

PMI approach in the implementation of photovoltaic systems for self-consumption

Ruben A. Figueroa-León¹; Luis A. Julca-Verástegui²; Martin Taboada-Neira² and Alexander Y. Vega-Anticona²

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Lima-Perú, C28920@utp.edu.pe

^{2,3,4}Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Posgrado, Unidad de Posgrado en Ingeniería, Trujillo-Perú, ljulcav@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe, avega@unitru.edu.pe

Abstract– This work includes the design, management and execution of a photovoltaic picogeneration system using renewable solar energy for home self-consumption under the PMI approach, supported by the VDI 2221 standard, which allowed guaranteeing the technical-economic viability of the system, based on the average consumption. of electrical energy of homes and the solar energy potential of sector #4 of the district of Chimbote, Peru. The engineering design methodology with application of the German standard VDI 2221 and under the validated approach of the PMI, ensured the technical characteristics of assembly, operation and maintenance of the photovoltaic system, satisfying the demand of 2.65 kWh/day by 100%, reducing consumption costs, as well as harmful environmental emissions of 0.016 Ton CO₂ annually, having a total budget of S/ 10,466.04 and a cost generation unit of 0.4279 S/ kWh, in addition, a NPV of S/ 2,499.63, an IRR of 8.87%, B/C of 1.239 and a PRI of 12.4 were obtained, so the project is profitable, but in the long term , due to the high initial investment cost, also in the event of possible financing, the project would not be as profitable due to the high interest rates of financial entities.

Keywords-- photovoltaic systems, picogeneration, solar energy, VDI, PMI.

Enfoque PMI en la implementación de sistemas fotovoltaicos para autoconsumo

Ruben A. Figueroa-León¹; Luis A. Julca-Verástegui²; Martin Taboada-Neira² and Alexander Y. Vega-Anticona²

¹Universidad Tecnológica del Perú, Facultad de Ingeniería Industrial, Lima-Perú, C28920@utp.edu.pe

^{2,3,4}Universidad Nacional de Trujillo, Escuela de Posgrado, Unidad de Posgrado en Ingeniería, Trujillo-Perú, ljulcav@unitru.edu.pe, mtaboada@unitru.edu.pe, avega@unitru.edu.pe

Resumen– Este trabajo comprende el diseño, gestión y ejecución de un sistema fotovoltaico de picogeneración usando energía renovable solar para autoconsumo domiciliario bajo enfoque del PMI, apoyada en la norma VDI 2221 la cual permitió garantizar la viabilidad técnico-económica del sistema, a partir del consumo promedio de energía eléctrica de las viviendas y el potencial energético solar del sector #4 del distrito de Chimbote, Perú. La metodología de diseño en Ingeniería con aplicación de la norma alemana VDI 2221 y bajo el enfoque validado del PMI, aseguró las características técnicas de montaje, operación y mantenimiento del sistema fotovoltaico, satisfaciendo la demanda de 2.65 kWh/día en un 100%, reduciendo los costos por consumo, así como las emisiones nocivas ambientales en 0.016 Ton CO₂ anuales, teniendo un presupuesto total de S/ 10,466.04 y un costo unitario de generación de 0.4279 S/ kWh, además, se obtuvo un VAN de S/ 2,499.63, una TIR de 8.87%, B/C de 1.239 y un PRI de 12.4 por lo que el proyecto es rentable, pero a largo plazo, debido al alto costo de inversión inicial, asimismo ante un posible financiamiento, el proyecto no sería tan rentable por las altas tasas de interés de las entidades financieras.

Palabras clave– sistemas fotovoltaicos, picogeneración, energía solar, VDI, PMI.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el diálogo y la colaboración internacional son factores clave para la transición energética, que involucra tanto a productores como a consumidores, permitiendo desplegar de la forma menos disruptiva hacia esta importante transición. Para ello se revisaron investigaciones a nivel internacional relacionadas a proyectos de sistemas fotovoltaicos (SF) con energía renovable solar, tal es el caso de [1] quienes concluyeron que, al evitar el tamaño excesivo de sistemas de energía solar permite asegurar un adecuado, confiable y económico diseño del sistema, además los mismos procedimientos pueden emplearse y adaptarse a distintos ámbitos y sectores, luego [2] señaló que para la mantención anual de un SF, se tiene un costo de 0.5 a 2% de la inversión, años más tarde, [3] evidenció la escasez de conocimientos técnicos relacionados a la generación distribuida, limitando el acceso a tecnologías relacionadas con fuentes no convencionales de energía, que de ser implementadas de forma correcta llegarían a representar bajas importantes en los costos de operación, finalmente [4] concluyeron que los paneles del SF aislado al estar en una orientación e inclinación óptima pueden aprovechar eficientemente la radiación con elementos ideales para su instalación.

En el ámbito nacional, [5] resaltan que una correcta regulación y fomento de la microgeneración distribuida en el Perú, incentivará a la población a realizar proyectos que le permitan gestionar su autoconsumo, a partir de fuentes renovables de energía, luego, [6] concluyó que la ejecución de un proyecto de SF apoyado en las buenas prácticas del PMI, garantiza una buena gestión, permitiendo definir correctamente el alcance, evitar caer en sobrecostos y dilataciones del cronograma, identificar los riesgos, asegurar la calidad, estimar apropiadamente los recursos, identificar los canales principales de comunicación, así como involucrar a todas las partes interesadas, al año siguiente, [7] concluyó que el tiempo de recuperación para un SF, se da a partir del año 12 después de su puesta en funcionamiento, finalmente [8] concluyó que si se configura, dimensiona y analiza apropiadamente la influencia de cada componente del SF, se garantiza una mayor disponibilidad de energía eléctrica.

En el plano local, [9] concluyó que la energía para autoconsumo con almacenamiento tiene un costo de 0.357 S/ /kWh, teniendo un ahorro anual de 81.72%, además, se dejan de emitir 33.38 Ton CO₂ en 25 años, con un PRI de 12 años.

A. Conceptos principales

1) *Sistema(s) Fotovoltaico(s) (SF)*: es un sistema que aprovecha la energía solar como energía limpia e inagotable y en progresivo crecimiento se considera una solución para la reducción de gases de efecto invernadero, usado especialmente en zonas aisladas y desconectadas [10].

2) *Verein Deutscher Ingenieure (VDI)*: es una metodología de diseño mecánico, en este caso la norma VDI 2221 que se enfoca en la definición de requisitos con condiciones límite, la derivación de funciones básicas, así como el desarrollo de conceptos y selección mediante análisis del valor de utilidad [11].

