

Optimización de Sistemas Fotovoltaicos para la Iluminación de Edificios

Administrativos: El Caso de Villa María del Triunfo. 

Optimization of Photovoltaic Systems for the Lighting of Administrative Buildings: The Case of Villa María del Triunfo

Javier Jesús Mamani Pachari  ORCID, Jorge Augusto Sánchez Ayte  ORCID

Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, Lima, Perú

RESUMEN

El presente artículo aborda el diseño y cálculo de un sistema fotovoltaico Off Grid destinado a la iluminación de un edificio administrativo en el Complejo Deportivo Andrés Avelino Cáceres, ubicado en Villa María del Triunfo, Lima. Se detalla el proceso de selección de equipos y cálculo de cargas, iniciando con la identificación de cargas en equipos de iluminación y procediendo al dimensionamiento de los principales equipos basándose en fórmulas y catálogos de fabricantes. Se seleccionaron paneles monocristalinos y otros componentes para cumplir con la demanda energética, validando los cálculos con el software PVSYST 7.4. Este diseño busca reducir la dependencia del sistema interconectado nacional, disminuir emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la imagen institucional mediante la implementación de energías renovables.

PALABRAS CLAVES: Sistema Fotovoltaico Off Grid, Iluminación Edificio Administrativo, Complejo Deportivo Andrés Avelino Cáceres, Diseño y Cálculo Fotovoltaico, Sostenibilidad Energética.

ABSTRACT

This article addresses the design and calculation of an Off Grid photovoltaic system intended for lighting an administrative building in the Andrés Avelino Cáceres Sports Complex, located in Villa María del Triunfo, Lima. The process of equipment selection and load calculation is detailed, starting with the identification of loads on lighting equipment and proceeding to the sizing of the main equipment based on formulas and manufacturers' catalogues. Monocrystalline panels and other components were selected to meet the energy demand, validating the calculations with the PVSYST 7.4 software. This design seeks to reduce dependence on the national interconnected system, reduce greenhouse gas emissions and improve the institutional image through the implementation of renewable energies.

KEYWORDS: *Off Grid Photovoltaic System, Administrative Building Lighting, Photovoltaic Design and Calculation, Energy Sustainability*

INTRODUCCIÓN

La transición hacia fuentes de energía renovables se ha posicionado en el centro del debate global, enfocándose en cómo abordar simultáneamente la crisis climática y satisfacer el incremento en la demanda energética mundial[1][2][3][4]. En este escenario, la energía solar fotovoltaica emerge como una opción prometedora, especialmente en áreas geográficas privilegiadas por su alta exposición solar, como es el caso de Villa María del Triunfo[5][6]. Esta localidad, como otras zonas urbanas, se presenta como un caso emblemático donde el aprovechamiento de la energía solar no solo es factible sino también necesario, considerando su potencial para contribuir significativamente a la mitigación de los efectos adversos del cambio climático [7][8][9][10][11]. La eficiencia energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero son objetivos primordiales en la agenda global, siendo la implementación de sistemas fotovoltaicos en edificios administrativos una estrategia clave para alcanzar dichas metas[12][13][14]. Además, esta iniciativa se inscribe en un marco más amplio de esfuerzos por alcanzar el desarrollo sostenible, reflejando compromisos asumidos tanto a nivel nacional como internacional. La consolidación de las energías renovables en el paisaje energético global implica un cambio paradigmático hacia modelos más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

La literatura científica sobre la energía solar fotovoltaica es vasta y diversa, reflejando el interés y la inversión crecientes en esta tecnología [15][16][17][18]. Sin embargo, se observa una carencia notable de investigaciones que se enfoquen en la aplicación y optimización de sistemas fotovoltaicos autónomos específicamente diseñados para edificaciones administrativas en entornos urbanos densamente poblados [19][20], como Villa María del Triunfo. Esta ausencia es particularmente crítica al considerar la necesidad de adaptar las soluciones tecnológicas a las características únicas de cada contexto, incluyendo factores climáticos, urbanísticos y arquitectónicos que influyen directamente en la eficacia y eficiencia de los sistemas fotovoltaicos [21][22][23]. El análisis detallado de estas variables es esencial para diseñar sistemas que no solo sean sostenibles desde una perspectiva ambiental, sino también viables económicamente y socialmente aceptables. La falta de estudios específicos que aborden estas consideraciones limita la capacidad para aprovechar plenamente el potencial de la energía solar fotovoltaica en la mejora de la sostenibilidad urbana y la reducción de la huella de carbono.

