



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

Estrategia de administración de un sistema de energías renovables híbrido para proporcionar electricidad para aplicaciones en áreas remotas.

presentada por

Juan Carlos León Gómez

como requisito para la obtención del grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis

Dra. Susana Estefany De León Aldaco

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2024.

Cuernavaca, Mor.,
No. de Oficio:
Asunto:

20/mayo/2024
DIE/038/2024
Aceptación de documentos de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Juan Carlos León Gómez, con número de control M22CED83 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "ESTRATEGIA DE ADMINISTRACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍAS RENOVABLES HÍBRIDO PARA PROPORCIONAR ELECTRICIDAD PARA APLICACIONES EN ÁREAS REMOTAS", y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dra. Susana Estefany De León Aldaco
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 10458245

COORDINADOR DE TESIS

Dr. Jesús Aguayo Amúlcira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1

Dr. Victor Hugo Olivares Peregrino
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5999002

REVISOR 2

Dr. Mario Ponce Silva
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 3516427

Cc. M. J. María Lleras Gómez Torres, jefe del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
405/kmgd

Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

29/mayo/2024
SAC/177/2024
Autorización de
Impresión de tesis

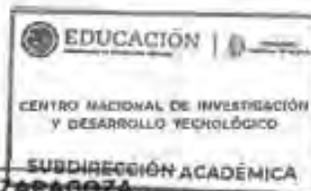
JUAN CARLOS LEÓN GÓMEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"ESTRATEGIA DE ADMINISTRACIÓN DE UN SISTEMA DE ENERGÍAS RENOVABLES HÍBRIDO PARA PROPORCIONAR ELECTRICIDAD PARA APLICACIONES EN ÁREAS REMOTAS"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro en el mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excellencia en Educación Tecnológica
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. C. D. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/imz



RESUMEN

Las consecuencias medioambientales emergentes de la excesiva dependencia de los combustibles fósiles han empujado a muchos países a invertir en fuentes de energía limpias y renovables. México es un país que por su diversidad geográfica y climática puede aprovechar este potencial en la generación de energías renovables y reducir su dependencia de los combustibles fósiles, a la vez que trazar estrategias para mejorar su sistema energético. Este estudio investigó la viabilidad del uso autónomo de un sistema híbrido de energía renovable para alimentar los hogares de una localidad remota. Con la ayuda del software HOMER se realizó un modelo para evaluar el funcionamiento del sistema durante un año y se predijo la demanda de acuerdo a algún escenario determinado. Además, se determinó la configuración óptima de los componentes del sistema. Los resultados mostraron que el uso simultáneo de sistemas solares con un convertidor y un sistema de respaldo compuesto por un generador diésel y baterías sería la opción más viable y confiable para la generación de electricidad con energías renovables en la localidad seleccionada, ofreciendo electricidad con una fracción renovable de más del 80%.

ABSTRACT

The emerging environmental consequences of excessive dependence on fossil fuels have pushed many countries to invest in clean and renewable energy sources. Mexico is a country that, due to its geographical and climatic diversity, can take advantage of this potential in renewable energy generation and reduce its dependence on fossil fuels, while developing strategies to improve its energy system. This study investigated the feasibility of the autonomous use of a hybrid renewable energy system to power homes in a remote location. With the help of HOMER software, a model was made to evaluate the operation of the system for one year and the demand was predicted according to a given scenario. In addition, the optimal configuration of the system components was determined. The results showed that the simultaneous use of solar systems with a converter and a backup system consisting of a diesel generator and batteries would be the most viable and reliable option for the generation of electricity with renewable energies in the selected location, offering electricity with a renewable fraction of more than 80%.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a

A mis queridos padres por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios. Gracias por ser mi inspiración y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Su confianza en mí me ha dado la fuerza para superar todos los desafíos y llegar hasta aquí. Esta tesis es un reflejo de todo lo que he aprendido de ustedes y un pequeño homenaje a su dedicación y cariño.

A mis estimados asesores, por su orientación, paciencia y sabiduría. Gracias por compartir sus conocimientos y por guiarme a lo largo de este camino. Sus consejos y enseñanzas han sido fundamentales para la realización de este trabajo. Su compromiso y profesionalismo han sido un ejemplo a seguir y una fuente constante de motivación. Esta tesis no habría sido posible sin su valioso apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido parte fundamental de mi vida y que, con su apoyo y compañía, han contribuido a la realización de esta tesis.

A mis padres,

Por su amor, apoyo incondicional y por creer siempre en mí. Sus palabras de aliento y su confianza han sido mi principal motivación para alcanzar mis metas. Gracias por enseñarme la importancia del esfuerzo y la dedicación.

A CONAHCYT,

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico brindado durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico,

Por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de este trabajo.

A mis directores de tesis la Dra. Susana Estefany de León y el Dr. Jesús Aguayo Alquicira,

Por su orientación y consejos que me ayudaron a concluir esta etapa.

*A los miembros de mi comité revisor, El Dr. Víctor Hugo Olivares
Peregrino y el Dr. Mario Ponce Silva,*

*por sus comentarios y críticas que me sirvieron para mejorar la calidad
de mi trabajo.*

A mis abuelos,

*Por su sabiduría y sus consejos. Sus historias y experiencias han sido
una fuente de inspiración y un recordatorio constante de la importancia
de la perseverancia y la resiliencia.*

A mi novia Rosandra,

*Por su amor, comprensión y apoyo constante. Gracias por estar siempre
presente, por entender mis ausencias y por ser una fuente inagotable de
motivación y alegría. Tu amor me ha dado la fuerza necesaria para
seguir adelante.*

A mi hermana,

*Por su cariño y su apoyo. Gracias por estar siempre ahí, por tus palabras
de aliento y por ser una amiga incondicional. Tu presencia en mi vida es
invaluable.*

A mis amigos,

*Por estar siempre a mi lado, en los buenos y malos momentos. Gracias
por su compañía, por los momentos de distracción y por ser un pilar
fundamental en mi vida. Su amistad ha sido esencial en este proceso.*

*A mis compañeros y amigos,
Gracias por todos los momentos
compartidos y por hacer de mi estancia en el CENIDET una
grata experiencia.*

*A mis profesores,
Por su guía, enseñanzas y paciencia a lo largo de mi formación
académica. Gracias por compartir sus conocimientos y por motivarme a
ser mejor cada día. Su dedicación y compromiso han sido fundamentales
para mi crecimiento profesional y personal.*

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	I
Abstract	IV
Dedicatoria	V
Agradecimientos	VI
Tabla de Contenido	IX
Listado de Figuras	XII
Listado de Tablas	XIII
Abreviaturas y Acrónimos	XIV
Simbología.....	XVI
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.1 Introducción.....	- 1 -
1.2 Antecedentes	- 1 -
1.3 Objetivos	- 2 -
1.4 Metas	- 2 -
1.5 Justificación.....	- 3 -
1.6 Problemática	- 3 -
1.7 Método	- 4 -
1.8 Hipótesis	- 5 -
1.9 Alcance	- 5 -
1.9 Aportación.....	- 6 -
1.10 Organización del documento.....	- 6 -
capítulo 2. Estado del arte	- 7 -
2.1 Artículos encontrados en la literatura	- 7 -
2.2 Sistemas de Almacenamiento en un SHER.....	- 12 -
2.3 Arquitectura de los SHER.....	- 14 -
2.4 Criterios de Optimización	- 16 -
2.5 Métodos de Optimización	- 17 -
2.6 Resumen del estudio del estado del arte para el caso de estudio.	- 20 -
2.6.1 Sistemas de Baterías.....	- 20 -
2.6.2 Herramienta para la optimización.....	- 21 -
2.6.3 Criterios de Optimización.....	- 22 -

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	- 23 -
3.1 Sistemas de Paneles Solares.....	- 24 -
3.2 Carga y descarga de los sistemas de baterías	- 25 -
3.3 Aerogeneradores.....	- 27 -
3.3.1 Cálculo de la altura del buje Velocidad del viento.....	- 27 -
3.3.2 Cálculo de la potencia de salida de la turbina con una densidad de aire estándar	- 27 -
3.3.3 Aplicando corrección de densidad.....	- 28 -
3.4 Generador Diesel	- 29 -
3.5 Inversores	- 30 -
3.5.1 Convertidores	- 30 -
3.6 Estrategia de despacho de energía.....	- 30 -
3.7 Evaluación económica del sistema.....	- 31 -
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO	- 34 -
4.1 Caso de estudio	- 34 -
4.2 Base de datos	- 34 -
4.3 Localidad.....	- 36 -
4.4 Recolección y análisis de datos del sistema.....	- 36 -
4.5 Recolección de datos meteorológicos	- 37 -
4.5.1 Irradiancia solar y claridad.....	- 37 -
4.5.2 Velocidad del viento	- 37 -
4.5.3 Temperatura Ambiente	- 38 -
4.6 Área de estudio y Perfil de carga.....	- 39 -
CAPÍTULO 5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HÍBRIDA DE ENERGÍAS RENOVABLES	- 41 -
5.1 Escenario 1	- 42 -
5.1.1 Sistema Fotovoltaico	- 43 -
5.1.2 Sistema Eólico	- 44 -
5.1.4 Sistemas de Baterías	- 47 -
5.1.5 Inversor	- 49 -
5.1.6 Análisis del Sistema	- 50 -
5.2 Escenario 2	- 52 -
5.2.1 Paneles Solares	- 52 -
5.2.2 Generador Diesel	- 54 -

5.2.3 Baterías	- 55 -
5.2.4 Inversores	- 56 -
5.2.5 Análisis del Sistema	- 56 -
5.3 Escenario 3	- 58 -
5.3.1 Paneles Solares	- 58 -
5.3.2 Baterías	- 59 -
5.3.3 Convertidores	- 61 -
5.3.4 Análisis del Sistema	- 61 -
Capítulo 6. Análisis de los resultados	- 63 -
Capítulo 7. Conclusiones	- 66 -
Anexos	- 67 -
Anexo A. Datasheet de los inversores.....	- 68 -
Anexo B. Data Sheet del convertidor.....	- 69 -
Bibliografía.....	- 70 -

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Personas con acceso y sin acceso a la electricidad en el mundo [1].....	- 4 -
Figura 2. Metodología para el cumplimiento de los objetivos.	- 5 -
Figura 3. Selección de la bibliografía.	- 8 -
Figura 4. Configuración del BUS en CD.....	- 14 -
Figura 5. Configuración del BUS en CA.	- 14 -
Figura 6. Configuración del BUS combinando CA-CD aislado de la red.....	- 14 -
Figura 7. Configuración del BUS en CA-CD conectado a la red.....	- 15 -
Figura 8. Arquitectura del sistema caso de estudio [40].	- 20 -
Figura 9. Comparación de baterías de ácido-plomo e ion-litio [33].	- 21 -
Figura 10. Funciones principales del HOMER [54].	- 23 -
Figura 11. Característica de una turbina eólica [54].	- 28 -
Figura 12. Curva de eficiencia de un generador diésel.....	- 29 -
Figura 13. Diagrama de estrategia para el despacho de la energía.	- 31 -
Figura 14. Mapa de Campeche, Ciudad del Carmen, El Arca [54].	- 36 -
Figura 15. Recolección de datos meteorológicos.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 16. Perfil de carga diario y mensual del poblado El Arca.....	- 40 -
Figura 17. Sistema Híbrido (FV-AG-GD-SB).	- 43 -
Figura 18. Generación de los paneles y los la carga demandada.	- 43 -
Figura 19. Velocidad del viento y la generación asociada.	- 45 -
Figura 20. Generación eléctrica de un generador diésel en un mes.....	- 46 -
Figura 21. Estados de carga y descarga.	- 48 -
Figura 22. Valores de potencia del convertidor en horas, días y año.	- 49 -
Figura 23. Energía producida por cada elemento de generación.	- 50 -
Figura 24. Comportamiento del sistema en siete días.....	- 51 -
Figura 25. Configuración del Sistema híbrido.....	- 52 -
Figura 26. Irradiación solar y generación de electricidad de los paneles.	- 53 -
Figura 27. Comportamiento del generador diésel en el mes de mayo.	- 54 -
Figura 28. Régimen de trabajo de la batería en un mes.....	- 55 -
Figura 29. Comportamiento de cada elemento de generación.	- 57 -
Figura 30. Irradiancia solar y la generación producida.	- 58 -
Figura 31. Estados de carga y descarga del sistema de baterías.....	- 60 -
Figura 32. Comportamiento del sistema entre sus fuentes de energías.	- 61 -

