5.0.9. Optimización mediante IA.

Luego de obtener los resultados del Software PvSyst que nos daría la generación, el área ocupada, la eficiencia, la cantidad de paneles y mediante el Software SketchUp tendríamos la ubicación exacta de cada panel del SSFV y su orientación, se realizarán un total de 360 simulaciones de este tipo para luego tomar una parte para enseñar al software donde realizaremos la optimización mediante IA y la otra para seleccionar la mejor inclinación y ubicación de los paneles solares.

5.0.10. Análisis de costos e impacto medioambiental.

Para el desarrollo del análisis de costos se siguen los criterios dados por [22, 85, 115]:

En la evaluación económica, se incluirán todos los costos relacionados con la implementación de la tecnología fotovoltaica, como paneles, estructuras de montaje, cableado, fijaciones y inversores. Además, se considerarán factores como el impuesto bancario, la inflación, la tasa de descuento y el período de vida útil de los paneles. Esto permitirá obtener una estimación precisa del tiempo necesario para recuperar la inversión y las ganancias potenciales que se generarán.

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 siguiente ecuación 5.23:

$$I_n = E_g * T_e \quad (5.23)$$

Donde:

I_n -Ingreso.

E_g -Electricidad generada.

T_e -Tarifa eléctrica.

Determinación del valor presente neto.

Se determina el Valor Presente Neto (VPN), ver ecuación 5.24.

$$VPN = -K_0 + \sum \frac{Fc_i}{(1+D)^i} \quad (5.24)$$

Donde:

K_0 -inversión inicial.

Fc -flujo de caja.

D -taza 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 indica el porcentaje o tasa de interés que se obtiene sobre el saldo pendiente de recuperar de una inversión, de modo que al finalizar el período de evaluación o vida útil, dicho saldo sea nulo.

La TIR se calcula por la ecuación 5.25:

$$VPN = -K_0 + \sum \frac{Fc_i}{(1+TIR)^i} \quad (5.25)$$

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

Es el tiempo de recuperación de 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 5.26.

$$0 = -K_0 + \sum \frac{Fc_i}{(1+D)^i} \quad (5.26)$$

Para calcular el PRI, se suman gradualmente los flujos de efectivo anuales a la inversión inicial hasta que el resultado alcance cero, lo que indica que la inversión ha sido recuperada.

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 5.27).

$$RCB = \frac{VPNC}{VPNB} \quad (5.27)$$

5.0.11. 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 CO_2 dejado de emitir a la atmósfera en $\frac{t}{anual}$.

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 5.28:

$$C_a = \frac{E * g}{1000} \quad (5.28)$$

Donde:

C_a -Combustible ahorrado.

E -energía generada.

g -consumo específico de combustible de los grupos electrógenos.

Cantidad de CO_2 dejado de emitir a la atmósfera.

A partir del combustible ahorrado se puede obtener la cantidad de CO_2 dejado de emitir a la atmósfera en t/año por la ecuación (ecuación 5.29):

$$R = \frac{C_a * k}{\rho} \quad (5.29)$$

Donde:

R - CO_2 no emitido.

K -coeficiente que permite relacionar el combustible no quemado con las toneladas de CO_2 no vertidas a la atmósfera.

ρ -densidad del combustible.

Conclusiones parciales del capítulo.

- Se planearon los pasos a seguir para el dimensionamiento del SSFV.
- Se utilizaron métodos manuales para los cálculos de selección, dimensionamiento y resistencia mecánica de los sistemas.
- Se hizo referencia a softwares utilizados para la evaluación los cálculos propuestos manualmente.
- Se planteo la forma para la optimización e integración de ambos sistemas.

CAPÍTULO 6

Resultados y discusión

6.1. Caracterización energética de la institución según la etapa de planificación de la norma ISO 50001.

6.1.1. Caracterización de la empresa.

El hotel "Punta la Cueva", diseñado por el arquitecto Roberto Cabrera, actualmente forma parte de la cadena ISLAZUL. Ofrece 67 habitaciones climatizadas. Sus instalaciones incluyen un restaurante, bar, parrillada, sala de fiestas, piscina, enfermería, caja de seguridad central, teléfono y estacionamiento. El restaurante "Yaima" tiene capacidad para 52 personas y la parrillada "El Crepúsculo" para 40. La sala de fiestas "Imago" puede acoger a 100 personas y organiza espectáculos nocturnos y eventos empresariales. Además, el lobby-bar sirve cocteles de 10:00 am a 3:00 am. El hotel también ofrece servicios de pasadía en la piscina y zona de playa, alquiler de equipos recreativos, encuentros de softball y comedor para los empleados.

6.1.2. Situación energética del hotel.

La matriz energética (Figura 6.1) es una herramienta que se utiliza para mostrar el desempeño del hotel en materia de gestión de energía. A continuación, se reflejan los resultados obtenidos a partir de una encuesta realizada a la alta dirección del hotel.



Figura 6.1: Matriz de gestión energética.

La matriz nos muestra como media de la gestión energética 2 la cual se tendrá en cuenta para el análisis. Desde el punto de vista de la Divulgación y

Capacitación se presenta la situación más desfavorable dentro del hotel por ser el único indicador que se encuentra por debajo de la media, no existe un método para promover e intensificar las acciones en materia de gestión energética dentro de la instalación, sin embargo, a pesar de ello existe una adecuada política energética establecida, que a su vez es el único indicador que se encuentra por encima de la media, así como una aceptada organización, información y comunicación, así como en el monitoreo y control.

6.1.3. Principales portadores energéticos.

Los principales portadores energéticos del Hotel Punta la Cueva son la electricidad, el diésel, el gas licuado y la gasolina. En la Figura 6.2 se muestra un diagrama de bloque con estos portadores y la descripción de las distintas áreas del hotel que hacen uso de los mismos.

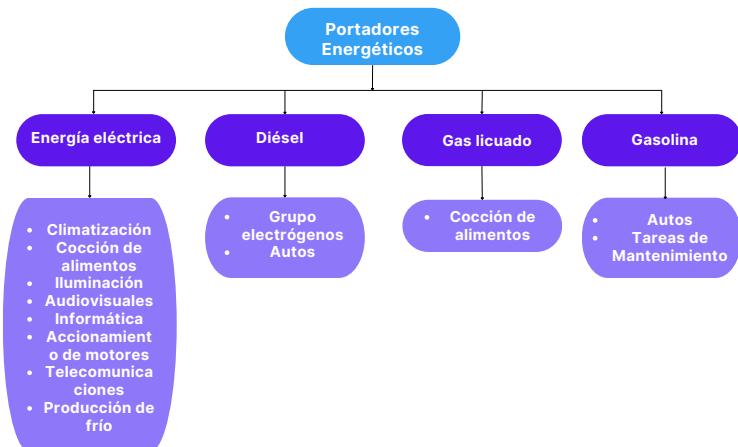


Figura 6.2: Diagrama de bloque del uso de los principales portadores energéticos en el Hotel Punta la Cueva.

6.1.4. Análisis del consumo de los principales portadores energéticos del Hotel Punta la Cueva.

A continuación, se muestra en la Tabla 6.1 y Tabla 6.2 el consumo promedio de los portadores energéticos del hotel en los años 2018 y 2019 respectivamente.

Utilizando como base las tablas (6.1 y 6.2), se presentan los diagramas de Pareto correspondientes a cada año.

A partir del análisis de las tablas anteriores se infiere que el mayor consumo en ambos años dentro del hotel es la electricidad, podemos ver que del año 2018 al 2019 hubo una pequeña mejoría con respecto al consumo de electricidad (468.07 MWh a 465.18 MWh) y a su vez un aumento del porcentaje que representa la misma con respecto a los demás portadores (95.46 a 96.30 %), por lo que

Portador	U.M.	Consumo	F.Conver.	TCC	%	% Acum.
Electricidad	MWh	468.07	0.35	163.92	95.46	95.46
Gas Licuado (GLP)	Litros	7 701.00	2 132.40	3.61	2.10	97.56
Diésel	Litros	3 763.00	1 241.48	3.03	1.77	99.32
Gasolina	Litros	2 150.00	1 847.56	1.16	0.68	100
Total	-	-	-	171.72	100	-

Tabla 6.1: Consumo de los portadores energéticos en el año 2018.

Portador	U.M.	Consumo	F.Conver.	TCC	%	% Acum.
Electricidad	MWh	465.18	0.35	162.91	96.30	96.30
Gas Licuado (GLP)	Litros	7 751	2 132.40	3.64	2.15	98.45
Diésel	Litros	3 708	1 847.56	2.01	1.19	99.64
Gasolina	Litros	757	1 241.48	0.61	0.36	100
Total	-	-	-	169.16	100	-

Tabla 6.2: Consumo de los portadores energéticos en el año 2019.

se ve la disminución del consumo de diésel y gasolina. De ahí la gran importancia de incidir e insistir en el ahorro, vigilancia y control del portador electricidad el cual está representando el mayor consumo total de los portadores energéticos empleados en la instalación en ambos años. Para una mejor panorámica de la información ver Figuras (6.3 y 6.4).

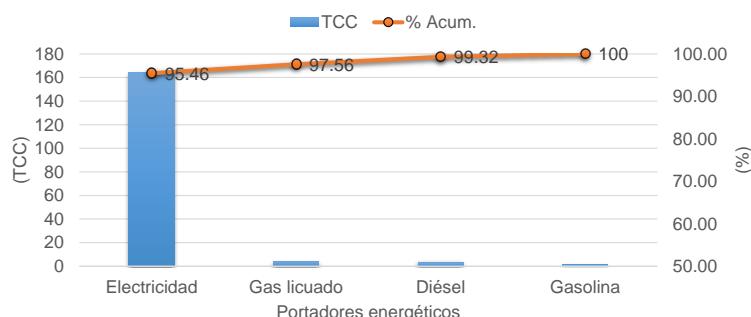


Figura 6.3: Diagrama de Pareto correspondiente al año 2018.

En los diagramas anteriores se puede observar claramente que más del 95 % del consumo de los portadores energéticos en el hotel lo representa la electricidad, portador este que presenta una importancia vital en la prestación de servicios de la instalación, por lo que sobre él se pretende enfocar el estudio en cuestión.

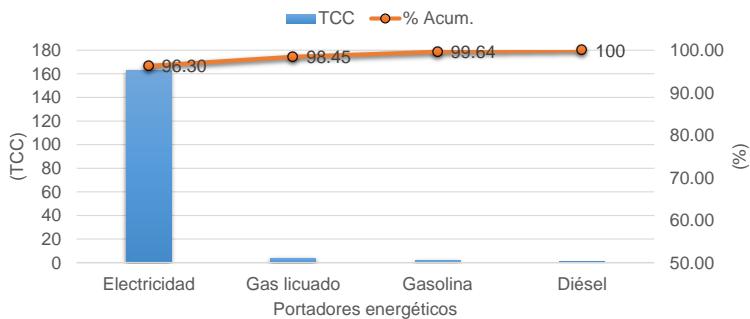


Figura 6.4: Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.

6.1.5. Censo de carga por áreas del Hotel Punta la Cueva.

Para el desarrollo del censo de carga, se parte de un levantamiento general de todos los equipos consumidores de energía eléctrica que se operan en las diferentes áreas del hotel. A partir de los datos de chapa y de información brindada por los trabajadores del hotel, se determinaron las potencias, tiempo y modo de uso de cada uno de estos equipos. Para analizar cual área es la mayor consumidora de electricidad se realizó la Tabla 6.3, en ella se detalla el consumo de electricidad para las áreas que componen el hotel y en la Figura 6.5 se presenta el diagrama de Pareto equivalente.

Áreas	Consumo (kWh/mes)	%	% Acumulado
Habitaciones	65 202.39	71.26	71.26
Servicios	6 413.25	7.01	7.01
Cocina	5 822.58	6.36	84.64
Complejo	5 357.46	5.86	90.49
Administrativa	4 167.66	4.55	95.05
Exteriores	2 583.21	2.82	97.87
Almacenes	1 950.09	2.13	100
Total	91 496.64	100.00	-

Tabla 6.3: Consumo por área de la energía eléctrica.

Como se puede observar en la figura anterior 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 que áreas representan el 80 % del consumo de energía eléctrica dentro del hotel se puede incluir el área de los servicios, entre ambas representan más del 78 % del consumo de electricidad del hotel.

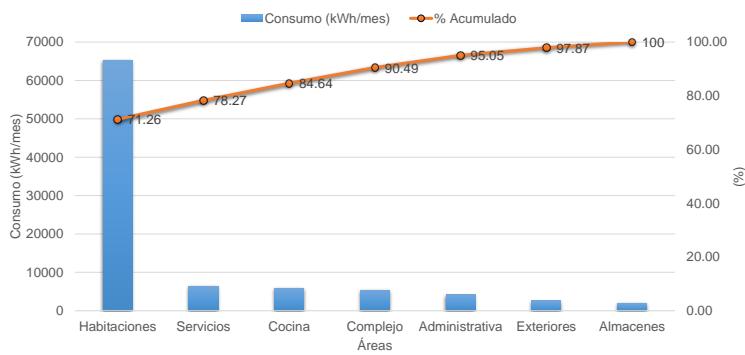


Figura 6.5: Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.

6.1.6. Estratificación en las habitaciones del Hotel Punta la Cueva.

Para analizar cual equipo es el mayor consumidor de electricidad en el área de habitaciones se procedió a realizar el diagrama de Pareto asociado, ver Figura 6.6.

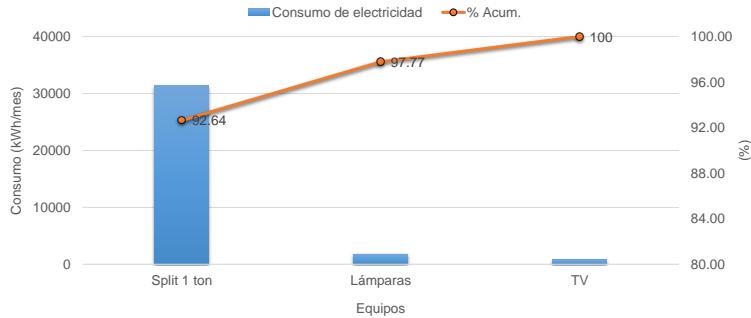


Figura 6.6: Diagrama de Pareto correspondiente al año 2019.

Como se puede observar en la Figura 6.6 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.

6.1.7. Análisis del comportamiento del consumo de energía eléctrica.

Para el análisis del comportamiento del consumo de electricidad y la producción en el tiempo se realizó un graficó de línea tomando en consideración sus desempeños en el periodo 2018-2019.



Figura 6.7: Consumo de electricidad y la producción en el tiempo.

Como se puede apreciar en la Figura 6.7 existen grandes variaciones en el comportamiento de la producción (HDO) con respecto al consumo(kWh) en los años analizados:

- 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 septiembre-18 a enero-19 se observa una disminución del consumo y la producción debido a formar parte de la temporada baja.
- 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.

Las Figuras (6.8 y 6.9) muestran los gráficos de control correspondientes al consumo de electricidad de los años 2018 y 2019, los cuales están construidos a partir del consumo total para esos años, así como por el consumo promedio de los mismos y se encuentran limitados por dos veces el valor de la desviación estándar obtenida para los datos.



Figura 6.8: Gráfico de control del consumo de electricidad (2018).

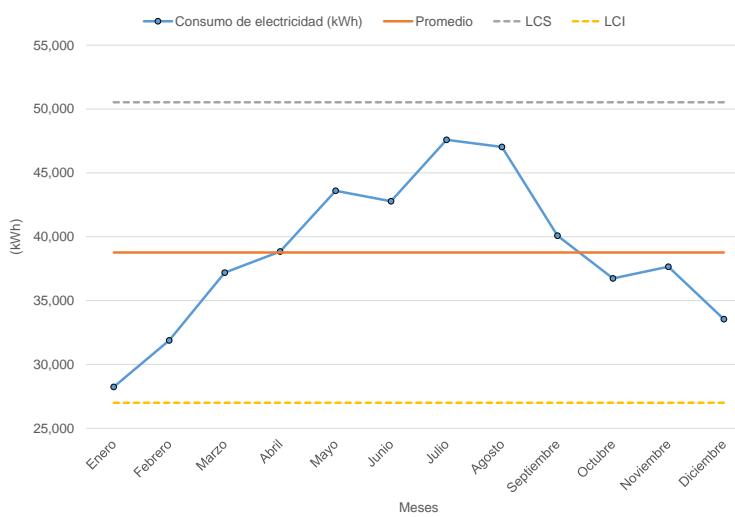


Figura 6.9: Gráfico de control del consumo de electricidad (2019).

En los gráficos anteriores se puede observar que el consumo de energía eléctrica en ambos años posee un comportamiento similar y se encuentran controlados todo el año, no existen meses donde el consumo sobrepase los límites establecidos.

El principio de Pareto se realizó con el fin de determinar el portador energético de mayor consumo por identidad, luego mediante el mismo proceso se alargará el área de mayor consumo de dicho portador; con estos resultados se trazó una gráfica de consumo versus días de habitación. Se ocupó tomando como referencia que ambas variables son las de mayor incidencia en la consecuencia consumo-producción del hotel.

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

Para la presentación del LBen preliminar, se decidió analizar el consumo de energía eléctrica y el HDO en el periodo 2018-2019, como se muestra en la Figura 6.10. En dicha figura se presenta la ecuación de consumo de ambos, la cual tiene 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, lo que representa más del 80 % del total de energía consumida por la compañía.

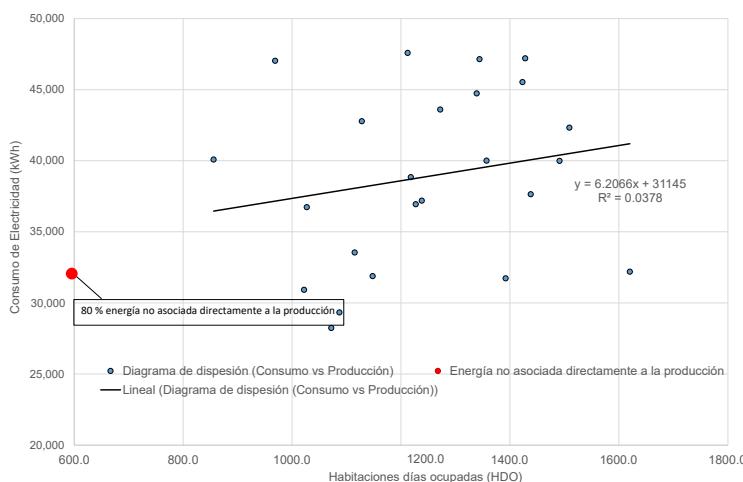


Figura 6.10: Gráfico de dispersión de energía vs producción (HDO) (2018-2019).

