



PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA
SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE

ISSN: 3072-8452

**OPTIMIZACIÓN DE SISTEMA
HÍBRIDO EÓLICO – FOTOVOLTAICO
PARA SUMINISTRO ELÉCTRICO DEL
EDIFICIO T DEL TECNOM - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ**

*OPTIMIZATION OF A HYBRID WIND-
PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR THE
ELECTRICAL SUPPLY OF BUILDING T AT
TECNOM - TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF
VERACRUZ*

AUTORES

**ULISES ROCHER
ORTIZ**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
MÉXICO

**JOSÉ LUIS FERNANDO
PALOMEQUE LOYO**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
MÉXICO

**FRANCISCO JAVIER GÓMEZ
GONZÁLEZ**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
MÉXICO

**MARTÍN HERNÁNDEZ
ORDÓÑEZ**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
MÉXICO

**JORGE ARTURO MENDOZA
SOSA**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE
MÉXICO - INSTITUTO
TECNOLÓGICO DE VERACRUZ
MÉXICO

Optimización de Sistema Híbrido Eólico – Fotovoltaico para Suministro Eléctrico del Edificio T del TecNM - Instituto Tecnológico de Veracruz

Optimization of a Hybrid Wind-Photovoltaic System for the Electrical Supply
of Building T at TecNM - Technological Institute of Veracruz

Ulises Rocher Ortiz

m24023021@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0003-9153-1623>

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Veracruz
Veracruz - México

José Luis Fernando Palomeque Loyo

jose.pl@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0001-6708-294X>

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Veracruz
Veracruz - México

Francisco Javier Gómez González

francisco.gg@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7798-9601>

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Veracruz
Veracruz - México

Martín Hernández Ordoñez

martin.ho@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0000-0002-3740-5736>

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Veracruz
Veracruz - México

Jorge Arturo Mendoza Sosa

jorge.ms@veracruz.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0008-4027-3157>

Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Veracruz
Veracruz - México

Artículo recibido: 19/02/2026

Aceptado para publicación: 21/03/2026

Conflictos de Intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

Para este caso de estudio se optimizó un sistema híbrido eólico-fotovoltaico interconectado a la red en el Edificio T del TecNM - Instituto Tecnológico de Veracruz, buscando reducir la facturación eléctrica y las emisiones de CO₂. La optimización del sistema híbrido se llevó a cabo mediante la aplicación del software especializado HOMER Pro. De 2,000 soluciones simuladas, se seleccionaron 10 por su alta capacidad de suministro energético. De estas combinaciones, dos destacaron por su óptimo rendimiento: una centrada en la economía y otra en la sostenibilidad ambiental. La Combinación 3, elegida por su economía, tiene un Costo Neto Presente (NPC) de \$71,825.93 USD y un Costo Nivelado de Energía (COE) de \$0.0178 USD. Este sistema incluye 110 módulos fotovoltaicos (61.05 kW), 3 aerogeneradores (1.2 kW) y 13 inversores (65 kW), con una fracción renovable del 35.64% y emisiones de CO₂ de 124,765.30 kg/año. La Combinación 9, seleccionada por su rendimiento ambiental, destaca por una fracción renovable del 94.10% y emisiones de CO₂ de 62,276.36 kg/año. Este sistema cuenta con 290 módulos fotovoltaicos (160.95 kW), 3 aerogeneradores (1.2 kW) y 33 inversores (165 kW), con un NPC de \$112,510.90 USD y un COE de \$0.0279 USD.

Palabras clave: sistema híbrido, energías renovables, HOMER Pro, energía solar fotovoltaica, energía eólica

ABSTRACT

For this case study, a grid-connected hybrid wind-photovoltaic system was optimized at Building T of the TecNM - Technological Institute of Veracruz, aiming to reduce electricity bills and CO₂ emissions. The hybrid system optimization was performed using the specialized software HOMER Pro. From 2,000 simulated solutions, 10 were selected for their high energy supply capacity. Of these combinations, two stood out for their optimal performance: one focused on cost-effectiveness and the other on environmental sustainability. Combination 3, chosen for its cost-effectiveness, has a Net Present Cost (NPC) of \$71,825.93 and a Levelized Energy Cost (LEC) of \$0.0178. This system includes 110 photovoltaic modules (61.05 kW), 3 wind turbines (1.2 kW), and 13 inverters (65 kW), with a renewable energy share of 35.64% and CO₂ emissions of 124,765.30 kg/year. Combination 9, selected for its environmental performance, stands out with a renewable energy share of 94.10% and CO₂ emissions of 62,276.36 kg/year. This system features 290 photovoltaic modules (160.95 kW), 3 wind turbines (1.2 kW), and 33 inverters (165 kW), with an NPC of \$112,510.90 and a COE of \$0.0279.

Keywords: hybrid system, renewable energies, HOMER Pro, photovoltaic solar energy, wind energy

INTRODUCCIÓN

Hoarca J. & colaboradores, (2023) mencionan un diseño comparativo de dimensionamiento para sistemas de energía renovable basado en los simuladores HOMER e iHOGA. Presentan en detalle un análisis comparativo de las soluciones obtenidas con los simuladores para el mismo sistema híbrido. El sistema híbrido incluye paneles fotovoltaicos, convertidor, turbina eólica, batería, generador diésel y carga eléctrica. Los precios de los componentes del sistema se obtuvieron de los fabricantes y en la simulación se tuvieron en cuenta los precios actuales del mercado. Mediante un análisis comparativo entre los dos programas, se observa que iHOGA presenta algunas desventajas, como la incapacidad para realizar análisis probabilísticos y el uso de una estrategia de control más compleja debido al empleo de algoritmos genéticos, lo cual es más difícil de entender para los usuarios.

Khalil, L. y colaboradores, (2021) realizan un análisis utilizando el software HOMER Pro, donde simulan varios esquemas de plantas de energía; luego, se evalúan esos esquemas para encontrar la configuración de la planta de energía más optimizada con respecto al costo operativo, el costo actual neto, las emisiones de gases y la comparación económica.

García, J. y Osma, G., (2023) presentan el dimensionamiento de una microrred y la caracterización del impacto de siete variables sobre indicadores de viabilidad técnico-financiera. Para ello, se establece la solución óptima de dimensionamiento de una microrred aislada a partir de HOMER Pro, la cual busca atender la demanda energética de usuarios ubicados en una zona no interconectada. El estudio realizado contribuye a la divulgación del análisis de sensibilidad como herramienta de toma de decisiones en proyectos de microrredes.