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Artículos revisados en la Literatura.....	- 9 -
Tabla 2. Ventajas y desventajas de los sistemas de baterías [31-34].	- 12 -
Tabla 3. Resumen de las arquitecturas encontradas en la literatura [3, 31, 35].	- 15 -
Tabla 4. Criterios de optimización(económico) y limitaciones para SHER [3, 31].	- 16 -
Tabla 5. Criterios de optimización(fiabilidad) y limitaciones para SHER [3, 31].	- 17 -
Tabla 6. Aplicaciones de las técnicas de optimización en la literatura revisada [3, 31, 48, 52].	- 18 -
Tabla 7. Conceptos económicos utilizados [54].	- 24 -
Tabla 8. Datos sobre la vivienda del pueblo El Arca [58].	- 35 -
Tabla 9. Problemas Principales según INEGI.	- 35 -
Tabla 10. Valores promedios mensuales de viento, temperatura y radiación.	- 39 -
Tabla 11. Perfil de carga diario y mensual del poblado El Arca.	- 40 -
Tabla 12. Niveles de voltaje por etapas [60].	- 41 -
Tabla 13. Datos Técnicos-económicos [61].	- 42 -
Tabla 14. Parámetros técnico-económico del sistema de paneles solares.	- 44 -
Tabla 15. Parámetros técnicos económicos del sistema de generación eólica.	- 45 -
Tabla 16. Parámetros técnicos económicos del generador diésel.	- 47 -
Tabla 17. Parámetros técnico económico del sistema de baterías.	- 48 -
Tabla 18. Parámetros técnicos de los inversores y rectificadores.....	- 49 -
Tabla 19. Resumen de los costos del sistema.....	- 51 -
Tabla 20. Parámetros técnicos económicos del sistema de energía solar.	- 53 -
Tabla 21. Parámetros técnicos económicos de un generador diésel.	- 55 -
Tabla 22. Parámetros del sistema de baterías.....	- 56 -
Tabla 23. Parámetros técnicos de los convertidores.	- 56 -
Tabla 24. Aspectos económicos del sistema.	- 57 -
Tabla 25. Parámetros técnico económico del sistema de paneles.....	- 59 -
Tabla 26. Parámetros técnico económicos del sistema de baterías.....	- 60 -
Tabla 27. Parámetros de los convertidores e inversores.	- 61 -
Tabla 28. Resumen económico del sistema.	- 62 -
Tabla 29. Dimensionamiento del cada sistema.....	- 63 -
Tabla 30. Costos generales de cada escenario.	- 63 -
Tabla 31. Gastos de cada sistema.	- 64 -
Tabla 32. Índices de producción de energía.	- 64 -
Tabla 33. Parámetros medioambientales	- 64 -

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

ACS	Costo anual del sistema
AG	Aerogeneradores
BESS	Almacenamiento de fuentes de energía en baterías
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
COA	Algoritmo de Optimización Coyote
COE	Costo de la Energía
CRF	Factor de recuperación capital
CWECSS	Almacenamiento de energía en aire comprimido
DPSP	Deficiencia en la probabilidad de suministro de energía
EENS	Energía prevista no suministrada
EO	Optimización Equilibrada
FESS	Flywheel
FV	Energía Fotovoltaica
GA	Algoritmo genético
HESS	Basada en hidrógeno
HOMER	Modelo híbrido de optimización de energías renovables
HS	Búsqueda Armónica
iHOGA	Optimización Híbrida Mejorada mediante Algoritmos Genéticos
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INTERNET	Redes interconectadas
LA	Nivel de autonomía fiabilidad
LCC	Ciclo del costo de vida
LLCB	Costo de pérdida de vida de la batería
LLP	La Probabilidad de Pérdida de Carga
LPSP	Probabilidad de pérdida de suministro eléctrico
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio
NPC	Costo Neto Presente
NREL	Laboratorio Nacional de Energías Renovables
PoPA	Poder PA
PSO	Partículas SO
SA	Recocido Simulado
SB	Sistemas de Baterías
SER	Sistemas de Energías Renovables
SESS	Supercapacitor

<i>SHER</i>	Sistemas Híbridos de Energías Renovables
<i>SOC</i>	Estado de Carga
<i>TNPC</i>	Costo neto actúa total
<i>TS</i>	Búsqueda tabú
<i>TRNSYS</i>	Simulación de sistemas energéticos transitorios

SIMBOLOGÍA

$C_{ann,tot}$	Costo total anualizado del sistema
$C_{boliler}$	Costo marginal de la caldera
E_{exceso}	Exceso de energía Total
$E_{norenovable}$	Energías no renovables
E_{prod}	Energía producida en un año
E_{prod}	Energía producida
E_{served}	Carga eléctrica total servida
F_{PV}	El factor de reducción de potencia fotovoltaica
F_0	El coeficiente interpolado de la curva de combustible
F_1	Es la pendiente de la curva de combustible
$G_{T,STC}$	La radiación incidente en condiciones de ensayo estándar
G_T	La radiación solar incidente en el campo fotovoltaico en el paso de tiempo actual
H_{served}	Carga térmica total servida
I_{max}	Corriente de carga máxima del acumulador
LHV_{fuel}	Es el valor calorífico inferior del combustible
N_{batt}	Número de baterías del banco de almacenamiento
P_{PV}	Potencia de un panel solar
$P_{WTG,STP}$	Es la potencia del aerogenerador a temperatura y presión estándar
P_{WTG}	Es la potencia del aerogenerador
$P_{batt,max,kgm}$	Potencia máxima de carga en un modelo de almacenamiento cinético
$P_{batt,max,mcc}$	Potencia máxima de carga del banco de almacenamiento correspondiente a la corriente de carga máxima
$P_{batt,max,mcr}$	Potencia de carga de almacenamiento correspondiente a la tasa de carga máxima
$P_{batt,cmax}$	Potencia máxima de carga de almacenamiento
$P_{batt,dmax,kgm}$	Potencia máxima de descarga
$P_{batt,dmax}$	Potencia máxima de descarga del banco de almacenamiento
P_{gen}	Potencia de salida del generador
Q_{max}	Es la capacidad total del banco de almacenamiento
Q_1	Es la energía disponible en el acumulador al principio del paso de tiempo
$T_{c,STC}$	La temperatura de la célula fotovoltaica en condiciones de prueba estándar
T_c	La temperatura de la célula fotovoltaica en el paso de tiempo actual
U_{anem}	La velocidad del viento a la altura del anemómetro
U_{hub}	Es la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador

V_{nom}	Tensión nominal del acumulador
Y_{PV}	Es la capacidad nominal del generador fotovoltaico
Y_{gen}	Es la potencia nominal del generador
Z_{anem}	La altura del anemómetro
Z_{hub}	La altura del buje del aerogenerador
Z_0	La longitud de la rugosidad superficial
f_{exceso}	Fracción de Exceso de energía
f_{ren}	Fracción renovable
m_{fuel}	El combustible consumido por el generador
$n_{batt,c}$	Es la eficiencia de carga de almacenamiento
$n_{batt,d}$	Es la eficiencia de descarga del almacenamiento
n_{gem}	El rendimiento del generador
α_p	El coeficiente de temperatura de la potencia
α_c	Es la tasa de carga máxima del acumulador
ρ_0	Es la densidad del aire a temperatura y presión estándar
Δt	Es la longitud del paso temporal
CRF	Es el factor de recuperación de capital
N	El tiempo de vida estimado para el sistema
Q	Es la cantidad total de energía almacenada al principio del paso temporal
f	Tasa de inflación esperada
i	Es la tasa de interés real
k	Es la constante de velocidad de almacenamiento
ρ	Es la densidad real del aire

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Hoy en día, el acceso a la electricidad puede considerarse una medida del desarrollo económico sostenible de una nación y de la prosperidad de sus ciudadanos. De hecho, ningún país puede crecer y prosperar sin asegurar el acceso a fuentes de energía como la electricidad. En las últimas décadas la combinación del rápido crecimiento de la población y el rápido desarrollo tecnológico ha creado una enorme demanda de energía, especialmente de energía eléctrica. Mientras tanto, muchas zonas rurales y las zonas remotas, especialmente en los países en desarrollo, siguen sin tener acceso a la electricidad. Este problema puede resolverse ampliando las redes eléctricas o construyendo sistemas de generación de energía fuera de la red. Aunque una gran parte (aproximadamente el 75%) de la electricidad mundial sigue procediendo de fuentes de combustible fósil. Los problemas asociados a la dependencia excesiva de estos combustibles, incluyendo la degradación del medio ambiente y el cambio climático debido a las emisiones de CO₂, han hecho que fuentes de energía renovables, como la eólica, la solar y la geotérmica se alcen como fuentes de energía alternativas viables. Sin embargo, todavía hay muchos problemas con el uso de sistemas renovables autónomos fuera de la red para satisfacer la demanda de energía localizada, sobre todo los altos costos de inversión y la baja fiabilidad debido a la incertidumbre inherente a las fuentes de energía renovables. Es por ello que surge el concepto de sistema híbrido de energía renovable (SHER) el cual se ha desarrollado para abordar este tema y hacer frente a este reto. El SHER es un sistema de fuentes de energías convencionales y renovables diseñado para generar y almacenar electricidad para un punto de demanda localizado en un estado autónomo o sin conexión a la red. El SHER puede utilizarse para llevar la electricidad a zonas remotas y rurales de difícil acceso.

1.2 Antecedentes

Los sistemas de energía renovable a pequeña escala son cada vez más populares debido al reciente desarrollo de tecnologías energéticas a pequeña escala y al aumento global de la demanda energética. La integración de estas diferentes tecnologías formando un sistema híbrido puede ser una alternativa realista a los generadores convencionales alimentados por combustibles fósiles para suministrar energía en pequeñas comunidades. Entre estos sistemas energéticos, los renovables, como la eólica, la solar y la biomasa, son aún más atractivos debido al aumento de los precios de los combustibles fósiles y a los impactos ambientales.

Las combinaciones de diferentes tipos de energía renovable, como la eólica, la solar y la biomasa, junto con unidades de almacenamiento de energía, como baterías y motores de gasolina/diésel como respaldo, proporcionan un sistema energético autónomo. Esta propuesta de tema de tesis se centrará en pequeños sistemas híbridos de energía solar, fotovoltaica, motor y batería para proporcionar electricidad. Este sistema de producción de energía a pequeña escala puede utilizarse como solución temporal o a largo plazo para las zonas rurales, situaciones de catástrofe natural o provocada por el hombre, equipos móviles de exploración o fines militares.

La naturaleza intermitente de la energía eólica y solar en combinación con los ciclos de la batería y el funcionamiento del motor de gasolina/diésel pone de relieve la importancia de la estrategia de administración o control. Por esto es necesario definir una estrategia de administración integral en función de la fuente de producción de energía y el consumo de flujo de energía. Sin una buena estrategia de administración, el sistema no funcionará de forma eficiente y podrían propiciarse fallos prematuros en los diferentes componentes que conducen a un aumento de los costos y de las emisiones relacionadas.

1.3 Objetivos

General

El objetivo principal de este estudio será evaluar el funcionamiento del sistema caso de estudio, en función de los criterios deseados, y una estrategia de despacho para extraer la máxima energía disponible de las fuentes de energías renovables.

Particulares

- Estimar la demanda y el perfil de carga para el escenario seleccionado en un período de un año.
- Determinar las mejores configuraciones del sistema según la fiabilidad y criterios económicos.
- Determinar la capacidad de los componentes del sistema híbrido de energía renovable de acuerdo a algún escenario determinado

1.4 Metas

- Seleccionar un caso de estudio en una localidad remota.
- Determinar un perfil de carga en función del número de hogares, de los dispositivos y aparatos que consumen energía en cada hogar y del consumo de los proveedores de servicios.
- Analizar las mejores configuraciones en la conexión del sistema basado en las aplicaciones prácticas.
- Seleccionar varios escenarios para un análisis comparativo.
- Optimizar los sistemas en función de criterios técnicos – económicos.
- Determinar la capacidad de generación de cada componente.
- Realizar un análisis comparativo entre los escenarios, para determinar el mejor escenario para el caso de estudio.

1.5 Justificación

Esta propuesta de tema de tesis se centrará en pequeños sistemas híbridos de energías renovables, motores, baterías, convertidores e inversores para proporcionar electricidad. La implementación de un sistema híbrido permite diversificar las fuentes de energía utilizadas. Al combinar diferentes tecnologías renovables, se reduce la dependencia de una sola fuente de energía, lo que proporciona una mayor seguridad energética. Si una fuente de energía falla o no está disponible, las otras pueden compensar y garantizar el suministro continuo de energía. La implementación de un sistema híbrido de energías renovables fomenta la investigación, el desarrollo y la innovación tecnológica. Al combinar diferentes tecnologías, se abre el camino para la creación de soluciones más avanzadas y eficientes en el campo de las energías renovables. Esto no solo beneficia al sistema energético, sino que también impulsa el crecimiento económico y la generación de empleo en el sector de las energías limpias.