La baja correlación entre el consumo eléctrico y el HDO se debe al servicio del Hotel; es un hotel temporal, principalmente para turismo nacional y servicios empresariales, servicios de pernoctación y fiestas en la piscina. Además, los servicios de cócteles se encuentran en su bar lobby climatizado y en su salón de fiestas y reuniones. Otros servicios son la gastronomía tanto para los turistas de paso como para sus trabajadores. Estos indicadores no consideran el tipo de turismo, la época del año y el tipo de clima de nuestro país.

Esta baja correlación indica que no existe una dependencia directa entre el consumo de electricidad (kWh) y las HDO, trayendo consigo las dificultades siguientes:

- Imposibilidad de evaluar y gestionar adecuadamente la eficiencia energética del hotel.
- Se imposibilita realizar el control y seguimiento de los consumos y del desempeño energético.
- No permite identificar y determinar correctamente los potenciales de ahorro energético.

- No es posible llevar a cabo una proyección en los estimados de los consumos energéticos.

Por lo tanto, es necesario seguir analizando para encontrar un indicador que tenga una mayor correlación. Así, se decidió tomar en cuenta la incidencia del clima en esta zona del Caribe. No se consideró aplicar la técnica de filtrado de datos debido a la baja correlación entre consumo y HDO, por lo que se supone que no llega al valor de correlación recomendado de 0.75. Este bajo nivel de correlación ha sido demostrado en numerosos trabajos para estas variables presentadas anteriormente. Sin embargo, la mayoría de investigadores coinciden en que la variable Días Grados (DG) tiene una marcada influencia en el consumo energético de la instalación si el aire acondicionado es el servicio más consumido en el Hotel. Es entonces necesario incorporar la DG como variable influyente en el consumo de energía [137, 138, 139, 140, 141, 142].

Análisis estadístico en el software especializado R-Studio.

Luego de estos primeros resultados se continuó a realizar el diseño de un nuevo indicador y a su vez un análisis estadístico y de correlación de los datos en el software especializado R-Studio.

Los resultados que se observan en la Figura 6.11 confirman que existe una buena correlación de los datos de $R^2=0.851$. Se puede observar que el valor p es pequeño, por lo que rechaza la hipótesis nula y afirma que existe una relación entre y-x. Respecto al intercepto, es significativo, por lo que podemos apreciar que esta recta no pasa por el origen (rechazamos H_0 : la recta pasa por el origen). En este caso podemos afirmar que hay energía no asociada a la producción.

```

call:
lm(formula = consumo ~ HDODG, data = energia)

Residuals:
    Min      1Q  Median      3Q     Max 
-5951.0 -1185.9   367.6   976.9  6143.6 

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept) 2.008e+04 1.748e+03 11.49 9.14e-11 ***
HDODG       6.724e-02 5.996e-03 11.21 1.44e-10 ***
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2420 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8511,    Adjusted R-squared:  0.8443 
F-statistic: 125.8 on 1 and 22 DF,  p-value: 1.443e-10

```

Figura 6.11: Análisis estadístico en R-Studio.

Las gráficas de residuos de la Figura 6.12. muestran la presencia de residuos, los datos no siguen completamente la forma de campana de Gauss, la simetría con respecto a 0 no es total. Vemos que los residuos siguen un compor-

tamiento bastante lineal (Normal Q-Q Plot). Hay dispersión de los valores (ancho de la caja y largo de los bigotes) y se observan valores atípicos.

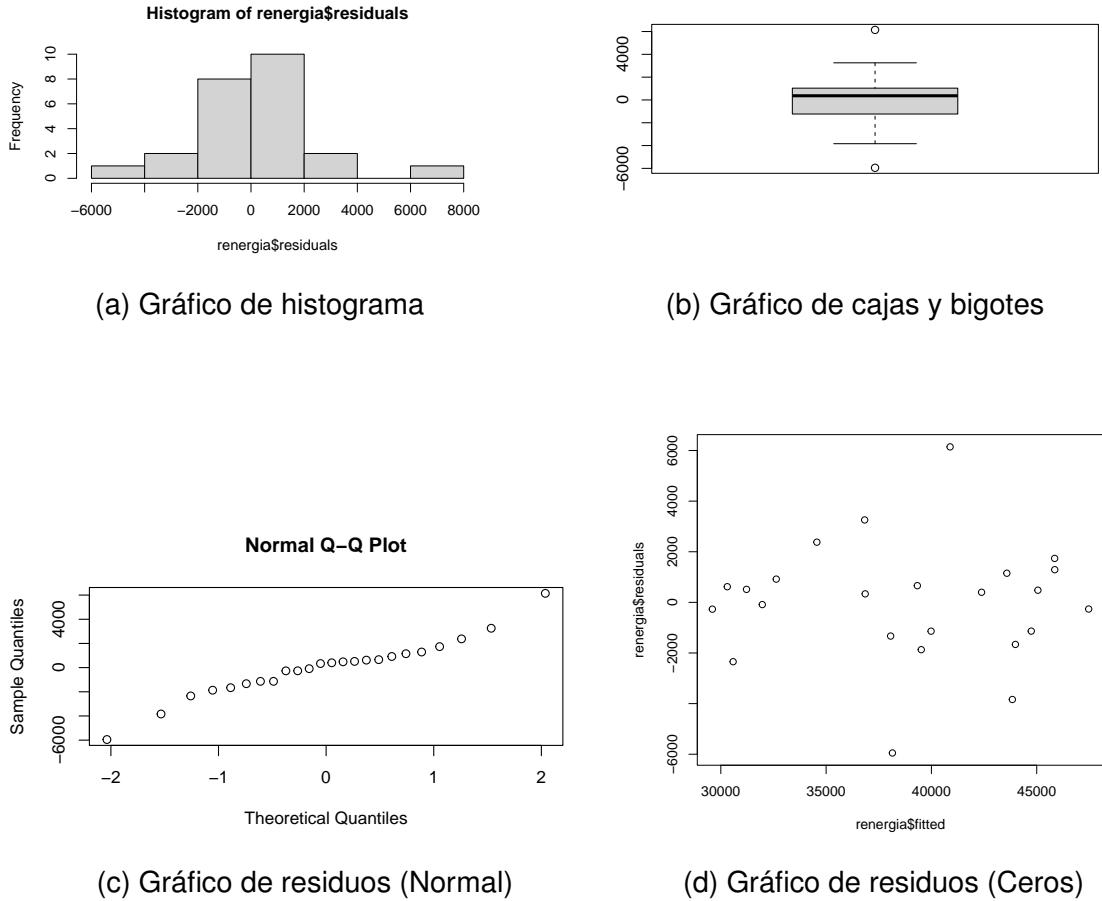


Figura 6.12: Gráficos del análisis estadístico en R-Studio.

La Figura 6.13 muestra el gráfico de correlación entre los días de ocupación de habitaciones ajustados con días grados (HDO^*DG) y el consumo de energía eléctrica (kWh). El gráfico se obtiene de los registros históricos correspondientes a los años 2018 y 2019. Como se puede observar el valor de correlación supera el 0.75, por lo que se puede considerar correcto.

Según los resultados obtenidos se puede observar un aumento en la correlación entre consumo y producción del hotel; esto se debe a la alta incidencia de la temperatura en esta zona del Caribe, lo que trae consigo un aumento en el consumo del principal portador energético de la instalación que es la electricidad debido al aumento en el uso de aire acondicionado, el cual representa una de la mayor carga eléctrica de la instalación.

En el gráfico superior se puede ver la representación de los datos analizados, en rojo la línea de tendencia y en el tono más claro los intervalos de confianza. Una vez identificado el período base o línea de mejor ajuste median-

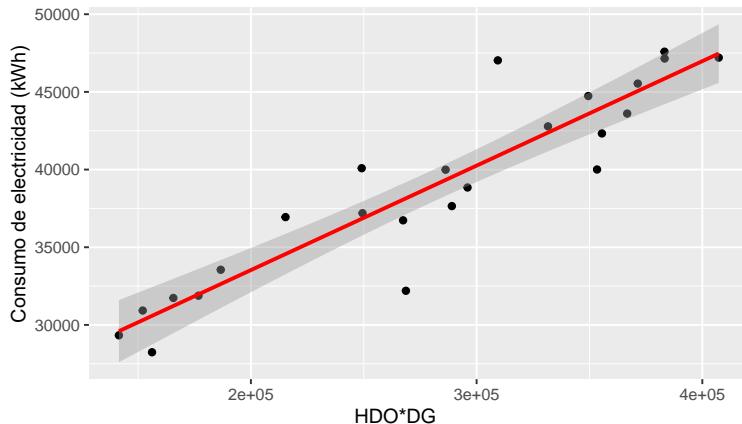


Figura 6.13: Gráfico de dispersión de energía vs producción (HDO*DG) (2018-2019).

te un análisis de regresión lineal, este puede considerarse como una línea base energética, a partir de la cual se puede monitorear y evaluar el desempeño energético de la entidad, como se muestra en la Figura 6.13.

La línea objetivo se obtiene utilizando el procedimiento de excluir del dominio los valores por encima de la línea de base y correlacionar solo aquellos puntos que representan buenas prácticas operativas por debajo de la línea de base. Nótese que los puntos rojos ahora se consideran para la correlación de la línea de meta, obteniendo un R^2 igual a 0.9194 en los años 2018-2019. Todo esto se muestra en la Figura 6.14.

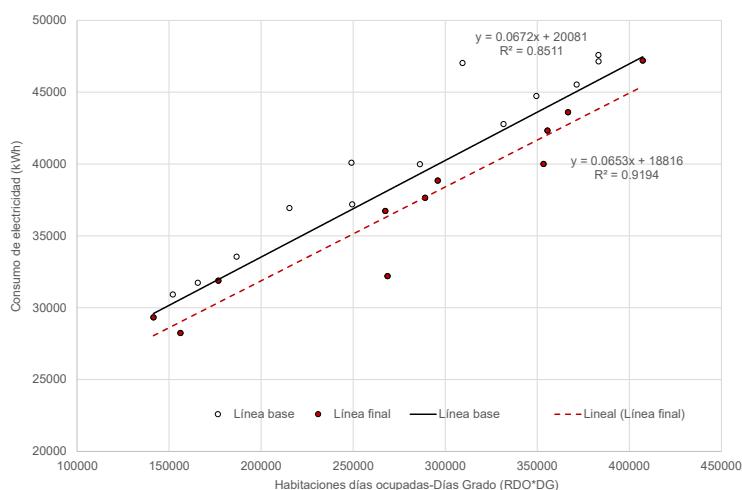


Figura 6.14: Línea base y línea objetivo de consumo de energía vs HDO*DG (2018-2019).

Para conseguir una mejora en la correlación del gráfico anterior se filtró el 8.33 % de los datos. Para lo cual se obtuvo una nueva línea base y a su vez la línea meta correspondiente para este caso:

- La línea base de energía tiene una ecuación y correlación $R^2 = 0.93$;
- La línea de meta tiene una ecuación y correlación $R^2 = 0.97$;
- Con la línea de meta obtenida se observa una mejora en la correlación de los datos y una disminución del 5.3 % en la energía no asociada al proceso, con un ahorro de energía de 1 088 kWh.

These results can be seen in Figure 6.15, which coincide with those obtained by [138].

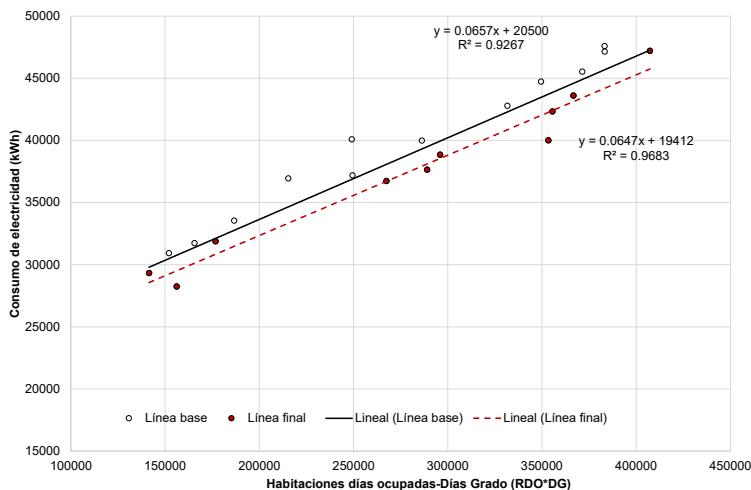


Figura 6.15: Línea base y línea objetivo correspondientes a los datos filtrados de consumo de energía vs. HDO*DG (2018-2019).

Como se muestra en la Figura 6.15, el valor de correlación (R^2) de la línea de meta de energía es aproximadamente 0.97; es posible incorporar esta línea de meta como línea base energética futura del Hotel.

Indicador de desempeño energético.

El indicador de desempeño objetivo se obtuvo de esta línea objetivo [143], que se muestra en la Figura 6.16.

Se identificaron necesidades de capacitación en la implementación y operación, se definió el plan y se estableció un registro. Además, la organización logró brindar información sobre su SGEN: desempeño energético, ahorros o desvíos, logros por área o procesos, y se implementó un proceso que permite a cualquier persona que trabaje para o en nombre de, la organización realizar comentarios o sugerencias para la mejora del SGEN.

Verificación del Indicador de Desempeño Energético mediante un Análisis Multivariable.

El método de regresión lineal multivariable (Y = Electricidad El consumo (kWh), X_1 = DG y X_2 = HDO) se ha utilizado para desarrollar EnB y EnPI y reportar

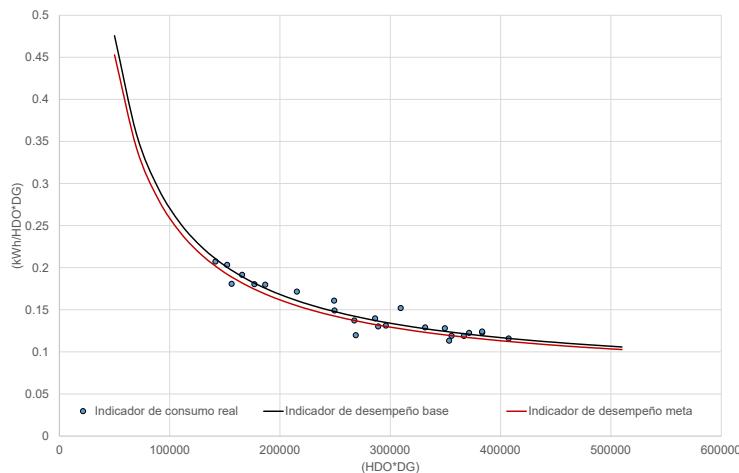


Figura 6.16: Indicador de desempeño energético (2018-2019).

el R cuadrado valor así como valores p . En este caso, el EnB se obtiene como $Y = aX_1 + bX_2 + c$.

En la Tabla 6.4 se muestran las variables a analizar y a su vez los resultados que muestran la significancia de estas variables para el modelo de regresión multivariable propuesto, donde estas variables tienen una alta significancia en este modelo.

Variables	Coeficientes	Típico	Error típico	Probabilidad Estadística	Más bajo 95 %	Superior 95 %
Y	7,429.18	3,268.78	2.27	0.03	631.39	14,226.98
X_1	8.89	2.20	4.04	0.0006	4.32	13.46
X_2	90.51	6.68	13.56	7.45 10^{-12}	76.63	104.40

Tabla 6.4: Parámetros de análisis del método de regresión lineal múltiple.

En la Tabla 6.5 se muestran los indicadores del análisis de regresión lineal multivariable, donde se puede observar, entre otros, el coeficiente de determinación, que alcanza un valor de 0.90. d

La Figura 6.17 muestra la relación entre la variable dependiente versus el percentil simple, y en esta relación se puede observar un comportamiento casi lineal, lo que significa que el modelo propuesto se ajusta a los datos analizados, obteniendo la siguiente ecuación de el modelo $y = 7,429.18412 + 8.888X_1 + 90.51074X_2$.

Oportunidades de ahorro.

Las oportunidades de ahorro se realizan para brindar a la dirección hotelera soluciones para reducir el consumo de sus principales vectores energéticos;

Análisis de parámetros de la regresión	Valores
Coeficiente de correlación múltiple	0.95
R^2	0.90
R^2 tight	0.89
Error típico	2,016.58
Observaciones	24

Tabla 6.5: Estadísticas de regresión.

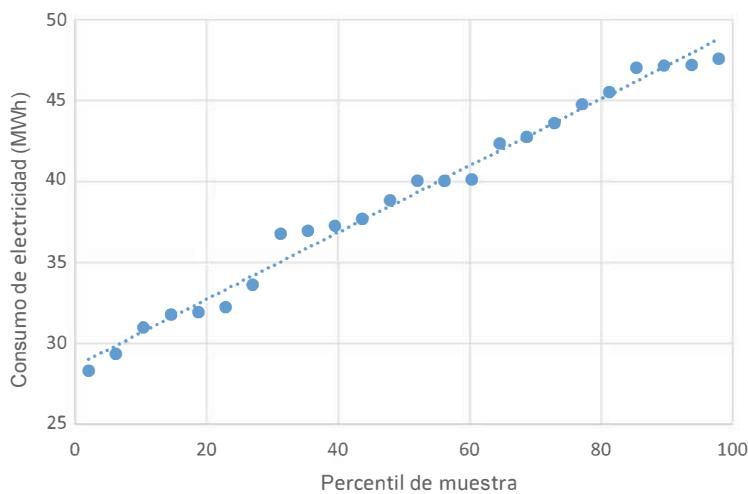


Figura 6.17: Indicador de desempeño energético (2018-2019).

en este caso nos centramos en la energía eléctrica, la mayor portadora que consume la instalación. De esta forma, el hotel aumentará su eficiencia y al mismo tiempo, sus beneficios.