HOMER Pro, a diferencia de softwares como iHOGA, cuenta con una interfaz gráfica intuitiva que facilita la creación y el análisis de modelos, además de contar con una amplia documentación y soporte técnico, lo que facilita su aprendizaje y uso. Permite al usuario personalizar muchos parámetros, desde las características de los componentes hasta establecer los perfiles de carga y las tarifas eléctricas.

Se modela y diseña un sistema híbrido eólico-fotovoltaico interconectado a la red en el Edificio T del TecNM – Instituto Tecnológico de Veracruz. Este enfoque busca mitigar los altos costos energéticos, reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y mejorar el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles. El objetivo de este artículo es

seleccionar dos configuraciones óptimas: una desde el punto de vista económico y otra desde una perspectiva ambiental.

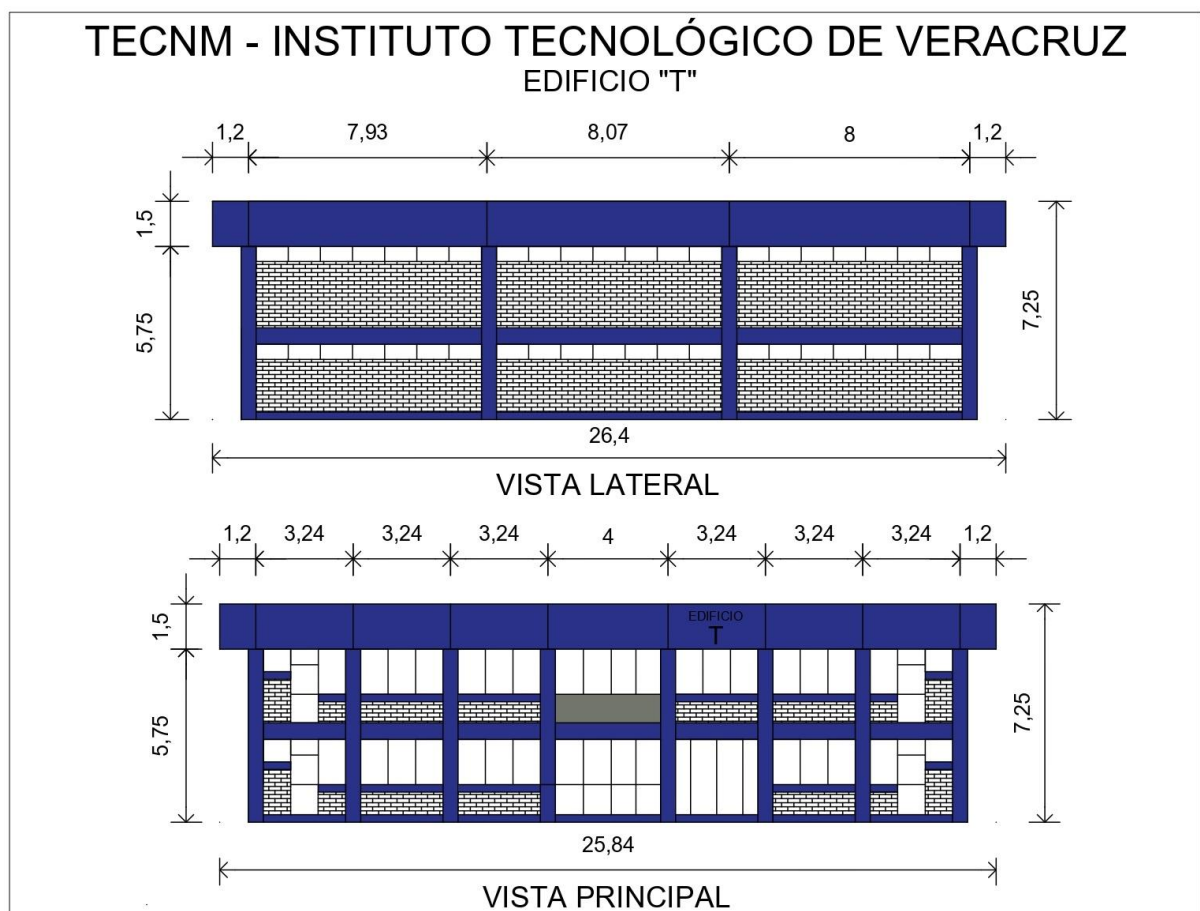
METODOLOGÍA

Descripción del caso de estudio

El Edificio T del ITVER está ubicado en Av. Miguel Ángel de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, 91897, en Veracruz, Veracruz. Mediante el sitio web Google Earth, se estableció la ubicación geográfica del lugar, obteniendo las coordenadas (GPS) 19°12'01"N 96°09'40"W.

En las figuras 1 y 2 se muestra un esquema del dimensionamiento del Edificio T realizado con el software AutoCAD 2025 (Autodesk, (2024).

Figura 1. Dimensionamiento del Edificio T del ITVER



Fuente: Elaboración propia (AutoCAD25).

Figura 2. Edificio T del ITVER modelado en 3D



Fuente: Elaboración propia (AutoCAD25).

El Instituto Tecnológico de Veracruz cuenta con alrededor de 5,116 estudiantes matriculados y 580 en curso de preparación. Es una institución de educación superior enfocada en la formación de personal capacitado en áreas científicas y tecnológicas, con la finalidad de que sus estudiantes realicen investigaciones que promuevan el desarrollo económico y social de México.

Por otra parte, la tarifa aplicable al ITVER corresponde a Gran Demanda Media Tensión Horaria (GDMTH). Esta aplica para empresas con una demanda contratada igual o superior a 100 kW, por lo que el costo por kWh varía según la hora del día, dividiéndose en los periodos base, intermedio y punta. Esto se aúna a la integración de los cargos por conceptos de transmisión, distribución, operación del CENACE, operación del suministrador básico, servicios conexos no MEM, energía y capacidad; por lo tanto, la facturación es más compleja debido a la variación horaria del precio (CFE, 2024).

Actualmente, la institución cuenta con una demanda contratada de 1,167 kW con una tarifa horaria en media tensión.

Caracterización de la demanda

Para esta etapa se realizó un levantamiento de cargas; con la ayuda de la Ecuación 1 se obtuvieron las potencias totales, las cuales se detallan en la Tabla 1.

$$P_t = P_{za} * P * h$$

Ec. (1)

Donde:

P_t = Potencia total.

P_{za} = Cantidad.

P = Potencia de consumo en kW.

h = Horas promedio de operación.