Este sistema de producción de energía a pequeña escala puede utilizarse como solución temporal o a largo plazo para las zonas rurales o proyectos de construcción, en situaciones de catástrofe natural o provocadas por el hombre, equipos móviles de exploración o fines militares.

1.6 Problemática

El uso de la electricidad es un bien fundamental para la reducción de la pobreza, el crecimiento económico y la mejora del nivel de vida. La Agencia Internacional de la Energía (AIE) determinó que los hogares deben cumplir un nivel mínimo de electricidad especificado, que se establece en función de si el hogar es rural o urbano, y que aumenta con el tiempo. Para los hogares rurales, este umbral mínimo es de 250 kilowatts-hora (kWh) al año y para un hogar urbano es de 500 kWh al año.

A nivel mundial, el porcentaje de personas con acceso a la electricidad no ha dejado de aumentar en las últimas décadas como se muestra en la **Figura 1**. En 1990, alrededor del 71% de la población mundial tenía acceso; esta cifra ha aumentado al 87% en 2016.

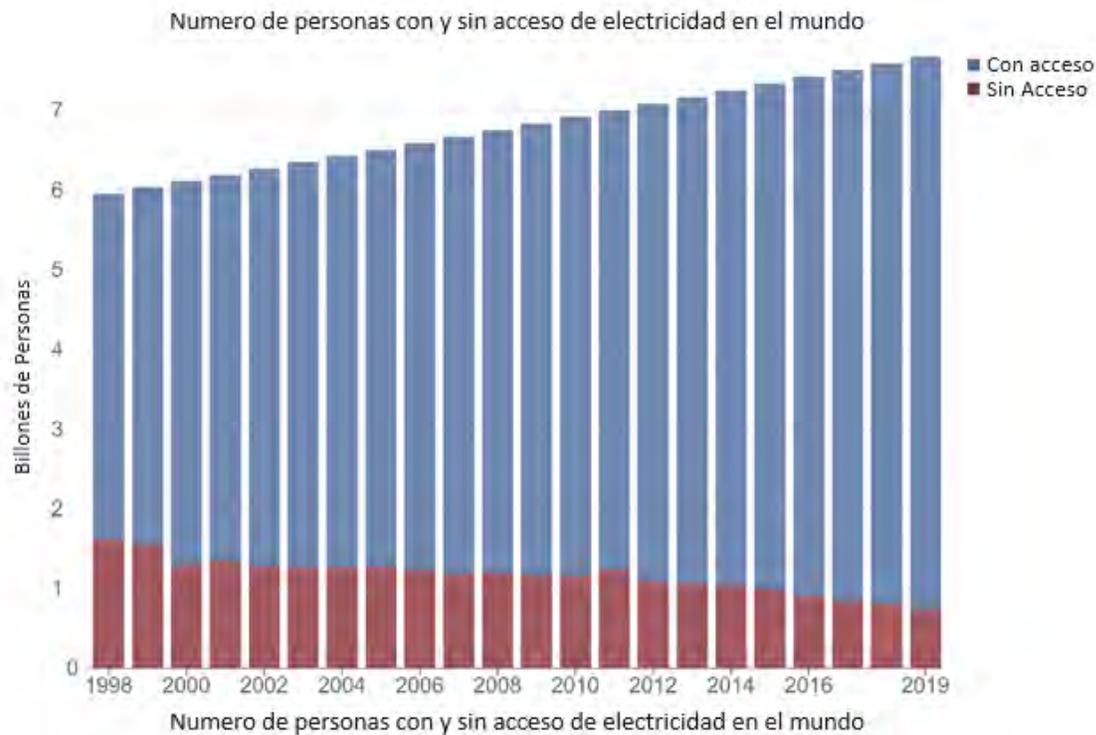


Figura 1. Personas con acceso y sin acceso a la electricidad en el mundo [1].

En México aún existen zonas que están fuera del alcance de las redes eléctricas debido a su ubicación y su baja productividad económica. En la actualidad se estima que existen más de 800 000 personas aun sin acceso a la electricidad, por lo que muchas aún no cuentan con energía eléctrica para necesidades básicas. De ahí la necesidad de realizar estos estudios sobre SHER, ya que brindan la posibilidad de poder llegar a esta porción de la población, a la cual aún no es viable su electrificación mediante las demás fuentes de energía.

1.7 Método

Una de las cuestiones importantes a la hora de diseñar un SHER es cómo optimizar sus componentes, por ejemplo, las especificaciones de las turbinas eólicas, los paneles fotovoltaicos, las baterías, los generadores y los convertidores para que pueda alcanzar sus objetivos de forma óptima. Para ello se han desarrollado numerosas aplicaciones informáticas y métodos de optimización.

Una de las herramientas más potentes para determinar el número y las especificaciones óptimas de los equipos de una SHER es el software denominado HOMER (optimización híbrida de múltiples recursos energéticos), desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. En este estudio, se pretende que este software se utilice para alcanzar algunos de los objetivos de la investigación, es decir, determinar la composición óptima de una SHER para un determinado caso de estudio. En la **Figura 2** se muestra el procedimiento a seguir para el cumplimiento de los objetivos [2].

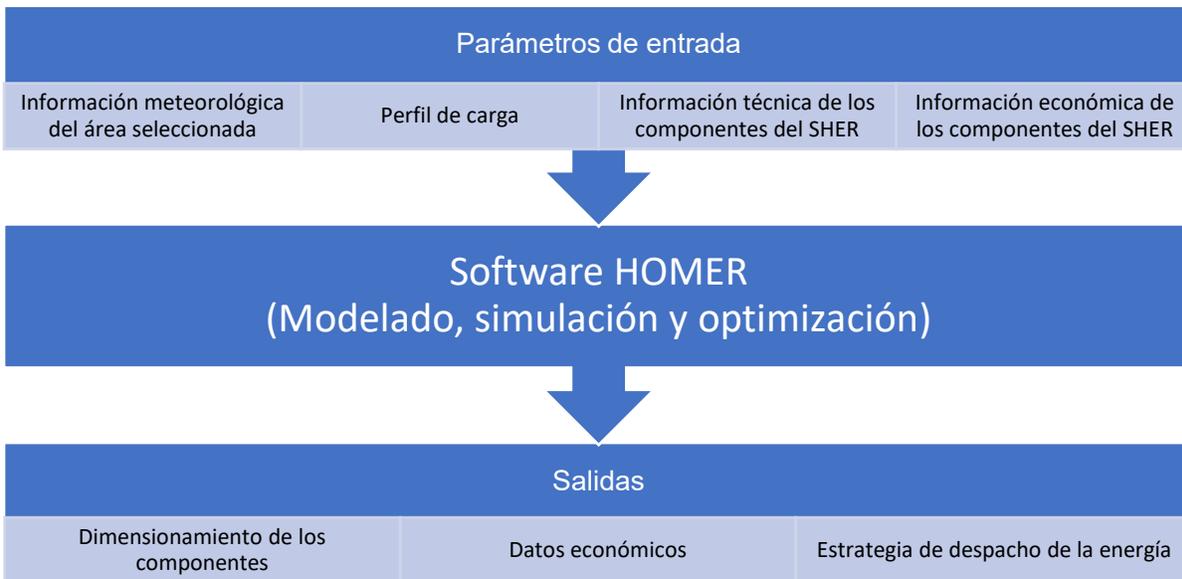


Figura 2. Metodología para el cumplimiento de los objetivos.

1.8 Hipótesis

El diseño y la optimización de un sistema híbrido de energías renovables para generar energía eléctrica, podrá abastecer de manera fiable y económico un perfil de carga determinado según el escenario escogido, como una aldea remota, en casos de catástrofes o fines militares.

1.9 Alcance

El SHER desarrollará la forma de abordar de la manera más económica y eficiente el abastecimiento de energía eléctrica en un solo caso de estudio, debido a que cada caso de estudio conlleva a cambiar los parámetros de entrada del sistema, los cuales toman mucho tiempo recopilarlos.

1.9 Aportación

Los sistemas híbridos de energías renovables constituyen una forma de generación de electricidad económica y generosa con el medio ambiente. Haciendo viable brindar servicios básicos de electricidad de forma estable a zonas remotas donde no es rentable llevar los servicios convencionales. Con la electrificación de estas pequeñas comunidades surgiría un abanico de oportunidades socio-económicas, ya que estimularía la economía local habilitando algún tipo de comercio local o el uso de algunas máquinas que afines con la actividad económica de la localidad. Aumentaría la calidad de vida y el desarrollo social con la introducción del alumbrado eléctrico y la posibilidad de usar algunos electrodomésticos y posibilitaría la construcción de una escuela local.

1.10 Organización del documento

La estructura del presente documento está diseñada de forma condensada para la fácil ubicación de los temas. En el capítulo 1 se explica la propuesta de solución. En el capítulo 2 se habla sobre el estudio del estado del arte. En capítulo 3 se presenta el marco teórico donde se abordan las cuestiones relacionadas con el modo en el que opera teóricamente el software. En el capítulo 4 se trata el caso del estudio, donde se definen las características socioeconómicas de la localidad seleccionada. En capítulo 5 ya se definen los escenarios y las características de diseño de los mismos para la simulación y posteriormente el análisis de cada caso. En el capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones y se realiza un estudio comparativo entre cada escenario para determinar el sistema más óptimo y factible. Luego de presentan las conclusiones de este estudio y posteriormente se presentan algunos anexos y luego la bibliografía utilizada.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Artículos encontrados en la literatura

Se ha demostrado que disponer de más de una fuente de energía renovable hace que el sistema sea más fiable. La arquitectura de la conexión de varios recursos de ER, convertidores y buses puede ser diferente, cada uno con su propia complejidad. El objetivo principal de la arquitectura de la SHER es minimizar el número de etapas de conversión para reducir las pérdidas de conversión y la complejidad del sistema de control, a la vez que se consigue que el sistema sea fiable y rentable. El sistema SHER puede constar de unidades de almacenamiento de energía conectadas a través de un convertidor bidireccional que puede almacenar energía durante el exceso de producción de energía y suministrar energía a la carga o al sistema durante el estado de déficit de energía. Los SHER pueden estar aislados o conectados a la red [3].

Hasta la fecha son muchos los artículos y trabajos realizados sobre el tema, de aquí que se realizó una detallada revisión de sobre lo que es un SHER y las herramientas necesarias para su análisis. Así se podrán alcanzar mayores referencias de comparación y mayores criterios a la hora de buscar nichos o lagunas que queden aun sin profundizar.

Con la búsqueda del estado del arte se identificaron las técnicas, herramientas y las formas de optimización de los SHER en los últimos años. En un inicio, se realiza la búsqueda de artículos donde se implementen los SHER, en función de los objetivos que se querían obtener. El proceso de selección de artículos se muestra en la Figura 1, donde se explican los pasos seguidos para la selección de los 62 artículos. En los pasos iniciales, se utilizaron las palabras clave "Hybrid Renewable Energy Systems", "HRES Optimization" y "HRES Sizing".

La **Figura 3** muestra la metodología utilizada para la revisión sistemática de la literatura. En su estructura se utilizaron cuatro etapas (identificación, investigación, elegibilidad e inclusión), cada una con sus propios criterios de selección o búsqueda. Como puede observarse en la figura, la búsqueda se inició inicialmente por títulos y palabras. El resultado fueron 1261 artículos relacionados con los sistemas de energías renovables. Después, en el cribado, se detectaron 438 artículos repetidos o sin relación. En la elegibilidad, se establecieron los criterios del tipo de documento, los años de publicación, y el idioma en inglés, donde se descartaron 323, y finalmente incluidos, se obtuvo un resultado final de 62 artículos.