3) *Project Management Institute (PMI)*: es la institución líder en la Industria de la Gerencia de Proyectos, dedicada al progreso y fomento de su aplicación efectiva a través de la práctica [12].

4) *Project Management Institute (PMBOK)*: es un modelo de gestión de proyectos que se utiliza para proporcionar prácticas adecuadas para ayudar a los gerentes de proyectos a lidiar con los ciclos de vida de entrega de los proyectos [13].

5) *Indicadores Económicos*: según [9], para que la inversión sea rentable, el número de años necesarios para compensar la inversión mediante flujos de efectivo positivos o también llamado Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI), debe ser menor que la mitad de los años de vida útil del sistema, así también la relación Beneficio/Costo (B/C), debe ser mayor a 1, luego, el Valor Actual Neto (VAN) debe ser mayor o igual al costo de la inversión, además la Tasa Interna de Retorno (TIR), utilizada como un índice para medir y comparar la rentabilidad de la inversión, debe ser mayor a la Tasa de descuento. Las unidades de medida para el PRI, B/C, VAN y TIR son: años, adimensional, S/ y % respectivamente.

II. METODOLOGÍA

A. Diseño metodológico

Se consideraron todos los SF en general para la población, asimismo un SF de picogeneración (Off-Grid) como muestra única. Luego, se siguió una secuencia metodológica según la guía del PMBOK®, para cada grupo de procesos (Ver Fig. 1).

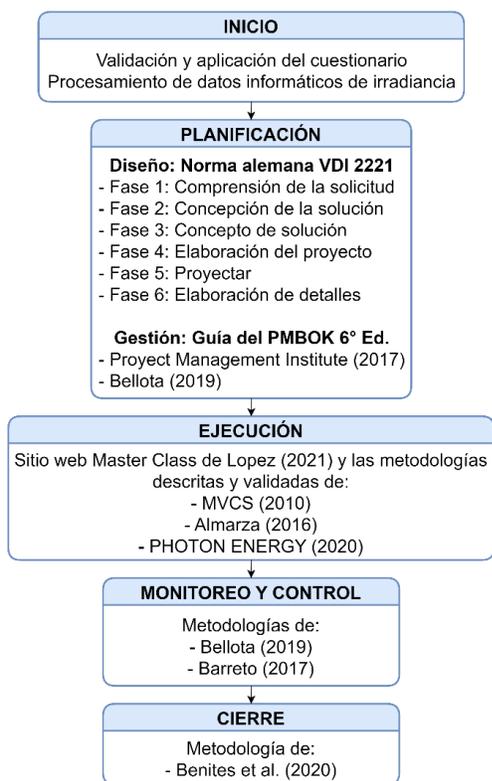


Fig. 1 Metodología de la investigación.

La investigación inició con la validación del cuestionario mediante la prueba estadística V de Aiken, luego los resultados de la aplicación de este instrumento se validaron mediante el Alfa de Cronbach, posteriormente se realizó el análisis estadístico de la demanda, para cerrar con el procesamiento de datos, calculando los promedios para llegar a obtener los valores de irradiancia global diaria media

mensual a partir de los datos obtenidos mediante el software *Meteonorm V8.0.4®*, luego, la planificación comprendió todas las fases de la metodología de diseño acorde a la norma alemana VDI 2221. En un segundo momento la aprobación del diseño, seguidamente el desarrollo de un expediente técnico, para finalmente culminar con el proceso de adquisición de equipos, la ejecución comprendió el proceso de instalación, operación y puesta en marcha del SF, a partir de manuales que garantizan la adecuada operatividad. El monitoreo y control encomienda acciones preventivas que garanticen la correcta operatividad del SF así también se realizó un análisis de disminución de emisiones durante el funcionamiento del SF, finalmente el cierre comprendió la culminación formal de todas las actividades del proyecto para finalizar con el análisis económico y financiero.

B. Zona de estudio

La zona de estudio estuvo comprendida por los asentamientos humanos El Mirador, José Sánchez Milla, Octavio Arrollo Villajulca, Esperanza Alta, Los Girasoles, San Pedro y Los Jardines Cono Norte pertenecientes al sector #4 de la ciudad de Chimbote, según se muestra en la Fig. 2.

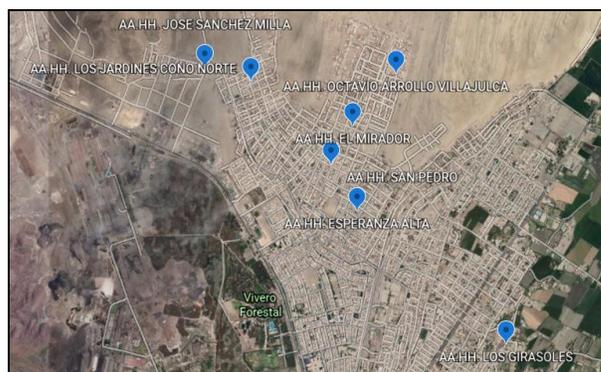


Fig. 2 Sector #4 – Chimbote, Ancash, Perú. [14]

III. RESULTADOS

A. Demanda y potencial energético en Chimbote

Se seleccionó la vivienda con el consumo promedio mensual más cercano a la media poblacional de 66.06 kWh.

TABLA I
CONSUMO DE ENERGÍA MENSUAL EN kWh
(Jul 2020 – Jun 2021)

Jul-20	Ago-20	Set-20	Oct-20	Nov-20	Dic-20
48	34	34	47	42	62
Ene-21	Feb-21	Mar-21	Abr-21	May-21	Jun-21
60	55	82	69	73	79

Nota. Información extraída de los recibos de energía eléctrica de cada mes.

Según la Tabla I, el mayor consumo mensual fue de 82 kWh en marzo del 2021, siendo considerado para obtener un consumo de energía diaria promedio de 2.65 kWh/día, además del potencial energético de la Fig. 3, se consideró el valor crítico de 4.98 kWh/m².