Tabla 1. Inventario de equipos consumidores de energía eléctrica del Edificio T

Nº	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD (PZA)	CONSUMO (KW)	HORAS PROMEDIO DE OPERACIÓN (H)	POTENCIA TOTAL (KWH)
1	Lampara tipo gabinete 2 tubos	149	0.075	12	134.1
2	Iluminación de riel	3	0.030	12	1.08
3	Lampara espiral p/soquet	2	0.065	12	1.56
4	Contactos	186	0.180	12	401.76
5	Receptáculos	24	0.200	4	19.2
6	Aires acondicionados	25	1.500	12	450
7	Computadoras	19	0.350	8	53.2
8	Multifuncional	1	0.450	4	1.8
9	Proyectores	3	0.500	5	7.5
10	Televisores	1	0.165	1	0.165
11	Cafeteras	1	0.720	6	4.32
12	Laptop	7	0.200	6	8.4
13	Horno de microondas	1	1.500	1	1.5
14	Regulador	3	0.005	12	0.18
15	Cargadores	8	0.030	6	1.44
Consumo Total del Edificio:					1084.77

Fuente: Recuperado de Formato TecNM-GA-05-02 (Sistemas de gestión del ITVER).

Los consumos son de 1,084.77 kWh, considerando que toda la carga estuviera conectada en un rango de operación máximo de 12 horas. Se estimó el perfil de demanda utilizando el medidor de consumo de energía eléctrica “EFI CON100T”, que opera con sistemas monofásicos y polifásicos (*Energía Con100t*, 2018). El dispositivo se conectó al interruptor termomagnético trifásico ubicado en la Subestación 5 de Ingeniería Mecánica del ITVER, en el cual se realizaron mediciones eléctricas en los meses de marzo, abril y mayo de 2024. Una vez analizadas las lecturas, se obtuvo la demanda eléctrica semanal, mensual y el consumo promedio por hora, tal como se observa en la Tabla 2.

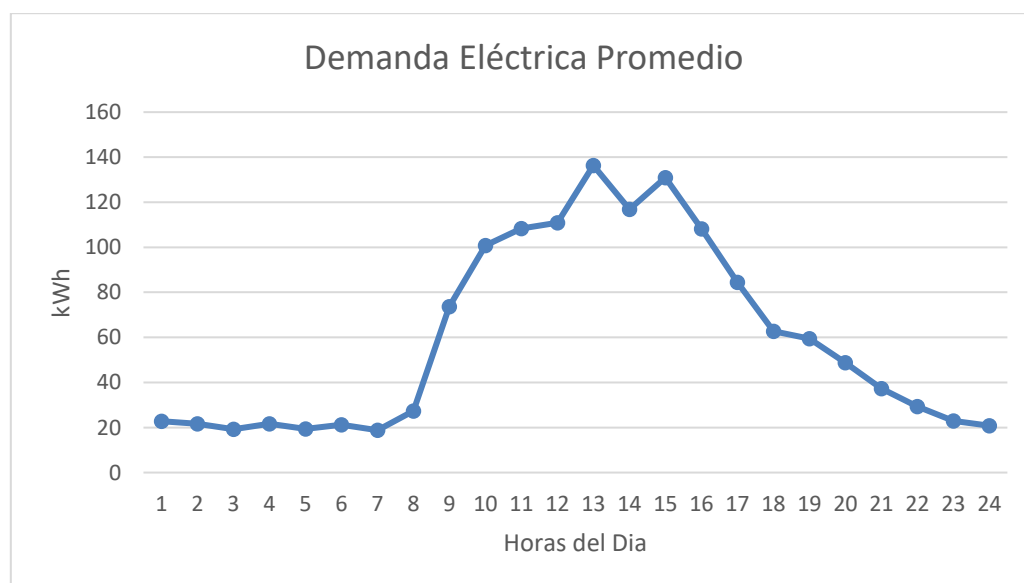
Tabla 2. Consumos de energía 2024

ENERGÍA			
Meses	Consumo Promedio	Consumo Semanal	Consumo Mensual
	kWh	kW	kW
Marzo	59.49	9994.49	49,962.86
Abril	35.40	3705.63	18,531.64
Mayo	70.58	11857.94	59,329.67

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Con los datos obtenidos, se graficó el comportamiento de los kWh respecto a las horas de un día del Edificio T en operación, como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Gráfica de la demanda diaria promedio del Edificio T, ITVER



Fuente: Elaboración propia (Excel).

De acuerdo con las mediciones eléctricas de los meses de marzo, abril y mayo, se estimó que la demanda eléctrica promedio del Edificio T del ITVER es de 58 kWh. En la gráfica se observa que los puntos críticos de consumo de energía eléctrica son de 8:00 a. m. a 8:00 p. m., siendo 12 horas en las cuales todo el edificio está en su máxima operación con personal administrativo, docente y estudiantes.

Evaluación del Recurso Renovable

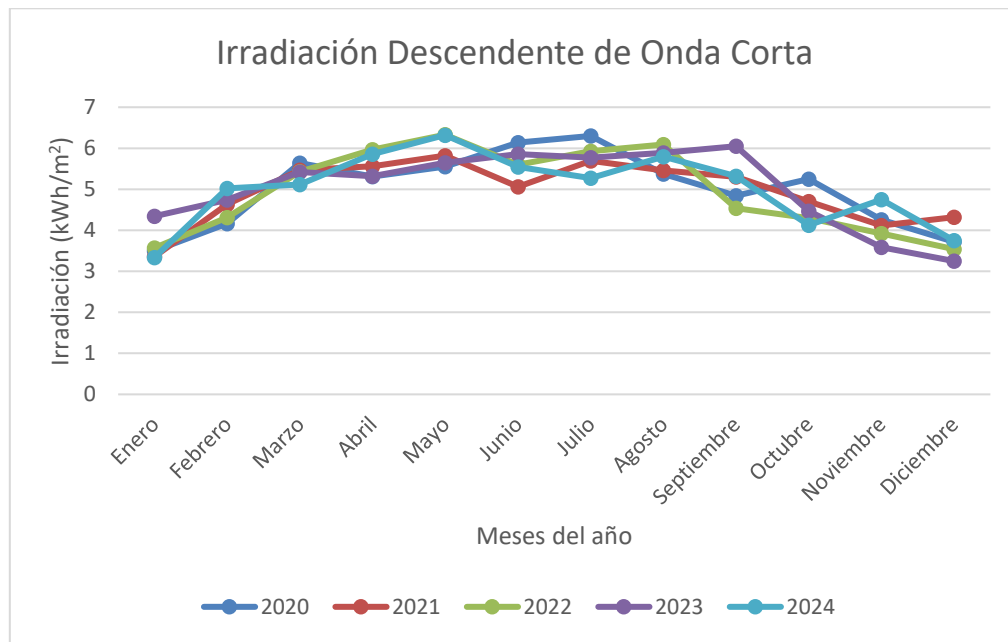
Mediante la combinación de dimensionamiento matemático clásico y herramientas computacionales, se analizaron las variables climáticas y ambientales del sitio que inciden en el desempeño de las tecnologías de generación propuestas (Cuahuey, M.E y Colaboradores, 2023). Dicho análisis se estructuró en dos ejes principales: el potencial solar y el recurso eólico., se visitó la página NASA POWER Data Access Viewer; para este caso de estudio las coordenadas decimales del sitio, corresponden a una latitud de 19.2002465 y una longitud de -96.1611987. Se estableció una “Extensión de Tiempo” de los años 2020 al 2024 (NASA POWER, 2024). La irradiación varía entre 3.25 kWh/m² y 6.32 kWh/m², de acuerdo con la Tabla 3, siendo noviembre, diciembre y enero los meses con menor irradiancia registrada.