Aire acondicionado

- Limpiar los evaporadores periódicamente. Verificar el correcto funcionamiento del sistema de deshielo;
- Limpiar los filtros del equipo de aire acondicionado semanalmente;
- Reducir las entradas de aire exterior sellando adecuadamente las puertas, utilizando brazos hidráulicos y reduciendo el tiempo de apertura de las puertas mediante medidas organizativas;
- Ajuste los termostatos en habitaciones con aire acondicionado a 24 °C;
- Apague el equipo de aire acondicionado en habitaciones vacías;
- Uso de cortinas en ventanas y puertas para reducir la ganancia de calor;

- g. La selección de las habitaciones, sin afectar la calidad del cliente, deberá priorizarse en aquellas habitaciones que tengan menor carga térmica dependiendo de la temporada, incluyendo una programación de las condiciones hoteleras que prioricen aquellas que tengan menor consumo, evitando de manera óptima el desperdicio de energía eléctrica ya que esta es la zona del hotel que más consume;
- h. Sustituye los Split comunes por aquellos con tecnología inverter, ya que estos son mucho más eficientes;
- i. Reemplazar los aires acondicionados del área de gestión por Split inverters según la capacidad requerida.

Iluminaria:

Aprovecha al máximo la luz natural, colocando papel translúcido en ventanas y puertas de cristal, dejando pasar la luz y rechazando el calor:

- a. Seccionar los circuitos de iluminación para compartimentar su uso;
- b. Ilumina puntos específicos en lugar de iluminar fondos;
- c. Pinte paredes, techos y columnas en colores claros;
- d. Bajar la altura de las lámparas;
- e. Cambiar las señales de salida de incandescentes a diodos emisores de luz (LED).

Motores eléctricos:

- a. Selección adecuada de motores eléctricos en bombas de suministro de agua de hoteles, principalmente en piscinas;
- b. Lograr los períodos más largos de operación del motor y su carga con la máxima eficiencia (75–95 % de su potencia nominal);
- c. Verificar reparaciones en motores rebobinados;
- d. Evaluar la sustitución de motores viejos o de uso intensivo por motores estandarizados de alta eficiencia;
- e. Mantener en buen estado los medios de transmisión de carga del motor, así como los cojinetes del motor.

Propuesta de Sustitución de Equipos.

Para aumentar la eficiencia energética y ahorrar electricidad, una posibilidad de reducir el consumo de energía es la sustitución de luminarias fluorescentes por luminarias LED [144, 145, 146]. Este estudio se realizó para reemplazar la iluminación de las áreas exteriores del hotel, las cuales cuentan con 80 focos marca Illumenova (CFL, 15 W, 6500 k, $\frac{120V}{60Hz}$, E27). La propuesta es sustituirlas por bombillas de la marca Gedeme (bombillas LED, E27, 9 W) que se venden a nivel nacional en comercios mayoristas.

La vida útil de la bombilla de la marca Gedeme:

- $50,000 \text{ h} / 365 \text{ días} (12 \text{ horas de trabajo por día}) = 50,000 \text{ h} / (365 \times 12) = 11 \text{ años}$. Ingresos: Los ingresos están dados por el ahorro que aportan las nuevas bombillas instaladas, las cuales tienen un valor de $18.5 \frac{\text{USD}}{\text{año}}$. Gastos: Necesitas comprar un total de 80 bombillas marca Gedeme que costarían 32 USD;
- La tasa de interés utilizada es del 8 %, establecida por la Dirección General del Tesoro del Banco Central de Cuba en las Circulares 5/2011 y 2/2012;
- El impuesto a la renta es del 35 %, según el artículo 97 de la Ley 113 publicada en el Diario Oficial N° 053 Ordinario del 21 de noviembre de 2012;
- El resultado del procesamiento se muestra en la Figura 6.18, donde se puede observar desde el año 0 hasta el segundo año y los resultados finales a alcanzar en el undécimo año de funcionamiento de los focos.

La representación gráfica de los Indicadores Económicos de la evaluación económica del reemplazo de focos en el hotel se da en la Figura 6.18.

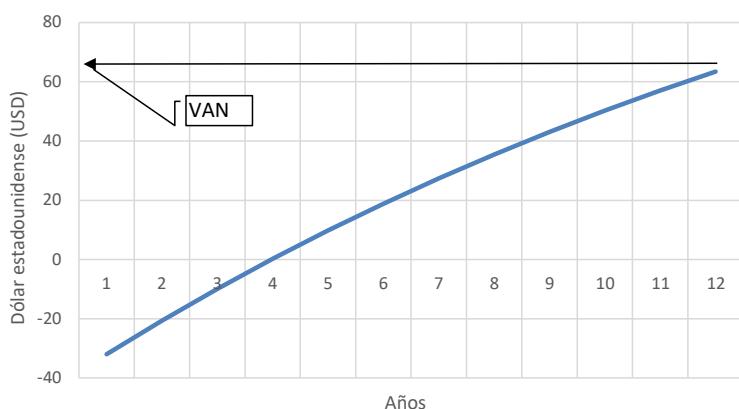


Figura 6.18: Evaluación económica del reemplazo de luminaria.

En definitiva, la inversión tiene una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 28 %, un Valor Actual Neto (VAN) de 71.5 dólares y un Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) de 3.6 años.

6.2. Dimensionamiento y optimización del SSFV.

Para el dimensionamiento y optimización del SSFV se pasaron varias fases entre las cuales los puntos del 2 al 6 de la Metodología propuesta, consultar Figura 5.1.

6.2.1. Análisis Estructural del sitio

Para el análisis estructural del sitio se realizó una revisión visual junto con un equipo de arquitectos e ingenieros civil, se tomaron en cuenta los siguientes parámetros del lugar.

1. Carga del viento: Estos factores son cruciales para determinar la resistencia y estabilidad del edificio frente a condiciones climáticas extremas. Los paneles solares agregarán carga adicional al techo, por lo que es esencial calcular cómo esto afectará la carga total que la estructura debe soportar.
2. Carga muerta y carga viva: La carga muerta se refiere al peso permanente de la estructura y los materiales de construcción, mientras que la carga viva se refiere a las cargas temporales, como personas y mobiliario. La instalación de paneles solares añadirá carga muerta adicional al techo, lo que debe ser tenido en cuenta en el diseño estructural.
3. Capacidad de carga del techo: Se debe evaluar la capacidad de carga del techo para determinar si puede soportar el peso adicional de los paneles solares. Esto implica considerar el tipo de techo, la calidad de la construcción, y cualquier refuerzo que pueda ser necesario.
4. Distribución de carga: Es importante considerar cómo se distribuirá la carga de los paneles solares sobre la estructura del techo. Esto puede variar dependiendo del tipo de panel solar y del método de instalación.
5. Tipo de paneles solares y soportes: Los diferentes tipos de paneles solares (por ejemplo, fotovoltaicos o térmicos) tienen diferentes pesos y requisitos de instalación. Además, los soportes utilizados para fijar los paneles al techo deben ser adecuados para la estructura y cumplir con los estándares de seguridad.
6. Impacto en la integridad estructural: Se debe evaluar cómo la instalación de paneles solares afectará la integridad estructural del edificio a largo plazo. Esto implica considerar posibles tensiones, deformaciones y otros efectos que puedan surgir debido a la instalación de los paneles.
7. Reglamentos y normativas locales: Es crucial cumplir con los códigos de construcción locales y cualquier normativa específica relacionada con la instalación de paneles solares. Esto puede incluir requisitos de carga, distancias de seguridad, y permisos necesarios.

Luego de esta revisión se tomó como conclusión que la edificación soporta la carga e instalación del SSFV.

6.2.2. Resultados del cálculo del soporte a utilizar

La Figura 6.19 muestra la aplicación de cargas de viento en SAP2000, donde la carga distribuida de succión se representa con valores negativos en la dirección del viento en el eje X positivo. Esta representación visual ilustra cómo se modela la influencia del viento por succión en la estructura.

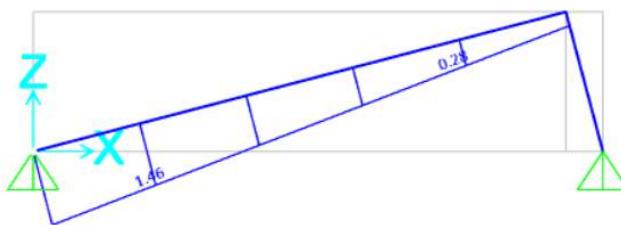


Figura 6.19: Carga de viento aplicada.

El análisis estructural realizado en SAP2000 ha permitido obtener las reacciones en los apoyos de la estructura como respuesta a las cargas aplicadas. La Figura 6.20 muestra las reacciones generadas por la carga muerta, es decir, el peso propio de la estructura, mientras que la Figura 6.20 presenta las reacciones debidas a la carga de viento. Estas reacciones se han descompuesto en sus componentes verticales y horizontales, lo que ha posibilitado evaluar la estabilidad y el equilibrio general de la estructura. El desglose de las reacciones en estos ejes principales es fundamental para garantizar que la estructura sea capaz de resistir y transmitir adecuadamente las solicitudes a los elementos de apoyo.

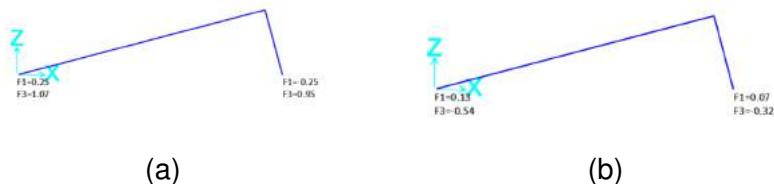


Figura 6.20: Reacciones de apoyo: (a) Carga muerta y (b) Carga del viento.

El programa ha generado la Figura 6.21 que representan la forma deformada de la estructura bajo la acción de las cargas aplicadas. Estas visualizaciones permiten identificar las zonas que experimentan los mayores desplazamientos y deformaciones. Los valores máximos de deformación obtenidos se

encuentran en el rango de [valor mínimo] a [valor máximo], lo cual se considera aceptable de acuerdo a los criterios establecidos en la normativa vigente. Por otro lado, se ha analizado el comportamiento de la losa ante fenómenos de succión, los cuales pueden generar deformaciones y tensiones internas en la estructura. Los resultados obtenidos muestran que los valores de deformación por succión se mantienen dentro de los límites permisibles establecidos en los códigos de diseño aplicables.

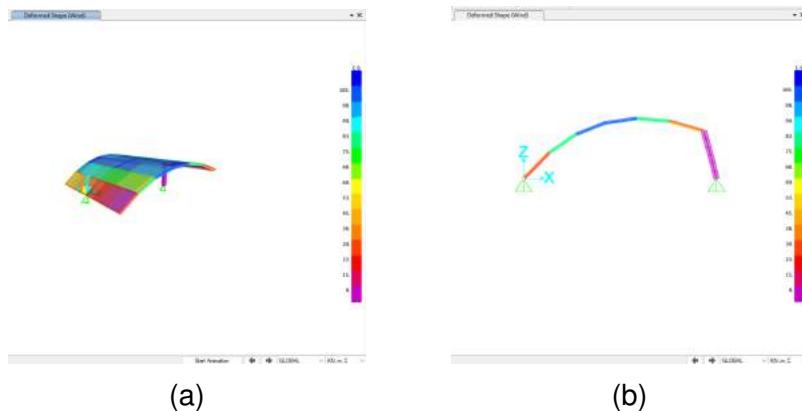


Figura 6.21: Análisis de deformación crítica del soporte: (a) Vista 3D y (b) Vista lateral.

6.2.3. Análisis de las variables climatológicas del sitio donde se encuentra la edificación

El hotel Punta la Cueva descrito anteriormente posee características caribeñas ya que se encuentra en el centro sur de Cuba a continuación se muestra una imagen tomada del software PVsyst 7.3 donde se da a conocer todas las características climatológicas, ubicación y un mapeo del comportamiento del sol ver Figuras 6.22.

6.2.4. Clasificación de las áreas del lugar y estudio de sombras

La Figura 6.23 muestra cómo varía la incidencia de la radiación solar a lo largo del día, teniendo en cuenta la trayectoria del sol y los obstáculos presentes. En la figura, se destacan en color marrón las áreas con condiciones óptimas para la instalación del SSFV, así como las zonas recomendadas para la colocación de los paneles. Este análisis ha permitido identificar la mayor área disponible para maximizar la eficiencia del sistema, minimizando la incidencia de sombras sobre los PV.

Como conclusión el sitio posee características ideales de irradiación y calidad del aire, donde al mismo tiempo hay niveles altos de humedad relativa y

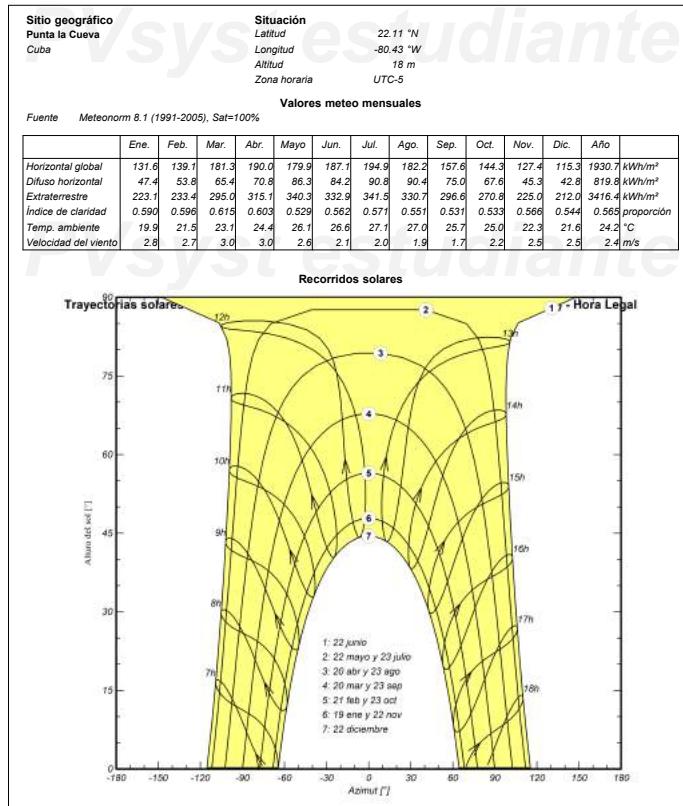


Figura 6.22: Análisis de variables climatológicas.

temperatura las cuales aumentan el nivel de radiación difusa la cual es menos aprovechada por los módulos solares y las altas temperaturas afectan la eficiencia del sistema ya que aumenta la resistencia de los conductores y disminuye también la generación de electricidad.

6.2.5. Diseño del SSFV

Según las características analizadas de consumo de la instalación, variables meteorológicas y estudios de sombras se inició con la selección de los módulos a utilizar, el diseño de los soportes para los mismos y por último el dimensionamiento y optimización del SSFV.

Características del módulo fotovoltaico

PERC Monocristalino MEDIO CORTE (550Wp) Los módulos solares Mono

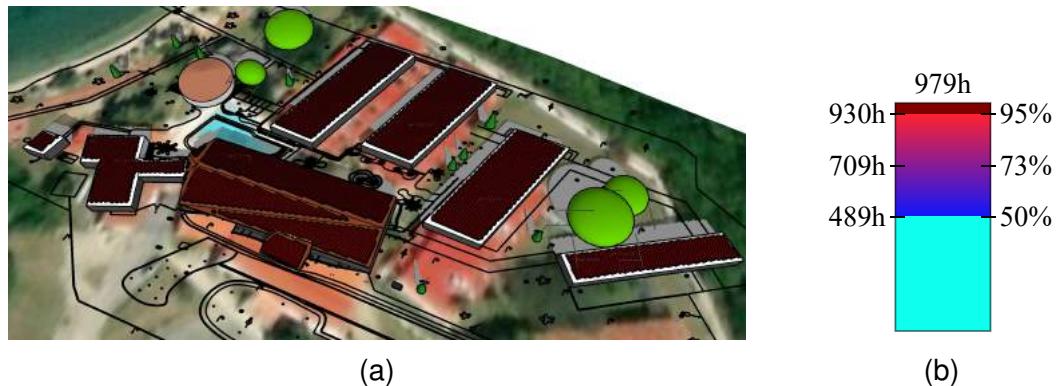


Figura 6.23: Estudio de sombras realizado sobre el modelo tridimensional: (a) Malla representativa de las horas solares producidas en los tramos de cubierta de interés y (b) Escala correspondiente al estudio de sombras.

PERC de medio corte contienen células solares que se dividen por la mitad, lo que hace que tengan un mejor rendimiento y durabilidad. Los principales beneficios de este tipo de celdas son que a nivel de rendimiento pueden aumentar la eficiencia del panel en algunos puntos porcentuales, además de tener mejores cifras de producción, son más pequeñas y tienen más resistencia a la rotura. Lo que pasa con las células más pequeñas es que tienen tensiones mecánicas reducidas, lo que les permite tener menos posibilidades de romperse. Este tipo de paneles tienen un mayor rendimiento y son más fiables que los paneles solares convencionales. Las celdas medio cortadas pueden resistir los efectos de la sombra más que los paneles solares tradicionales debido a los métodos de cableado utilizados para conectar la celda medio cortada dentro del panel. Este módulo posee características ideales para climas húmedos, fuertes vientos y tormentas, ver Figura 6.24 .

Diseño del soporte para los módulos del SSFV

Análisis y optimización del arreglo fotovoltaico

El objetivo de este apartado es realizar un análisis de todas las variantes según el azimut que puede tener este SSFV. Para ello, se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

- Detectar las áreas disponibles.
- Seleccionar los módulos y soportes a utilizar.
- Se realizaron 360 simulaciones en el software SketchUp 2023, con su enlace en Skelion, para detectar la cantidad de módulos y espacios entre ellos que pudieran ocupar de la mejor forma posible el área disponible.