Ante esta brecha en la investigación existente, el presente estudio propone diseñar y evaluar un sistema fotovoltaico optimizado específicamente para un edificio administrativo en Villa María del Triunfo. Este enfoque permitirá abordar las limitaciones identificadas anteriormente, ofreciendo soluciones concretas y adaptadas a las necesidades y características del contexto local. A través de un análisis exhaustivo de la variabilidad de la radiación solar en la región, este estudio buscará determinar las configuraciones óptimas de los paneles solares en términos de orientación, inclinación y diseño integrado con la arquitectura del edificio, maximizando así la generación de energía y la eficiencia del sistema. Se evaluarán los impactos potenciales en términos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, así como los beneficios económicos asociados a la implementación del sistema, considerando tanto los ahorros en el consumo energético como las posibles ventajas financieras derivadas de incentivos gubernamentales y políticas de fomento a las energías renovables. Este estudio no solo busca llenar un vacío en la literatura científica, sino también demostrar la viabilidad de integrar soluciones fotovoltaicas en el diseño urbano y arquitectónico, promoviendo un modelo de desarrollo que sea sostenible, eficiente y estéticamente agradable, contribuyendo de manera significativa a los esfuerzos globales por un futuro energético renovable.

MARCO TEORICO

Irradiancia solar (G)

La irradiancia solar (G) es la potencia por unidad de área de la radiación solar incidente sobre una superficie, medida generalmente en kW/m². Depende de factores como la ubicación geográfica y las condiciones climáticas. El cálculo de la irradiancia solar es el proceso para estimar la cantidad de radiación solar que incidirá sobre una superficie determinada a lo largo del año, analizando valores promedio y máximos. Se utiliza en el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos, para asegurar que la energía solar disponible cubra la demanda eléctrica en todo momento.

Eficiencia de los Paneles Solares

La eficiencia de conversión de energía de un panel solar fotovoltaico es un parámetro crítico que indica la proporción de radiación solar que puede convertir en electricidad. Esta eficiencia dependerá de factores tecnológicos del panel como el tipo de célula fotovoltaica utilizada. La selección adecuada de los paneles es una etapa clave en el diseño de un sistema de energía solar. Esta selección debe basarse tanto en un correcto análisis de la irradiancia solar del lugar, que determina el recurso solar disponible, como en la determinación de qué paneles tienen la capacidad de conversión necesaria bajo las condiciones de irradiancia específicas. Es decir, los módulos fotovoltaicos deben ser capaces de convertir suficiente energía solar en electricidad para así satisfacer los requerimientos energéticos y de consumo eléctrico previamente definidos en el dimensionamiento del sistema. Lograr empatar adecuadamente la irradiancia disponible con la eficiencia de conversión de los paneles permite garantizar un funcionamiento óptimo, autónomo y sostenible de un sistema de energía solar fotovoltaica.

Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico autónomo requiere una metodología que integre el análisis de la demanda energética junto a la disponibilidad del recurso solar. Se determina inicialmente la carga eléctrica total del sitio considerando todos los equipos y necesidades de electricidad. Luego se evalúa la irradiancia solar incidente y se seleccionan los paneles fotovoltaicos según su eficiencia. Con estos parámetros se realiza un prediseño para calcular la configuración óptima, incluyendo número de módulos solares, capacidad de baterías y equipos como inversores. Finalmente, y de forma complementaria, se emplean softwares de simulación solar para verificar los cálculos y visualizar el comportamiento del sistema fotovoltaico ante distintos escenarios antes de su instalación.

Ángulo Óptimo de Inclinación de los Paneles

El ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos es un parámetro de diseño óptimo que maximiza la captación de la radiación solar incidente, aumentando la productividad de un sistema a lo largo del año. Su cálculo se basa en la latitud geográfica del emplazamiento, utilizando fórmulas empíricas específicas que consideran la trayectoria variable del sol según las estaciones. Determinar con precisión este ángulo de inclinación permite orientar adecuadamente los paneles solares de tal forma que en todo momento se aproveche la máxima irradiancia disponible. Optimizando así el aprovechamiento del recurso solar, se logra la mayor generación energética del sistema fotovoltaico acorde al potencial solar del sitio, cumpliendo con la máxima productividad para la cual fue dimensionado.