Tabla 3. Niveles de irradiación 2020-2024

IRRADIACIÓN DESCENDENTE DE ONDA CORTA					
Meses	2020 (kWh/m ²)	2021 (kWh/m ²)	2022 (kWh/m ²)	2023 (kWh/m ²)	2024 (kWh/m ²)
Enero	3.5	3.36	3.57	4.34	3.34
Febrero	4.16	4.63	4.31	4.74	5.02
Marzo	5.64	5.47	5.43	5.42	5.12
Abril	5.31	5.56	5.97	5.32	5.86
Mayo	5.55	5.82	6.33	5.65	6.32
Junio	6.14	5.06	5.6	5.86	5.55
Julio	6.3	5.69	5.93	5.77	5.27
Agosto	5.37	5.46	6.09	5.89	5.79
Septiembre	4.84	5.3	4.54	6.05	5.32
Octubre	5.25	4.7	4.3	4.47	4.13
Noviembre	4.26	4.12	3.92	3.59	4.75
Diciembre	3.72	4.32	3.54	3.25	3.75
Promedio	5.00	4.96	5.09	5.09	5.02

Fuente: Elaboración propia (Excel).

De acuerdo con el estudio realizado, se obtuvo que la irradiación promedio del 2020 al 2024 fue de 4.99 kWh/m². En la Figura 4 se graficó el comportamiento de la irradiación.

Figura 4. Gráfica del comportamiento de la irradiación 2020-2024

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Con base en la Tabla 4, se observa que la velocidad del viento a 10 metros de altura en el sitio oscila entre 2.18 m/s y 3.77 m/s, siendo julio, agosto y septiembre los meses con menor viento. Estos valores son bajos para la mayoría de los aerogeneradores, lo que implica que su producción será limitada en comparación con la de los módulos fotovoltaicos. De acuerdo con el estudio realizado, se obtuvo que la velocidad del viento promedio del 2020 al 2024 fue de 3.19 m/s (NASA POWER, 2024).

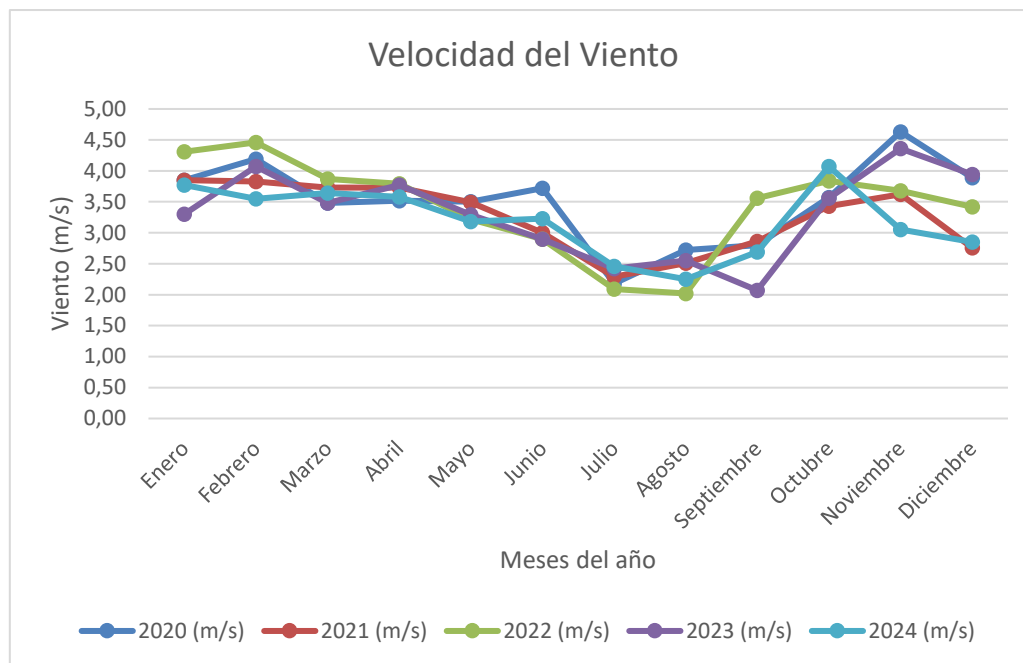
Tabla 4. Velocidad de viento a 10m máx. 2020-2024

VELOCIDAD DEL VIENTO					
Meses	2020 (m/s)	2021 (m/s)	2022 (m/s)	2023 (m/s)	2024 (m/s)
Enero	3.85	3.85	4.31	3.30	3.77
Febrero	4.19	3.83	4.46	4.07	3.55
Marzo	3.48	3.73	3.87	3.48	3.64
Abril	3.52	3.73	3.79	3.77	3.58
Mayo	3.50	3.49	3.22	3.29	3.18
Junio	3.72	3.00	2.90	2.90	3.23
Julio	2.18	2.29	2.09	2.42	2.46
Agosto	2.72	2.51	2.02	2.55	2.25
Septiembre	2.80	2.86	3.56	2.07	2.69
Octubre	3.57	3.43	3.84	3.56	4.07
Noviembre	4.63	3.62	3.68	4.36	3.05
Diciembre	3.89	2.76	3.42	3.94	2.85
Promedio	3.50	3.26	3.43	3.31	3.19

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Finalmente, se graficó el comportamiento de la velocidad del viento, como se observa en la Figura 5.

Figura 5. Gráfica de la velocidad de viento 2020-2024



Fuente: Elaboración propia (Excel).