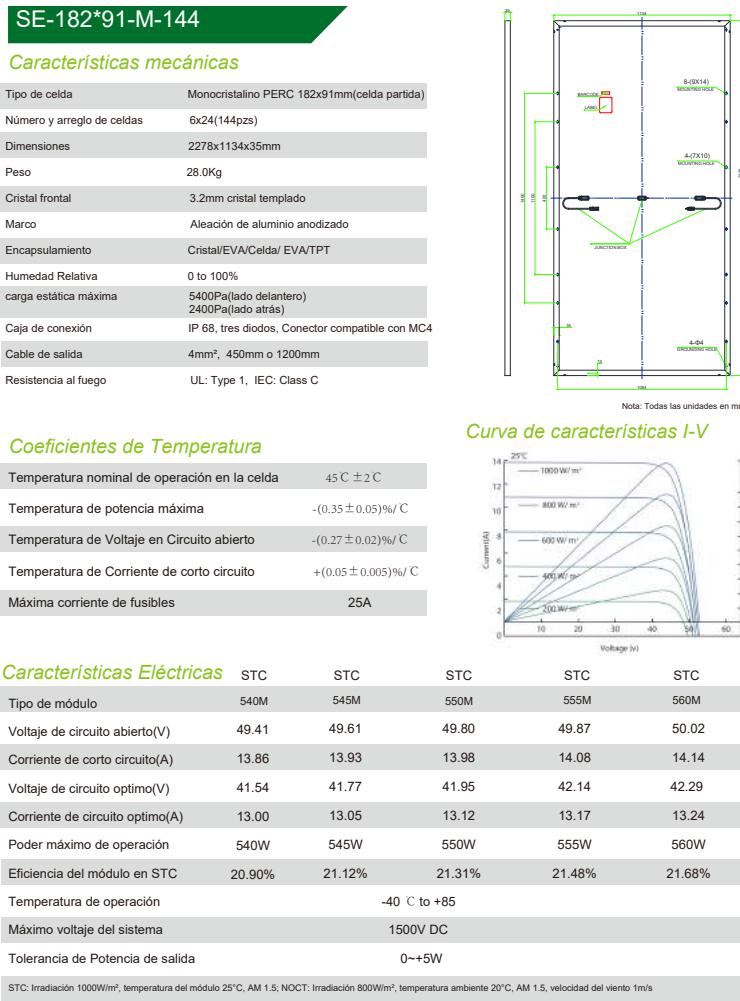


Figura 6.24: Características técnicas del módulo seleccionado.

- Se realizaron 360 simulaciones en PVsyst 7.3 con el objetivo de ajustar el mejor arreglo eléctrico posible, seleccionando los inversores de la forma más conveniente.
- Luego se analizaron detalladamente estos datos obtenidos.
- Se estimó un modelo que describiera dicho proceso con ayuda de machine learning y se analizó estadísticamente. Después de su validación, se realizó el proceso de optimización.
- Por último, se propuso el mejor arreglo según nuestro estudio.

Análisis de resultados

La Tabla 6.25 presenta los resultados obtenidos en las simulaciones. Se observó que las orientaciones más favorables fueron suroeste y nordeste, las

cuales ofrecen las mejores eficiencias, una mayor cantidad de módulos y en consecuencia, una producción más alta. Ambas orientaciones muestran resultados similares en términos de beneficios. Por otro lado, las orientaciones noroeste y sureste presentan resultados negativos similares entre sí. La orientación sur no muestra la relación deseada entre las variables, lo que resalta la importancia de utilizar modelado y optimización en lugar de depender únicamente de la normativa que favorece solo la orientación sur.

	Cantidad de Paneles	area ocupada	Produccion (kwh/year)	Grados	PR
0	699	1806	699693	0	91.56
1	706	1824	706320	1	91.49
2	706	1824	706320	2	91.49
3	706	1824	706312	3	91.49
4	712	1839	713618	4	91.64
5	702	1813	699968	5	91.21
6	702	1813	700170	6	91.24
7	699	1806	700369	7	91.67
8	700	1808	701345	8	91.67
9	698	1803	699231	9	91.68
...
351	710	1834	711901	351	91.74
352	703	1816	703739	352	91.73
353	700	1808	701745	353	91.73
354	699	1806	700787	354	91.73
355	701	1811	702914	355	91.73
356	706	1824	708122	356	91.74
357	723	1868	725673	357	91.74
358	714	1844	716447	358	91.74
359	723	1868	725739	359	91.74
360	699	1806	701032	360	91.74

Figura 6.25: Análisis de datos.

Se utilizó el siguiente seudocódigo de machine learning para realizar estudios de correlación entre las variables en tres fases: primero, el análisis de los 360 grados; segundo, los primeros 180 grados; y tercero, los últimos 180 grados. De esta manera, se puede valorar y realizar una revisión más precisa y detallada del comportamiento de las mismas:

1. Importar bibliotecas necesarias (pandas, numpy, matplotlib, seaborn, sklearn).
2. Definir la función '*perform – analysis*' que realiza el análisis de datos:
 - a. Imprimir los datos cargados.
 - b. Calcular y graficar la matriz de correlación entre variables.
 - c. Separar las características (X) y la variable objetivo (y).
 - d. Inicializar un modelo de regresión lineal sin término independiente.
 - e. Entrenar el modelo con los datos.
 - f. Obtener los coeficientes del modelo.
 - g. Imprimir los coeficientes del modelo.
 - h. Definir e imprimir la ecuación del modelo.
 - i. Realizar predicciones con el modelo.
 - j. Calcular y imprimir el valor de R^2 .
 - k. Graficar los datos reales y predichos.
 - l. Graficar la ecuación del modelo.

3. Cargar los datos desde un archivo CSV.
4. Dividir la columna de Producción (kWh/year) entre 1000.
5. Realizar el análisis para todos los datos llamando a `perform-analysis(df)`.
6. Realizar el análisis para los primeros 180 datos llamando a `perform-analysis(df - first - 180)`.
7. Realizar el análisis para los últimos 180 datos llamando a '`perform-analysis(df - last - 180)`'.

Análisis de los 360 grados

La Figura 6.26 muestra la correlación entre cada una de las variables que participan en la investigación.

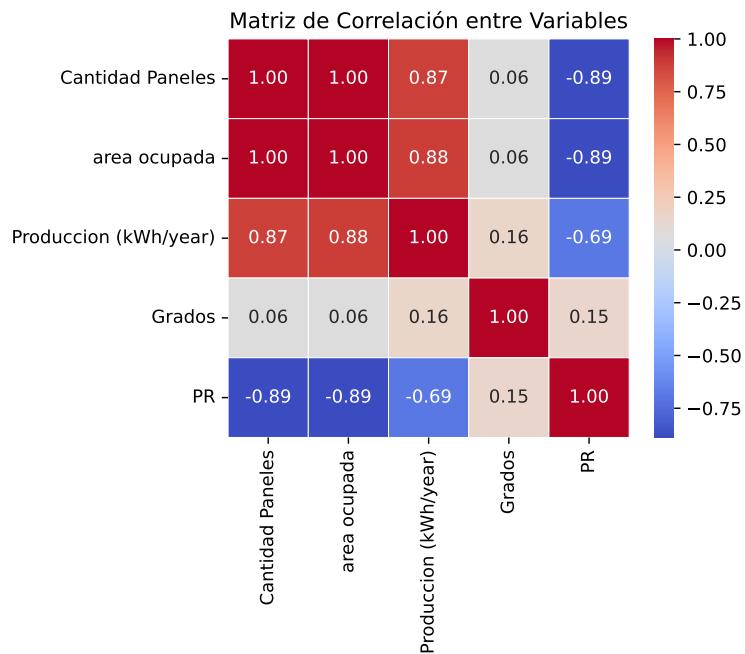


Figura 6.26: Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio.

El gráfico anterior muestra una correlación por encima de los parámetros permitidos con un R^2 mayor que 0.80 entre las variables menos las que se relacionan con los grados que se encuentra por debajo de 0.15. Son resultados esperados ya hay una relación directa entre la producción y el número de paneles solares y a su vez el área ocupada depende directamente de la cantidad de módulos.

Se realizó un análisis de regresión lineal multivariable para buscar un modelo que describa el comportamiento del dimensionamiento. Donde se obtuvieron los siguientes resultados, ver Figura 6.27:

Coeficientes del modelo:

- Intercepto: 0.0
- Coeficiente X1: 0.1464
- Coeficiente X2: 0.1062
- Coeficiente X3: 0.0162
- Coeficiente X4: 4.3208

Ecuación del modelo:

$$y = 0.0 + (0.1464 * X1) + (0.1062 * X2) + (0.0162 * X3) + (4.3208 * X4) \quad (6.1)$$

Valor de R^2 : 0.79

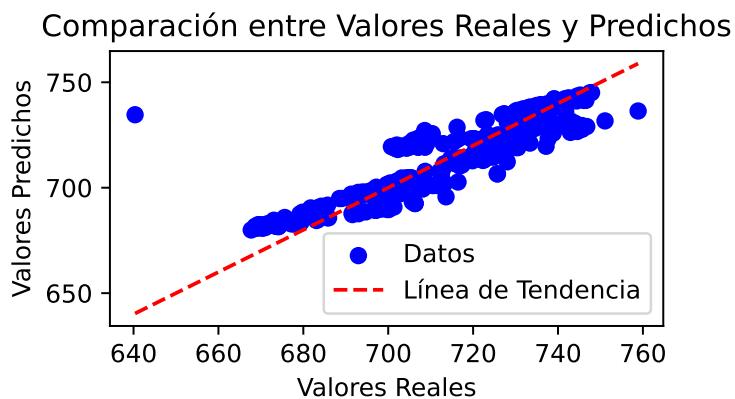


Figura 6.27: Gráfico de correlación de los 360 grados.

El modelo tiene un buen ajuste aceptable, ya que el valor de R^2 es relativamente alto, lo que sugiere que las variables predictoras están proporcionando una buena explicación de la variabilidad en la variable dependiente, pero el mismo nos deja un margen de error alto aún.

Análisis de los primeros 180 grados

La Figura 6.28 muestra la correlación entre cada una de las variables que participan en la investigación pero en este caso se analizó desde 0 grados hasta 180 grados.

El gráfico anterior muestra una correlación por encima de los parámetros permitidos con un R^2 mayor a 0.80 entre todas las variables, el análisis posee un comportamiento lineal de ahí la buena correlación y un comportamiento estables y creciente.

Se realizó un análisis de regresión lineal multivariable para buscar un modelo que describa el comportamiento del dimensionamiento. Donde se obtuvieron los siguientes resultados, ver Figura 6.29:

Coeficientes del modelo:

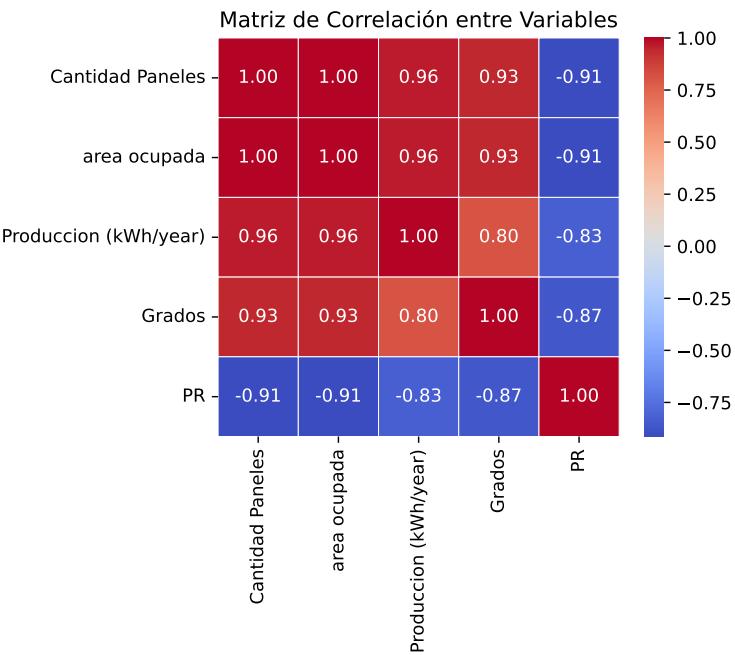


Figura 6.28: Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio, desde 0 grados hasta 180 grados.

- Intercepto: 0.0
- Coeficiente X1: 3.1102
- Coeficiente X2: -0.9018
- Coeficiente X3: -0.3604
- Coeficiente X4: 1.7391

Ecuación del modelo:

$$y = 0.0 + (3.1102 * X1) + (-0.9018 * X2) + (-0.3604 * X3) + (1.7391 * X4) \quad (6.2)$$

Valor de R^2 : 0.9851

El modelo tiene muy bien ajuste, ya que el valor de R^2 indica que aproximadamente el 98.51 % de la variabilidad en la variable de respuesta es explicada por el modelo de regresión lineal.

Análisis de 180 a 360 grados

La Figura 6.30 muestra la correlación entre cada una de las variables que participan en la investigación pero en este caso se analizó desde 180 grados hasta 360 grados.

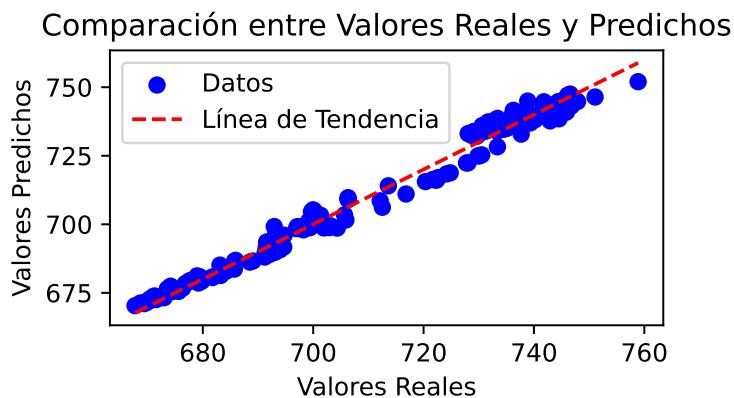


Figura 6.29: Gráfico de correlación, datos desde o grados hasta 180 grados.

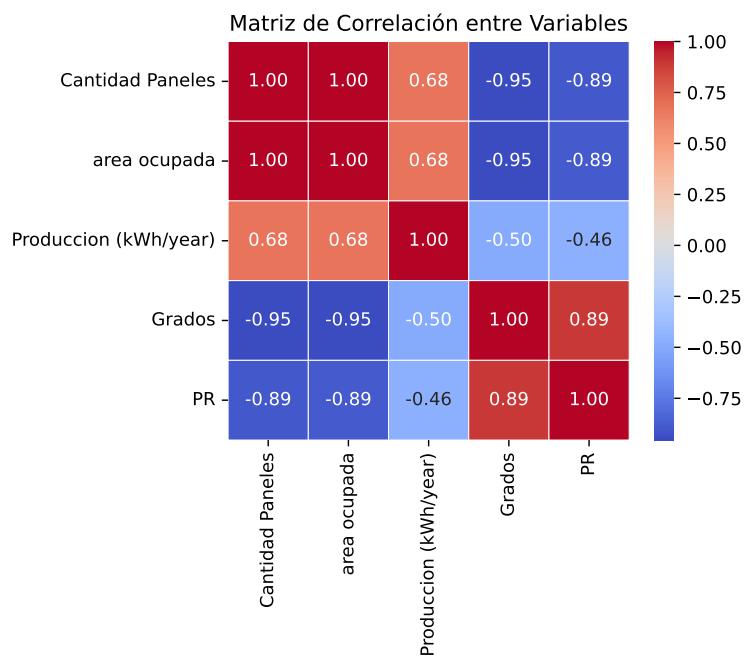


Figura 6.30: Mapa de calor de correlación entre las variables de estudio, 180 a 360 grados.

El gráfico anterior muestra una correlación por encima de los parámetros permitidos con un R^2 menor a 0.50 entre las variables Producción-Grados y Producción-PR; menor a 0.68 entre las variables Producción-Cantidad de paneles y Producción-Área ocupada; todas las demás se encuentran por encima del 0.80 , el análisis posee un comportamiento lineal y creciente con algunos valores atípicos como se ven en el gráfico de la Figura 6.29.

Se realizó un análisis de regresión lineal multivariable para buscar un modelo que describa el comportamiento del dimensionamiento. Donde se obtuvieron los siguientes resultados, ver Figura 6.29:

Coeficientes del modelo:

- Intercepto: 0.0
- Coeficiente X1: 0.7963
- Coeficiente X2: -0.0151
- Coeficiente X3: 0.4050
- Coeficiente X4: 0.3856

Ecuación del modelo:

$$y = 0.0 + (0.7963 * X1) + (-0.0151 * X2) + (0.4050 * X3) + (0.3856 * X4) \quad (6.3)$$

Valor de R^2 : 0.69

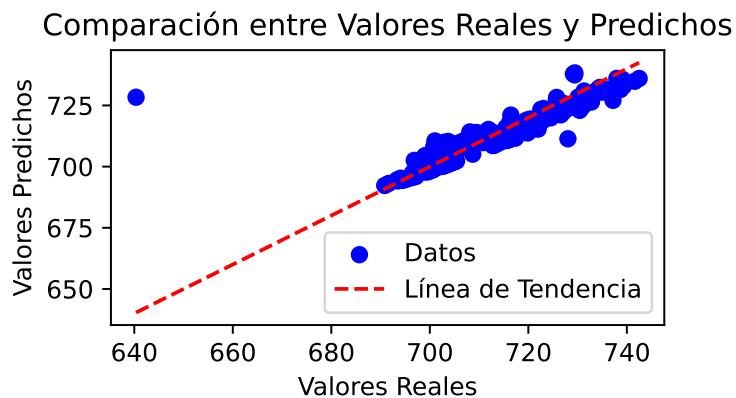


Figura 6.31: Gráfico de correlación, datos desde 180 grados hasta 360 grados.

El modelo tiene un ajuste aceptable, ya que el valor de R^2 indica que aproximadamente el 69 % de la variabilidad en la variable de respuesta es explicada por el modelo de regresión lineal. Esto se debe a los valores atípicos que posee debido a las características del posicionamiento de la instalación. Ángulos como estos no favorecen el dimensionamiento y aprovechamiento del área.

Proceso de optimización

Para el proceso de optimización, se implementó un algoritmo genético con el objetivo de encontrar el máximo del modelo diseñado que describe los datos. La condición establecida fue una eficiencia mayor al 91.56 %, además de buscar una combinación que maximizara tanto la producción como el área ocupada en relación con el ángulo azimutal, tomando como referencia los análisis previos. A continuación, se describe el pseudocódigo utilizado.

La Figura 6.32 describe el comportamiento y modela los datos obtenidos en las simulaciones de los softwares que poseen eficiencias iguales o superiores

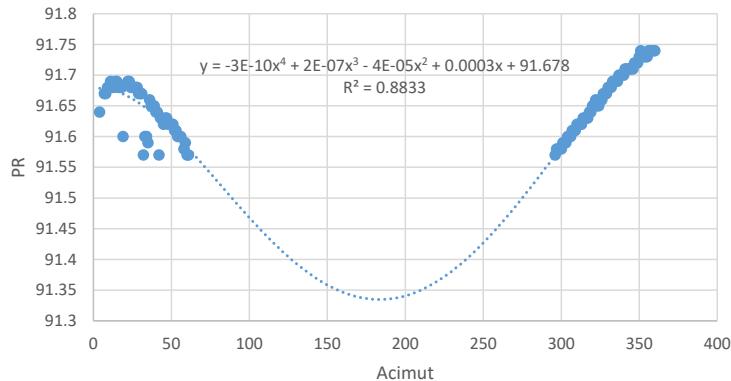


Figura 6.32: Gráfico de correlación, datos con eficiencias (PR) mayor a 91.56.

a la ubicación normada en el hemisferio norte hacia el sur, la cual es un objetivo de mejora.