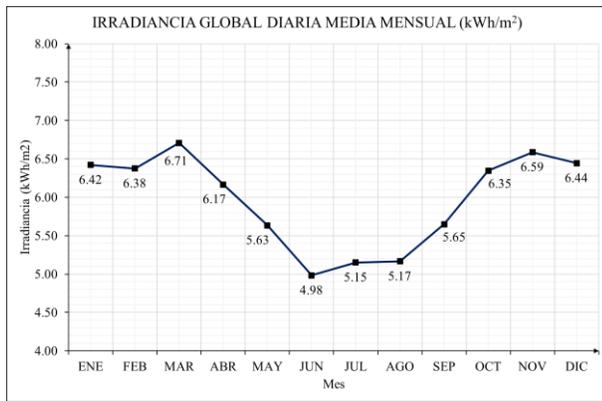


Fig. 3 Irradiancia global diaria media mensual (kWh/m²).

B. Especificaciones finales de diseño del SF

Se determinaron las características técnicas del SF aplicando la metodología de diseño según la VDI 2221 (Ver Tabla II), así como los componentes de la Tabla III.

TABLA II
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SF

CARACTERÍSTICA	VALOR
Número de paneles solares	4
Potencia de los módulos solares	200W
Potencia solar fotovoltaica instalada	800W
Eficiencia del sistema	71.4%
Potencia generada	2844.58 Wh/día
Amperios del regulador de carga	60A
Voltaje del sistema	12V
Pico de arranque máximo admitido por el inversor	1600W
Capacidad de la batería	300Ah
Energía útil almacenada	1800Wh

Nota. La tabla muestra los valores obtenidos mediante cálculos de ingeniería.

TABLA III
LISTA DE COMPONENTES DEL SF

Nº	Componentes principales
1	Panel solar fotovoltaico 200W 12V
2	Controlador PWM LCD 60A 12/24V Must Solar
3	Inversor Solar Victron Phoenix 12V 800VA
4	Batería GEL 12V 300Ah Tensite
Otros accesorios	
5	Cable Unifilar 6 mm ² SOLAR PV ZZ-F Rojo
6	Cable Unifilar 6 mm ² SOLAR PV ZZ-F Negro
7	Cable Unifilar 16 mm ² SOLAR PV ZZ-F Rojo
8	Cable Unifilar 16 mm ² SOLAR PV ZZ-F Negro
9	Cable Unifilar 50 mm ² POWERFLEX RV-K Verde
10	Cable Unifilar 50 mm ² POWERFLEX RV-K Negro
11	Caja Estanca de paso 150x120mm
12	Repartidor LEGRAND Bornera Seleccionable 100A
13	Terminal de Compresión Cable 50mm - Perno 8mm
14	Conector MC4 Multicontact Macho-Hembra
Seguridad	
15	Seguridad de CC
16	Seguridad de CA
17	Sistema de puesta a tierra
Sistema de montaje	
18	Perfil principal, fijadores, sujeción y anclaje

Nota. La tabla muestra los componentes diseñados y los seleccionados de catálogos de proveedores en áreas mecánica, eléctrica y electrónica.

Finalmente, la Fig. 4 muestra el esquema eléctrico del SF.

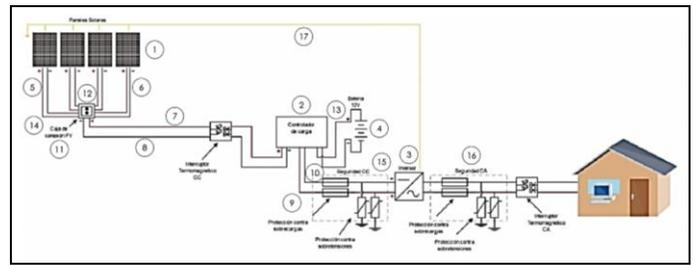


Fig. 4 Esquema eléctrico del SF.

C. Características técnicas de montaje, operación y mantenimiento de los SF

Se consideró un área efectiva de 20.7 m² como se observa en la Fig. 5, que incluye tanto el sistema de montaje, así como un 20% adicional para las actividades de mantenimiento.

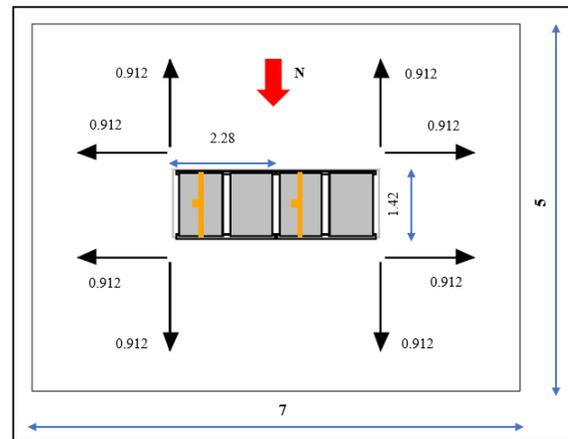


Fig. 5 Vista de planta de la azotea de la vivienda.

Así también, se estableció una inclinación de los módulos solares de 19° orientado hacia el Norte, según la Fig. 6.

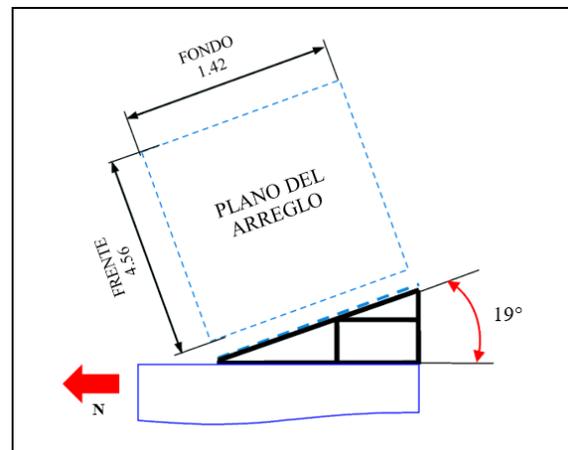


Fig. 6 Vista lateral de la azotea de la vivienda.

A fin de garantizar una adecuada instalación, la Tabla IV muestra el plan de montaje del SF.

TABLA IV
PLAN DE MONTAJE DEL SF

PLAN DE MONTAJE DEL SF	
Tipo:	Sistema aislado de la red (Off-Grid)
Montaje:	A nivel del techo
ANTES DEL MONTAJE	
1	Conocer las normas de instalación y las políticas legales de generación distribuida en el Perú.
2	Realizar una evaluación técnica de la zona a instalar.
3	Determinar la ubicación de cada componente de la instalación y hacer un trazado de diseño de la línea de electrificación deseada.
4	Revisar adecuadamente los manuales de especificaciones técnicas de cada componente.
5	Priorizar el tema de la seguridad y el fácil acceso.
6	Contar con las herramientas, materiales y adicionales necesarios antes de proceder a instalar.
MONTAJE	
1	Instalación de la batería.
2	Instalación del controlador de carga.
3	Instalación del inversor.
4	Instalación de los elementos de seguridad.
5	Instalación del sistema de montaje.
6	Instalación de los paneles fotovoltaicos.
7	Instalación de otros accesorios.
8	Conexión del SF
DESMONTAJE	
1	Desconectar el arreglo FV.
2	Desconectar la batería.
3	Desconectar el SF del tablero eléctrico de la vivienda.