$$\beta_o = 3.7 + 0.69|\phi|$$

β_o : *Angulo óptimo de inclinación*

$|\phi|$: *Latitud del lugar*

METODOLOGIA

La metodología implementada refleja un enfoque pragmático dirigido a resolver problemas específicos de sostenibilidad y eficiencia energética. Este enfoque se articula a través de un diseño de investigación aplicada, enfocado en la implementación práctica de soluciones tecnológicas en el ámbito de la energía renovable. La investigación se clasifica como descriptiva y experimental, donde se describen las características actuales de la demanda energética y se experimenta con la implementación de un sistema fotovoltaico para evaluar su impacto en la reducción de la dependencia de las fuentes de energía convencionales y en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

Enfoque de la Investigación

El enfoque adoptado es cuantitativo, ya que implica la recopilación y análisis de datos numéricos relacionados con la irradiación solar, la demanda energética del edificio, y la eficiencia de los componentes del sistema fotovoltaico. Este enfoque cuantitativo permite una evaluación objetiva y precisa de la viabilidad técnica y económica del sistema propuesto.

Tipo de Investigación

Se trata de una investigación aplicada, ya que tiene como objetivo generar conocimientos prácticos que puedan ser utilizados para resolver un problema específico: el diseño e implementación de un sistema fotovoltaico off-grid para un edificio administrativo. Este tipo de investigación contribuye directamente al desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de la energía renovable.

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es no experimental y transversal. A través de este diseño, se evalúan las condiciones actuales de irradiación solar y demanda energética para determinar los requisitos específicos del sistema fotovoltaico. Además, se utiliza un diseño experimental en la fase de simulación con software especializado, donde se manipulan variables como la configuración del sistema para optimizar el rendimiento energético del sistema.

Método de Investigación

El método de investigación comprende varios pasos sistemáticos y estructurados:

Estimación de la Demanda Eléctrica: Se realiza un análisis detallado de la demanda energética del edificio, utilizando mediciones y cálculos basados en el consumo histórico y los patrones de uso.

Análisis de la Irradiación Solar: Se emplean datos de irradiación solar específicos de la ubicación para determinar la disponibilidad de recursos solares.

Diseño del Sistema Fotovoltaico: Se seleccionan y dimensionan los componentes del sistema (paneles solares, baterías, inversores, etc.) basándose en los requisitos de demanda energética y la irradiación solar disponible.

Simulación y Evaluación: Se utilizan herramientas de software para simular el rendimiento del sistema propuesto y realizar ajustes en el diseño en función de los resultados obtenidos.

Análisis de Viabilidad: Se evalúa la viabilidad técnica, económica, y ambiental del sistema, considerando aspectos como el coste inicial, los ahorros energéticos, y la reducción de emisiones de CO₂.

RESULTADOS

La investigación realizada para el diseño de un sistema fotovoltaico off-grid destinado a satisfacer las necesidades de iluminación de un edificio administrativo ubicado en el Complejo Deportivo de Villa María del Triunfo en Lima, Perú, se estructuró mediante un enfoque metodológico riguroso y sistemático. Este enfoque se orientó hacia la identificación precisa de los requisitos energéticos del edificio, el análisis detallado de la disponibilidad de recursos solares, la selección óptima de los componentes del sistema fotovoltaico, la evaluación del rendimiento del sistema mediante simulaciones y, finalmente, la evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto. A continuación, se expone de manera detallada cada fase del proceso investigativo, destacando los resultados claves obtenidos.

Fase 1: Estimación de la Demanda Eléctrica

Inicialmente, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la demanda eléctrica del edificio, considerando el consumo histórico y los patrones de uso de los equipos de iluminación. Este análisis permitió establecer que la demanda eléctrica total para iluminación ascendía a 61,170 Wh diarios. La metodología aplicada para este cálculo implicó la utilización de fórmulas estándar de ingeniería eléctrica que consideran tanto la potencia nominal de los dispositivos como sus tiempos de operación. Este paso resultó fundamental para dimensionar adecuadamente el sistema fotovoltaico, garantizando que este fuese capaz de cubrir las necesidades energéticas del edificio de manera eficiente.