Este código implementa un algoritmo genético para la optimización de una función objetivo. Aquí la descripción del mismo:

Funciones definidas:

1. POBLACION_INICIAL: Genera una población inicial de soluciones aleatorias dentro de los límites especificados.
2. OPERADOR_CRUCE: Realiza el cruce de individuos de la población, generando nuevos individuos a partir de la combinación de características de dos individuos seleccionados aleatoriamente.
3. OPERADOR_MUTACION: Aplica mutaciones aleatorias a los individuos de la población, introduciendo variabilidad genética en la población.
4. OBJETIVO_V1: Calcula el valor de la función objetivo para cada individuo de la población. En este caso, la función objetivo es una función cúbica específica.
5. SELECCION_V1: Realiza la selección de los individuos para la siguiente generación basándose en el valor de la función objetivo. Se prefieren los individuos con valores de función objetivo más altos.

Parámetros del algoritmo:

- G: Número de generaciones.
- mu: Tamaño de la población.
- límites: Límites para la generación de números aleatorios.
- var: Desviación estándar para la mutación.

Inicialización de variables:

Se inicializan arrays para almacenar la población actual (x_p), la población cruzada (x_c), la población mutada (x_h), así como los valores de la función objetivo para la población actual (y_p) y la población mutada (y_h).

Ejecución del algoritmo:

Se genera una población inicial utilizando la función POBLACION_INICIAL. Luego, se itera a través de un número fijo de generaciones (G). En cada generación, se realizan operaciones de cruce, mutación y evaluación de la población actual y mutada. Finalmente, se seleccionan los individuos para la siguiente generación basándose en el valor de la función objetivo.

Resultado:

Se muestra la mejor solución encontrada (x_p) y su valor de función objetivo correspondiente (y_p).

La Figura 6.33 muestra el resultado de la optimización, donde se selecciona un máximo en la función modelada del comportamiento del dimensionamiento de SSFV. En este caso, se presentan las variables de acimut y producción de energía anual en corriente alterna. Para validar estos resultados, se llevó a cabo un análisis de la función y los datos, y se compararon con el resultado obtenido. Como argumento, se llevará a cabo el dimensionamiento final en SketchUp 2023 y PVsyst 7.3. Ambos programas proporcionarán los valores finales, tomando como referencia los resultados del algoritmo.



```
C:\Users\Jose\OneDrive\Escritorio\bioinsp>runfile('C:/Users/Jose/OneDrive/Escritorio/bioinsp/mainV2.py', wdir='C:/Users/Jose/OneDrive/Escritorio/bioinsp')
Mejor solución encontrada:
x = 6.1506894580911
y = 91.67837804162963
In [205]:
```

Figura 6.33: Resultados de la simulación en Python 3.11.

La Figura 6.34 muestra el resultado de la optimización, donde se selecciona un máximo en la función modelada del comportamiento del dimensionamiento de SSFV. En este caso en los 6.15 grados la función converge y es donde seleccionamos el máximo local y le corresponde 91.68 % .

Validación de resultados

Para la validación y dimensionamiento final del SSFV se realizó un dimensionamiento es en el software SketchUp 2023, los resultados se simularán en el software PVsyst 7.3, en donde vamos a tener como resultados la cantidad de módulos, eficiencia del sistema, producción y disminución de emisiones de agentes contaminantes.

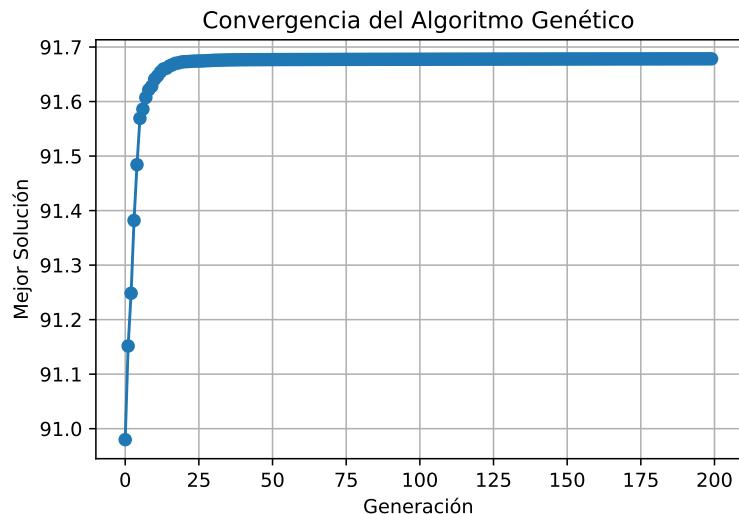


Figura 6.34: Convergencia del Algoritmo Genético.

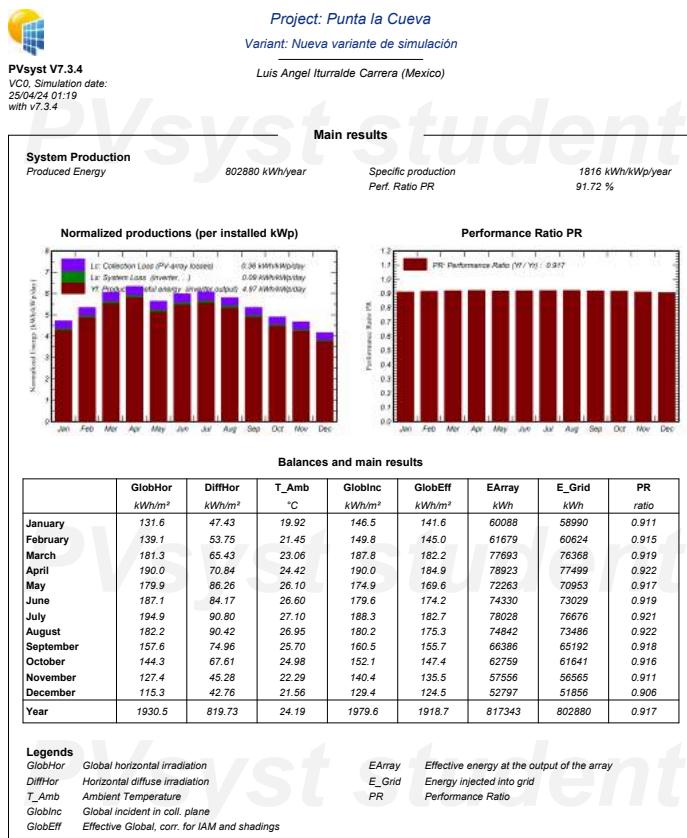
La Figura 6.35 muestra el dimensionamiento del SSFV luego de los resultados obtenidos con la IA. Para los ajustes, se decidió mantener y aprovechar al máximo el área de la edificación principal con orientación Norte-Sur. Para ello, se utilizó un sistema coplanar que mantiene las características del techo y se ajusta al área del mismo donde se aprovecha la mayor cantidad de espacio. El ángulo de inclinación utilizado es de 15 grados, lo cual está dentro del rango permisible en Cuba con respecto a la latitud. La eficiencia se compensa durante el dimensionamiento y la confección del arreglo fotovoltaico. Las demás áreas mantienen los ángulos definidos con el algoritmo genético.



Figura 6.35: Dimensionamiento del SSFV, software SketchUp 2023.

Después del análisis anterior, pasamos a realizar el dimensionamiento y el arreglo fotovoltaico en el software PVsyst 7.3 con el objetivo de analizar el sistema eléctrico, su eficiencia, pérdidas y generación de energía.

La Figura 6.36 muestra la generación anual del SSFV de $802\,880 \frac{kWh}{año}$ para 804 módulos y un PR medio de 91.72 %. En el análisis los meses más críticos en el PR son el primer y último trimestre del año debido a la baja irradiación en estos meses del año, lo que tiene una relación directa con la producción del sistema.



25/04/24

PVsyst Student License for Luis Angel Iturralde Carrera (Mexico)

Page 6/10

Figura 6.36: Análisis del SSFV (PR y generación anual), software PVsyst 7.3.

La Figura 6.37 muestra los cuatro arreglos utilizados y cómo se estructuran, con sus strings, cantidad de módulos, orientación, azimuth, producción y PR correspondientes. Se pudo observar que los arreglos con orientación optimizada poseen los mejores valores de PR, seguidos por los orientados hacia el Sur, y en última instancia, los orientados hacia el Norte y el arreglo con menos módulos. Esto demuestra la efectividad del algoritmo genético y la importancia de la selección de los inversores basada en sobredimensionamientos de hasta un 30 %, teniendo en cuenta rangos de trabajo y eficiencia de los mismos como referencia. Se destaca la importancia de los arreglos y los MPPT, lo cual permitió lograr una alta eficiencia del sistema en general.

La Figura 6.38 muestra las pérdidas del sistema y donde se desarrollan las mismas, en este caso se encuentran en la irradiación, calidad y tipo de módulo, arreglo e inversores; se tomó en cuenta las mismas en el desarrollo y dimensio-

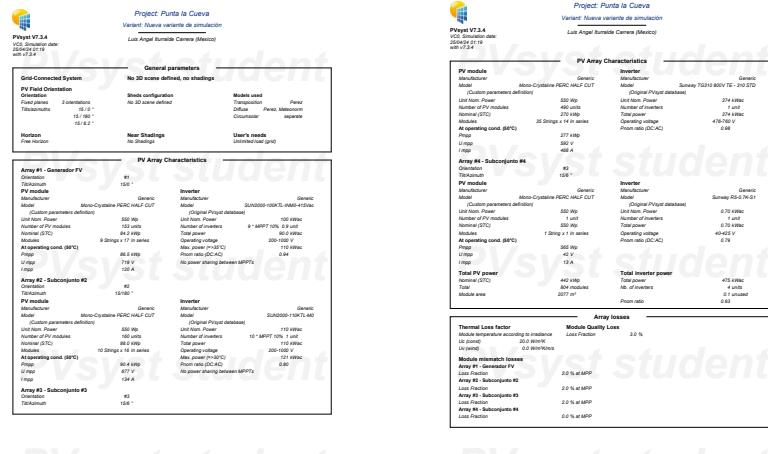


Figura 6.37: Arreglo fotovoltaico utilizado: (a) Arreglo 1, 2 y 3 y (b) Arreglo 4 y resumen del sistema.

namiento del SSFV, para lo cual se realizaron los ajustes mencionados anteriormente para lograr que las mismas fueran lo mínimo posible.

Análisis económico y medioambiental

Para la evaluación económica del proyecto se tendrán en cuenta los criterios dados por [147, 148, 149, 150].

El análisis económico depende de la propuesta *PVSS-EW* descrita anteriormente. El criterio de selección deriva de la composición integral de esta instalación, debido principalmente al número de elementos como módulos *PV* e inversores *PV* más significativo que la otra propuesta realizada. Como consecuencia de esta estructura, la propuesta incurre en el costo neto más alto, lo que la convierte en un candidato óptimo para facilitar un estudio de viabilidad económica en profundidad. El costo unitario asociado a la instalación *PV* como componentes *PV* y servicios de montaje y la magnitud de los términos financieros requeridos para la evaluación económica y el cálculo de los indicadores económicos se obtienen de los datos proporcionados por las empresas y las fuentes bibliográficas. Los montos económicos y sus orígenes o fuentes se exponen en cada uno de los parámetros utilizados en la evaluación económica.

La viabilidad económica de una inversión para instalar un *PVSS* se considera casi poco convencional en países como Cuba debido a las particularidades de sus estructuras económicas y mecanismos financieros. En consecuencia, se tomó la decisión estratégica de realizar análisis económicos duales. Uno de estos enfoques se basa en las implicaciones para la propia empresa. Este enfoque se llama enfoque de empresa. El segundo enfoque se centra en la conservación potencial de barriles de petróleo importados para la nación y se define en el

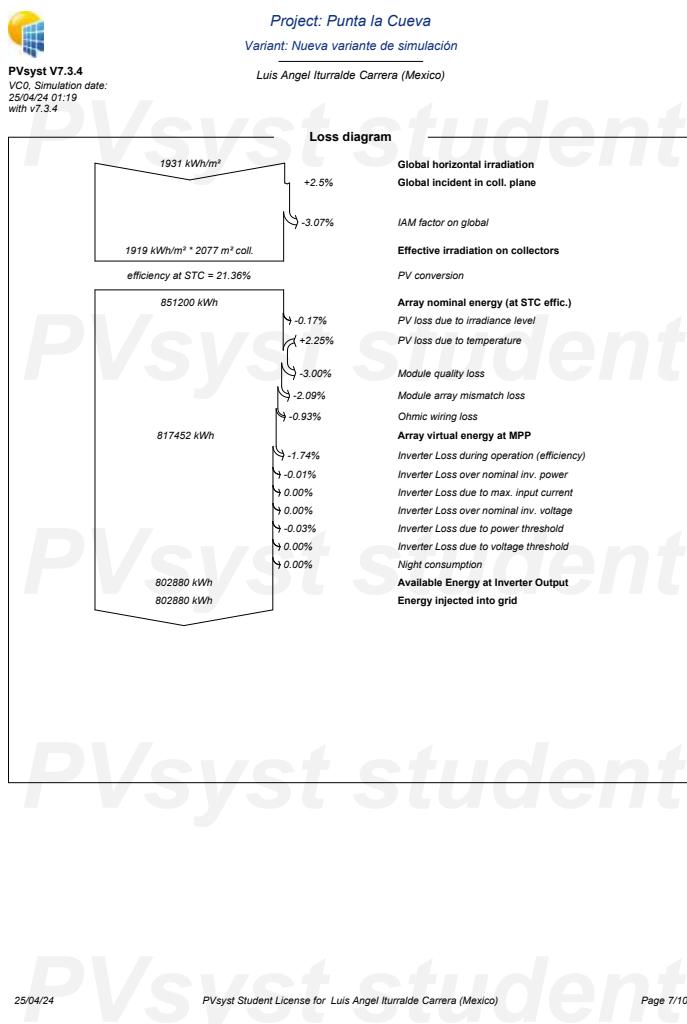


Figura 6.38: Diagrama de pérdidas del SSFV , software PVsyst 7.3.

presente estudio como un enfoque nacional.

Para este estudio se tomaron los mismos tipos de cambio del dólar americano (*USD*) respecto del peso cubano (*CUP*), el cual se rige por el Banco Central de Cuba por el siguiente cambio de tipo: 1 *USD* = 120 *TAZA*. También se facilitaron los datos de la tasa de descuento del 8%, la tasa de inflación del 5%, el margen de riesgo del 3% y el tipo impositivo del 35%. Para estos datos las referencias utilizadas son [151, 148].

Se tomó como referencia una correlación de las empresas Corey Solar (Méjico) y Alibaba (China) para los costos e instalación de los módulos, inversores y otros equipos *PV*. Los costos que se muestran a continuación incluyen instalación y son precios especiales por la cantidad de equipo:

- Cada módulo de 550 Wp costaría 60 *USD* por unidad, por lo que los 804

módulos tendrían un valor total de 48,240 *USD*.

- Los inversores cuestan 3,000 *USD* inversor de 100 kW (cantidad 2), 7,500 *USD* inversor de 274 kW (cantidad 1) y 75 *USD* inversor de 0.70 kW (cantidad 1), y para la instalación se necesitan 4 inversores por un valor de 10,575 *USD*.
- Mano de obra 0.02 *USD* el Wp, sería 442 kWp para un total 8,840 *USD*.
- Estructura 0.02 *USD* el Wp, sería 442 kWp para un total 8,840 *USD*.
- Material eléctrico 0.01 *USD* el Wp, sería 442 kWp para un total 4,420 *USD*.
- Para un total de 80,915 *USD*.

La evaluación económica de la propuesta debe considerar la cantidad de módulos a utilizar y las pérdidas del sistema. Con esos datos se puede evaluar cuánto se tomaría la producción diaria; como referencia, existe una media anual de 5 horas solares pico (*HSP*) en Cuba.

Para desarrollar la evaluación económica también es necesario conocer el pago de los *kWh* generados por el sistema *PV* proyectado y entregado al Sistema Electroenergético Nacional (*SEN*). Para ello se revisa el apartado segundo del Decreto Ley número 345 del Ministerio de Justicia de la República de Cuba. Esta ley establece: “Para la formación del precio de compra de la energía eléctrica se tiene en cuenta, entre otros elementos, el costo evitado de la generación eléctrica con combustibles fósiles”.

A través de intercambios con algunos colegas de la Oficina Nacional para el Control del Uso Racional de la Energía (*ONURE*), especialmente una entrevista a su director [152], en la que establecen como costo de referencia para la compra de electricidad producida en Cuba fuera del *SEN* de 1.5869 $\frac{\text{CUP}}{\text{kWh}}$. El resultado de la evaluación económica de la viabilidad económica del proyecto por parte de la empresa Corey Solar de México se muestra en la Figura 6.39.

Dada la situación económica existente en Cuba, producto de la dualidad monetaria, los márgenes de inflación elevados, el subsidio en la electricidad y otro servicios sociales, se aprecia en la figura anterior el comportamiento de la TIR de -10 % y el VAN de 20 000 *USD* por lo cual el proyecto se recupera en 17 años; si se toma en cuenta los futuros mantenimientos, roturas, depreciación y la disminución de la eficiencia del SSFV; lo cual indica que los ingresos no alcanzan cubrir los egresos, por ende, el proyecto no es rentable. Por lo que no se considera factible la incorporación de energía renovable en el país.