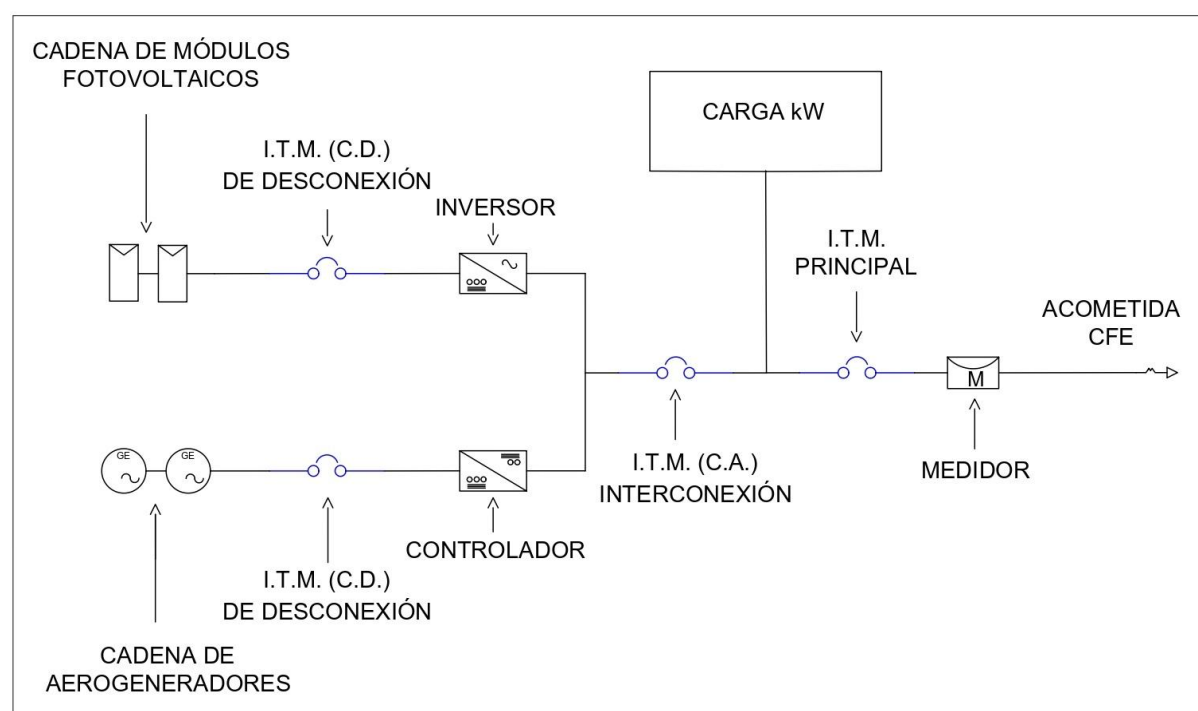
Arquitectura del sistema propuesto

La arquitectura del sistema encargado de generar energía eléctrica para el caso de estudio contempla el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica a través de módulos fotovoltaicos para generar electricidad en corriente directa, ya que en el área existe una gran disponibilidad del recurso solar. De igual forma, la optimización contempló aerogeneradores de eje horizontal para aprovechar la energía cinética del viento y convertirla en electricidad en corriente directa; además, se incluyen inversores para convertir la electricidad generada de corriente directa a corriente alterna. Por último, en la Tabla 5 se detallan las características de los componentes del sistema propuesto, y la figura 6 muestra el esquemático de los componentes del sistema híbrido a optimizar.

Tabla 5. Características de los componentes del sistema híbrido

COMPONENTES	MARCA	MODELO	CAPACIDAD	COSTO INICIAL (USD)	COSTO DE REEMPLAZO (USD)	COSTO DE O&M (USD)
Panel solar	Connera	CONNERA-555W	555 W	\$148.70	\$148.70	\$2.97
Aerogenerador	Pikasola	P400W-12V	400 W	\$381.36	\$381.36	\$7.62
Inversor	Beyond	BEYOND5KM2/2	5000 W	\$491.00	\$491.00	\$9.82

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Figura 6. Esquemático de los componentes del sistema híbrido eólico-fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia (AutoCAD 25).

Optimización del sistema híbrido

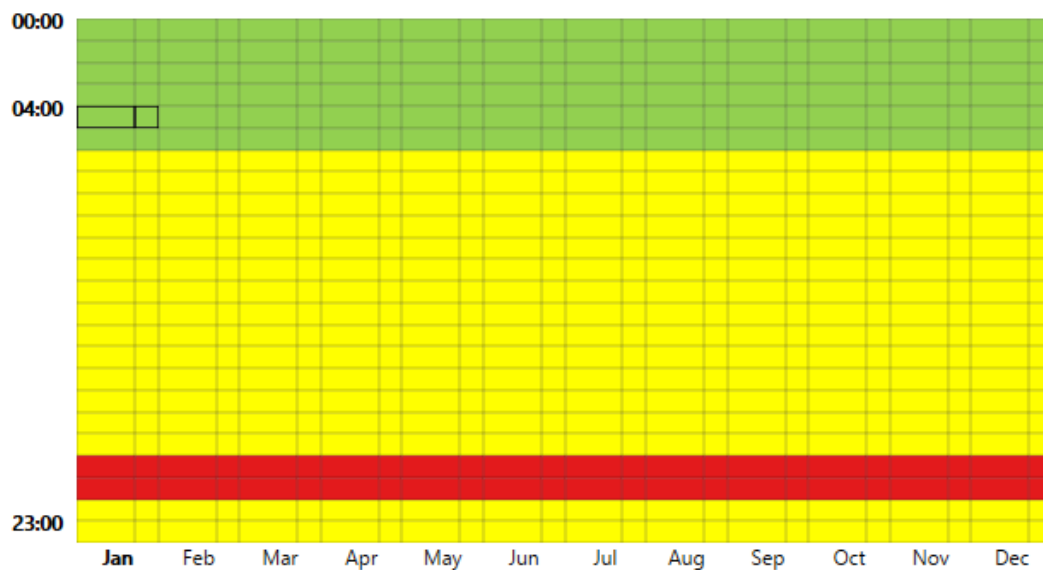
Para este fin, se tomaron en consideración diferentes fabricantes, capacidades y características distintas para los componentes. A partir de los datos obtenidos sobre la demanda energética, la red eléctrica, los recursos renovables y los componentes del sistema propuesto, se realizó la optimización del sistema mediante la aplicación del software especializado HOMER Pro (UL Solutions. (2024)). Para esto, se configuró la red en el apartado “Advanced Grid” (Red avanzada) y se definieron las tarifas como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Definiciones de tarifas