Posteriormente, la Tabla V muestra el plan de operación, además la Tabla VI proporciona una guía de usuario para la puesta en marcha del SF.

TABLA V
PLAN DE OPERACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

PLAN DE OPERACIÓN DE UN SF	
Tipo:	Sistema aislado de la red (Off-Grid)
Montaje:	A nivel del techo
1	Realizar una hoja de ruta.
2	Verificar las herramientas y equipos a usar.
3	Verificar que todos los componentes eléctricos, mecánicos y electrónicos se encuentren correctamente instalados.
4	Hacer una inspección de toda la instalación antes de la puesta en marcha.
5	Documentar toda la información.

TABLA VI
GUÍA DE USUARIO PARA LA PUESTA EN MARCHA DEL SF

GUÍA DE USUARIO PARA PUESTA EN MARCHA DEL SF	
Tipo:	Sistema aislado de la red (Off-Grid)
Montaje:	A nivel del techo
Periodo de funcionamiento:	08:00 am - 18:00 pm
ACTIVAR EL SF	
1	Encender el inversor.
2	Habilitar el paso de energía desde los paneles al regulador mediante el interruptor de corriente directa.
3	Activar el interruptor general.
DESACTIVAR EL SF	
1	Deshabilitar el paso de energía desde los paneles al regulador mediante el interruptor de corriente directa.
2	Apagar el inversor.
3	Desactivar el interruptor general.

Finalmente, en la Fig. 7 se despliega un cronograma anual para la ejecución del plan de mantenimiento.

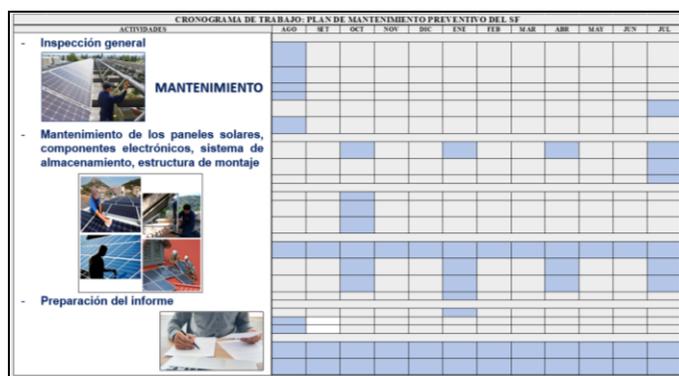


Fig. 7 Cronograma anual de mantenimiento preventivo del SF.

D. Mejores prácticas bajo el enfoque del PMI para la gestión y ejecución de SF

Principales resultados para cada área de conocimiento:

1) *Gestión de la integración:* El proyecto que consiste en el diseño, gestión y ejecución de un SF de picogeneración con energía renovable solar para autoconsumo domiciliario en una vivienda del sector #4 de Chimbote, contempla:

- Demanda: 2.65 kWh/día
- Periodo: 168 días hábiles
- Presupuesto: S/ 10,466.04

La Tabla VII, muestra los principales hitos del proyecto.

TABLA VII
HITOS DEL PROYECTO DE SF

EDT	PRINCIPALES HITOS	FECHA
1.1	INICIO DEL PROYECTO	01/04/2022
1.2.1	INICIO	04/04/2022
1.2.2	PLANIFICACIÓN	24/09/2022
1.2.3	EJECUCIÓN	08/10/2022
1.2.4	MONITOREO Y CONTROL	11/10/2022
1.2.5	CIERRE	13/10/2022
1.3	FIN DEL PROYECTO	13/10/2022

2) *Gestión del alcance:* La Tabla VIII, muestra los criterios de aprobación del alcance del producto y la Tabla IX, los entregables del proyecto.

TABLA VIII
CRITERIOS DE APROBACIÓN DEL ALCANCE DEL PRODUCTO

PARÁMETRO	LÍMITES ACEPTADOS
Potencia Pico	800 Wp
Coefficiente de rendimiento	71.40%
Área efectiva de instalación	20.7 m ²
Peso de cada panel solar	14.2 kg
Eficiencia del inversor	91%
Datos técnicos de los componentes del SF	Disponible durante toda la etapa de la instalación
Cantidad de paneles en paralelo	4
Voltaje del SF	12V

TABLA IX
ENTREGABLES DEL PROYECTO

ENTREGABLE
• Expediente técnico
• Plano de distribución
• Plano del sistema de montaje
• Esquema eléctrico del SF
• Certificados de calidad
• Acta de observaciones
• Control de Check List
• Certificado de operatividad
• Manuales del SF

3) *Gestión del cronograma:* En seguida, se muestran los principales datos:

- **Tiempo estimado:** 168 días hábiles
- **Jornada diaria de trabajo:** 8 horas
- ***INICIO:** 3 días
- ***PLANIFICACIÓN:** 149 días
- ***EJECUCIÓN:** 12 días
- ***MONITOREO Y CONTROL:** 2 días
- ***CIERRE:** 2 días

4) *Gestión de los costos:* En breve, en la Tabla X, se presentan los costos totales por etapa, así como el presupuesto total del proyecto en la Tabla XI:

TABLA X
ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO

ESTIMACIÓN DE COSTOS	MONTO
INICIO	S/ 150.00
PLANIFICACIÓN	S/ 750.00
EJECUCIÓN	S/ 7,691.70
MONITOREO Y CONTROL	S/ 80.00
CIERRE	S/ 50.00
TOTAL	S/ 8,721.70

TABLA XI
PRESUPUESTO DEL PROYECTO

ESTIMACIÓN DE COSTOS TOTAL	S/ 8,721.70
Gastos Administrativos (5%)	S/ 436.09
Reserva de Contingencia (10%)	S/ 872.17
LÍNEA BASE DE COSTO	S/ 10,029.96
Reserva de Gestión (5%)	S/ 436.09
PRESUPUESTO DEL PROYECTO	S/ 10,466.04

5) *Gestión de la calidad:* En breve, en la Tabla XII, se muestran los responsables y roles para garantizar la calidad.