Tabla 01

Cálculo de potencia y demanda

Cálculo de estimación de potencia y energía de demanda de circuito de iluminación							
Tensión 220v	Modelo	Potencia (W)	Cantidad	Potencia Nom Total (W)	Tiempo de uso diario (H)	Demanda de corriente diaria (Ah)	Demanda energía diaria (Wh)
Piso 1	Panel led 60x 60 Disano 4000k(Oficinas)	33	51	1683	10	76.50	16830
	Tira led 1.20 m Disano 4000k(Oficinas)	18	34	612	24	66.76	14688
	Led Circular empotrable Disano 6500k (Zonas comunes y SSH)	18	26	468	12	25.53	5616

Piso 2	Panel led 60x 60 Disano 4000k(Oficinas)	33	46	1518	10	69.00	15180
	Tira led 1.20 m Disano 4000k(Oficinas)	18	2	36	24	3.93	864
	Led Circular empotrable Disano 6500k (Zonas comunes y SSH)	18	37	666	12	36.33	7992
Estimación Total de energía				4983 W		278.05 Ah/dia	61170 Wh/dia

Fase 2: Análisis de la Irradiación Solar

Posteriormente, se llevó a cabo un análisis detallado de la irradiación solar específica para la ubicación del proyecto, empleando mediciones actuales obtenidas a través del POWER Data Access Viewer de la NASA. Esta herramienta proporcionó información valiosa sobre las tendencias de irradiación solar en el área de interés, revelando que el mes de junio registraba la menor irradiación solar, con un promedio de 5.13 kWh/m²/día, mientras que el promedio anual fue estimado en 6.44 kWh/m²/día. La máxima irradiación solar, por otro lado, se observó en diciembre. El acceso a estos datos precisos y detallados fue esencial para comprender la variabilidad estacional de la irradiación solar en la región, lo cual es crucial para la planificación y optimización del sistema fotovoltaico propuesto. Esto permitió asegurar que el diseño del sistema pudiese manejar eficientemente las fluctuaciones en la irradiación solar a lo largo del año, maximizando así su eficiencia y rendimiento.

```

|-----BEGIN HEADER-----
NASA/POWER CERES/MERRA2 Native Resolution Monthly and Annual
Dates (month/day/year): 01/01/2022 through 12/31/2022
Location: Latitude -12.1482 Longitude -76.954
Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 1194.76 meters
The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999
Parameter(s):
ALLSKY_KT CERES SYN1deg All Sky Insolation Clearness Index (dimensionless)
CLOUD_AMT CERES SYN1deg Cloud Amount (%)
CLRSKY_KT CERES SYN1deg Clear Sky Insolation Clearness Index (dimensionless)
TOA_SW_DWN CERES SYN1deg Top-Of-Atmosphere Shortwave Downward Irradiance (kw-hr/m^2/day)
ALLSKY_SFC_UVA CERES SYN1deg All Sky Surface UVA Irradiance (W/m^2)
ALLSKY_SFC_UVB CERES SYN1deg All sky Surface UVB Irradiance (W/m^2)
ALLSKY_SRF_ALB CERES SYN1deg All Sky Surface Albedo (dimensionless)
ALLSKY_SFC_SW_DNI CERES SYN1deg All Sky Surface Shortwave Downward Direct Normal Irradiance (kw-hr/m^2/day)
ALLSKY_SFC_SW_DWN CERES SYN1deg All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance (kw-hr/m^2/day)
CLRSKY_SFC_SW_DWN CERES SYN1deg Clear Sky Surface Shortwave Downward Irradiance (kw-hr/m^2/day)
ALLSKY_SFC_PAR_TOT CERES SYN1deg All Sky Surface PAR Total (W/m^2)
ALLSKY_SFC_SW_DIFF CERES SYN1deg All Sky Surface Shortwave Diffuse Irradiance (kw-hr/m^2/day)
CLRSKY_SFC_PAR_TOT CERES SYN1deg Clear Sky Surface PAR Total (W/m^2)
ALLSKY_SFC_UV_INDEX CERES SYN1deg All Sky Surface UV Index (dimensionless)
-----END HEADER-----
PARAMETER YEAR JAN FEB MAR APR MAY JUN JUL AUG SEP OCT NOV DEC ANN
ALLSKY_KT 2022 0.53 0.52 0.52 0.59 0.66 0.62 0.59 0.58 0.62 0.66 0.62 0.54 0.59
CLOUD_AMT 2022 68.40 79.38 74.41 52.15 40.78 44.98 49.20 48.34 50.02 44.88 53.43 71.84 56.37
CLRSKY_KT 2022 0.73 0.73 0.73 0.74 0.76 0.76 0.76 0.76 0.78 0.79 0.77 0.74 0.75
TOA_SW_DWN 2022 11.13 10.95 10.33 9.32 8.29 7.75 7.98 8.84 9.86 10.64 11.01 11.12 9.76
ALLSKY_SFC_UVA 2022 15.68 15.14 14.38 14.20 13.57 11.84 11.55 12.77 15.59 17.73 18.00 15.97 14.70
ALLSKY_SFC_UVB 2022 0.51 0.50 0.47 0.45 0.40 0.33 0.33 0.38 0.48 0.55 0.60 0.57 0.46
ALLSKY_SRF_ALB 2022 0.12 0.12 0.13 0.12 0.13 0.13 0.14 0.14 0.16 0.16 0.16 0.15 0.14
ALLSKY_SFC_SW_DNI 2022 4.89 3.96 4.08 5.43 6.84 6.19 5.76 5.84 6.55 7.39 6.42 4.44 5.66
ALLSKY_SFC_SW_DWN 2022 5.91 5.67 5.43 5.55 5.51 4.85 4.65 5.14 6.11 6.98 6.92 5.96 5.72
CLRSKY_SFC_SW_DWN 2022 8.15 7.95 7.48 6.93 6.28 5.90 6.07 6.73 7.70 8.36 8.50 8.28 7.36
ALLSKY_SFC_PAR_TOT 2022 113.68 109.61 104.59 104.27 101.48 88.50 85.59 94.34 113.52 129.45 130.53 114.77 107.49
ALLSKY_SFC_SW_DIFF 2022 2.40 2.69 2.47 1.93 1.36 1.29 1.24 1.43 1.68 1.79 2.30 2.73 1.94
CLRSKY_SFC_PAR_TOT 2022 151.98 148.43 140.20 128.40 115.15 107.06 110.84 121.78 140.39 151.30 156.64 154.77 135.50
ALLSKY_SFC_UV_INDEX 2022 NaN NaN