Evaluación económica a nivel de país

Los ingresos por concepto de ahorro de combustible están dados en la ecuación 6.4:

$$G_{comb} = E_{gelec} * \frac{365\text{día}}{\text{año}} * g_{espgelec} \quad (6.4)$$

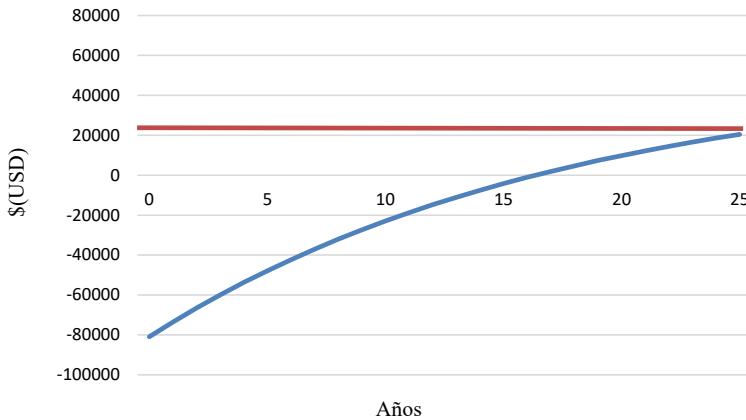


Figura 6.39: Análisis económico del SSFV.

Donde:

E_{gelec} - Energía eléctrica generada por el grupo electrógeno.

$g_{espglec}$ - Consumo específico del grupo electrógeno. Es considerado un valor de los equipos más modernos ($0.236 \frac{kg}{kWh}$) al no tener el valor real del equipo en funcionamiento.

Sustituyendo valores en la ecuación 6.5:

$$G_{comb} = \frac{2230 \frac{kWh}{día}}{\frac{día}{año}} \times \frac{365 \frac{día}{año}}{\frac{año}{año}} \times \frac{0.236 \frac{kg}{kWh}}{\frac{kWh}{año}} = 192\,092.2 \frac{kg}{año} \quad (6.5)$$

Considerando el valor de la densidad del diésel ($\rho_{diésel}$) de 850 kg/m^3 el flujo volumétrico de diésel es de $225\,990.8$ litros/año. El valor del litro de diésel para Cuba dado en la página web del sitio [153].

1 litro = 1 USD; 0.831 €

El ingreso por ahorro de combustible en USD es:

Ingreso ahorro diésel = $225,990.8$ litros/año * 1 \$USD/litro = $225,990.8$ USD/año

Análisis medioambiental

La Figura 6.40 muestra la cantidad de emisiones de agentes contaminantes que este SSFV aportaría para no emitirlas.

6.3. Discusión: Indicadores de desempeño energético.

Se realizó un análisis de correlación donde se demostró que la variable (HDO × DG) tiene una influencia significativa en el modelo de consumo energético del hotel ($R^2 = 0.97$). Otro punto novedoso de este trabajo es el uso de fuentes de energía renovables, lo que permitiría un ahorro de energía eléctrica, que es el vector energético que más consume la instalación, por lo que estaría influyendo

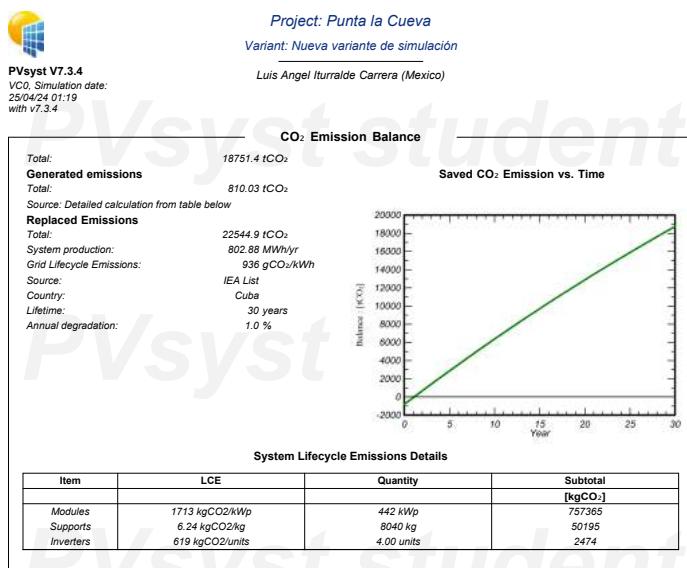


Figura 6.40: Diagrama y resultados del análisis medioambiental.

directamente en ello, como ocurre con el cambio de luminaria que supondría un ahorro económico. Todo ello contribuiría a la protección del medio ambiente y a la mayor competitividad del hotel.

La Tabla 6.6 muestra los resultados elegidos por otros autores en estudios similares variando el indicador de rendimiento energético.

En el caso de los hoteles no es tan fácil obtener un indicador energético. Las características constructivas del hotel, su ubicación geográfica, la calidad de los servicios y su tamaño son algunas de las variables que se tienen en cuenta a la hora de proponer un indicador de desempeño energético. En el caso del Caribe, además de esto, existe la posibilidad de contar con un hotel tipo tránsito, un turista que hace uso de sus servicios sin hospedarse directamente en el hotel. De esto se infiere que, en muchas ocasiones, el consumo energético presentado no tiene por qué estar directamente relacionado con el nivel de ocupación en

Indicador de rendimiento energético utilizado	Correlación obtenida (R^2)	Autor	Regresión lineal	Norma utilizada
$\frac{\text{kWh}}{\text{Personas}}$	-	[154]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{HDO}}$	0.51	[155]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{meses} \cdot \text{HDO}}$	0.65	[156]	simple	ISO 50001:2018
$\frac{\text{kWh}}{\text{meses}}$	0.67	[157, 138]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$	0.72	[158]	simple	ISO 50001:2018
$\frac{\text{kWh}}{\text{Grados días}}$	0.73	[159]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{DG}}$	0.77	[139]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{Ocupación Equivalente}}$	0.80	[137]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{HDO Equivalente}}$	0.90	[155]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{Día} \cdot \text{HDO}}$	0.91	[160]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{HDO} \cdot \text{DG}}$	0.92	[31]	simple	ISO 50001:2011
$\frac{\text{kWh}}{\text{E} \cdot \text{C} \cdot \text{A}}$	0.77	[161]	multiple	ISO 50001:2018
$\frac{\text{kWh}}{\text{DG} \cdot \text{HDO}}$	0.90	Nuestra investigación	multiple	ISO 50001:2018
$\frac{\text{kWh}}{\text{DG} \cdot \text{RDO}}$	0.97	Nuestra investigación	simple	ISO 50001:2018

Tabla 6.6: Análisis de los indicadores de desempeño energético más utilizados en la industria hotelera.

estancias que puede presentar.

La Tabla 6.6 presenta los niveles de correlación para diversos indicadores utilizados en hoteles, la correlación entre las variables más significativas que afectan el consumo de energía en las instalaciones hoteleras se verificó mediante dos métodos matemáticos. Cabe señalar que las mejores correlaciones R^2 se logran para aquellos que toman en cuenta los grados día en su análisis considerando el nivel de ocupación. Para el caso de estudio, se alcanza un nivel de correlación R^2 de 0.97 para $\frac{\text{kWh}}{\text{RDO} \cdot \text{DG}}$, después de filtrar algunos valores con comportamiento anómalo dentro de la muestra utilizada. El indicador establecido para el estudio es 0.1 $\frac{\text{kWh}}{\text{RDO} \cdot \text{DG}}$; Este valor del indicador de desempeño energético se conoce como EntPI crítico, es decir, siempre es recomendable que el hotel esté por debajo de este valor. Es, por tanto, un aporte necesario para que el

hotel tenga un valor que pueda caracterizar en un momento dado cómo se está comportando el hotel en términos de gestión energética.

6.4. Discusión: Optimización del SSFV.

Esta sección tiene como objetivo comparar las propuestas diseñadas en esta investigación con propuestas similares relacionadas con el campo de este estudio. Entre los factores que se compararán están la orientación del sistema, el lugar donde se realizó el estudio, la tecnología de los módulos *PV* utilizados, la cantidad de módulos *PV* utilizados, el área considerada para el estudio y el *PR* estimado. La Tabla 6.7 presenta los principales elementos que comparan los resultados alcanzados en esta investigación con los de otros estudios dentro del mismo campo.

Como se muestra en la Tabla 6.7 , la mayoría de los estudios adoptan una estrategia de orientación alineada con la latitud de sus respectivas ubicaciones (hemisferio norte hacia el sur, y viceversa para el hemisferio sur). En la mayoría de los casos, el ángulo de inclinación ideal para los módulos *PV* tiende a corresponder con la latitud del sitio de instalación. Este criterio es consistente con la literatura revisada.

La temperatura operativa de los módulos *PV* es un factor muy influyente que afecta la eficiencia de cualquier *PVSS*. Esta investigación ha revelado una correlación notable entre la mejora de la eficiencia y el aumento de la producción mediante la manipulación de ángulos de inclinación y acimut. Esta correlación surge de alteraciones en la incidencia de la radiación solar sobre la superficie de captación del módulo. En otros trabajos de investigación donde se realizó un estudio similar, no se consideró la temperatura de funcionamiento de los módulos *PV* a pesar de su relevancia. Por lo tanto, estos parámetros, junto con la orientación del módulo, son fundamentales a considerar para lograr un rendimiento sobresaliente y una mayor precisión en los procesos de planificación y diseño de sistemas *PV*.

Otra consideración notable en las propuestas es que consideran modificaciones a las estructuras de los edificios para crear un área disponible más grande para instalar módulos *PV* a través del enfoque *BIPV*. Esta metodología de diseño no se aborda ampliamente en numerosos estudios revisados, ya que muchos autores se limitaron a áreas preexistentes sin sugerir modificaciones para mejorar el potencial de instalar una cantidad más significativa de módulos. Además, el proceso de diseño implica un análisis de los voltajes *MPPT* asociados con los inversores dimensionados, lo que proporciona información sobre la eficiencia de los inversores. Este parámetro específico destaca porque a menudo se pasa por alto en otros estudios comparables.

El estudio actual subraya que la optimización de la producción se puede lograr manipulando los ángulos de inclinación y acimut. La manipulación de

Orientación	Lugar de la instalación	Número de módulos	Potencia del sistema (kW_p)	PR (%)	Optimización	Autor
Sur (16°)	Hotel Punta la Cueva, Cienfuegos, Cuba	891	240.33	77	PVsyst	[85]
Sur (15 °)	Universidad de Cien-fuegos, Cuba	120	33.4	75	SketchUp	[162]
Norte (9 °)	Cajamarca, Perú	30	9.6	84	PVsyst	[163]
Sur (20 °)	Instituto Tec-nológico de Odish, India	360	90	79	PVsyst	[164]
Sur (7 °)	Hotel Ce-dars, Jordania	912	300	82	PVsyst	[165]
Sur (13 °)	India	158	54.25	79.80	PVsyst	[58]
Sur (32 °)	Marruecos	3,924	1,000	77.3	PVsyst	[166]
Nordeste (25 °)	Malasia	-	260	71	PVsyst	[167]
Sur (20 °)	Turkia	54	29.4	72.8	PVsyst	[168]
Este-Oeste (30 °)	Jordania	64	26	78	PVsyst	[169]
Este-Oeste (10 °)	Hotel Pa-sacaballos, Cienfuegos, Cuba	418	158.54	80.2	SketchUp-PVsyst	[170]
Suroeste (15 °)	Hotel Punta la Cueva, Cienfuegos, Cuba	804	442.2	91.72	SketchUp-PVsyst-Algoritmo Genético	Nuestra in-vestigación

Tabla 6.7: Datos estadísticos obtenidos del estudio sobre las principales variables que afectan la eficiencia de un SSFV.

estos ángulos puede aumentar el *PR*. Los *PR* obtenidos de los SSFV proyectados son superiores o iguales a la mayoría de las investigaciones revisadas. En particular, nuestro estudio ha logrado niveles de producción superiores al capitalizar características de instalación que son altamente factibles y capaces de satisfacer más de la mitad de la demanda energética diaria del edificio analizado. Además, estas instalaciones contribuyen a la preservación del medio ambiente al disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, como se confirma en el apartado de resultados. Estos elementos son donde la profunda novedad de esta investigación se hace evidente: al emplear estructuras de montaje orientadas de este a oeste junto con condiciones operativas específicas, existe el potencial

de mejorar la eficiencia y la producción de electricidad de un sistema solar *PV*, particularmente dentro de los límites del espacio disponible dentro de un edificio. Esta investigación tiene una importancia sustancial dentro del campo ya que proporciona un camino para optimizar la utilización espacial, mejorar la eficiencia y establecer la viabilidad, particularmente en países como Cuba. El estudio proporciona una valiosa orientación durante la planificación del proyecto para determinar las estructuras de montaje más adecuadas. En consecuencia, esto favorece la perfecta integración de las energías renovables en la red eléctrica, particularmente (*PV*). Además, esta integración se logra utilizando superficies de tejados inutilizables y expuestas al sol de los edificios para proyectar un *SSFV* sobre ellos. La investigación se puede aplicar en cualquier parte del mundo. Aun así habría que regirse por la normativa del lugar y considerar las características climatológicas, la zona donde se ubica y la orientación del edificio a estudiar.

Conclusiones

Estos puntos concluyen un estudio exhaustivo realizado en el Hotel Punta la Cueva, enfocado en la implementación de sistemas solares fotovoltaicos (SSFV) para mejorar la eficiencia energética. Desde la revisión de tendencias en SSFV hasta la optimización de la producción de energía solar, se busca maximizar la eficiencia, reducir costos y mitigar el impacto ambiental de manera significativa.

- Se realizó un estudio del estado del arte en el que se definieron las tendencias actuales respecto a las principales tecnologías SSFV existentes.
- Se desarrolló una metodología para el dimensionamiento de SSFV que logra una integración entre la eficiencia energética y la optimización de la eficiencia de SSFV mediante técnicas de inteligencia artificial.
- Para el Hotel Punta la Cueva se pudo determinar que el portador energético fundamental es la electricidad, representando más del 95 % del consumo total de portadores en la instalación para los años 2018 y 2019.
- El consumo de energía eléctrica para el año 2019 fue de 465.183 kWh, un 0.6 % menos que el año anterior. Por su parte, las áreas con mayor consumo son Habitaciones, Servicios y Cocina (en conjunto el 84.64 % del total).
- Se realizó un análisis de correlación donde se demostró que la variable RDO * DG tiene una influencia significativa en el modelo de consumo energético del hotel ($R^2 = 0.97$).
- La línea objetivo propuesta cuyo modelo de consumo trae consigo un ahorro energético no asociado a la producción de 1,028 kWh respecto a la línea base (5.3 %).
- Se creó un algoritmo genético para la optimización de este sistema, el cual arrojó como resultado un ángulo de azimuth de 6.15 grados, el más óptimo para estas condiciones temporales. Esto se basó en un análisis de sombra, detección del área disponible y en 360 simulaciones de diferentes configuraciones. Además, se desarrolló un modelo que describe el comportamiento del sistema y a partir de este se detectó la mejor configuración para aprovechar al máximo el área y la producción.

- Este SSFV se optimizó la producción con un aumento del 14.75 %, el PR aumentó en 0.16 unidades y el área en un 15 % con respecto a la orientación Sur que es la normada para este tipo de proyectos.
- Se realizaron 2 valoraciones económicas, una con respecto al hotel y otra basada en los ahorros al país por la compra de combustibles. Como resultado se obtuvo un TIR de -10 %, un PRI de 17 años y un VAN de 20,000 USD, con respecto al país $225,990.8 \frac{USD}{año}$.
- Con respecto al análisis medioambiental se dejaría de emitir 18 751.4 tCO₂.

Bibliografía

- [1] E. Pérez-Denia, F. Fernández-Luqueño, and D. Vilariño-Ayala, “Suitability assessment for electricity generation through renewable sources: towards sustainable energy production,” *CT&F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 11, no. 1, pp. 109–122, 2021.
- [2] R. Díaz Santos, M. Castro Fernández, A. Santos Fuentefría, and M. Vilarragut Llanes, “Análisis de la influencia del ángulo de inclinación en la generación de una central fotovoltaica,” *Ingeniería Energética*, vol. 39, no. 3, pp. 146–156, 2018.
- [3] S. Thangavelu and P. Umapathy, “Design of new high step-up dc-dc converter topology for solar pv applications,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, 2021.
- [4] E. J. González Gaudiano and P. Á. Meira Cartea, “Educación para el cambio climático: ¿ educar sobre el clima o para el cambio?,” *Perfiles educativos*, vol. 42, no. 168, pp. 157–174, 2020.
- [5] A. Olabi and M. A. Abdelkareem, “Renewable energy and climate change,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, p. 112111, 2022.
- [6] F. Sher, O. Curnick, and M. T. Azizan, “Sustainable conversion of renewable energy sources,” 2021.
- [7] F. U. H. Faiz, R. Shakoor, A. Raheem, F. Umer, N. Rasheed, and M. Farhan, “Modeling and analysis of 3 mw solar photovoltaic plant using pvsyst at islamia university of bahawalpur, pakistan,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2021, 2021.
- [8] P. Junaidh, A. Vijay, and M. Mathew, “Power enhancement of solar photovoltaic module using micro-climatic strategies in warm-humid tropical climate,” in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, pp. 1–6, IEEE, 2017.
- [9] N. M. Kumar, “Simulation tools for technical sizing and analysis of solar pv systems,” in *Proceedings of the 6th World Conference on Applied Sciences, Engineering and Technology (WCSET-2017)*, vol. 201, pp. 218–222, 2017.
- [10] R. Martínez Bernal, *Estimación de la eficiencia de un sistema de energía eléctrica basado en paneles solares considerando variables ambientales en la ciudad de Bogotá*. PhD thesis, Universidad Santo Tomás, 2017.