TARIFA	PRECIO (\$USD/KWH)	PROGRAMA DE TARIFAS (H)
Base	0.0010	00:00 - 05:00
Intermedio	0.0017	06:00 - 19:00
		22:00 - 23:00
Punta	0.0020	20:00 - 21:00

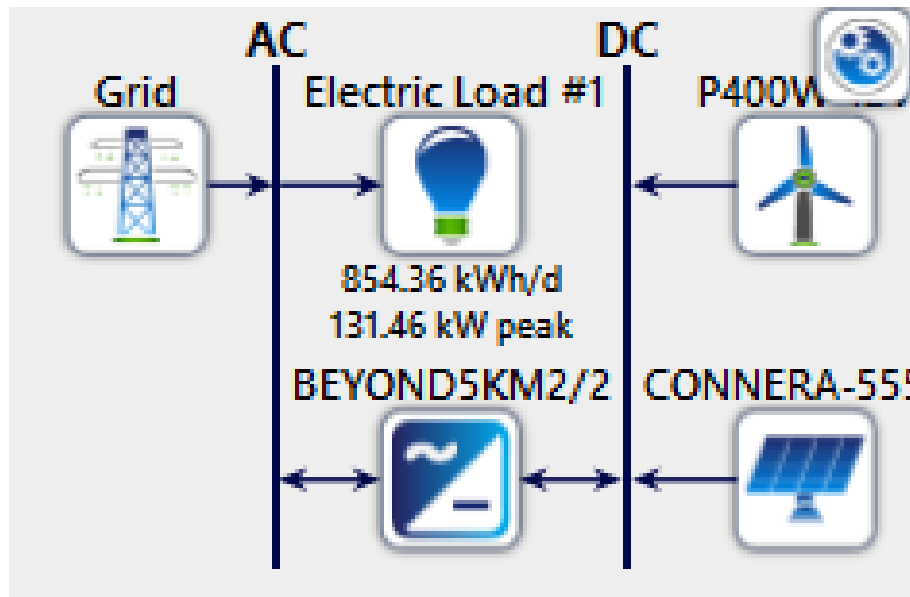
Fuente: Elaboración propia (Excel) [7].

Se seleccionó el periodo “All week” (Toda la semana). En la Figura 7 se indicaron los horarios para el programa de tarifas de red; la optimización toma en consideración las 24 horas del día (estableciendo diferentes periodos de facturación) de enero a diciembre.

Figura 7. Programa de tarifas de red

Fuente: Elaboración propia (HOMER Pro).

En el apartado de carga (Load) se estableció la carga eléctrica (Electric load). De las mediciones eléctricas realizadas, se seleccionó un día al azar de los meses analizados; Los datos de demanda se registran con una frecuencia horaria para minimizar el margen de error y cumplir con los requisitos de entrada del software HOMER Pro (Pisco Vanegas, J. C., & Torres Quijije, Á. I., 2021), tal como se ilustra en la Tabla 7, esta información se ingresó en la plataforma, como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. Esquemático de componentes

Fuente: Elaboración propia (HOMER Pro).

Tabla 7. Carga eléctrica

HORA	CARGA (KW)	HORA	CARGA (KW)	HORA	CARGA (KW)
0	12.65	8	44.22	16	50.68
1	12.95	9	60.46	17	37.66
2	11.50	10	65.01	18	35.66
3	13.02	11	66.52	19	29.31
4	11.67	12	81.81	20	22.35
5	12.70	13	70.14	21	17.56
6	11.27	14	78.52	22	13.77
7	16.39	15	64.94	23	12.50

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Se empleó un perfil de carga en corriente alterna. La Tabla 8 muestra los datos escalados de la carga eléctrica considerada en la simulación.

Tabla 8. Datos escalados de la carga eléctrica

Promedio (kWh/año)	312,695.76
Promedio (kWh/mes)	26,057.98
Promedio (kWh/d)	854.36
Promedio (kW)	35.36
Pico (kW)	131.46

Fuente: Elaboración propia (Excel).

La optimización puede realizarse de dos formas distintas: automática y manual. Se optó por la segunda opción, en la cual se estableció el espacio de búsqueda mostrado en la Tabla 9 para realizar la optimización en el software.

Tabla 9. Espacio de búsqueda

CONFIGURACIÓN MANUAL			
#	PIKASOLA-400W	CONNERA-555W	BEYOND5KM2/2
1	0	27.75	30
2	1	55.55	60
3	2	61.05	65
4	3	72.15	75
5		88.8	90
6		111	115
7		138.75	140
8		155.4	160
9		160.95	165
10		166.5	170

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Por último, es importante mencionar que el tiempo de vida de los componentes es variable; por ejemplo, los módulos fotovoltaicos tienen 25 años de vida, los aerogeneradores 20 y el inversor 15. Por lo tanto, este último habrá que reemplazarlo a la mitad del tiempo de vida del proyecto para no afectar el funcionamiento del sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

HOMER realizó la simulación de 2,000 soluciones de diferentes tipos de sistemas, de las cuales 960 eran factibles. Sin embargo, tras un proceso de selección, se identificaron únicamente 10 soluciones que destacan por ofrecer la mayor capacidad de suministro energético. Además, estas soluciones fueron seleccionadas por cumplir con los criterios de congruencia respecto a la demanda eléctrica del Edificio T del ITVER, asegurando así un funcionamiento eficiente y adecuado del sistema.

Para este caso de estudio, se seleccionaron dos combinaciones óptimas: una desde el punto de vista económico y otra desde una perspectiva ambiental. Para ello, los datos obtenidos en

HOMER Pro se dividieron en cuatro categorías principales: Arquitectura del sistema (Tabla 10), Costos asociados (Tabla 11), Sistema (Tabla 12) y Energía (Tabla 13).

Esta división permitió una evaluación detallada para obtener la mejor optimización del sistema.