```

Figura 1: Datos de irradiación solar obtenidos de “POWER DATA ACCESS VIEWER”

Fase 3: Diseño del Sistema Fotovoltaico

La selección y diseño de los componentes del sistema fotovoltaico Off Grid para el edificio administrativo se realizaron con meticuloso detalle, enfocándose en la optimización de la eficiencia y la fiabilidad del sistema completo. Para satisfacer las necesidades energéticas de ambos niveles del edificio, se determinó la necesidad de 24 paneles solares monocristalinos de 455Wp y 24V para el primer nivel y 16 paneles de las mismas especificaciones para el segundo nivel. Esta selección se fundamentó en una evaluación exhaustiva que tomó en cuenta las demandas energéticas específicas del edificio, así como la eficiencia y la compatibilidad integral de los componentes seleccionados. En cuanto al almacenamiento de energía, se optó por configurar bloques de baterías de 48V y 600Ah, utilizando un total de 3 unidades para el primer nivel y 2 unidades para el segundo nivel, todas de la marca Ultracell. Este diseño garantiza la capacidad de almacenamiento necesaria para mantener una autonomía y eficiencia óptimas durante 2 días, considerando una profundidad de descarga del 75% y una eficiencia de batería del 64%. Para la conversión de energía, se seleccionaron cuidadosamente inversores específicos para cada nivel, eligiendo un inversor MPS – VMAX de 8200W para el primer nivel y un inversor Solener de 12000W para el segundo nivel, basándose en cálculos precisos de la demanda energética y la capacidad requerida. Estos inversores cumplen con las necesidades de conversión de corriente directa a corriente alterna del sistema, asegurando una integración eficaz y eficiente con la infraestructura eléctrica existente.

Fase 4: Simulación y Evaluación

Para validar los cálculos manuales y optimizar el diseño del sistema, se emplearon herramientas de software especializadas, como PVSYST, que permitieron simular el rendimiento del sistema fotovoltaico bajo diversas condiciones ambientales. Estas simulaciones facilitaron ajustes precisos en el diseño y proporcionaron una estimación realista del rendimiento esperado del sistema, contribuyendo significativamente a la eficacia general del proyecto.

Fase 5: Análisis de Viabilidad

Finalmente, se evaluó la viabilidad del sistema fotovoltaico desde perspectivas técnica, económica y ambiental. Se estimó un ahorro económico mensual de S/. 10,532.9 soles como resultado de la implementación del sistema, lo cual subraya la rentabilidad del proyecto. Además, la reducción de emisiones de CO₂ fue calculada en 0.0102 tCO₂ diarios, evidenciando el impacto positivo del sistema en la mitigación del cambio climático y la promoción de la sostenibilidad ambiental.