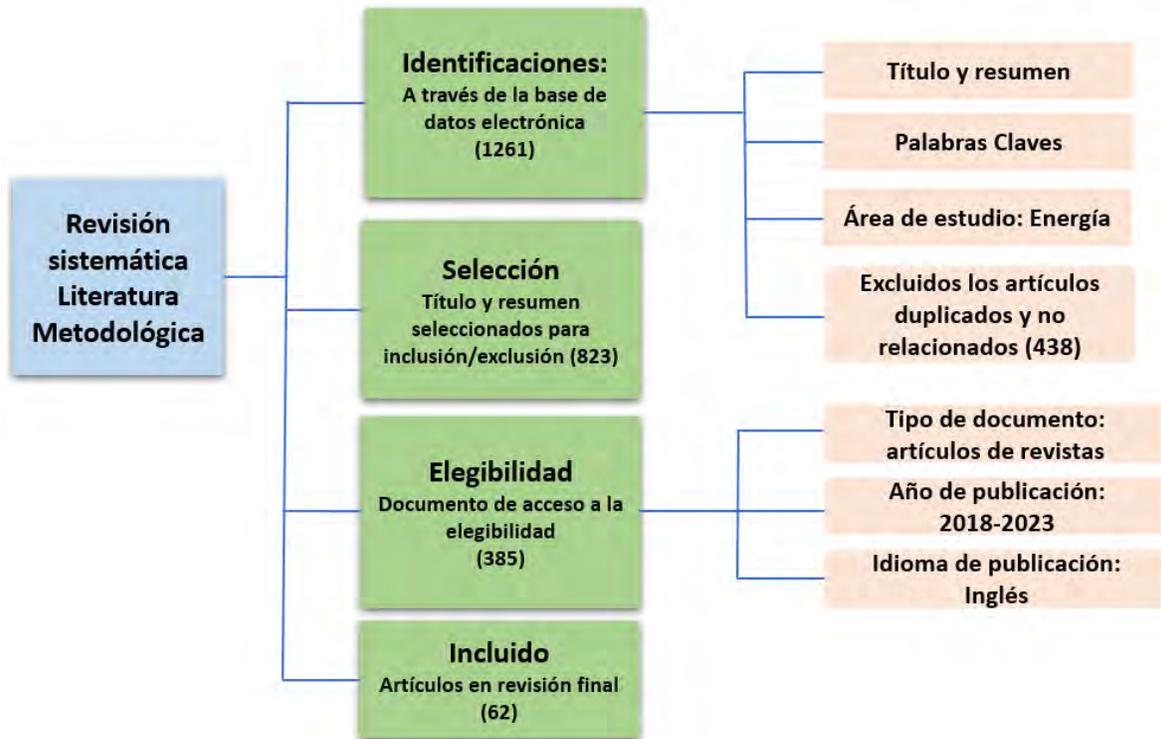


Figura 3. Selección de la bibliografía.

La **Tabla 1** muestra algunas de las publicaciones encontradas, con indicación de los años, referencias, lugares y aplicaciones utilizadas en los estudios de casos.

Tabla 1. Dimensiones y áreas de aplicación de los artículos revisados en la Literatura.

Ref	Título	Año	Fuentes de Energía	Aplicación	Dimensión del sistema
[4]	Use of a Hybrid Wind–Solar–Diesel–Battery Energy System to Power Buildings in Remote Areas: A Case Study.	2021	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	32 kW para 20 hogares
[5]	Performance Analysis of Solar-Wind-Diesel-Battery Hybrid Energy System for KLIA Sepang Station of Malaysia.	2015	FV-AG-SB-GD	No especifica	56kW instalados, para más de 50 hogares y 6 tiendas.
[6]	A Comparative Study of the Optimal Sizing and Management of Off-Grid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Systems for Remote Areas.	2021	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	44.1kW instalados, para 10 hogares
[7]	Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System with Battery Storage for Rural Electrification.	2014	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	40kW instalados, para 150 hogares
[2]	Designing and Sensitivity Analysis of an Off-Grid Hybrid Wind-Solar Power Plant with Diesel Generator and Battery Backup for the Rural Area in Iran.	2022	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	13kW instalados, no especifica el número de hogares
[8]	Research on capacity optimization of PV-wind diesel-battery hybrid generation system.	2018	FV-AG-SB-GD	No especifica	38kW instalados, no especifica el número de hogares
[9]	Optimal sizing and performance investigation of a solar-wind-battery-DG based hybrid Microgrid system applicable to the remote school of Bangladesh.	2020	FV-AG-SB-GD	Edificios estudiantiles	4.6kW instalados, para una escuela rural
[10]	Simulation and Optimization of Solar Photovoltaic–Wind–Diesel Generator Stand-alone Hybrid System in Remote Village of Rajasthan, India.	2020	Se realiza una comparación entre diferentes fuentes de energía	Zona rural residencial	Entre 50 y 60 kW instalados, para 41 hogares
[11]	Design and Simulation of an Optimal Mini-Grid Solar-Diesel Hybrid Power Generation System in a Remote Bangladesh.	2018	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	No se encontraron

[12]	Techno economic environmental assessment of hybrid renewable energy system in India.	2021	FV-AG-SB-GD	Edificios estudiantiles	4 MW instalados para tres edificios de estudiantes
[13]	Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—A way forward for sustainable development.	2021	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	7MW instalados, no especifica la cantidad de hogares
[14]	Optimal Configuration of Wind/Solar/Diesel/Battery Hybrid Energy System for Electrification of Rural Area.	2015	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	Desde 250 a 280kW instalados, no especifica el número de hogares
[15]	Cost-effective sizing of an AC mini-grid hybrid power system for a remote area in South Australia.	2018	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	Desde 0.6MW-1,15MW instalados según el caso de estudio
[16]	Developed Approach Based on Equilibrium Optimizer for Optimal Design of Hybrid PV/Wind/Diesel/Battery Microgrid in Dakhla, Morocco.	2021	FV-AG-SB-GD	Industrial	86.77kW instalados
[17]	Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago.	2019	FV-AG-SB-GD	Industrial	50kW instalados, en una planta de desalinizadora.
[18]	A flexible metamodel architecture for optimal design of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) e Case study of a stand-alone HRES for a factory in tropical island.	2019	FV-AG-SB-GD	Industrial	467kW instalados, en una fábrica
[19]	Challenges of reaching high renewable fractions in hybrid renewable energy systems.	2023	FV-AG-SB-GD	Algunas regiones de EUA	17kW instalados
[20]	Comparison of Different Hybrid Renewable Energy Systems with Optimized PV Configuration to Realize the Effects of Multiple Scheme.	2019	PV-BESS	No especifica	1.3MW instalados
			FV-AG-SB-GD		1.25MW instalados
[21]	The impact of energy dispatch strategy on design optimization of hybrid renewable energy systems.	2019	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	7MW installed Not specified number of homes

[22]	Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural area.	2020	FV-AG-SB-GD-BG-BM-CC	Zona rural residencial	317kW instalados
			FV-AG-BG-BM-CC		317kW instalados
			FV-AG-BG-BM-SB		260kW instalados
			FV-AG-BG-BM		260kW instalados
[23]	Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms.	2022	No se encontraron	Zona rural residencial	23kW instalados par a 140 viviendas
[24]	Designing of an optimal standalone hybrid renewable energy micro-grid model through different algorithms.	2023	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	11kW instalados
[25]	Sizing and economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-wind system for rural electrification: A case study Lundu, Sarawak.	2022	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	150kW instalados
[26]	HOMER Based Optimal Sizing of a PV/Diesel/Battery Hybrid System for a Laboratory Facility.	2021	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	53.8kW instalados
[27]	Techno-economic scrutiny of HRES through GA and PSO technique.	2018	FV-AG-SB-GD-BM	Zona rural residencial	150kW instalados
[28]	Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica.	2012	FV-AG-SB-GD	Zona rural residencial	9.6kW instalados
[29]	Optimal Management Energy System and Control Strategies for Isolated Hybrid Solar-Wind-Battery-Diesel Power System.	2021	FV-AG-SB-GD	No especifica	40kW instalados
[30]	Optimal structure design of a PV/FC HRES using amended Water Strider Algorithm.	2021	FV-CC	Zona rural residencial	24.35kW instalados

FV – fotovoltaica, AG – aerogenerador, SB – sistemas de baterías, GD – generador diésel, CC – celdas de combustible, BM – biomasa, BG – biogás.

En la tabla 1 se presentan los artículos de revisión, junto con las fuentes de energía renovable utilizadas por los autores. Se pueden observar los tipos de energías renovables más utilizadas, así como las aplicaciones para las que fueron diseñadas y la capacidad de los sistemas utilizados. En el universo de esta revisión, se observa que las fuentes de energía más utilizadas fueron la combinación de sistemas

fotovoltaicos, turbinas eólicas, sistemas de baterías y generadores diésel. Como se puede observar, estos sistemas pueden alcanzar grandes capacidades de generación, aunque la mayoría de ellos, al ser para uso residencial, se encuentran en el rango de los 100 kW.

2.2 Sistemas de Almacenamiento en un SHER

Los Sistemas de Baterías son una parte importante de los SHER que ayudan a alcanzar una alta fiabilidad ya que la energía generada por las fuentes renovables de energía es irregular debido a que depende de los recursos naturales y estos presentan intermitencia, lo que aumenta las irregularidades del sistema eléctrico y deprecia su calidad.

Por esto se hace vital la búsqueda de información de los SB que existen en la actualidad para poder luego determinar cuál sistema implementar. En la **Tabla 2** se mostrarán los tipos de SB, sus ventajas, desventajas y las referencias encontradas donde se emplean estos tipos de SB.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los sistemas de baterías [31-34].

BESS	Ventajas	Desventajas	Artículos que aplican estas tecnologías
Almacenamiento de energía en aire comprimido (CWECS)	Menor costo, baja autodescarga, vida útil alta.	Costo inicial alto, gran escala, Existen restricciones geográficas que limitan la instalación del sistema.	No se encontraron
Batería Ni-Cd	Bajo requerimiento de mantenimiento, alta densidad de energía y alta confiabilidad.	Este producto tiene costos elevados y sufre de un fenómeno conocido como "memoria de batería".	No se encontraron
Batería plomo-ácido	Este producto tiene una densidad de energía media, una baja inversión inicial y está ampliamente disponible. Además, no requiere de un sistema de gestión de celdas.	Las características de este producto incluyen un ciclo de vida bajo, baja eficiencia, requerimiento de ventilación y la necesidad de una eliminación adecuada de las pilas usadas.	[7, 9-13, 17, 28, 35-38]
Batería Li-ion	Este producto se destaca por su alta eficiencia, alta densidad de energía, largo ciclo de vida y tamaño relativamente compacto. Además, se encuentra en un ámbito donde se están produciendo rápidos avances tecnológicos.	Las desventajas de este producto son su alto costo de capital inicial debido al embalaje especial que requiere y el riesgo potencial de ruptura del cuerpo de la batería.	[19, 26, 39]

Basada en hidrógeno (HESS)	Este producto es casi libre de contaminación y tiene un amplio rango de poder.	Este producto incluye baja eficiencia, bajo tiempo de respuesta, alto costo y restricciones de instalación debido al tanque de almacenamiento del hidrógeno.	No se encontraron
Supercapacitor (SESS)	Tiene una alta eficiencia, un ciclo de vida prolongado y una alta capacidad de potencia.	Tiene una baja densidad de energía y un costo relativamente alto.	No se encontraron
Flywheel (FESS)	Se caracteriza por su alta capacidad de potencia, ciclo de vida prolongado y capacidad de carga rápida.	Las desventajas de este producto incluyen su alto costo debido a la necesidad de una cámara de vacío independiente, cuestiones de seguridad, alta autodescarga y costo elevado.	[15]
Gel	Este producto es una buena elección para aplicaciones que tienen altos requerimientos cíclicos debido a su excelente comportamiento de recarga, lo que le proporciona una larga vida útil.	Una de las desventajas de las baterías de gel es que tienen una menor capacidad de corriente en comparación con otras tecnologías de baterías. Pueden ser más costosas que algunas otras tecnologías de baterías.	[6]

Como se puede apreciar, los sistemas de baterías poseen diferentes características las cuales las hacen útiles en diferentes aplicaciones. En la tabla anterior se muestra las ventajas y desventajas de cada una expuesta para así saber definir cuál es la más adecuada para el dado. Para la implementación de los SHER los sistemas más usados según la revisión del estado del arte son las baterías de ácido-plomo y las de ion-litio.

2.3 Arquitectura de los SHER

La arquitectura de la conexión de varias fuentes de energía renovable, los convertidores y los buses pueden ser diferente, y cada uno tiene su propia complejidad, como se muestra en las **Figura 4-7** y la **Tabla 3** [40].

El objetivo principal de la arquitectura de la SHER es minimizar el número de etapas de conversión para reducir las pérdidas de conversión y la complejidad del sistema de control, al tiempo que se consigue que el sistema sea fiable y rentable.

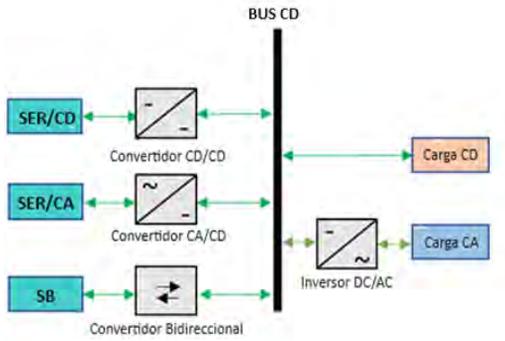


Figura 4. Configuración del BUS en CD.

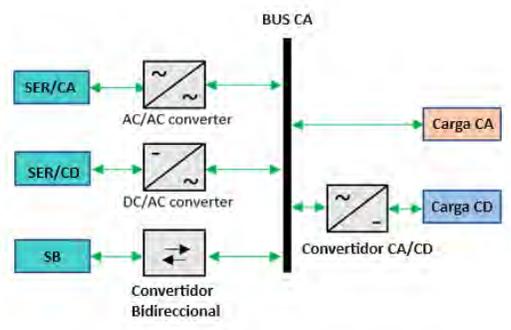


Figura 5. Configuración del BUS en CA.