TABLA XII
ROLES PARA GARANTIZAR LA CALIDAD DEL PROYECTO

Responsable	Rol
Jefe de proyecto	Custodiar la calidad en las distintas actividades del proyecto.
Asistente administrativo	Asistir en las distintas actividades al jefe de proyecto.
Supervisor de proyecto	Supervisar la calidad de trabajo realizado.
Técnico electricista	Realizar la conexión de componentes con calidad.
Técnico montaje	Realizar el montaje de estructuras con calidad.

Además, en cuanto al proyecto se deben tener en cuenta las expectativas del cliente, presupuesto estimado, cronograma, normas de seguridad, calidad de los entregables, mientras que, en cuanto al producto, la productividad requerida de 2.84 kWh/día para el primer año, límites aceptables, componentes certificados y levantamiento de las observaciones.

6) *Gestión de los recursos:* En breve, la Fig. 8 presenta el organigrama correspondiente al proyecto en mención.

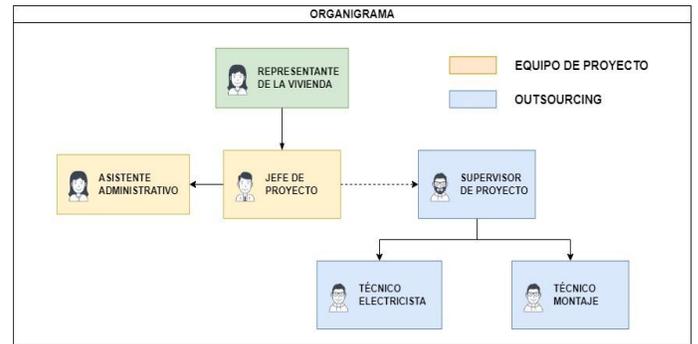


Fig. 8 Organigrama para la ejecución del proyecto de SF.

7) *Gestión de las comunicaciones:* A fin de garantizar que se transmita la información de manera correcta entre las partes interesadas, a continuación, la Fig. 9, muestra el flujo de comunicación.

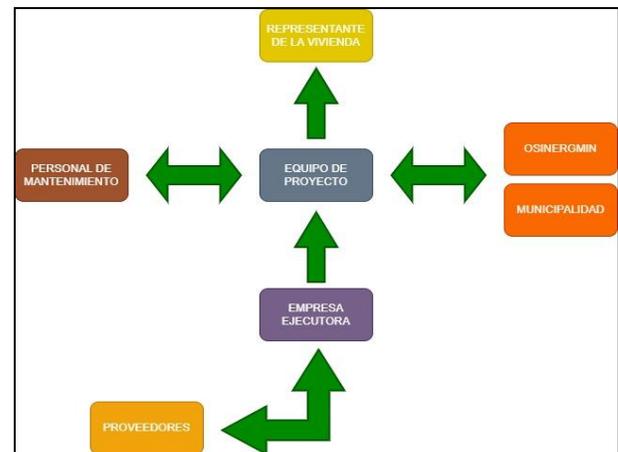


Fig. 9 Flujo de comunicación entre las partes interesadas.

8) *Gestión de los riesgos:* Para salvaguardar la integridad del proyecto y de las personas que intervienen, se contemplaron los principales riesgos, así como las estrategias de acción para poderlos abordar, de acuerdo como se muestra en la Tabla XIII:

TABLA XIII
RIESGOS Y ESTRATEGIAS DE ACCIÓN DEL PROYECTO

PRINCIPALES RIESGOS	ESTRATEGIAS DE ACCIÓN
Proveedores no confiables.	Realizar contratos bajo penalidad de no cumplir con los requerimientos del proyecto.
Especificaciones técnicas deficientes de los componentes del SF.	Realizar contratos bajo penalidad de no cumplir con los plazos establecidos.
Entregables con alta complejidad de desarrollo y entendimiento.	Realizar capacitaciones de forma periódica a la población.

9) *Gestión de las adquisiciones:* Una vez aprobado el expediente técnico de diseño del SF, se considera:

- Preparación de la propuesta (30 días)
- Evaluación de la propuesta y selección del proveedor (30 días)
- Aprobación (1 día)

Además, se consideraron como principales proveedores los que se muestran en la Fig. 10:



Fig. 10 Principales proveedores de componentes fotovoltaicos.

10) *Gestión de los interesados:* Es importante mantener una buena relación con todas las partes interesadas (Ver Fig. 11), así como gestionar adecuadamente la información.



Fig. 11 Partes interesadas del proyecto de SF.

E. Disminución de las emisiones o riesgos ambientales durante el funcionamiento del SF.

Es importante indicar que no toda la producción energética de la empresa suministradora se realiza mediante el uso de combustibles fósiles, gran parte se genera en centrales hidroeléctricas y sólo el 2.87% en centrales térmicas, tal es así que al usar el SF, se prevé un ahorro de 0.007 de TOE en un año, al producir 1.04 MWh, así como un ahorro de 0.154 TOE en 25 años, al producir 24.46 MWh de energía eléctrica, de acuerdo con la Tabla XIV.

TABLA XIV
AHORRO DE TONELADAS EQUIVALENTES DE PETRÓLEO (TOE)

Descripción	TOE
Factor de conversión [TOE/MWh]	0.22
TOE ahorrado en un año = $0.0287 * 0.22 * 1.04$ MWh	0.007
TOE ahorrado en 25 años = $0.0287 * 0.22 * 24.46$ MWh	0.154

Nota. Factor de conversión extraído de [15].

Así también, al producir 1.04 MWh de energía eléctrica, se dejaría de emitir 0.016 toneladas de CO₂ en un año, asimismo 0.384 toneladas de CO₂, al producir 24.46 MWh en 25 años, según la Tabla XV.

TABLA XV
EMISIONES EVITADAS DE TON CO₂

Descripción	Ton CO ₂
Factor de emisión [Ton/MWh]	0.547
Emisiones evitadas en un año = $0.0287 * 0.547 * 1.04$ MWh	0.016
Emisiones evitadas en 25 años = $0.0287 * 0.547 * 24.46$ MWh	0.384

Nota. Factor de emisión extraído de [16].

F. Estudio de factibilidad económica del proyecto de ejecución de SF

Costo unitario de generación (S/kWh). Se obtuvo un costo total del SF de S/ 10,466.04, produciendo 24457.44 kWh en un periodo de 25 años, siendo el costo unitario de generación de 0.4279 S/ / kWh, de acuerdo con la Tabla XVI.