Uso diario de energía, variante "Nueva variante de simulación"

Definición de consumos domésticos diarios para el año.

Consumo Distribución por hora

Consumos diarios

Número	Aparato	Potencia	Uso diario	Distrib. por hora	Daily energy
46	Panel led 60 x 60	33 W/lámpara	10,0 h/día	OK	15180 Wh
2	Luminaria tira led	18 W/apar.	24,0 h/día	OK	864 Wh
37	Luminaria led circular	18 W/apar.	12,0 h/día	OK	7992 Wh
0	Nevera / congelación profunda	0,00 kWh/día	0,0		0 Wh
0	Lavaplatos y lavadora	0,0 W prom	0,0 h/día		0 Wh
0	Otros usos	0 W/apar.	0,0 h/día		0 Wh
0	Otros usos	0 W/apar.	0,0 h/día		0 Wh
	Consumidores en espera	0 W tot	24 h/día		0 Wh
Energía diaria total					24036 Wh/día
Energía mensual					721.1 kWh/mes

Info aparatos

Definición de consumo por

Años Estaciones Meses

Fin de semana o uso semanal

Usar solo durante

7 días en una semana

Modelo

Carga Guardar Otro perfil Cancelar OK

Figura 2: Calculo de la demanda eléctrica de iluminación en segundo nivel obtenidos del programa "PVSYS 7.4"

DISCUSIÓN

La incorporación del análisis metodológico riguroso y sistemático en el diseño del sistema fotovoltaico off-grid para el edificio administrativo en el Complejo Deportivo de Villa María del Triunfo se refleja en la optimización de sistemas híbridos de energía renovable a nivel doméstico abordada por Mayer et al. (2020). Este enfoque subraya la necesidad de un equilibrio entre impactos económicos y ambientales, resonando con la fase de evaluación de la viabilidad técnica, económica y ambiental de nuestro estudio, donde se enfatiza la importancia de minimizar la huella de carbono a la par de maximizar los beneficios económicos, en consonancia con el ahorro económico mensual y la reducción de emisiones de CO₂ identificados [24].

En cuanto a la estimación de la demanda eléctrica, el trabajo de Li y Wolfs (2008) proporciona un contexto relevante al destacar cómo la selección tecnológica afecta la integración y el rendimiento del sistema fotovoltaico en edificaciones. La metodología empleada en nuestra investigación para calcular la demanda energética y dimensionar el sistema fotovoltaico se alinea con la necesidad de elegir adecuadamente tecnologías que optimicen el desempeño, asegurando una cobertura eficiente de las necesidades energéticas identificadas para iluminación [25].

La revisión de Shukla et al. (2016) sobre sistemas fotovoltaicos integrados en edificios complementa la fase de diseño del sistema fotovoltaico de nuestro estudio. Al abogar por la incorporación del sistema fotovoltaico de manera que contribuya tanto al suministro energético como a la estética del edificio, resalta la relevancia de considerar la integración arquitectónica desde las etapas iniciales, en línea con nuestra selección cuidadosa de paneles solares y componentes que armonizan con el entorno arquitectónico [26].

Liu et al. (2019) enfatizan la importancia de las tecnologías de almacenamiento energético para compensar la variabilidad de la generación fotovoltaica. Esta perspectiva es crucial para la fase de diseño y simulación del sistema propuesto, donde se seleccionaron baterías y se realizaron simulaciones para optimizar el diseño, asegurando que el sistema pueda operar eficientemente bajo diversas condiciones de irradiación solar, mejorando así la estabilidad y eficiencia del suministro energético [27].

Por último, la revisión de Feron (2016) sobre la sostenibilidad de sistemas fotovoltaicos off-grid en electrificación rural proporciona un marco útil para el análisis de viabilidad de nuestro proyecto. Al destacar los desafíos multidimensionales que pueden comprometer la sostenibilidad, este trabajo complementa nuestra evaluación final, subrayando la importancia de abordar aspectos institucionales, económicos, ambientales y socio-culturales para asegurar el éxito y la sostenibilidad a largo plazo del proyecto, en concordancia con el ahorro económico y la reducción de emisiones de CO₂ proyectados [28].

CONCLUSIONES

El presente estudio aborda la concepción y evaluación de un sistema fotovoltaico independiente diseñado específicamente para atender las demandas de iluminación de una edificación administrativa situada en Villa María del Triunfo, Lima, Perú. A través de un meticuloso proceso de selección de componentes y la validación de los cálculos mediante el software PVSYST 7.4, se evidencia la viabilidad de reducir la dependencia de los sistemas de interconexión nacional, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y fortalecer la imagen institucional mediante la implementación de soluciones basadas en energías renovables.