- [11] Y. Himeur, K. Ghanem, A. Alsalemi, F. Bensaali, and A. Amira, "Artificial intelligence based anomaly detection of energy consumption in buildings: A review, current trends and new perspectives," *Applied Energy*, vol. 287, p. 116601, 2021.
- [12] M. Gaur, S. Makonin, I. V. Bajić, and A. Majumdar, "Performance evaluation of techniques for identifying abnormal energy consumption in buildings," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 62721–62733, 2019.
- [13] R. Alayi, H. Harasii, and H. Pourderogar, "Modeling and optimization of photovoltaic cells with GA algorithm," *Journal of Robotics and Control (JRC)*, vol. 2, pp. 35–41, Jan. 2021. Number: 1.
- [14] J. C. Pisco Vanegas and Á. I. Torres Quijije, "Diseño de un sistema híbrido aislado para abastecer a la hacienda quirola," *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 13, no. 2, pp. 311–317, 2021.
- [15] R. González Celis *et al.*, "Matriz energética mundial y el cambio climático: Estado actual," 2020.
- [16] L. Á. Iturrealde Carrera, J. P. Monteagudo Yanes, and N. A. Castro Perdomo, "La eficiencia energética y la competitividad empresarial en américa del norte," *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 13, no. 5, pp. 479–489, 2021.
- [17] G. Sanz-Magallón Rezusta, M. M. Molina-López, and G. Izquierdo Llanes, "Eficiencia energética en escuelas españolas como indicador de competencia de gestión económica: Diferencias entre centros públicos y privados," *Gestión y política pública*, vol. 29, no. 2, pp. 387–411, 2020.
- [18] Ember, "Global Electricity Review 2022 | Ember," 2022.
- [19] C. R. Algarin and O. R. Álvarez, "Un panorama de las energías renovables en el mundo, latinoamérica y colombia," *Espacios*, vol. 39, no. 10, 2018.
- [20] M. K. H. Rabaia, M. A. Abdelkareem, E. T. Sayed, K. Elsaid, K.-J. Chae, T. Wilberforce, and A. Olabi, "Environmental impacts of solar energy systems: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 754, p. 141989, 2021.
- [21] L. Vazquez, Y. Majanne, M. Castro, J. Luukkanen, O. Hohmeyer, M. Vilari-gut, and D. Diaz, "Energy system planning towards renewable power system: energy matrix change in cuba by 2030," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 522–527, 2018.
- [22] L. A. I. Carrera, R. J. Borges, E. M. Santana, and A. L. Á. González, "Potencialidades de generación fotovoltaica sobre la cubierta del edificio crai de la universidad de cienfuegos," *Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 3, pp. 318–330, 2022.

- [23] J. A. Peña Acción, P. R. Viego Felipe, J. R. Gómez Sarduy, and A. E. Padrón Padrón, “Pronóstico del consumo pico para la gestión energética de la universidad de cienfuegos,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 11, no. 4, pp. 220–228, 2019.
- [24] J. M. Sousa Lira, E. G. Salgado, and L. A. Beijo, “Which factors does the diffusion of iso 50001 in different regions of the world is influenced?,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 226, p. 759–767, July 2019.
- [25] F. Marimon and M. Casadesús, “Reasons to adopt iso 50001 energy management system,” *Sustainability*, vol. 9, no. 10, p. 1740, 2017.
- [26] X. Zhou, Y. Mei, L. Liang, Z. Fan, J. Yan, and D. Pan, “A dynamic energy benchmarking methodology on room level for energy performance evaluation,” *Journal of Building Engineering*, vol. 42, p. 102837, 2021.
- [27] L. M. Dibene-Arriola, F. M. Carrillo-González, S. Quijas, and M. C. Rodríguez-Uribe, “Energy efficiency indicators for hotel buildings,” *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1754, 2021.
- [28] Z.-R. Teng, C.-Y. Wu, and Z.-Z. Xu, “New energy benchmarking model for budget hotels,” *International Journal of Hospitality Management*, vol. 67, p. 62–71, Oct. 2017.
- [29] R. Salem, A. Bahadori-Jahromi, A. Mylona, P. Godfrey, and D. Cook, “Energy performance and cost analysis for the nzeb retrofit of a typical uk hotel,” *Journal of Building Engineering*, vol. 31, p. 101403, 2020.
- [30] H. Palani and A. Karatas, “Identifying energy-use behavior and energy-use profiles of hotel guests,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 13, p. 6093, 2021.
- [31] M. A. Álvarez Guerra Plasencia, J. J. Cabello Eras, V. Sousa Santos, A. Sagastume Gutiérrez, D. Haeseldonckx, and C. Vandecasteele, “Experiencias en la utilización de información meteorológica para el pronóstico y control del consumo de electricidad en hoteles,” in *XI Congreso de la Asociación Española de Climatología*, Asociación Española de Climatología, 2018.
- [32] K.-H. Huang, K.-H. Chao, and T.-W. Lee, “An improved photovoltaic module array global maximum power tracker combining a genetic algorithm and ant colony optimization,” *Technologies*, vol. 11, no. 2, p. 61, 2023.
- [33] S. Chander, A. Purohit, A. Sharma, Arvind, S. Nehra, and M. Dhaka, “A study on photovoltaic parameters of mono-crystalline silicon solar cell with cell temperature,” *Energy Reports*, vol. 1, pp. 104–109, 2015.
- [34] D. Ramya, A. Krishnakumari, P. Dineshkumar, M. P. Srivastava, L. V. Kannan, G. Puthilibai, and P. M. Kumar, “Investigating the influence of nanoparticle disbanded phase changing material (ndpcm) on the working of solar pv,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 1341–1346, 2022.

- [35] M. Nadia, H. Lassad, Z. Abderrahmen, and C. Abdelkader, "Influence of temperature and irradiance on the different solar pv panel technologies," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 15, no. 2, pp. 421–430, 2021.
- [36] R. Venkateswari and S. Sreejith, "Factors influencing the efficiency of photovoltaic system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 376–394, 2019.
- [37] P. N. Kuznetsov, V. V. Kuvshinov, H. A. Issa, H. J. Mohammed, A. G. Al Barmani, *et al.*, "Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 18, no. 3, pp. 313–320, 2020.
- [38] A. S. Rana, M. Nasir, and H. A. Khan, "String level optimisation on grid-tied solar pv systems to reduce partial shading loss," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 2, pp. 143–148, 2018.
- [39] H. Zsiboracs, L. Zentko, G. Pinter, A. Vincze, and N. H. Baranyai, "Assessing shading losses of photovoltaic power plants based on string data," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 3400–3409, 2021.
- [40] T. Khatib and R. Deria, "East-west oriented photovoltaic power systems: model, benefits and technical evaluation," *Energy Conversion and Management*, vol. 266, p. 115810, 2022.
- [41] D. R. R. Sobrino, L. A. I. Carrera, and E. M. Santana, *Nuevas condiciones para el emplazamiento de los sistemas solares fotovoltaicos en cubiertas del hotel Pasacaballos Cienfuegos*. PhD thesis, Universidad de Cienfuegos, 2022.
- [42] G. Litjens, E. Worrell, and W. Van Sark, "Influence of demand patterns on the optimal orientation of photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1002–1014, 2017.
- [43] E. Tröster and J.-D. Schmidt, "Evaluating the impact of pv module orientation on grid operation," in *Proceedings of the 2nd International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, Lisbon, Portugal*, pp. 1–6, 2012.
- [44] A. Barbón, C. Bayón-Cueli, L. Bayón, and C. Rodríguez-Suanzes, "Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications," *Applied Energy*, vol. 305, p. 117802, 2022.
- [45] O. Ayadi and S. Al-Dahidi, "Comparison of solar thermal and solar electric space heating and cooling systems for buildings in different climatic regions," *Solar Energy*, vol. 188, pp. 545–560, 2019.

- [46] V. K. Vashishtha, A. Yadav, A. Kumar, and V. K. Shukla, "An overview of software tools for the photovoltaic industry," *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [47] N. K. Kasim, H. H. Hussain, and A. N. Abed, "Performance analysis of grid-connected cigs pv solar system and comparison with pvsyst simulation program," *International Journal of Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 172–179, 2019.
- [48] A. Alnoosani, M. Oreijah, M. Alhazmi, Y. Samkari, and H. Faeheha, "Design of 100mw solar pv on-grid connected power plant using (pvsyst) in umm al-qura university," *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 8, no. 11, pp. 356–363, 2019.
- [49] F. F. Ahmad, M. Abdelsalam, A. K. Hamid, C. Ghenai, W. Obaid, and M. Bettayeb, "Experimental validation of pvsyst simulation for fix oriented and azimuth tracking solar pv system," in *Modelling, Simulation and Intelligent Computing: Proceedings of MoSICom 2020*, pp. 227–235, Springer, 2020.
- [50] A. Shrivastava, R. Sharma, M. K. Saxena, V. Shanmugasundaram, M. L. Rinawa, *et al.*, "Solar energy capacity assessment and performance evaluation of a standalone pv system using pvsyst," *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [51] H. D. Young and R. A. Freedman, *Libro Fisica Universitaria 12Va. Edición Sears, Zemansky Vol. 2 (libro en Inglés)*, Zemansky Sears, ISBN 9789333188753. Comprar en Buscalibre, vol. 2. México,: PEARSON EDUCACIÓN,, 12 ed., 2009.
- [52] L. A. I. Carrera, N. A. C. Perdomo, and E. B. Valuca, "La energía fotovoltaica y sus particularidades en cuba," *Revista Mapa*, vol. 5, no. 23, 2021.
- [53] C. Ji, Z. Zhang, T. Masuda, Y. Kudo, and L. J. Guo, "Vivid-colored silicon solar panels with high efficiency and non-iridescent appearance," *Nanoscale Horizons*, vol. 4, no. 4, pp. 874–880, 2019.
- [54] P. R. Dias, L. Schmidt, N. L. Chang, M. M. Lunardi, R. Deng, B. Trigger, L. B. Gomes, R. Egan, and H. Veit, "High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 169, p. 112900, 2022.
- [55] F. Ma, Y. Zhao, J. Li, X. Zhang, H. Gu, and J. You, "Nickel oxide for inverted structure perovskite solar cells," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 52, pp. 393–411, 2021.
- [56] T. Markvart and L. Castañer, "Principles of solar cell operation," in *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, pp. 3–28, Elsevier, 2018.

- [57] M. Zhang, Q. Chen, R. Xue, Y. Zhan, C. Wang, J. Lai, J. Yang, H. Lin, J. Yao, Y. Li, *et al.*, “Reconfiguration of interfacial energy band structure for high-performance inverted structure perovskite solar cells,” *Nature communications*, vol. 10, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [58] S. Sharma, C. P. Kurian, and L. S. Paragond, “Solar pv system design using pvsyst: a case study of an academic institute,” in *2018 International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCP CCT)*, pp. 123–128, IEEE, 2018.
- [59] M. Aghaei, N. M. Kumar, A. Eskandari, H. Ahmed, A. K. V. de Oliveira, and S. S. Chopra, “Solar pv systems design and monitoring,” in *Photovoltaic Solar Energy Conversion*, pp. 117–145, Elsevier, 2020.
- [60] L. A. Iturralde Carrera, A. L. Álvarez González, J. Rodríguez-Reséndiz, and J. M. Álvarez-Alvarado, “Selection of the energy performance indicator for hotels based on iso 50001: A case study,” *Sustainability*, vol. 15, no. 2, p. 1568, 2023.
- [61] D. D’Agostino, D. Parker, P. Melià, and G. Dotelli, “Optimizing photovoltaic electric generation and roof insulation in existing residential buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 255, p. 111652, 2022.
- [62] R. F. Asrami, A. Sohani, E. Saedpanah, and H. Sayyaadi, “Towards achieving the best solution to utilize photovoltaic solar panels for residential buildings in urban areas,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102968, 2021.
- [63] R. Dhakal, A. Sedai, S. Paneru, M. Yosofvand, and H. Moussa, “Towards a net zero building using photovoltaic panels: A case study in an educational building,” *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 11, no. 2, pp. 879–889, 2021.
- [64] T. Christiaanse, R. C. Loonen, and R. Evins, “Techno-economic optimization for grid-friendly rooftop pv systems—a case study of commercial buildings in british columbia,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101320, 2021.
- [65] A. Arabkoohsar, A. Behzadi, and A. S. Alsagri, “Techno-economic analysis and multi-objective optimization of a novel solar-based building energy system; an effort to reach the true meaning of zero-energy buildings,” *Energy Conversion and Management*, vol. 232, p. 113858, 2021.
- [66] F. F. Ahmad, C. Ghenai, A. K. Hamid, O. Rejeb, and M. Bettayeb, “Performance enhancement and infra-red (ir) thermography of solar photovoltaic panel using back cooling from the waste air of building centralized air conditioning system,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 24, p. 100840, 2021.

- [67] C. Mokhtara, B. Negrou, N. Settou, A. Bouferrouk, and Y. Yao, "Optimal design of grid-connected rooftop pv systems: An overview and a new approach with application to educational buildings in arid climates," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 47, p. 101468, 2021.
- [68] S. Yadav, C. Hachem-Vermette, S. K. Panda, G. Tiwari, and S. S. Mohapatra, "Determination of optimum tilt and azimuth angle of bispvt system along with its performance due to shadow of adjacent buildings," *Solar Energy*, vol. 215, pp. 206–219, 2021.
- [69] G. Yu, H. Yang, Z. Yan, and M. K. Ansah, "A review of designs and performance of façade-based building integrated photovoltaic-thermal (bipvt) systems," *Applied thermal engineering*, vol. 182, p. 116081, 2021.
- [70] A.-M. H. MK, T. Al-Asemi, N. Sabr, K. Almawari, A. Abuelrub, and M. Ehsani, "On-grid photovoltaic energy system-a case study," in *2022 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, pp. 1–6, IEEE, 2022.
- [71] A. Patel, "Mejora de la eficiencia de la transferencia de calor en sistemas solares térmicos mediante intercambiadores de calor avanzados," *Revista Internacional Multidisciplinaria de Investigación y Desarrollo (MIJRD)*, no. 06, pp. 31–51, 2023.
- [72] S. P. Tembhare, D. P. Barai, and B. A. Bhanvase, "Performance evaluation of nanofluids in solar thermal and solar photovoltaic systems: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, p. 111738, 2022.
- [73] J. D. Osorio, Z. Wang, G. Karniadakis, S. Cai, C. Chryssostomidis, M. Panwar, and R. Hovsapian, "Forecasting solar-thermal systems performance under transient operation using a data-driven machine learning approach based on the deep operator network architecture," *Energy Conversion and Management*, vol. 252, p. 115063, 2022.
- [74] S. K. Verma, R. Kumar, M. Barthwal, and D. Rakshit, "A review on futuristic aspects of hybrid photo-voltaic thermal systems (pv/t) in solar energy utilization: Engineering and technological approaches," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102463, 2022.
- [75] C. Zhang, C. Shen, Y. Zhang, and J. Pu, "Feasibility investigation of spectral splitting photovoltaic/thermal systems for domestic space heating," *Renewable Energy*, vol. 192, pp. 231–242, 2022.
- [76] M. Derick, C. Rani, M. Rajesh, M. Farrag, Y. Wang, and K. Busawon, "An improved optimization technique for estimation of solar photovoltaic parameters," *Solar Energy*, vol. 157, pp. 116–124, 2017.

- [77] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. Mahlia, “Characterization of pv panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm,” *Energy Conversion and Management*, vol. 73, pp. 10–25, 2013.
- [78] M. Zamen, A. Baghban, S. M. Pourkiaei, and M. H. Ahmadi, “Optimization methods using artificial intelligence algorithms to estimate thermal efficiency of pv/t system,” *Energy Science & Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 821–834, 2019.
- [79] J. Pardo de Vera García, *Optimización del dimensionamiento de plantas solares fotovoltaicas*. PhD thesis, Universidad Pontificia Comillas, 2020.
- [80] V. S. B. Kurukuru, A. Haque, M. A. Khan, S. Sahoo, A. Malik, and F. Blaabjerg, “A review on artificial intelligence applications for grid-connected solar photovoltaic systems,” *Energies*, vol. 14, no. 15, p. 4690, 2021.
- [81] A. Mellit and S. A. Kalogirou, “Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review,” *Progress in energy and combustion science*, vol. 34, no. 5, pp. 574–632, 2008.
- [82] A. Mellit and S. Kalogirou, “Artificial intelligence and internet of things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: Challenges, recommendations and future directions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, p. 110889, 2021.
- [83] M. Guzmán Villavicencio, C. R. Soto Castellón, I. Águila Bernal, and J. M. Torres Águila, “Procedimiento para instalación de un sistema fotovoltaico sobre techos en la corporación cuba ron sa,” *Centro azúcar*, vol. 44, no. 1, pp. 70–81, 2017.
- [84] E. Albert López, *Instalación de placas solares en una nave industrial para autoconsumo*. PhD thesis, Universidad Pontificia Comillas, 2020.
- [85] A. L. Á. González, L. A. I. Carrera, R. J. Borges, J. P. M. Yanes, and M. G. Muñoz, “Potencialidades de generación fotovoltaica sobre cubiertas de edificaciones en una instalación hotelera,” *Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 3, pp. 565–573, 2022.
- [86] W. Chiang, I. Permana, F. Wang, H. Chen, and M. Erdenebayar, “Experimental investigation for an innovative hybrid photovoltaic/thermal (pv/t) solar system,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 910–918, 2022.
- [87] K. R. Gautam and G. B. Andresen, “Performance comparison of building-integrated combined photovoltaic thermal solar collectors (bipvt) with other building-integrated solar technologies,” *Solar energy*, vol. 155, pp. 93–102, 2017.

- [88] A. M. Alshibil, I. Farkas, and P. Víg, “Multi-aspect approach of electrical and thermal performance evaluation for hybrid photovoltaic/thermal solar collector using trnsys tool,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, p. 100222, 2022.
- [89] A. D. Tuncer, A. Khanlari, F. Afshari, A. Sözen, E. Çiftçi, B. Kusun, and İ. Şahinkesen, “Experimental and numerical analysis of a grooved hybrid photovoltaic-thermal solar drying system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 218, p. 119288, 2023.
- [90] M. Deymi-Dashtebayaz, M. Rezapour, and M. Farahnak, “Modeling of a novel nanofluid-based concentrated photovoltaic thermal system coupled with a heat pump cycle (cpvt-hp),” *Applied Thermal Engineering*, vol. 201, p. 117765, 2022.
- [91] A. Di Placido, C. Archetti, and C. Cerrone, “A genetic algorithm for the close-enough traveling salesman problem with application to solar panels diagnostic reconnaissance,” *Computers & Operations Research*, vol. 145, p. 105831, 2022.
- [92] A. Hassan, O. Bass, and M. A. Masoum, “An improved genetic algorithm based fractional open circuit voltage mppt for solar pv systems,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1535–1548, 2023.
- [93] A. Heydari, Z. S. Alborzi, Y. Amini, and A. Hassanvand, “Configuration optimization of a renewable hybrid system including biogas generator, photovoltaic panel and wind turbine: Particle swarm optimization and genetic algorithms,” *International Journal of Modern Physics C*, vol. 34, no. 05, p. 2350069, 2023.
- [94] M. Eslami, E. Akbari, S. T. Seyed Sadr, and B. F. Ibrahim, “A novel hybrid algorithm based on rat swarm optimization and pattern search for parameter extraction of solar photovoltaic models,” *Energy Science & Engineering*, vol. 10, no. 8, pp. 2689–2713, 2022.
- [95] N. B. Repalle, P. Sarala, L. Mihet-Popa, S. R. Kotha, and N. Rajeswaran, “Implementation of a novel tabu search optimization algorithm to extract parasitic parameters of solar panel,” *Energies*, vol. 15, no. 13, p. 4515, 2022.
- [96] M. Sirimanna, J. D. Nixon, and M. Innocente, “Performance of different optimization solvers for designing solar linear fresnel reflector power generation systems,” in *International Conference on Energy and Sustainable Futures*, pp. 323–332, Springer Nature Switzerland Cham, 2022.
- [97] O. Khaledi, S. Sadodin, and S. H. Rostamian, “Optimization of the nonlinear model of neural network training in predicting thermal efficiency of solar concentrator with simulated annealing algorithm,” *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, vol. 13, no. 2, pp. 2947–2960, 2022.