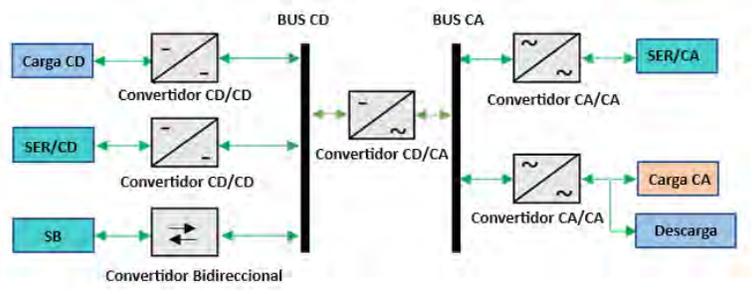


Figura 6. Configuración del BUS combinando CA-CD aislado de la red.

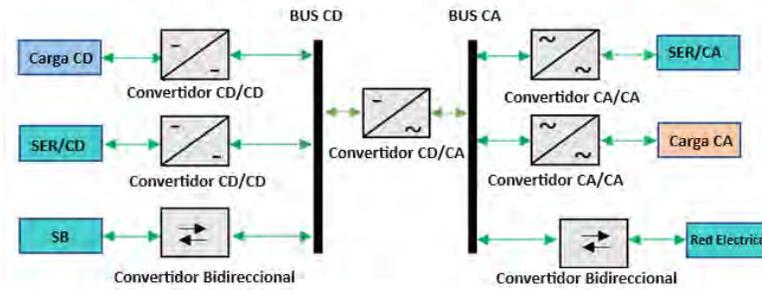


Figura 7. Configuración del BUS en CA-CD conectado a la red.

La tabla 3 muestra el número mínimo y máximo de convertidores que pueden utilizarse para cada topología, sus ventajas e inconvenientes y los artículos que utilizaron cada uno de ellos.

Tabla 3. Resumen de los tipos de arquitecturas encontradas en la literatura [3, 31, 35].

Tipo	Artículos donde se aplican	Convertidores		Ventajas	Desventajas
		Min	Max		
Barra DC Aislada	[8, 21, 25, 41]	2	4	Es simple y de poca complejidad.	Si el bus fallara, el sistema se colapsaría.
Barra AC Aislada	-	2	4	Este tipo de aplicación es más apropiado para cargas de CA de pequeña escala en situaciones reales.	Es necesario que la frecuencia del bus de CA esté sincronizada con todos los componentes de CA.
Red híbrida aislado	[2, 4-9, 11-19, 21, 22, 24, 25, 27, 28, 30, 39, 41-46]	2	6	Brinda mayor eficiencia y fiabilidad al sistema.	La complejidad aumenta en el control y gestión del sistema.
Red híbrida conectada	[38, 47]	3	7	Esta configuración es más apropiada en áreas semiurbanas que cuenten con accesibilidad a la red.	Cuando se trata de conectar a la red, la gestión de la calidad de la energía es una preocupación importante.

La revisión indica que el modo de instalación más utilizado es el sistema aislado de la red, lo que sugiere que la mayoría están diseñados para instalarse en lugares sin acceso a la red eléctrica.

2.4 Criterios de Optimización

Los criterios en los que se basa la optimización de un SHER se dividen básicamente en dos categorías: económicos y de fiabilidad [31]. Queda a decisión de los objetivos de la investigación, qué criterios deben tener prioridad y seleccionar un nivel de tolerancia para cada uno de ellos.

Los criterios económicos tienen que ver básicamente con el costo del sistema o, en algunos casos, con el tamaño del mismo, mientras que los criterios de fiabilidad dan prioridad a la continuidad de la alimentación de la carga. Los criterios de optimización se citan en **Tabla 4** y **Tabla 5** junto con ciertas limitaciones propias de cada criterio del sistema [31, 48]. En la **Tabla 6** se muestra las técnicas de optimización en la literatura revisada.

Tabla 4. Criterios de optimización(económico) y limitaciones para SHER [3, 31].

Criterios	Tipo	Limitaciones	Artículos que aplican estos criterios
Costo anual del sistema (ACS)	económico	La estimación de costos no considera la posible variación del tipo de interés y la inflación.	-
Costo neto actual (NPC)	económico	No es posible tener en cuenta la fluctuación en los precios del combustible (en caso de que se incluyan fuentes de energía convencionales) y las incertidumbres en la durabilidad de los componentes del sistema, tales como las baterías.	[2, 4, 6, 7, 9-18, 26, 28, 37-39, 42-44, 46, 47, 49, 50]
Costo de energía (COE)	económico	El costo de recuperación de los componentes del sistema al final de su vida útil no se encuentra incluido.	[5-7, 9, 10, 12-14, 17, 22, 24, 26-28, 37, 39, 42-44, 46, 47, 50]
Costo nivelado de la energía (LCOE)	económico	La herramienta de estimación de costos no tiene en cuenta factores externos, como la volatilidad en los precios de los combustibles fósiles.	[4, 15, 16, 18, 19, 30, 38, 39]
Costo neto actual total (TNPC)	económico	Los cambios en el costo de la energía no son tomados en cuenta.	-
Ciclo del costo de vida (LCC)	económico	La estimación de costos es complicada debido a la dificultad de predecir con exactitud los costos de adquisición, operación y mantenimiento a largo plazo, lo que puede afectar la precisión del análisis de Costo del Ciclo de Vida (LCC, por sus siglas en inglés).	[6, 8, 25]
Costo de pérdida de vida de la batería (LLCB)	económico	La reducción del rendimiento de la batería a medida que envejece no se incluye en la evaluación.	-

En esta tabla se muestran algunos de los criterios de optimización económicos encontrados en la literatura resaltando las limitaciones que presentan cada uno. Como se puede observar, en los SHER los que más se usan son el NPC y el COE.

Tabla 5. Criterios de optimización (fiabilidad) y limitaciones para SHER [3, 31].

Criterios	Tipo	Limitaciones	Artículos que aplican estos criterios
Probabilidad de pérdida de suministro eléctrico (LPSP)	fiabilidad	Está definido para un perfil de carga específico y no se toman en cuenta las variaciones en dicho perfil de carga.	[14, 16, 24, 27, 30, 51]
Energía prevista no suministrada (EENS)	fiabilidad	El impacto potencial de la variación en la demanda de carga no se toma en cuenta.	-
Nivel de autonomía (LA)	fiabilidad	Normalizado a la demanda total de energía anual.	-
La Probabilidad de Pérdida de Carga (LLP)	fiabilidad	Una limitación en la evaluación de la confiabilidad del suministro eléctrico es que la pérdida de carga de larga duración (LLP) solo mide la probabilidad de interrupción del suministro eléctrico y no proporciona una evaluación completa de la confiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto.	[44]
Deficiencia en la probabilidad de suministro de energía (DPSP)	fiabilidad	Para $EPG < E_L$, es el mismo que LPSP.	-

De igual manera que en la tabla 5 se muestran los criterios que se usan para la optimización basados en la fiabilidad y muestran las limitaciones que presenta cada uno. Para la optimización de los SHER el criterio que más se usa es el LPSP.

2.5 Métodos de Optimización

Los distintos métodos disponibles para la optimización de los SHER pueden clasificarse en términos generales como métodos de inteligencia artificial, métodos iterativos y métodos de software. Los métodos de inteligencia artificial comprenden métodos como el AG, partículas SO(PSO), la búsqueda tabú (TS), el recocido simulado (SA), la búsqueda armónica (HS), etc. Mientras que los métodos iterativos pueden incluir el SCA eléctrico (ESCA), power PA(PoPA), algoritmos genéricos (GA) etc.

Las herramientas de software disponibles para la optimización son Transient Energy System Simulation (TRNSYS), Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable (HOMER), Hybrid2, etc., cada una con su propia técnica de optimización subyacente. En la tabla 6 se muestran las aplicaciones de las técnicas de optimización en la literatura revisada.

Tabla 6. Aplicaciones de las técnicas de optimización en la literatura revisada [3, 31, 48, 52].

Técnicas de Optimización	Ventajas	Desventajas	Artículos que aplican este algoritmo
Partículas SO (PSO)	La técnica que no utiliza derivadas y que es menos sensible a la naturaleza de la función objetivo, así como menos dependiente del conjunto de puntos iniciales, presenta una alta eficiencia.	La técnica carece de una base matemática sólida y es una variante de las técnicas de optimización estocástica que requieren un mayor tiempo computacional.	[8, 15, 24, 27, 41]
Busqueda Tabú (TA)	La técnica es altamente compatible con otros métodos y, además, dedica más tiempo a la región donde la solución es óptima. Esto se logra mediante el uso de movimientos deterministas que reducen la variabilidad causada por la solución inicial.	Esta técnica requiere un mayor número de iteraciones, lo que puede resultar en una tasa de convergencia más lenta.	No se encontraron
Coyote Optimization Algorithm (COA)	La técnica tiene una convergencia rápida y ha demostrado su eficacia en una variedad de problemas de optimización, incluyendo aquellos que son no lineales y multimodales.	El COA puede tener dificultades para encontrar soluciones precisas y puede detenerse en óptimos locales, especialmente en problemas que presentan múltiples óptimos locales. Esto se debe a que el algoritmo puede quedar atrapado en una solución subóptima en lugar de encontrar la solución global óptima.	[44]
Recocido Simulado (SA)	El método es capaz de tratar con modelos no lineales y garantiza estadísticamente la búsqueda de una solución óptima. Además, es fácil de codificar para sistemas complejos.	Se requieren muchas restricciones iniciales y la suposición inicial puede tener un fuerte impacto en la solución final.	No se encontraron

Búsqueda Armónica (HS)	El método tiene una fácil aplicación y requiere menos ajuste de parámetros, lo que lleva a una convergencia más rápida en comparación con otros métodos de optimización.	La complejidad de los problemas de optimización puede resultar en una convergencia prematura del algoritmo de optimización utilizado.	No se encontraron
Optimizador de equilibrio (EO)	Incluye mecanismos de búsqueda de alta exploración y explotación para cambiar aleatoriamente las soluciones.	-	[16]
Algoritmo Genético (GA)	El algoritmo genético (GA) puede resolver problemas con múltiples soluciones y se puede aplicar fácilmente a simulaciones y modelos ya existentes.	Si la población inicial generada no es suficiente, el GA puede estancarse en mínimos locales.	[10, 21, 27]
Poder PA (PoPA)	La interfaz gráfica hace que sea más fácil entender y aplicar los problemas de restricciones.	El método o técnica de optimización puede ser utilizado en un sistema que consta de una sola unidad generadora de energía.	No se encontraron
ESCA	Este método de optimización se inspira en el algoritmo POPA y puede manejar sistemas con múltiples generadores.	La aplicación de la técnica se vuelve compleja debido a la optimización de múltiples restricciones.	No se encontraron
AWSA	Es factible realizar cambios en el AWSA con facilidad para ajustarlo a diversos tipos de problemas de optimización.	El desempeño del AWSA puede verse afectado de manera considerable por la calidad de la solución inicial; en caso de que ésta sea deficiente, el algoritmo podría encontrar dificultades para alcanzar la solución óptima.	[30]
Modelo híbrido de optimización de las energías renovables (HOMER).	La representación visual de datos puede facilitar la comprensión de la mejor combinación de sistemas rentables, lo que hace que sea sencillo implementar un sistema complejo.	No se puede realizar un análisis de fiabilidad.	[2, 4-7, 9-14, 17, 19, 22, 26, 28, 36-39, 46, 47, 50]

En la tabla 6 podemos observar los algoritmos y herramientas de optimización que más se usan para el análisis de los SHER, detallando las ventajas y desventajas que presentan cada uno de ellos y dando a relucir que el más usado es el software HOMER debido a la representación visual que presenta y su facilidad a la hora de operar.

2.6 Resumen del estudio del estado del arte para el caso de estudio.

De las arquitecturas encontradas en la revisión se tomó la decisión de implementar el esquema de conexión de CD (corriente directa), ya que no presenta los problemas asociados a la sincronización, los cuales representan un reto para estos sistemas. En la **Figura 8** se mostrará el esquema de conexión seleccionado para nuestro caso de estudio.

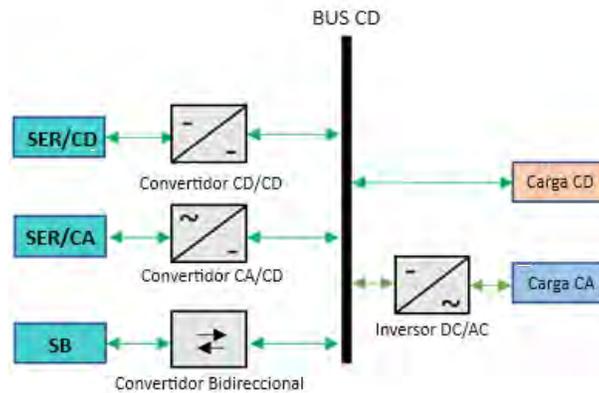


Figura 8. Arquitectura del sistema caso de estudio [40].