TABLA XVI
COSTO UNITARIO DE GENERACIÓN CON EL SF

Costo total del SF	S/ 10,466.04
Energía total producida por el SF en 25 años	24457.44 kWh
Costo unitario de generación	0.4279 S/ / kWh

Cabe señalar que las tarifas eléctricas se van incrementando progresivamente, sin embargo, el costo unitario de generación se mantiene constante.

Consumo promedio mensual de energía eléctrica (kWh/mes). Antes de instalar el SF, la cantidad de energía requerida es de 685 kWh anual, equivalente a 57.08 kWh/mes en promedio, obtenida de la red. Posteriormente, la cantidad de energía requerida de la red con el SF en operación para el primer año es de 0 kWh.

Además, dado que el sistema está dimensionado considerando la pérdida de eficiencia de la instalación (0.5% anual), se mantendrá el mismo valor de energía requerida de la red para los años siguientes.

Costos por consumo mensual de energía eléctrica (S/kWh). De la demanda total de 685 kWh, el 100% es cubierto con el SF, determinando que el ahorro mensual es de S/ 37.61 y el anual de S/ 451.35, según la Tabla XVII.

TABLA XVII
AHORRO MENSUAL Y ANUAL CON EL SF

	kWh	100%	Ahorro S/
Mensual	57.08	57.08	S/ 37.61
Annual	685.00	685.00	S/ 451.35

Análisis económico y financiero del proyecto. A continuación, la Tabla XVIII, contempla la alternativa sin financiamiento y con financiamiento del proyecto.

TABLA XVIII
ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DEL PROYECTO

SIN FINANCIAMIENTO	CON FINANCIAMIENTO
Inversión inicial: S/ 10,466.04	Inversión inicial: S/ 8,466.04
VAN-E: S/ 2,499.63	Financiamiento: S/ 2,000.00
TIR-E: 8.87% > 7.025% (WACC)	Tiempo: 2 años
B/C económico: 1.239	Cuotas mensuales: S/ 120.88
PRI: 12.4 años	VAN-F: S/ 34.97
	TIR-F: 8.68% > 8.650% (KO)
	B/C financiero: 1.004
	PRI: 12.8 años

G. Comparación del sistema propuesto con otros proyectos similares

En cuanto a costos, el SF propuesto tiene un presupuesto total de S/ 10,466.04 y un costo unitario de generación de 0.4279 S/ kWh. En comparación con [17], quienes analizan sistemas más grandes en Austria (20.14 kWp) con un Costo Nivelado de Electricidad (LCOE) que oscila entre 0.0811 y 0.0948 EUR/kWh. El costo unitario de generación del proyecto (aproximadamente 0.10 EUR/kWh al tipo de cambio actual) se encuentra dentro de un rango comparable.

En términos de eficiencia, el sistema en propuesto alcanza una eficiencia del 71.4% y genera 2.84 kWh/día, mientras que [18] analiza sistemas residenciales en Palestina con diferentes tasas de autoconsumo, donde el sistema de 2 kWp utiliza el 96.27% de su energía generada.

En cuanto a viabilidad financiera, el proyecto presenta un VAN-E de S/ 2,499.63, una TIR-E de 8.87%, un B/C de 1.239 y un PRI de 12.4 años, mientras que [18] muestra que, para los sistemas en Palestina, el sistema de 2 kWp tiene un TIR más alto del 23.60% y un período de recuperación descontado (DPP) más corto de 4.95 años. Sin embargo, estos operan bajo un esquema de net-metering, desde luego [17] reporta periodos de recuperación que varían de 6.01 a 14.66 años.

H. Impacto social, escalabilidad y adaptabilidad del proyecto

La escalabilidad de SF a comunidades o grupos de viviendas podría generar economías de escala en la adquisición de componentes y optimizar los costos de gestión y mantenimiento, buscando mejorar la rentabilidad a través de esquemas de conexión a la red, autoconsumo colectivo, incentivos gubernamentales y la posible venta de servicios a la red [18], además de aumentar significativamente el impacto

ambiental positivo al reducir las emisiones contaminantes y la dependencia de fuentes de energía no renovables. La aplicación de la metodología PMI facilitaría la gestión eficiente de proyectos más grandes y complejos, mientras que la integración de conceptos de comunidades energéticas y almacenamiento podría optimizar el uso de la energía generada localmente.

I. Alternativas de financiamiento y su efecto en la rentabilidad

Se resalta la importancia de los subsidios y esquemas de incentivos para la adopción de SF, como, por ejemplo:

En Palestina, inicialmente se incentivó la adopción de paneles solares a través de una iniciativa de tarifas de alimentación (FiT). Sin embargo, debido a la disminución de ingresos de las compañías de distribución, se transitó a un sistema de medición neta, la cual permite a los consumidores generar electricidad, exportar el excedente a la red y recibir créditos para compensar el consumo futuro, lo que incentiva la inversión en SF [18].

En China, un estudio sugiere transformar los beneficios ambientales de los SF en subsidios para mejorar su viabilidad económica y acortar los PRI. Este estudio encontró que los beneficios ambientales pueden ser significativamente mayores que los subsidios actuales. También se propone implementar subsidios diferenciados a nivel provincial basados en los beneficios económicos y los PRI de cada región [19].

En Italia, para fomentar la difusión de las Comunidades de Energía Renovable, se propuso un decreto que contempla contribuciones a los fondos de capital y un mecanismo de incentivo consistente en una tarifa premium por la energía compartida [20].

Estos ejemplos sugieren que los subsidios gubernamentales directos o indirectos (como tarifas preferenciales o la monetización de beneficios ambientales) pueden mejorar significativamente la accesibilidad económica de los SF, reduciendo el impacto del alto costo inicial y haciendo este proyecto, más atractivo para los usuarios.

J. Mantenimiento a largo plazo

Se consideró un plan de mantenimiento para prevenir posibles fallas, sin embargo, la rentabilidad del SF a lo largo de sus 25 años de vida útil se ve afectada por la degradación anual de la eficiencia, costos de mantenimiento y reemplazo de las baterías (cada 12 años) o el controlador de carga e inversor (cada 10 años) lo que aumenta los costos, así como el PRI a 14.9 años, impactando negativamente la rentabilidad del SF proyectado en el análisis económico del proyecto, teniendo un VAN-E de S/ 139.18, TIR-E de 7.14% y B/C de 1.013 siendo crucial una selección de componentes de alta calidad y un plan de mantenimiento adecuado para mitigar estos riesgos y asegurar la rentabilidad a largo plazo.