- [98] H. Yi and X. Yang, “A metaheuristic algorithm based on simulated annealing for optimal sizing and techno-economic analysis of pv systems with multi-type of battery energy storage,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102724, 2022.
- [99] Y. Zhang, Y.-J. Wang, Y. Zhang, and T. Yu, “Photovoltaic fuzzy logical control mppt based on adaptive genetic simulated annealing-optimized bp neural network,” *Processes*, vol. 10, no. 7, p. 1411, 2022.
- [100] Z. Liang, M. Li, X. Zheng, and L. Yao, “Application of improved harmony search algorithm in photovoltaic mppt under partial shadow conditions,” in *Advanced Intelligent Technologies for Industry: Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Intelligent Technologies (ICAIT 2021)*, pp. 169–178, Springer, 2022.
- [101] B. Keshtegar, K. Bouchouicha, N. Bailek, M. A. Hassan, R. Kolahchi, and M. Despotovic, “Solar irradiance short-term prediction under meteorological uncertainties: survey hybrid artificial intelligent basis music-inspired optimization models,” *The European Physical Journal Plus*, vol. 137, no. 3, p. 362, 2022.
- [102] S. Mahboob UI Hassan, M. A. Ramli, and A. H. Milyani, “Robust load frequency control of hybrid solar power systems using optimization techniques,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, p. 902776, 2022.
- [103] J. R. Rao, S. A. Saleem, *et al.*, “Efficiency improvement of solar panels through parasitic parameters extraction and maximum power improvement with enhanced slime mold optimization under partial shading conditions,” 2023.
- [104] W. A. E. M. Ahmed, H. M. A. Mageed, S. A. Mohamed, and A. A. Saleh, “Fractional order darwinian particle swarm optimization for parameters identification of solar pv cells and modules,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 2, pp. 1249–1263, 2022.
- [105] M. M. A. Awan and M. J. Awan, “Adapted flower pollination algorithm for a standalone solar photovoltaic system,” *Mehran University Research Journal Of Engineering & Technology*, vol. 41, no. 4, pp. 118–127, 2022.
- [106] F. Daqaq, M. Ouassaid, S. Kamel, R. Ellaia, and M. F. El-Naggar, “A novel chaotic flower pollination algorithm for function optimization and constrained optimal power flow considering renewable energy sources,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, p. 941705, 2022.
- [107] J. Jayaudhaya, K. Ramash Kumar, V. Tamil Selvi, and N. Padmavathi, “Improved performance analysis of pv array model using flower pollination algorithm and gray wolf optimization algorithm,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, 2022.

- [108] X. Yu, Z. Hu, X. Wang, and W. Luo, “Ranking teaching–learning-based optimization algorithm to estimate the parameters of solar models,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 123, p. 106225, 2023.
- [109] A. Sharma, W. H. Lim, E.-S. M. El-Kenawy, S. S. Tiang, A. S. Bhandari, A. H. Alharbi, and D. S. Khafaga, “Identification of photovoltaic module parameters by implementing a novel teaching learning based optimization with unique exemplar generation scheme (tlbo-uegs),” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 1485–1506, 2023.
- [110] A. Chi, M. Ma, Y. Zhang, and Z. Jin, “Competitive teaching–learning-based optimization for multimodal optimization problems,” *Soft Computing*, vol. 26, no. 19, pp. 10163–10186, 2022.
- [111] A. C. Benítez Soler, I. D. Tello Reyes, et al., *Estudio de factibilidad de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en la finca Villa Catalina*. PhD thesis, Universidad Libre, 2018.
- [112] O. P. Lamigueiro, “Energía solar fotovoltaica,” *Creative Commons ebook. España. 192pp*, 2013.
- [113] R. M. B. Delgado and C. J. P. M. Yanes, “Anteproyecto de sistema solar fotovoltaico en la delegación provincial de materiales de la construcción. cienfuegos.,”
- [114] A. Callisaya Condori and M. Romay Ossio, *Calculo y diseño de un sistema solar fotovoltaico auxiliar para el hospital de La Asunta-Sud Yungas*. PhD thesis, Universidad Mayor de San Andrés, 2012.
- [115] G. Crespo Sánchez, J. P. Monteagudo Yanes, M. Montesino Pérez, I. Cruz Virosa, and J. L. Cabrera Sánchez, “La gestión energética en la fabricación de piensos balanceados en cienfuegos,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 11, no. 1, pp. 249–256, 2019.
- [116] C. Vassiliades, R. Agathokleous, G. Barone, C. Forzano, G. Giuzio, A. Palombo, A. Buonomano, and S. Kalogirou, “Building integration of active solar energy systems: A review of geometrical and architectural characteristics,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 164, p. 112482, 2022.
- [117] C. Vassiliades, G. Barone, A. Buonomano, C. Forzano, G. Giuzio, and A. Palombo, “Assessment of an innovative plug and play pv/t system integrated in a prefabricated house unit: Active and passive behaviour and life cycle cost analysis,” *Renewable Energy*, vol. 186, pp. 845–863, 2022.
- [118] M. Deymi-Dashtebayaz, A. Nikitin, V. Davoodi, V. Nikitina, M. Hekmatshoar, and V. Shein, “A new multigenerational solar energy system integrated with near-zero energy building including energy storage—a dynamic energy,

- exergy, and economic-environmental analyses," *Energy Conversion and Management*, vol. 261, p. 115653, 2022.
- [119] B. Su, F. Lin, J. Ma, S. Huang, Y. Wang, X. Zhang, W. Han, and H. Wang, "System integration of multi-grade exploitation of biogas chemical energy driven by solar energy," *Energy*, vol. 241, p. 122857, 2022.
 - [120] K. C. Reddy, N. Dinesh, S. Das, A. Anand, *et al.*, "A review of solar powered electric bi-hybrid vehicle compared with ic engine vehicles using graph analytics with ai," in *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, pp. 605–609, IEEE, 2022.
 - [121] A. Saymbetov, S. Mekhilef, N. Kuttybay, M. Nurgaliyev, D. Tukymbekov, A. Meiirkhanov, G. Dosymbetova, and Y. Svanbayev, "Dual-axis schedule tracker with an adaptive algorithm for a strong scattering of sunbeam," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 285–297, 2021.
 - [122] R. Al Afif, C. Pfeifer, and H. J. El-Khozondar, "Implementation of maker movement to renewable energy laboratory: case study of auto-tracking photovoltaic model," in *2019 IEEE 7th Palestinian International Conference on Electrical and Computer Engineering (PICECE)*, pp. 1–4, IEEE, 2019.
 - [123] S. Dey, P. S. Kumar, K. Reddy, B. Pesala, *et al.*, "Optical and electrical performance investigation of truncated 3x non-imaging low concentrating photovoltaic-thermal systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 220, p. 113056, 2020.
 - [124] M. E. Al Hudha, R. J. Setiawan, and F. Imam, "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*.
 - [125] M. Baqir and H. K. Channi, "Analysis and design of solar pv system using pvsyst software," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 1332–1338, 2022.
 - [126] K. A. Kader, F. Rahman, N. I. Nahid, Z. Abedin, and M. A. Mannan, "Design and analysis of an on-grid solar system using pvsyst software for commercial application," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2021.
 - [127] A. Haggag, A. Aboshosha, and M. Azouz, "Computer-aided design and simulation-based efficiency improvement of the first egyptian solar city," in *2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEP-CON)*, pp. 491–496, IEEE, 2021.

- [128] A. A. A. Gassar and S. H. Cha, "Feasibility assessment of adopting distributed solar photovoltaics and phase change materials in multifamily residential buildings," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 29, pp. 507–528, 2022.
- [129] R. Othman and T. M. Hatem, "Assessment of pv technologies outdoor performance and commercial software estimation in hot and dry climates," *Journal of Cleaner Production*, vol. 340, p. 130819, 2022.
- [130] R. Khezri, A. Mahmoudi, and H. Aki, "Optimal planning of solar photovoltaic and battery storage systems for grid-connected residential sector: Review, challenges and new perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 153, p. 111763, 2022.
- [131] N. M. Kumar, S. Chakraborty, S. K. Yadav, J. Singh, and S. S. Chopra, "Advancing simulation tools specific to floating solar photovoltaic systems—comparative analysis of field-measured and simulated energy performance," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102168, 2022.
- [132] A. V. Chaware, S. Dambhare, V. Pathan, and G. Mistry, "Design and optimization of mini-grid pv system for developing country," in *2021 9th IEEE International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1–6, IEEE, 2021.
- [133] M. Elshafei, S. Abdelrazik, and A. Elshenawy, "Design and simulation analysis of 1 mwp grid connected photovoltaic system floating over lake nasser by using pv syst software," *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2021.
- [134] P. Ahirwar, A. K. Kori, and S. Kapoor, "Pre-installation analysis via “pvsys” & “homer pro” to design & simulate a 50kwp solar grid-tied pv system for rural area electrification, india," in *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, pp. 388–394, IEEE, 2021.
- [135] S. Bentouba, M. Bourouis, N. Zioui, A. Pirashanthan, and D. Velauthapillai, "Performance assessment of a 20 mw photovoltaic power plant in a hot climate using real data and simulation tools," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 7297–7314, 2021.
- [136] M. Mallek, M. A. Elleuch, J. Euchi, and Y. Jerbi, "Optimal design of a hybrid photovoltaic–wind power system with the national grid using homer: A case study in kerkennah, tunisia," in *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, pp. 725–729, IEEE, 2022.
- [137] G. V. Ochoa, "Application of equivalent occupation method as a tool for energy management in hotel sector," *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2018.

- [138] M. A. P. Marriaga, M. P. D. Contreras, A. P. Salas, M. V. Chamorro, and P. H. B. Zarante, “Calculation of energy performance indicators of a company in the hotel sector,” *Contemporary Engineering Sciences*, vol. 11, no. 73, pp. 3609–3619, 2018.
- [139] R. P. C. Mendoza, J. P. M. Yanes, A. B. Nordelo, and E. C. Q. Oqueña, “Línea de base energética en la implementación de la norma iso 50001. estudios de casos,” *El Hombre y la máquina*, no. 46, pp. 137–143, 2015.
- [140] P. P. Poveda-Orjuela, J. C. García-Díaz, A. Pulido-Rojano, and G. Cañón-Zabala, “Parameterization, analysis, and risk management in a comprehensive management system with emphasis on energy and performance (iso 50001: 2018),” *Energies*, vol. 13, no. 21, p. 5579, 2020.
- [141] J. A. Quesada-Céspedes, *Modelo de Gestión de Energía según las normas ISO 50000 para el Hotel del Sur y desarrollo de un prototipo para monitorear datos energéticos*. PhD thesis, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2022.
- [142] S. Tournaki, R. Tsoutsos, I. Morell, Z. Guerrero, A. Urosevic, C. Derjanecz, C. Nunez, M. Rata, S. Biscan, S. Pouffary, *et al.*, “Towards nearly zero energy hotels technical analysis and recommendations,” in *Proceedings of the 5th International Conference on Renewable Energy Sources and Energy Efficiency, Istanbul, Turkey*, pp. 21–23, 2021.
- [143] M. Moghadasi, N. Izadyar, A. Moghadasi, and H. Ghadamian, “Applying machine learning techniques to implement the technical requirements of energy management systems in accordance with iso 50001: 2018, an industrial case study,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1–18, 2021.
- [144] D. Campisi, S. Gitto, and D. Morea, “Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in rome,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 175, pp. 190–198, 2018.
- [145] S. Yoomak and A. Ngaopitakkul, “Optimisation of lighting quality and energy efficiency of led luminaires in roadway lighting systems on different road surfaces,” *Sustainable cities and society*, vol. 38, pp. 333–347, 2018.
- [146] A. Jhunjhunwala, K. Vasudevan, P. Kaur, B. Ramamurthi, S. Bitra, K. Uppal, *et al.*, “Energy efficiency in lighting: Ac vs dc led lights,” in *2016 First International Conference on Sustainable Green Buildings and Communities (SGBC)*, pp. 1–4, IEEE, 2016.
- [147] P. J. N. Ransoli, J. P. M. Yanes, and L. A. I. Carrera, “Anteproyecto de biodigestor de bolsa para la cocina comedor de la empresa porcina,” *SciComm Report*, vol. 1, no. 2, pp. 1–16, 2021.

- [148] L. A. Iturralde Carrera, R. Jiménez Borges, E. Molina Santana, and A. L. Álvarez González, “Potencialidades de generación fotovoltaica sobre la cubierta del edificio crai de la universidad de cienfuegos,” *Revista Universidad y Sociedad*, vol. 14, no. 3, pp. 318–330, 2022.
- [149] J. S. Marcelo García, *Análisis económico y ambiental de la implementación de energía fotovoltaica en las instalaciones de Fresenius Medical Care como alternativa frente al alto consumo energético*. PhD thesis, Universidad El Bosque, 2022.
- [150] G. H. Pupo, G. A. De la Paz Pérez, G. De la Paz Vento, and L. E. Mendoza, “Evaluación de opciones de inversión en eficiencia energética y fuentes renovables de energía en hoteles de santa lucía, camagüey,” *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 16, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [151] BCC, “Tipo de cambio oficial con relación al Peso Cubano, Banco Central de Cuba.,” 2023.
- [152] R. Sevajanes, “Tarifa electrica promedio para instalaciones hoteleras en Cuba.,” july 2023.
- [153] “Cuba gasoline prices.” <https://www.globalpetrolprices.com/Cuba/>.
- [154] A. Huovila, P. Tuominen, and M. Airaksinen, “Effects of building occupancy on indicators of energy efficiency,” *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 628, 2017.
- [155] L. R. Rodríguez, J. A. P. Insuasti, W. Y. Peña, C. O. Sierra, C. P. S. Arroyave, C. A. P. Soto, N. F. S. Vispo, J. M. H. Pinchao, R. D. G. Torres, and G. R. Lara, “Método de cálculo del índice de eficiencia energética de los hoteles,” *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 30, no. 2, 2017.
- [156] J. C. Eras, V. S. Santos, A. S. Gutierrez, and C. Vandecasteele, “Data supporting the improvement of forecasting and control of electricity consumption in hotels,” *Data in brief*, vol. 25, p. 104147, 2019.
- [157] M. A. P. Marriaga, M. P. D. Contreras, A. P. Salas, M. V. Chamorro, and P. H. B. Zarante, “Analysis of the potential for energy savings in a company in the hotel sector,” *Contemporary Engineering Sciences*, pp. 11–58, 2018.
- [158] H. eddine Mechri and S. Amara, “Investigation and analysis of energy and water use of hotel buildings in tunisia,” *Energy and Buildings*, vol. 241, p. 110930, 2021.
- [159] A. Molina González, H. R. Velarde Bedregal, A. E. Borroto Nordelo, C. E. Santiesteban Toca, and J. P. Monteagudo Yanes, “Nuevos índices de consumo energético para hoteles tropicales,” *Ingeniería Energética*, vol. 38, no. 3, pp. 198–207, 2017.

- [160] J. J. C. Eras, V. S. Santos, A. S. Gutiérrez, M. Á. G. Plasencia, D. Hae-seldonckx, and C. Vandecasteele, “Tools to improve forecasting and control of the electricity consumption in hotels,” *Journal of cleaner production*, vol. 137, pp. 803–812, 2016.
- [161] C. Torres Navarro, N. Malta Callegari, and H. Jara Olave, “Modelos de regresión y diseño de línea base para indicadores energéticos en una empresa siderúrgica,” *Ingeniería Energética*, vol. 42, no. 1, 2021.
- [162] R. J. Borges, A. L. Á. González, and J. P. M. Yanes, “Ventajas de la generación fotovoltaica en el parque tecnológico universitario,” *Eco Solar*, no. 80, pp. 18–23, 2022.
- [163] P. F. Mesones Abanto, *Dimensionamiento y selección de un sistema solar fotovoltaico de conexión a red para el restaurante “El zarco” ubicado en la ciudad de Cajamarca*. PhD thesis, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2019.
- [164] D. Dey and B. Subudhi, “Design, simulation and economic evaluation of 90 kw grid connected photovoltaic system,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 1778–1787, 2020.
- [165] H. Al-Zoubi, Y. Al-Khasawneh, and W. Omar, “Design and feasibility study of an on-grid photovoltaic system for green electrification of hotels: a case study of cedars hotel in jordan,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 611–626, 2021.
- [166] B. Belmahdi and A. El Bouardi, “Solar potential assessment using pvsyst software in the northern zone of morocco,” *Procedia Manufacturing*, vol. 46, pp. 738–745, 2020.
- [167] N. Anang, S. S. N. Azman, W. Muda, A. Dagang, and M. Z. Daud, “Performance analysis of a grid-connected rooftop solar pv system in kuala terengganu, malaysia,” *Energy and Buildings*, vol. 248, p. 111182, 2021.
- [168] T. Dindar, E. Vedat, and A. S. Sarkin, “Comparison of simulation results for 25 kw power output rooftop pv system,” *European Journal of Technique (EJT)*, vol. 12, no. 2, pp. 176–181, 2022.
- [169] J. Abu Qadourah, “Energy and economic potential for photovoltaic systems installed on the rooftop of apartment buildings in jordan,” *Results in Engineering*, vol. 16, p. 100642, 2022.
- [170] L. A. I. Carrera, E. Molina-Santana, J. M. Álvarez-Alvarado, J. R. García-Martínez, and J. Rodríguez-Reséndiz, “Energy efficiency analysis of east-west oriented photovoltaic systems for buildings: A technical-economic-environmental approach,” *IEEE Access*, 2023.