2.6.1 Sistemas de Baterías

El inconveniente de las fuentes de energías renovables es que la generación de energía depende completamente de las condiciones climáticas y de la topografía del emplazamiento de la planta y no de la demanda de carga, a diferencia de otros sistemas convencionales de generación de energía. Por lo tanto, puede surgir un problema de desajuste energético. De ahí que el sistema de almacenamiento sea una parte importante de la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables con el fin de contribuir a su fiabilidad y compensar el costo del sistema. Por lo tanto, el sistema de almacenamiento es esencial para proporcionar respaldo a los auxiliares, lo que ayuda a mejorar la calidad de la energía.

En la revisión del estado del arte también se abordan los sistemas de baterías y sus características [31]. De todos los sistemas existentes, entre los más empleados se encuentran las baterías de ácido-plomo y las de ion-litio. En la **Figura 9** se muestran las características de estas dos formas de almacenar la energía eléctrica.

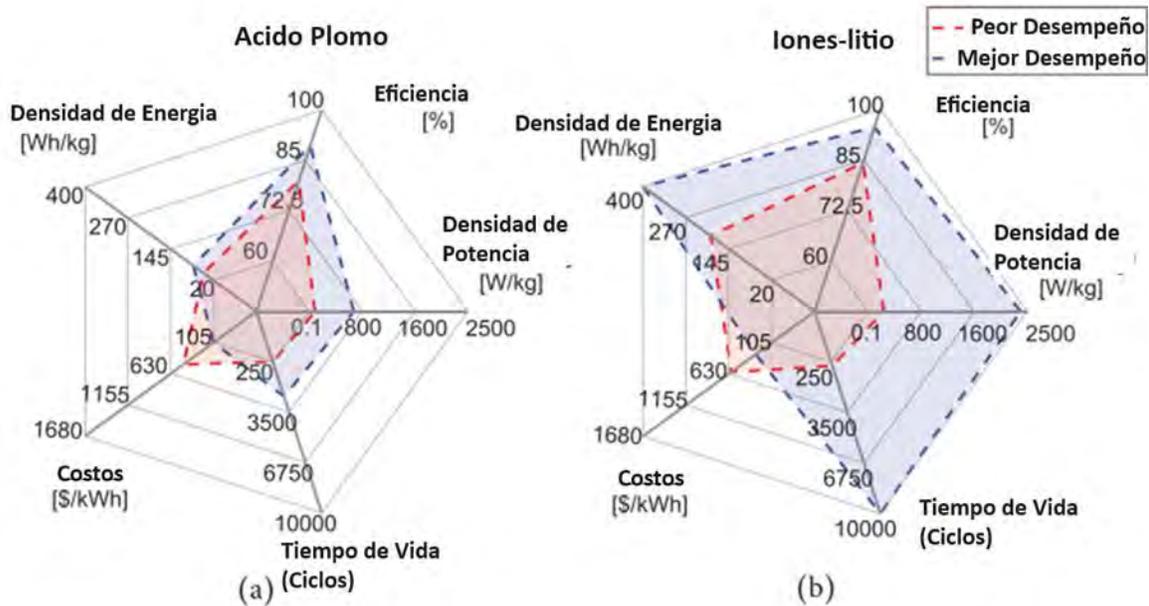


Figura 9. Comparación de baterías de ácido-plomo e ion-litio [33].

2.6.2 Herramienta para la optimización

Se pueden utilizar varias herramientas de optimización para formular el marco de modelización propuesto, como HOMER (Modelo híbrido de optimización de energías renovables), iHOGA (Optimización Híbrida Mejorada mediante Algoritmos Genéticos), Hybrid2 (Modelo híbrido de simulación de sistemas eléctricos). Entre ellos, HOMER es una herramienta de optimización del Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL) validada por varios investigadores para el dimensionamiento óptimo y el análisis económico de sistemas híbridos renovables debido a su facilidad de acceso para diferentes usuarios, flexibilidad y características de programación comprensibles. El algoritmo HOMER busca la solución óptima entre los distintos tamaños considerados para el perfil de carga definido. El algoritmo se realiza mediante el cálculo del balance energético horario para equilibrar la oferta y la demanda en los distintos escenarios híbridos definidos [53].

HOMER es una herramienta de modelado y optimización que ayuda a diseñar sistemas de energía híbridos autónomos o conectados a la red eléctrica. Está diseñado para evaluar y comparar diferentes combinaciones de fuentes de energía, como paneles solares, turbinas eólicas, generadores diésel, baterías y otros componentes, con el objetivo de encontrar la configuración más eficiente y rentable.

El software HOMER utiliza algoritmos avanzados de optimización para realizar análisis detallados de los sistemas energéticos propuestos. Permite tener en cuenta factores como la demanda de energía, los recursos energéticos disponibles, los costos de los equipos y los combustibles, y las restricciones técnicas y ambientales. También tiene en cuenta la variabilidad y la intermitencia de las fuentes de energía renovable, lo que permite evaluar la viabilidad y el rendimiento de los sistemas en diferentes escenarios. HOMER proporciona resultados y recomendaciones en términos de costos, producción de energía, confiabilidad del sistema y otras métricas relevantes [40].

Esto permite a los planificadores energéticos, ingenieros y diseñadores tomar decisiones informadas sobre el diseño y la implementación de sistemas energéticos híbridos óptimos, tanto en áreas urbanas como rurales [38]. Este caso de estudio será optimizado por el software HOMER el cual realizará una optimización energética, económica y dimensionará el sistema según el perfil de carga estimado.

2.6.3 Criterios de Optimización

Es necesario seleccionar criterios o técnicas de optimización con el objetivo de lograr un sistema óptimo y eficiente en su funcionamiento, para el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables. Para lograr esto se determinaron los criterios de optimización de NPC (costo neto presente) y el COE (costo de la energía) ya que es esencial diseñar un sistema capaz de ser rentable con respecto al precio actual de la energía.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

HOMER simplifica la tarea de diseñar sistemas de generación distribuida, tanto dentro como fuera de la red. Los algoritmos de optimización y análisis de sensibilidad de HOMER le permiten evaluar la viabilidad económica y técnica de un gran número de opciones tecnológicas y tener en cuenta las variaciones en los costos tecnológicos y la disponibilidad de recursos energéticos. Para trabajar eficazmente con HOMER es necesario comprender sus tres funciones principales: simulación, optimización y análisis de sensibilidad, y cómo interactúan.



Figura 10. Funciones principales del HOMER [54].

Simulación: En esencia, HOMER es un modelo de simulación. Intenta simular un sistema viable para todas las combinaciones posibles de los equipos que desee considerar. Dependiendo de cómo configure su modelo, HOMER puede simular cientos o incluso miles de sistemas.

Optimización: El paso de optimización sigue a todas las simulaciones. Los sistemas simulados se clasifican y filtran según los criterios que usted defina, para que pueda ver las mejores soluciones posibles. Aunque HOMER es fundamentalmente un modelo de optimización económica, también puede optar por minimizar el uso de combustible.

Análisis de sensibilidad: Este es un paso opcional que le permite modelar el impacto de las variables que están fuera de su control, tales como la velocidad del viento y los costos de combustible, y ver cómo el sistema óptimo cambia con estas variaciones [54].

En la **Tabla 7** se definen algunos de los conceptos que se toman en cuentas en los resultados de las simulaciones.

Tabla 7. Conceptos económicos utilizados [54].

Conceptos	Valores y formulas	Definición
Inflación en el estado (%)	5.8	La tasa de inflación es un indicador clave que señala el cambio porcentual promedio en los precios de bienes y servicios en la economía mexicana en un período dado.
Tasa de descuento (%)	$i = \frac{i' - f}{1 + f}$	La tasa de descuento es la tasa de interés que sirve para calcular el valor que tienen hoy una serie de ingresos que serán recibidos más adelante.
Costo de operación(\$/año)	$C_{operacion} = C_{ann,tot} - C_{ann,cap}$	El costo de explotación es el valor anualizado de todos los costos e ingresos distintos de los costos de capital iniciales.
Exceso de energía (%)	$f_{exceso} = \frac{E_{exceso}(kWh/año)}{E_{prod}(kWh/año)} * 100$	El exceso de electricidad es la energía eléctrica sobrante que debe ser vertida (o restringida) porque no puede utilizarse para servir a una carga o cargar baterías.
Fracción renovable	$f_{ren} = 1 - \frac{E_{norenovable}}{E_{prod}} * 100$	La fracción renovable es la fracción de la energía suministrada a la carga que procede de fuentes de energía renovables.

3.1 Sistemas de Paneles Solares

La potencia de un panel solar es una medida crucial que determina su capacidad para generar electricidad a partir de la energía solar. La potencia de salida es calculada por HOMER con la formula presentada a continuación [12].

$$P_{PV} = Y_{PV} * F_{PV} * \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) * [1 + \alpha_p * (T_c - T_{c,STC})] \quad (1)$$

Donde:

Y_{PV} : Es la capacidad nominal del generador fotovoltaico, es decir, su potencia en condiciones de prueba estándar [kW].

F_{PV} : El factor de reducción de potencia fotovoltaica [%].

G_T : La radiación solar incidente en el campo fotovoltaico en el paso de tiempo actual [kW/m²].

$G_{T,STC}$: La radiación incidente en condiciones de ensayo estándar [1 kW/m²].

α_P : El coeficiente de temperatura de la potencia [%/°C].

T_c : La temperatura de la célula fotovoltaica en el paso de tiempo actual [°C].

$T_{c,STC}$: La temperatura de la célula fotovoltaica en condiciones de prueba estándar [25°C].

3.2 Carga y descarga de los sistemas de baterías

En cada paso temporal, HOMER calcula la cantidad máxima de potencia que puede absorber el banco de almacenamiento. Utiliza esta potencia máxima de carga al tomar decisiones como si el banco de almacenamiento puede absorber toda la potencia renovable excedente disponible o cuánta potencia excedente debe producir un generador de carga cíclica. La potencia máxima de carga varía de un paso temporal a otro en función de su estado de carga y de su historial reciente de carga y descarga [\[12\]](#).

HOMER impone tres limitaciones distintas a la potencia máxima de carga del banco de almacenamiento. La primera limitación proviene del modelo de almacenamiento cinético y viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{batt,max,kbm} = \frac{k * Q_1 * e^{-k\Delta t} + Q * k * c(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k * \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2)$$

Donde:

Q_1 : Es la energía disponible [kWh] en el acumulador al principio del paso de tiempo.

Q : Es la cantidad total de energía [kWh] almacenada al principio del paso temporal.

c : Es el coeficiente de capacidad de almacenamiento.

k : Es la constante de velocidad de almacenamiento.

Δt : Es la longitud del paso temporal [h].

La segunda limitación se refiere a la tasa de carga máxima del Componente de Almacenamiento. La potencia de carga de almacenamiento correspondiente a esta tasa de carga máxima viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{batt,cmax,mcr} = \frac{(1 - e^{-\alpha_c \Delta t})(Q_{max} - Q)}{\Delta t} \quad (3)$$

Donde:

α_c : Es la tasa de carga máxima del acumulador [A/Ah].

Q_{max} : Es la capacidad total del banco de almacenamiento [kWh].

La tercera limitación se refiere a la corriente de carga máxima del componente de almacenamiento. La potencia máxima de carga del banco de almacenamiento correspondiente a esta corriente de carga máxima viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{batt,cmax,mcc} = \frac{N_{batt} * I_{max} * V_{nom}}{1000} \quad (4)$$

Donde:

N_{batt} = número de baterías del banco de almacenamiento.

I_{max} = corriente de carga máxima del acumulador [A].

V_{nom} = tensión nominal del acumulador [V].

HOMER establece la potencia máxima de carga del almacenamiento igual al menor de estos tres valores, suponiendo que cada uno se aplica después de las pérdidas de carga, por lo tanto:

$$P_{batt,cmax} = \frac{MIN(P_{batt,cmax,kbm}, P_{batt,cmax,mcr}, P_{batt,cmax,mcc})}{n_{batt,c}} \quad (5)$$

Donde $n_{batt,c}$ es la eficiencia de carga de almacenamiento.

La potencia máxima de descarga ($P_{batt,dmax}$) de los bancos de baterías se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$P_{batt,dmax} = n_{batt,d} * P_{batt,dmax,kbm} \quad (6)$$

Donde:

$$P_{batt,dmax,kbm} = \frac{-k * Q_1 * e^{-k\Delta t} + Q * k * c(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k * \Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (7)$$

$n_{batt,d}$: Es la eficiencia de descarga del almacenamiento.