La importancia de esta investigación radica en su aportación al avance hacia la autosuficiencia energética y la sostenibilidad, ofreciendo un modelo detallado para la adopción de tecnologías renovables en contextos urbanos. Destaca el rol significativo de la tecnología solar fotovoltaica, particularmente en zonas favorecidas por una alta exposición solar, como medio para mitigar los impactos del cambio climático y promover un futuro energético sostenible.

De cara a futuros desarrollos en este campo, se propone la exploración de sistemas avanzados de almacenamiento de energía que permitan compensar la variabilidad de la producción fotovoltaica y asegurar una mayor fiabilidad en el suministro energético. Además, se sugiere la investigación sobre la integración arquitectónica de soluciones fotovoltaicas que no solo satisfagan los requerimientos energéticos, sino que también contribuyan a la mejora

estética de los espacios construidos. Este enfoque ampliaría la aplicabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos, facilitando su adopción tanto en entornos urbanos como rurales.

Este análisis subraya la necesidad crítica de avanzar en la investigación y aplicación de energías renovables, con especial énfasis en los sistemas fotovoltaicos independientes, como estrategia clave para abordar los retos energéticos presentes y futuros, asegurando al mismo tiempo el compromiso con la sostenibilidad ambiental, económica y social

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D. Bogdanov *et al.*, “Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability”, *Energy*, vol. 227, jul. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120467.
- G. E. Halkos y E. C. Gkampoura, “Reviewing Usage, Potentials, and Limitations of Renewable Energy Sources”, *Energies (Basel)*, vol. 13, nº 11, jun. 2020, doi: 10.3390/EN13112906.
- B. Zakeri *et al.*, “Pandemic, War, and Global Energy Transitions”, *Energies (Basel)*, vol. 15, nº 17, sep. 2022, doi: 10.3390/EN15176114.
- M. G. Hennessey, “Cambio climático, Seguridad Nacional y riesgo global”, *Revista de las Fuerzas Armadas*, nº 259, pp. 53–65, jun. 2022, doi: 10.25062/0120-0631.396.
- C. Ghenai, T. Salameh, y A. Merabet, “Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 45, nº 20, pp. 11460–11470, abr. 2020, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2018.05.110.
- C. A. Yajure Ramírez, “Metodología de comparación de técnicas de corto plazo para el pronóstico de la producción de energía eléctrica de plantas solares fotovoltaicas”, *Revista De Investigación De Sistemas E Informática*, vol. 16, nº 1, pp. 21–33, ago. 2023, doi: 10.15381/RISI.V16I1.25055.
- O. Travesset-Baro, M. Vilella, y P. da V. Borges, “Hacia la autosuficiencia energética en las ciudades. análisis del potencial solar fotovoltaico a escala urbana en el Principado de Andorra”, *CienciAmérica*, vol. 10, nº 3, pp. 25–40, oct. 2021, doi: 10.33210/CA.V10I3.369.
- J. T. S. Silva, J. K. de Alencar, S. C. de Oliveira, S. S. B. Júnior, y A. G. Morales, “Análise do custo e do potencial de geração de energia fotovoltaica em uma universidade pública brasileira”, *Revista Brasileira De Gestão Ambiental E Sustentabilidade*, vol. 7, nº 15, pp. 3–19, 2020, doi: 10.21438/RBGAS(2020)071501.
- P. Schaubé, A. Ise, y L. Clementi, “Distributed photovoltaic generation in Argentina: An analysis based on the technical innovation system framework”, *Technol Soc*, vol. 68, feb. 2022, doi: 10.1016/J.TECHSOC.2021.101839.
- G. A. Gómez-Ramírez y C. A. Bolaños-Jiménez, “Metodología para la implementación de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento para pequeñas industrias”, *Revista Tecnología en Marcha*, dic. 2022, doi: 10.18845/TM.V36I1.5843.
- E. A. C. França, M. V. de A. Vinagre, N. D. de L. V. Fonseca, M. do S. B. Lopes, M. J. M. da Ponte, y A. C. de M. Lima, “Uso da geração fotovoltaica para viabilização de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo”, *Research, Society and Development*, vol. 10, nº 12, p. e583101220731, oct. 2021, doi: 10.33448/RSD-V10I12.20731.
- A. Jäger-Waldau, I. Kougias, N. Taylor, y C. Thiel, “How photovoltaics can contribute to GHG emission reductions of 55% in the EU by 2030”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 126, jul. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2020.109836.
- W. Wang, K. Liu, M. Zhang, Y. Shen, R. Jing, y X. Xu, “From simulation to data-driven approach: A framework of integrating urban morphology to low-energy urban design”, *Renew Energy*, vol. 179, pp. 2016–2035, dic. 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2021.08.024.
- C. Marino, A. Nucara, M. F. Panzera, M. Pietrafesa, y A. Pudano, “Economic Comparison Between a Stand-Alone and a Grid Connected PV System vs. Grid Distance”, *Energies (Basel)*, vol. 13, nº 15, ago. 2020, doi: 10.3390/EN13153846.
- J. J. Yoo *et al.*, “Efficient perovskite solar cells via improved carrier management”, *Nature*, vol. 590, nº 7847, pp. 587–593, feb. 2021, doi: 10.1038/S41586-021-03285-W.