Tabla 10. Arquitectura

ARQUITECTURA							
Comb. #	CONNERA- 555W		Pikasola- 400W		BEYOND5KM2/2		DISPATCH
	(Pza)	(kW)	(Pza)	(kW)	(Pza)	(kW)	
1	50	27.75	3	1.2	6	30	CC
2	100	55.55	3	1.2	12	60	CC
3	110	61.05	3	1.2	13	65	CC
4	130	72.15	3	1.2	15	75	CC
5	160	88.8	3	1.2	18	90	CC
6	200	111	3	1.2	23	115	CC
7	250	138.75	3	1.2	28	140	CC
8	280	155.4	3	1.2	32	160	CC
9	290	160.95	3	1.2	33	165	CC
10	300	166.5	3	1.2	35	170	CC

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Tabla 11. Costos Asociados

COSTOS					
Comb. #	NPC (\$)	COE (\$)	Costo de Operación (\$/yr)	Capital Inicial (\$)	O&M (\$/yr)
1	\$61,364.28	\$0.0152	\$3,855.28	\$11,525.08	\$3,764.48
2	\$70,010.92	\$0.0174	\$3,720.08	\$21,919.48	\$3,550.79
3	\$71,825.93	\$0.0178	\$3,708.51	\$23,884.08	\$3,526.14
4	\$75,653.74	\$0.0188	\$3,698.60	\$27,840.08	\$3,490.06
5	\$81,840.29	\$0.0203	\$3,718.13	\$33,774.08	\$3,470.35
6	\$91,275.73	\$0.0226	\$3,798.00	\$42,177.08	\$3,484.81
7	\$102,508.80	\$0.0254	\$3,901.89	\$52,067.08	\$3,523.30
8	\$110,199.50	\$0.0273	\$3,999.79	\$58,492.08	\$3,568.87
9	\$112,510.90	\$0.0279	\$4,025.58	\$60,470.08	\$3,581.58
10	\$114,868.40	\$0.0285	\$4,054.94	\$62,448.08	\$3,597.86

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Tabla 12. Sistema

SISTEMA		
<i>Comb. #</i>	<i>Fracción Renovable</i>	<i>CO₂ (kg/año)</i>
1	17.21 %	163157.3
2	33.53 %	130995.3
3	36.69 %	124765.3
4	42.88 %	112580.3
5	51.18 %	96221.94
6	64.96 %	79847.59
7	81.20 %	67672.73
8	90.94 %	63387.79
9	94.10 %	62266.73
10	97.79 %	61276.36

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Tabla 13. Energía

ENERGÍA					
<i>Comb #1</i>	<i>CONNERA-555W/ Producción (kWh/año)</i>	<i>P400W-2V/ Producción (kWh/año)</i>	<i>Energía Generada (kWh/año)</i>	<i>Demanda Anual (kWh/año)</i>	<i>Energía Comprada (kWh/año)</i>
1	50,524.18	2,656.59	53,180.77	312,695.76	259,514.99
2	101,139.40	2,656.59	103,795.99	312,695.76	208,899.77
3	111,153.20	2,656.59	113,809.79	312,695.76	198,885.97
4	131,362.90	2,656.59	134,019.49	312,695.76	178,676.27
5	161,677.40	2,656.59	164,333.99	312,695.76	148,361.77
6	202,096.70	2,656.59	204,753.29	312,695.76	107,942.47
7	252,620.90	2,656.59	255,277.49	312,695.76	57,418.27
8	282,935.40	2,656.59	285,591.99	312,695.76	27,103.77
9	293,040.30	2,656.59	295,696.89	312,695.76	16,998.87
10	303,145.10	2,656.59	305,801.69	312,695.76	6,894.07

Fuente: Elaboración propia (Excel).

Ya que la simulación se realizó mediante "Espacio de búsqueda", con la ayuda de la herramienta Excel se realizaron los cálculos manuales para identificar los parámetros a optimizar y, de esta forma, cotejar que los resultados de HOMER Pro son fiables. Para esto, en la Tabla 12 se observa el comportamiento del sistema. Se estimó la fracción renovable de forma manual y los valores son muy cercanos a los resultados de la optimización de HOMER Pro hasta llegar al 50%. Después de este porcentaje, el software empieza a interpretarlo como excedente de electricidad y, por ende, cuesta más trabajo alcanzar una fracción renovable mayor, por lo que esto ya no sería económicamente viable. En este caso, como el Edificio T

forma parte de la facturación del ITVER, se puede dar como viable la fracción renovable calculada y, de esta forma, lograr el autoconsumo de la energía generada.

Por lo tanto, desde un enfoque económico, la Combinación 3 es la mejor opción, ya que optimiza tanto los costos como la eficiencia del sistema. Tiene un NPC de \$71,825.93; se instalarían 110 módulos fotovoltaicos con una capacidad instalada de 61.05 kW, además de 3 aerogeneradores que aportarán al sistema 1.2 kW. Para satisfacer dicha generación eléctrica, se necesitarían 13 inversores con una capacidad de 65 kW. El sistema tendría una fracción renovable del 35.64% con una energía generada de 113,809.79 kWh/año, una generación de CO₂ de 124,765.30 kg/año y un COE de \$0.0178.

Desde el punto de vista ambiental, utilizamos dos parámetros clave para evaluar la sostenibilidad de las combinaciones: la fracción renovable y las emisiones de CO₂. Con base en estos dos parámetros, la Combinación 9 destaca como la más favorable, ya que presenta una fracción renovable del 94.10% con una energía generada de 295,696.89 kWh/año y las emisiones de CO₂ más bajas con 62,276.36 kg/año. Esta combinación tiene un NPC de \$112,510.90; se instalarían 290 módulos fotovoltaicos con una capacidad instalada de 160.95 kW y 3 aerogeneradores que aportarán 1.2 kW. Para satisfacer dicha generación eléctrica, se necesitarían 33 inversores con una capacidad de 165 kW, con un COE de \$0.0279. Además, se contempla que la estrategia de control de despacho sea por CC (Carga por Ciclos).

Retorno de inversión

Con la ayuda de los recibos de luz del ITVER, se pudieron estimar los valores de consumo de energía y el precio medio en el periodo enero-diciembre de 2024. Actualmente, los consumos oscilan entre 100,000 kWh y 293,000 kWh anuales; esto varía dependiendo de los meses del año. Además, la CFE establece un precio medio de facturación de entre \$0.1322 USD y \$0.1533 USD por kWh consumido. Para realizar la estimación del retorno de inversión, se estableció un valor promedio de \$0.1440 USD como precio medio de facturación para realizar las operaciones en este trabajo de investigación.

De acuerdo con la información recabada, el Edificio T tiene un consumo de energía de 26,058 kWh mensuales. Con estos datos, se realizó un estimado de cuál es el porcentaje de la demanda que abarca el Edificio T sobre la demanda total del ITVER con la ayuda de la Ecuación 2. Para

este caso de estudio, se ocupará el consumo promedio de 187,526 kWh; en la Ecuación 3 se aprecia el porcentaje de consumo del Edificio T (PCE_T) sobre el ITVER.

$$PCE_T = \frac{CE_T}{C_{ITVER}} (100)$$

Ec. (2)

Donde:

PCE_T = Porcentaje de consumo edificio T.

CE_T = Consumo edificio T.