3.3 Aerogeneradores

HOMER calcula la potencia de salida del aerogenerador en cada paso temporal mediante un proceso de tres pasos. En primer lugar, HOMER calcula la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador. A continuación, calcula cuánta potencia produce el aerogenerador a esa velocidad del viento con una densidad del aire estándar. Por último, HOMER ajusta ese valor de potencia de salida a la densidad real del aire [12].

3.3.1 Cálculo de la altura del buje Velocidad del viento

En cada paso de tiempo, HOMER calcula la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador utilizando las entradas que especifique en la página Recurso eólico y la entrada Cizalladura del viento.

Si elige aplicar la ley logarítmica, HOMER calcula la velocidad del viento a la altura del buje utilizando la siguiente ecuación:

$$U_{hub} = U_{anem} * \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \quad (8)$$

Donde:

U_{hub} : Es la velocidad del viento a la altura del buje del aerogenerador [m/s].

U_{anem} : La velocidad del viento a la altura del anemómetro [m/s].

Z_{hub} : La altura del buje del aerogenerador [m].

Z_{anem} : La altura del anemómetro [m].

Z_0 : La longitud de la rugosidad superficial [m].

3.3.2 Cálculo de la potencia de salida de la turbina con una densidad de aire estándar

Una vez que HOMER determina la velocidad del viento a la altura del buje, consulta la curva de potencia del aerogenerador para calcular la potencia de salida prevista del aerogenerador a esa velocidad del viento en condiciones estándar de temperatura y presión. En la **Figura 11**. Característica de una turbina eólica [54]., la línea de puntos rojos indica la velocidad del viento a la altura del buje y la línea de puntos azules indica la potencia de salida del aerogenerador que la curva de potencia predice para esa velocidad del viento.

Si la velocidad del viento a la altura del buje de la turbina no se encuentra dentro del intervalo definido en la curva de potencia, la turbina no produce potencia, siguiendo el supuesto de que los aerogeneradores no producen potencia a velocidades del viento inferiores a la velocidad de corte mínima o superiores a la velocidad de corte máxima.

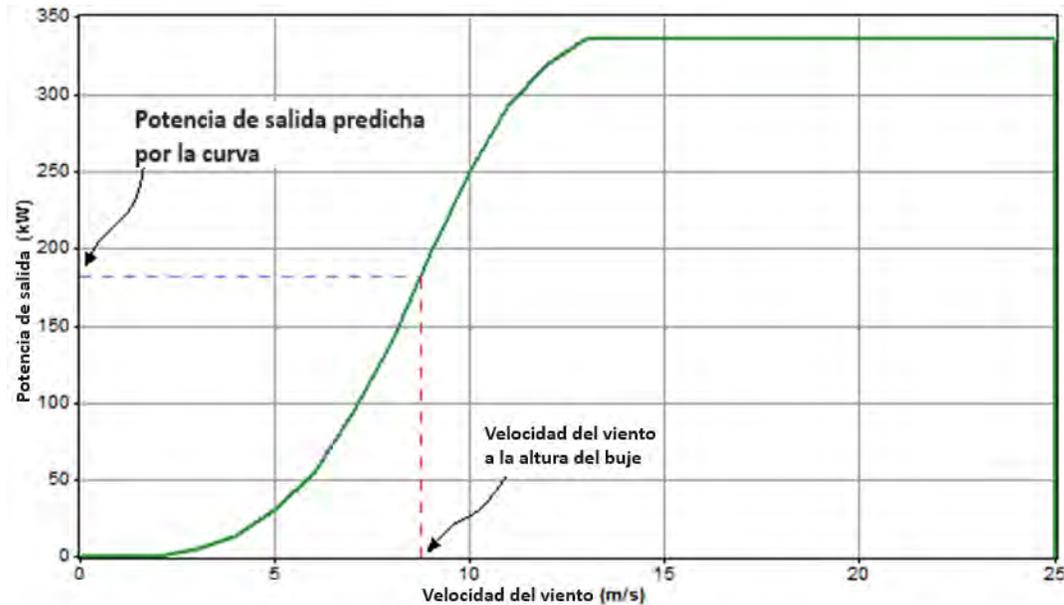


Figura 11. Característica de una turbina eólica [54].

3.3.3 Aplicando corrección de densidad.

Una vez que HOMER determina la velocidad del viento a la altura del buje, consulta la curva de potencia del aerogenerador para calcular la potencia de salida prevista del aerogenerador a esa velocidad del viento en condiciones estándar de temperatura y presión.

Las curvas de potencia suelen especificar el rendimiento del aerogenerador en condiciones de temperatura y presión estándar. Para ajustarse a las condiciones reales, HOMER multiplica el valor de potencia previsto por la curva de potencia por la relación de densidad del aire, de acuerdo con la siguiente ecuación [55-57].

$$P_{WTG} = P_{WTG,STP} * \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) \tag{9}$$

Donde:

P_{WTG} : Es la potencia del aerogenerador [kW].

$P_{WTG,STP}$: Es la potencia del aerogenerador a temperatura y presión estándar [kW].

ρ : Es la densidad real del aire [kg/m³].

ρ_0 : Es la densidad del aire a temperatura y presión estándar (1,225 kg/m³).

3.4 Generador Diesel

Se ha supuesto que se utiliza un generador diésel como fuente de reserva para producir energía adicional cuando la producción de electricidad de las fuentes renovables no es suficiente para satisfacer la demanda. La mayoría de los cálculos de esta parte del estudio están relacionados con la curva de combustible. La curva de combustible indica la cantidad de combustible que utiliza el generador para generar electricidad. Para simplificar, se ha supuesto que la curva de combustible es una línea recta. Por lo tanto, el combustible consumido por el generador se formuló de la siguiente manera [4]:

$$m_{fuel} = F = F_0 * Y_{gen} + F_1 * P_{gen} \quad (10)$$

donde F_0 es el coeficiente interpolado de la curva de combustible, F_1 es la pendiente de la curva de combustible (**Figura 12**), Y_{gen} es la potencia nominal del generador y P_{gen} es su potencia de salida. El rendimiento del generador puede definirse como la cantidad de energía eléctrica que sale del sistema en relación con la cantidad de energía consumida durante el proceso de combustión:

$$n_{gem} = \frac{3.6 * P_{gen}}{m_{fuel} * LHV_{fuel}} \quad (11)$$

En esta ecuación, LHV_{fuel} es el valor calorífico inferior del combustible. Para optimizar la capacidad del generador diésel, este parámetro se modificó de 0 a 100 kW en pasos de 10 kW [4, 54].

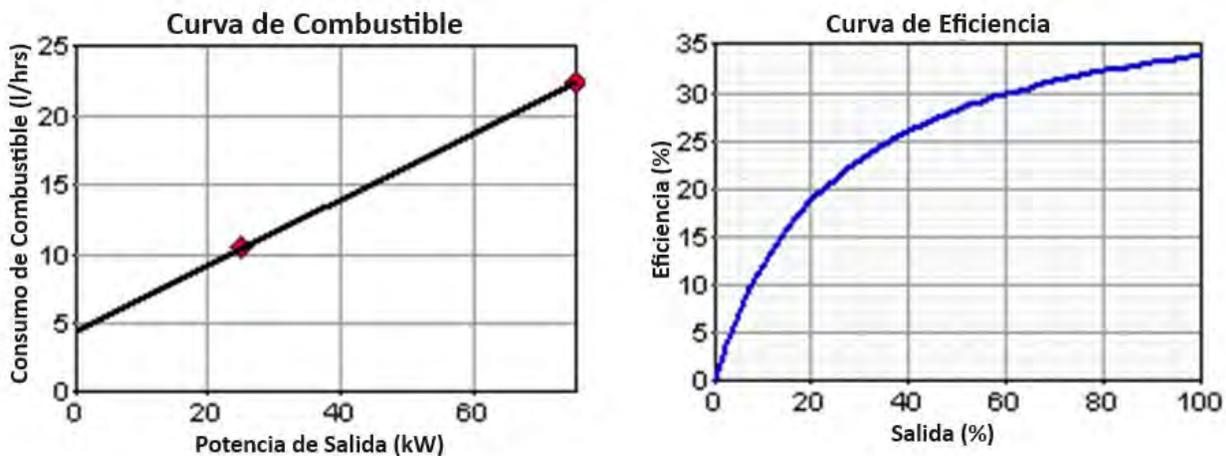


Figura 12. Curvas de eficiencia y combustible de un generador diésel.

3.5 Inversores

En un sistema híbrido de energías renovables, los convertidores e inversores son elementos esenciales para la gestión eficiente y efectiva de la energía generada por distintas fuentes renovables, como la solar, eólica o hidroeléctrica. Estos dispositivos desempeñan funciones específicas que permiten la conversión y distribución adecuada de la energía producida.

Los inversores son dispositivos esenciales que convierten la energía generada en corriente directa (CD), en corriente alterna (CA), que es la forma de energía eléctrica que se utiliza en la mayoría de los hogares y redes eléctricas convencionales. Además de esta conversión, los inversores también pueden desempeñar funciones adicionales, como la optimización de la potencia entregada a la red o la gestión de la carga de las baterías de almacenamiento.

3.5.1 Convertidores

Los convertidores son dispositivos que elevan o reducen los niveles de voltaje. En el contexto de las energías renovables, los convertidores son comúnmente utilizados para elevar o reducir el voltaje generado por paneles solares o turbinas eólicas (ya rectificado en una fase previa), que es la forma de energía eléctrica más comúnmente utilizada en la mayoría de los sistemas de energía eléctrica y redes de distribución.

3.6 Estrategia de despacho de energía

Una estrategia de despacho es un conjunto de reglas que gobiernan la operación de los generadores y el banco de baterías. HOMER puede modelar dos estrategias de despacho: carga cíclica y seguimiento de la carga. Cuál es la óptima depende de muchos factores, incluyendo el tamaño de los generadores y el banco de baterías, el precio del combustible, el costo de operación y mantenimiento de los generadores, la cantidad de energía renovable en el sistema, y el carácter de los recursos renovables. Si elige modelar ambos, HOMER simulará cada sistema utilizando ambas estrategias de despacho y podrá ver cuál es la óptima.

Con la estrategia de carga cíclica (CC, por sus siglas en inglés), siempre que el generador diésel tiene que funcionar, lo hace a plena capacidad, y la energía sobrante se destina a cargar el banco de baterías. La carga cíclica suele ser óptima en sistemas con poca o ninguna energía renovable [\[12, 27\]](#).

Con la estrategia de seguimiento de la carga (LF, por sus siglas en inglés), cada vez que se necesita del generador diésel, éste produce sólo la energía suficiente para satisfacer la demanda.

El seguimiento de la carga tiende a ser óptimo en sistemas con mucha energía renovable, cuando la producción de energía renovable a veces supera la carga. Para este estudio la estrategia a seguir será esta última mencionada (**Figura 13**) [\[12, 54\]](#).