IV. DISCUSIÓN

[9] estudió la demanda a partir de una muestra de 12 recibos del sector residencial por ser el más representativo de Chimbote, considerando la vivienda con el consumo más cercano a la media muestral, obteniendo un valor unitario de 204.67 kWh/vivienda, el cual coincide y es consistente con el presente trabajo de investigación en cuanto a metodología estadística, sin embargo, se realizó el estudio a una muestra de 96 viviendas comprendidas en las 7 zonas del sector #4 de Chimbote por su mayor nivel de radiación dada su altitud, considerando la vivienda con el consumo más cercano a la media poblacional, con un valor unitario de 66.28 kWh/vivienda, por otro lado, si bien en ambos casos los datos de irradiancia se obtuvieron mediante el software Meteonorm, Barreto encontró un valor de 4.51 kWh/m², mientras que para el presente trabajo de investigación considerando el historial de datos para una mayor consistencia, se estableció un valor de 4.98 kWh/m², sin embargo para los valores unitarios de consumo, ambas zonas no coinciden en número de habitantes.

Al evitar el tamaño excesivo de SF permite asegurar un adecuado, confiable y económico diseño, además los mismos procedimientos pueden emplearse y adaptarse a aplicaciones con mayores consumos de energía y ser empleado para otras ubicaciones geográficas, sin embargo, los parámetros de diseño apropiados de tales ubicaciones deberían evaluarse [1]. En el presente trabajo de investigación los valores obtenidos en base a los modelos matemáticos del referido autor son coherentes, sin embargo, se complementaron con algunos detalles técnicos de los módulos del curso Casas Solares a través de Hotmart y el sitio web Máster Class.

[8] en su investigación para determinar cuál es la mejor combinación de componentes que permitan una mayor disponibilidad de energía del SF, usó una metodología de diseño factorial, concluyendo que, si se configura y dimensiona convenientemente los componentes, analizando la influencia de cada uno y efectuando las mediciones adecuadas, se obtendrá una disponibilidad mayor de energía, mientras que en este trabajo de investigación se hizo uso de una metodología completa de diseño según los lineamientos de la norma alemana VDI 2221 la cual permitió desarrollar un diseño eficaz satisfaciendo las necesidades requeridas de la vivienda bajo los criterios técnico-económicos adecuados.

[4] seleccionaron 2 paneles fotovoltaicos de 280 Wp, sin considerar el área efectiva de trabajo, asumiendo que contaban con un área considerable para realizar la instalación, además siempre y cuando estén en una orientación e inclinación óptima permitirán aprovechar toda la radiación solar. Para el presente trabajo se consideró inicialmente el área del techo de la vivienda de 30 m², se procedió luego a escoger 4 paneles de 200 Wp, en un área efectiva de 8m², además de un 20% adicional para labores de mantenimiento y considerando a la vez el voltaje de 12V de la batería.

Al evaluar los criterios a tener en cuenta para el montaje y operación de un SF, [5] resaltaron que una regulación y promoción adecuada de la microgeneración distribuida en el Perú permitirá desarrollar proyectos que incentive a los usuarios a gestionar su autoconsumo de energía, a partir del uso de fuentes de energía renovable, en este caso se consideró un sistema Off-Grid (fuera de red), así también se elaboró un plan para garantizar la adecuada operación, satisfaciendo los criterios principales de función, seguridad y montaje con componentes adquiridos de proveedores certificados.

[2] señala que, para la mantención anual de un SF, se considera de 0.5 - 2% de la inversión, en esta investigación se desarrolló un plan de mantenimiento preventivo teniendo un costo fijo anual de S/ 138.88, equivalente al 1.33% del costo total de la inversión, así también se hizo el análisis de confiabilidad del sistema y su efecto económico derivado de una deficiente fiabilidad, evaluando indicadores de mantenimiento ante la presencia de algún fallo potencial.

En investigaciones realizadas para mejorar la gestión y ejecución de sistemas fotovoltaicos, [6] concluyó que implementar un proyecto con celdas fotovoltaicas según el PMI, permitirá garantizar un alcance adecuado del proyecto, evitar sobrecostos, identificar los principales riesgos y gestionar adecuadamente los recursos, luego [3] concluyó que de implementar proyectos tecnológicos de generación distribuida de energía con fuentes no convencionales de forma correcta, llegarían a representar disminuciones importantes en los costos de operación. En el presente trabajo de investigación se llegó a establecer los procedimientos adecuados para garantizar la disminución de los riesgos posibles antes de proceder al dimensionamiento, así también se demuestra que se aplicaron las buenas prácticas del PMI, en base a una gestión adecuada de los procesos, lo cual se planificó en un diagrama de GANTT para un mejor control tanto de insumos, procedimientos, tiempos y recursos.

Al evaluar las emisiones ambientales durante el funcionamiento de un SF con almacenamiento, [9] concluyó que la emisión de gases evitados en 25 años es de 33.38 TonCO₂ para una producción de 61.02 MWh. En este trabajo de investigación se obtuvo un valor de 0.384 TonCO₂, para una producción de 24.46 MWh, pero es importante resaltar que no toda la producción energética de la empresa Hidrandina S.A. se realiza mediante el uso de combustibles fósiles, gran parte se genera en centrales hidroeléctricas y un pequeño porcentaje en centrales térmicas (2.87 %), parámetro que no tomó en cuenta el autor antes mencionado.

Al analizar la factibilidad económica de un SF, [9] afirma que el costo de la energía producida para autoconsumo con almacenamiento es igual a 0.357 S/ / kWh con un ahorro anual del 81.72%, finalmente, el PRI es de 12 años. Por otro lado, [7] concluyó que la recuperación de la inversión de un SF se daría a partir del año 12 después de la puesta en marcha. En la

investigación se obtuvo un costo unitario de generación de 0.4279 \$/ kWh, un ahorro anual en el recibo del 100% y un periodo de retorno de la inversión de 12.4 años, sin embargo, debido a que se siguieron las buenas prácticas del PMBOK, se garantiza un diseño, gestión y ejecución eficiente del SF.

V. CONCLUSIONES

Se determinó a partir del diagnóstico de la población del sector #4 de Chimbote que la demanda promedio de una vivienda es de 685 kWh/año y el potencial energético es de una irradiancia global diaria media mensual de 4.98 kWh/m².