- N. Shanmugam, R. Pugazhendhi, R. M. Elavarasan, P. Kasiviswanathan, y N. Das, “Anti-Reflective Coating Materials: A Holistic Review from PV Perspective”, *Energies (Basel)*, vol. 13, n° 10, may 2020, doi: 10.3390/EN13102631.
- O. Almora *et al.*, “Device Performance of Emerging Photovoltaic Materials (Version 1)”, *Adv Energy Mater*, vol. 11, n° 11, mar. 2021, doi: 10.1002/AENM.202002774.
- F. H. M. de Moraes, O. A. V. de O. L. da Silva, A. M. de Moraes, y F. R. Barbosa, “Influência da Irradiação Solar na Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos”, *Revista Brasileira De Meteorologia*, vol. 36, n° 4, pp. 723–734, 2021, doi: 10.1590/0102-7786360049.
- J. R. A. Núñez, I. F. P. Benítez, R. Y. Proenza, L. S. Vázquez, y D. M. Díaz, “Metodología de diagnóstico de fallos para sistemas fotovoltaicos de conexión a red”, *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, vol. 17, n° 1, pp. 94–105, 2020, doi: 10.4995/RIAI.2019.11449.
- M. S. de Castro, F. N. Belchior, G. D. de Oliveira, J. D. Santos, y S. R. Pires, “Análise do Impacto da Geração Fotovoltaica na Universidade Federal de Goiás/ Analysis of the Impact of Photovoltaic Generation at the Federal University of Goiás”, *Brazilian Applied Science Review*, vol. 4, n° 5, pp. 3023–3042, 2020, doi: 10.34115/BASRV4N5-022.
- A. M. Pires, M. Braga, y R. Rütther, “Performance assessment of bare and anti-reflective coated CdTe photovoltaic systems in comparison to multicrystalline Si in Brazil”, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, n° 10, pp. 1105–1124, oct. 2021, doi: 10.1002/PIP.3446.
- C. Zomer *et al.*, “Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre”, *Solar Energy*, vol. 212, pp. 258–274, dic. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.10.080.
- M. Sheikholeslami, S. A. Farshad, Z. Ebrahimpour, y Z. Said, “Recent progress on flat plate solar collectors and photovoltaic systems in the presence of nanofluid: A review”, *J Clean Prod*, vol. 293, abr. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126119.
- M. J. Mayer, A. Szilágyi, y G. Gróf, “Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm”, *Appl Energy*, vol. 269, jul. 2020, doi: 10.1016/J.APENERGY.2020.115058.
- Q. Li y P. Wolfs, “A Review of the Single Phase Photovoltaic Module Integrated Converter Topologies With Three Different DC Link Configurations”, *IEEE Trans Power Electron*, vol. 23, n° 3, pp. 1320–1333, may 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.920883.
- A. K. Shukla, K. Sudhakar, y P. Baredar, “A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system”, *Energy Build*, vol. 128, pp. 99–110, sep. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.06.077.
- J. Liu, X. Chen, S. Cao, y H. Yang, “Overview on hybrid solar photovoltaic-electrical energy storage technologies for power supply to buildings”, *Energy Convers Manag*, vol. 187, pp. 103–121, may 2019, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2019.02.080.
- S. Feron, “Sustainability of Off-Grid Photovoltaic Systems for Rural Electrification in Developing Countries: A Review”, *Sustainability*, vol. 8, n° 12, pp. 1–26, 2016, doi: 10.3390/SU8121326.