C_{ITVER} = Consumo ITVER.

100 = Constante.

$$PCE_T = \left(\frac{26,058 \text{ kWh}}{187,526 \text{ kWh}} \right) (100) = 13.89\%$$

Ec. (3)

Posteriormente, sustituyendo los valores en la ecuación 4, se realizó la ecuación 5 para saber el precio total de lo que estaría facturando el edificio T.

$$FE_T = (CE_T) (PM)$$

Ec. (4)

Donde:

FE_T = Facturación edificio T.

CE_T = Consumo edificio T.

PM = Precio medio.

$$FE_T = (26,058 \text{ kWh})(\$0.1440) = \$3,752.35$$

Ec. (5)

Después, al sustituir los valores en la ecuación 6, se elaboró la ecuación 7 para estimar el retorno de inversión, en el caso de la combinación 3 (enfoque económico).

$$RI = \frac{NPC}{E_G P_M}$$

Ec. (6)

Donde:

RI = Retorno de inversión.

NPC = Costo neto presente.

E_G = Energía generada.

P_M = Precio medio de facturación.

Retorno de inversión:

$$\frac{\$71,825.93}{(113,809.79 \text{ kWh/año})(\$0.1440/\text{kWh})} = 4.38 \text{ años}$$

Ec. (7)

En el caso de la combinación 9 (enfoque ambiental) se realizó la ecuación 8, para identificar el tiempo estimado del retorno de inversión.

Retorno de inversión:

$$\frac{\$112,510.90}{(295,696.89 \text{ kWh/año})(\$0.1440/\text{kWh})} = 2.64 \text{ Años}$$

Ec. (8)

La optimización del sistema mediante el software HOMER Pro arroja una IRR (tasa interna de retorno) del 46% y un ROI (retorno de inversión) del 41%, en un tiempo estimado de 2.2 años, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Métricas económicas

IRR ⓘ	46%
ROI ⓘ	41%
Simple Payback ⓘ	2.2 yr

Fuente: Recuperado de HOMER Pro.

CONCLUSIONES

A través del proceso de optimización en HOMER Pro, se lograron encontrar las combinaciones más eficientes en términos tanto económicos como ambientales, basándose en parámetros clave como el costo neto presente (NPC), el costo nivelado de energía (COE), la fracción renovable y las emisiones de CO₂.

Desde el punto de vista económico, la Combinación 3 es la mejor opción debido a sus bajos valores de NPC (\$71,825.93 USD) y COE (\$0.0178 USD), lo que refleja un sistema de costos más eficiente y rentable. Sin embargo, para una evaluación ambiental, la Combinación 9 resulta más favorable, ya que tiene la mayor fracción renovable (94.10%) y las menores emisiones de CO₂ (62,276.36 kg/año), lo que contribuye a una operación más sostenible y con menor impacto ambiental.

Se proyecta un retorno de inversión de 2.2 años y una vida útil del proyecto de entre 20 y 25 años para los módulos fotovoltaicos y aerogeneradores. En el caso de los inversores, su duración varía entre 10 y 15 años, por lo que este último habrá que reemplazarlo a la mitad del tiempo de vida del proyecto para no afectar el funcionamiento del sistema.

Agradecimientos

El autor, Ulises Rocher Ortiz, agradece a la SECIHTI por el valioso apoyo brindado a través de la beca 1342744, la cual ha sido esencial para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, hago extensivo mi agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a la realización de este estudio. En primer lugar, deseo agradecer a mis mentores: la Mtra. Ana Celeste Argelia Bermúdez Castillo, el Ing. Eucalit Sánchez García y el Ing. Leodegario Vásquez González; su experiencia y consejos fueron fundamentales en este proceso. Asimismo, expreso mi gratitud al Dr. Juan Francisco Mejía Pérez y al Dr. Manuel Alberto Susunaga Miranda por el apoyo brindado, cuyo respaldo fue clave para alcanzar mis objetivos de formación académica. A mi compañera, la Ing. Vanessa Ortiz García, por sus valiosas sugerencias y por crear un ambiente de trabajo colaborativo y motivador. Finalmente, expreso mi gratitud a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del TecNM – Instituto Tecnológico de Veracruz por su apoyo incondicional y por brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación. Su compromiso con la formación académica y el fomento de la investigación ha sido fundamental en este proceso.

REFERENCIAS

Autodesk. (2024). AutoCAD (Versión 2025) [Software de computadora]. Recuperado de <https://www.autodesk.com>

CFE. (2024). [página web]. Recuperado de

<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRENegocio/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>

Cuahuey, M.E., Peralta, E., Hernández, D.E., Méndez J.F., Cardeña, S.A., (2023). Prototipo de un sistema híbrido de energía fotovoltaica eólica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. Volumen 7, Número 2.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5863

Energía Con100t. (2018). Catálogo de productos y servicios [Portal web]. Recuperado de

<https://www.energiacon100t.mx>

J. García-García, G. Osmá-Pinto, (2023). Dimensionamiento y análisis de sensibilidad de una microrred aislada usando HOMER Pro. *Tecnológicas*. vol. 26, nro. 56, e2565.

<https://doi.org/10.22430/22565337.2565>

Hoarca, I.C., Bizon, N., Sorlei, I.S., Thounthong, P. (2023). Sizing Design for a Hybrid Renewable Power System Using HOMER and iHOGA Simulator. *Energies* 16, 1923.

<https://doi.org/10.3390/en16041926>

L. Khalil, K. Liaquat Bhatti, M. Arslan Iqbal Awan et al. (2020). Optimization and designing of hybrid power system using HOMER PRO. *Materials Today: Proceedings, Volume 47, Supplement, 2021, Pages S110-S115*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.054>

NASA POWER. (2024). Data Access Viewer [Portal web]. Recuperado de

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Pisco Vanegas, J. C., & Torres Quijije, Á. I. (2021). Diseño de un sistema híbrido aislado para abastecer a la Hacienda Quirola. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(2), 311-317

UL Solutions. (2024). HOMER Pro Microgrid [Software de computadora].

<https://homerenergy.com/products/pro/index.html>

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.



doi: <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.173>

Cómo citar este artículo (APA 7ª edición):

Rocher Ortiz, U. ., Palomeque Loyo, J. L. F. ., Gómez González, F. J. ., Hernández Ordoñez, M. ., & Mendoza Sosa, J. A. . (2026). Optimización de Sistema Híbrido Eólico – Fotovoltaico para Suministro Eléctrico del Edificio T del TecNM - Instituto Tecnológico de Veracruz. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, 5(1), 385-406. <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.173>