Se determinaron las especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico aplicando la metodología de diseño según la norma alemana VDI 2221, obteniendo una potencia solar fotovoltaica instalada de 800W con 4 paneles solares de 200W-12V Era Solar, eficiencia del SF de 71.4%, potencia generada al día de 2.84 kWh/día, voltaje del SF de 12V, 60A para el regulador de carga PWM LCD 12/24V Must Solar, Inversor Victron Phoenix 12V con punta de arranque máxima admitida de 1600W y una batería de GEL 12V 300Ah Tensite con una energía útil almacenada de 1800 Wh.

Se determinó que el montaje del arreglo fotovoltaico debe estar colocado a 19° de inclinación orientado hacia el Norte para un mejor aprovechamiento de la energía solar, considerando que el sistema operará en modo Off-Grid de 08:00 a 18:00 horas, además el mantenimiento tiene un costo anual del 1.33% del costo total, el cual garantizará un funcionamiento eficiente del sistema fotovoltaico.

Bajo el enfoque del PMI se mejoró la gestión y ejecución del sistema fotovoltaico, lo cual permitió satisfacer el 100% de la demanda de energía eléctrica y garantizar un sistema sostenible en el tiempo, bajo un presupuesto total de \$/ 10,466.04 en un plazo de 168 días hábiles.

El sistema fotovoltaico desarrollado permitirá un ahorro de combustible de 0.154 toneladas equivalentes de petróleo, evitando emisiones de 0.384 toneladas de CO₂ en 25 años.

Se determinó el B/C, PRI y factibilidad de financiamiento del proyecto de ejecución del sistema fotovoltaico, obteniendo valores de 1.239 y 1.004 así como un PRI de 12.4 y 12.8 años para la alternativa sin financiamiento y con financiamiento de aproximadamente el 30% en un plazo de 2 años, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a la Unidad de Posgrado en Ingeniería de la UNT por su acogida durante 2 largos años, cuyas sesiones virtuales quedan en memoria de sacrificio, esfuerzo y dedicación, así también a la población del sector #4 de la ciudad de Chimbote por mostrar total predisposición a brindar información para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] A. Al-Shamani, M. Othman, S. Mat, M. Ruslan, A. Abed, and K. Sopian, "Design & sizing of stand-alone solar power systems a house Iraq," *In Conference: Recent Advances in Renewable Energy Sources*, 2015, <https://www.researchgate.net/publication/281612628>
- [2] D. Almarza, "Guía de Operación y Mantenimiento de Sistemas Fotovoltaicos," Ministerio de Energía, Chile, Santiago de Chile, 2016.
- [3] M. Luengas, "Metodología para la formulación, evaluación y gerencia de proyectos de generación distribuida de energía, para centros comerciales en Bogotá.", Tesis de Maestría, Universidad EAN, Bogotá, Ecuador, 2020, <http://hdl.handle.net/10882/9947>
- [4] E. Villegas, and L. Alcivar, "Diseño de un sistema fotovoltaico para la escuela de educación básica Simón Bolívar en la comunidad Masa, golfo de Guayaquil." Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2020, <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19525>
- [5] M. Matos, and E. Vargas, "La generación distribuida como forma de acceder al autoconsumo eléctrico a pequeña escala." Perú, pp. 1-27, 2019.
- [6] M. Bellota, "Propuesta de factibilidad energética haciendo uso de paneles solares en la universidad católica de santa maría bajo el enfoque del PMI." Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2019, <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8864>
- [7] H. Vasquez, "Generación eléctrica con sistemas fotovoltaicos para reducir el costo por consumo de energía eléctrica de la Universidad Nacional del Centro del Perú." Huancayo, Perú, 2020, <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6002>
- [8] V. Romero, "Sistema fotovoltaico autónomo para mayor disponibilidad de energía eléctrica en SENATI." Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Centro del Perú, Escuela de Posgrado, Huancayo, Perú, 2020, <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6598>
- [9] P. Barreto, "Suministro alternativo de energía eléctrica mediante paneles solares, para autoconsumo domiciliario en el sector urbano de Chimbote." Universidad San Pedro, Chimbote, Perú, 2017.
- [10] M. Fernandez, J. Morales, C. Román, E. Quinchimba, D. Sánchez, and Á. Carrera, "Photovoltaic system: Alternative renewable energy for rural lighting | Sistema fotovoltaico: Alternativa de energía renovable para la iluminación en la ruralidad." *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*, vol. 2024, no. E66, pp. 78-92, 2024.
- [11] M. Baranowski, J. Scholz, F. Köbler, and J. Fleischer, "Systematic Development of a Novel Laser-Sintering Machine with Roving Integration and Sustainability Evaluation." *Machines*, vol. 12, no. 5, 2024, <https://doi.org/10.3390/machines12050336>
- [12] PMI (2024). [Online]. Available: <https://pmi.org.pe/que-es-pmi>
- [13] A. Shikhli *et al.*, "Enhancing innovation in aviation: Applying the Triple Helix Model and PMBOK in the UAE-Sweden partnership," *Technology In Society*, vol. 79, p. 102713, sep. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2024.102713>
- [14] Google Earth. (2021). [Online]. Available: <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- [15] World Energy Council. (2021). [Online]. Available: <https://www.worldenergy.org/>
- [16] COES. (2021). [Online]. Available: <https://www.coes.org.pe/portal/>
- [17] G. Kousovista *et al.*, "Comparative lifecycle assessment of renewable energy investments in public buildings: A case study of an Austrian kindergarten under atypical operational conditions", *Appl. Sci. (Basel)*, vol. 15, núm. 5, p. 2330, 2025, <https://doi.org/10.3390/app15052330>
- [18] M. A. Omar, "Assessing the economic impacts of net metering on residential solar photovoltaic adoption: A Palestinian case study", *Int. J. Energy Res.*, vol. 2025, núm. 1, 2025, <https://doi.org/10.1155/er/1370101>
- [19] M. Shan, H. Zhang, Y. Wang, Z. Qiao, J. Zuo, y Y. Xu, "Estimating environmental impact of rooftop photovoltaic from the perspective of thermal power transmission", *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 112, núm. 107848, p. 107848, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107848>
- [20] F. De Bettin, F. D. Minuto, D. S. Schiera, y A. Lanzini, "Evaluating uncertainty of shared energy in solar energy communities using a stochastic simulation framework", *Renew. Energy*, vol. 243, núm. 122604, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122604>