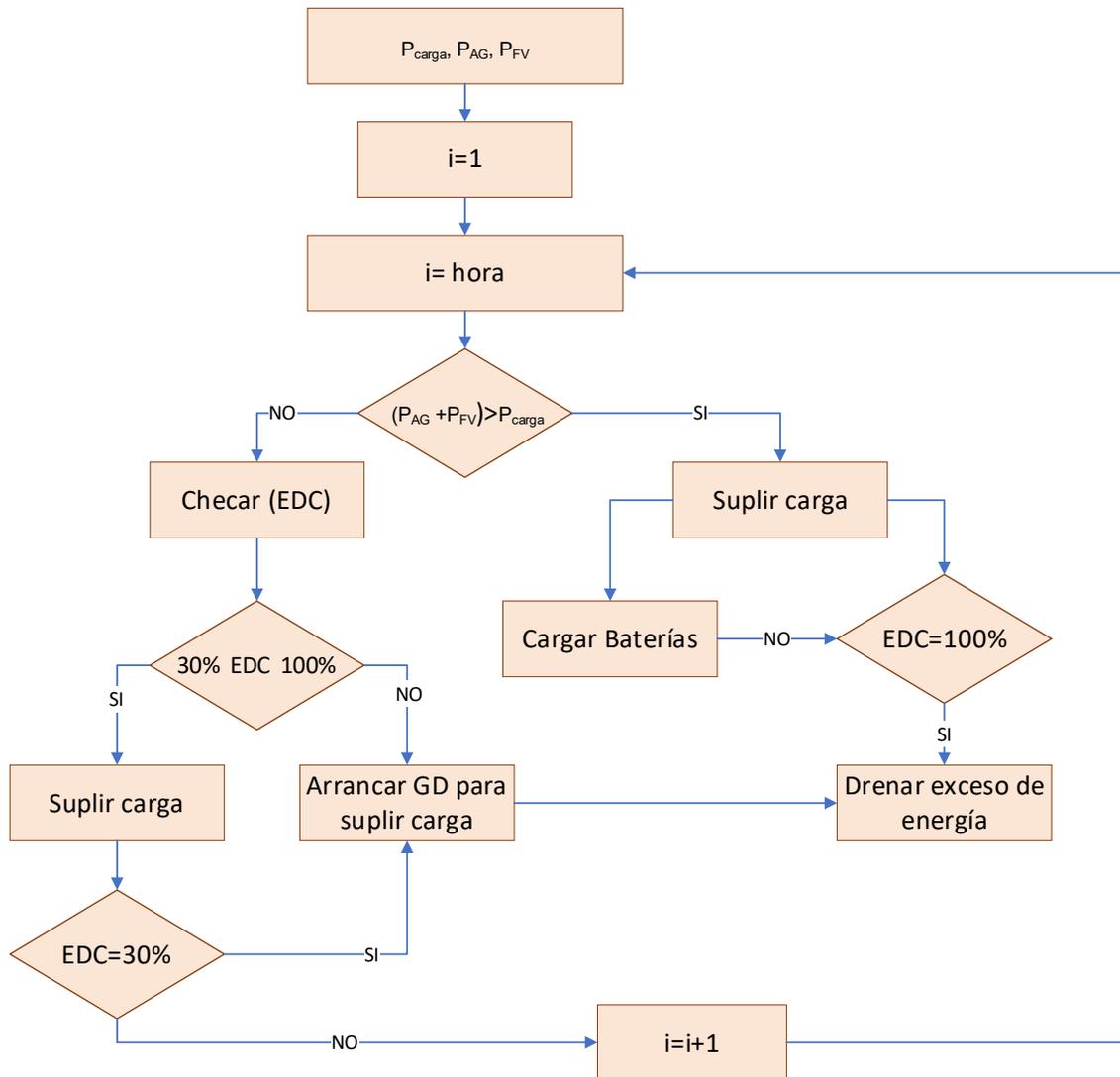


Figura 13. Diagrama de estrategia para el despacho de la energía.

3.7 Evaluación económica del sistema

HOMER define el costo nivelado de la energía (COE) como el costo medio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema. Para calcular el COE, HOMER divide el costo anualizado de producir electricidad (el costo total anualizado menos el costo de servir la carga térmica) por la carga eléctrica total servida, utilizando la siguiente ecuación:

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - C_{boliler} * H_{served}}{E_{served}} \quad (12)$$

Donde:

$C_{ann,tot}$ = Costo total anualizado del sistema [\$/año].

$C_{boliler}$ = Costo marginal de la caldera [\$/kWh].

H_{served} = Carga térmica total servida [kWh/año].

E_{served} = Carga eléctrica total servida [kWh/año].

El segundo término del numerador es la parte del costo anualizado que resulta de servir a la carga térmica. En sistemas como el eólico o el fotovoltaico, que no sirven a una carga térmica ($H_{térmica}=0$), este término es cero.

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (13)$$

El COE es una métrica conveniente con la que comparar sistemas, pero HOMER no clasifica los sistemas basándose en el COE.

El costo actual neto total (NPC, por sus siglas en inglés) de un sistema es el valor actual de todos los costos en los que incurre el sistema a lo largo de su vida útil, menos el valor actual de todos los ingresos que obtiene a lo largo de su vida útil. Los costos incluyen los costos de capital, los costos de sustitución, los costos de operación y mantenimiento, los costos de combustible, las penalizaciones por emisiones y los costos de compra de energía a la red. Los ingresos incluyen el valor residual y los ingresos por ventas a la red. HOMER calcula el NPC total sumando los flujos de caja descontados totales en cada año de la vida útil del proyecto.

El NPC total es el principal resultado económico de HOMER, el valor por el que clasifica todas las configuraciones del sistema en los resultados de la optimización, y la base a partir de la cual calcula el costo total anualizado y el costo nivelado de la energía. El NPC puede ser calculado como se muestra en las siguientes formulas:

$$NPC = \frac{C_{ann,tot}}{CRF_{i,N}} \quad (14)$$

Donde:

CRF: Es el factor de recuperación de capital y se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (15)$$

Donde i es la tasa de interés real y N el tiempo de vida estimado para el sistema, i es calculada como se muestra en la siguiente fórmula, donde i' es la tasa de interés nominal y f la tasa de inflación.

$$i = \frac{i' - f}{i + f} \quad (15)$$

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

4.1 Caso de estudio

Una vez realizado el estado del arte e identificado las características de los SHER se procedió a definir los pasos a seguir para desarrollar nuestro caso de estudio.

México tiene un gran potencial para el desarrollo de energías renovables debido a diversas características favorables. México cuenta con una excelente radiación solar en gran parte de su territorio, lo cual lo convierte en un lugar propicio para la generación de energía solar fotovoltaica. Regiones como el norte y el centro del país tienen niveles de irradiación solar muy altos, lo que facilita la producción de electricidad a partir de esta fuente. México posee extensas áreas con fuertes corrientes de viento, especialmente en la región del Istmo de Tehuantepec y la Península de Yucatán. Estos lugares tienen un gran potencial para la generación de energía eólica, y se están desarrollando parques eólicos a gran escala. México cuenta con numerosos ríos y cuerpos de agua, lo que proporciona un potencial para la generación de energía hidroeléctrica. México tiene una importante industria agrícola y agroindustrial, lo que genera una gran cantidad de residuos orgánicos y biomasa. Estos recursos pueden ser utilizados para la generación de energía a través de tecnologías de biomasa y biogás, lo que brinda una oportunidad adicional para el desarrollo de energías renovables [58].

El gobierno mexicano ha implementado políticas y regulaciones favorables para promover las energías renovables. Se han establecido metas ambiciosas para la generación de energía limpia y se han implementado mecanismos de apoyo, como subastas energéticas y programas de incentivos, para fomentar la inversión en este sector. Estos factores combinados hacen de México un país con un gran potencial para el desarrollo de las energías renovables.

4.2 Base de datos

En la era digital actual, encontrar una base de datos adecuada puede ser esencial para diversas necesidades, ya sea para la investigación académica, el desarrollo de aplicaciones, el análisis de datos o cualquier otro proyecto que requiera información estructurada. Afortunadamente, existen diversas formas de encontrar bases de datos confiables y relevantes.

Los gobiernos y organizaciones internacionales suelen mantener bases de datos en línea con información relevante sobre diversas temáticas. Estas bases de datos pueden abarcar desde estadísticas demográficas y económicas hasta datos medioambientales o de políticas públicas.

Para la obtención de los datos buscados se usaron dos bases de datos gubernamentales SENER e INEGI. En el siguiente sitio web se pueden encontrar la información de la base de datos de INEGI, en "Pueblos de México en Internet". Consultado el 26 de mayo de 2023 en <https://mexico.pueblosamerica.com>.

En la **Tabla 8** y **Tabla 9** se muestran los datos sobre la vivienda y la economía del Arca, comparando las condiciones existentes entre el año 2010 y el 2020.

Tabla 8. Datos sobre la vivienda del pueblo El Arca [58].

Años	2020	2010
Número de viviendas particulares habitadas	48	105
Viviendas con electricidad:	47.92%	15.05%
Viviendas con radio:	43.75%	19.35%
Viviendas con televisión:	31.25%	3.23%
Viviendas con refrigerador:	8.33%	6.45%
Viviendas con lavadora:	12.50%	4.30%
Viviendas con automóvil:	25.00%	12.90%
Viviendas con computadora personal, laptop o tablet	0.00%	0.00%
Viviendas con teléfono fijo:	16.67%	1.08%
Viviendas con teléfono celular:	60.42%	7.53%
Viviendas con Internet:	2.08%	0.00%

Tabla 9. Problemas Principales según INEGI.

Alumbrado Público		Telecomunicaciones	
Disponibilidad de alumbrado público en la localidad	No disponible	Teléfono público	No
Fuente de energía eléctrica del alumbrado	No disponible	Internet público	No
Fuente de energía eléctrica del alumbrado (otra) - Clave	No disponible	Teléfono celular	No
Cobertura del alumbrado público	No disponible	Televisión	No
Problema Principal			
Declaración del Informante		Carencia y fallas de energía eléctrica y alumbrado público	

4.3 Localidad

En nuestro caso de estudio, analizaremos la región de la península de Yucatán donde se cuenta con excelentes recursos naturales para la generación de electricidad. Además, se realizó una búsqueda de localidades que no tuvieran acceso a la electricidad en bases de datos del gobierno. La localidad seleccionada fue en el estado Campeche, municipio Carmen, el Arca.

El pueblo de El Arca está situado a 101.8 kilómetros de Ciudad del Carmen, Campeche, que es la localidad más poblada del municipio, en dirección Oeste.

Hasta el año 2020 se conoce que existen 48 viviendas habitadas en el pueblo, de las cuales más del 50% no cuentan con servicios de electricidad, con un equivalente de veinticinco viviendas sin electricidad.

En la **Figura 14** se muestran los mapas de México y del estado de Campeche donde se encuentra ubicada la localidad caso de estudio.

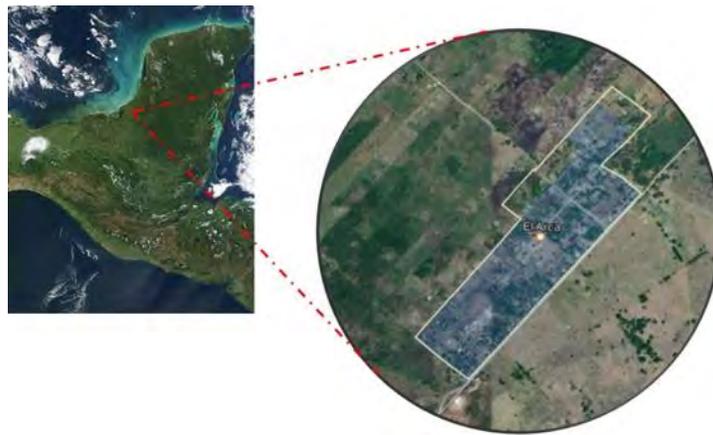


Figura 14. Mapa de Campeche, Ciudad del Carmen, El Arca [54].

4.4 Recolección y análisis de datos del sistema

En esta sección, nos enfocaremos en la evaluación detallada de datos meteorológicos clave y la posterior elaboración de un perfil de carga adaptado para un sistema híbrido específico. Este enfoque se presenta como un paso crucial para optimizar la eficiencia y la confiabilidad del sistema, ya que la disponibilidad y variabilidad de recursos naturales desempeñan un papel fundamental en el rendimiento global.

El análisis meteorológico abordará variables como la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente, proporcionando una comprensión holística de los patrones climáticos locales.

Estos datos servirán como base para la formulación de estrategias que maximicen la generación de energía renovable y minimicen la dependencia de fuentes convencionales.

Posteriormente, se llevará a cabo la creación de un perfil de carga personalizado, considerando la demanda eléctrica específica del sistema y las necesidades energéticas locales. Este perfil proporcionará una representación detallada de los patrones de consumo, permitiendo una gestión más efectiva de la generación y almacenamiento de energía. La combinación de estos dos análisis proporcionará información valiosa para el diseño y la operación eficientes de sistemas híbridos, contribuyendo así al desarrollo sostenible y a la reducción de la huella ambiental.

4.5 Recolección de datos meteorológicos

4.5.1 Irradiancia solar y claridad

Para diseñar un sistema fotovoltaico solar, se requiere información sobre la radiación solar y el índice de claridad del sitio en particular. La disponibilidad de horas suficientes de luz solar en la zona determina la viabilidad de este potencial solar [12]. Para esta evaluación, se obtuvo la información de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), utilizando la latitud y longitud del lugar. El lugar seleccionado está en el estado de Campeche, México y está ubicado a una latitud de 18°54.0' N y una longitud de 90°54.6'W, con una previsión del promedio diario de radiación solar de 5.31 kW/m²/día (ver figura 15). Durante los veintidós años, el valor promedio de los datos solares se obtuvo de la NASA mediante el software HOMER Pro, y la información de datos solares incluye el índice de claridad y la radiación solar, que varía de 0.533 a 0.605 y de 4.040 kW/m²/día a 6.350 kW/m²/día, respectivamente, como se presenta en la tabla 10. El mes de noviembre tiene el menor valor de radiación solar, con 4.040 kW/m²/día, y el mes de marzo tiene el valor más alto de radiación solar, con 6.350 kW/m²/día. Sin embargo, incluso en el mes con el valor más bajo de radiación solar, el sistema solar aún puede utilizarse para generar electricidad.

4.5.2 Velocidad del viento

El viento es otra fuente renovable que puede aprovecharse para la generación de energía. Los aerogeneradores están equipados con generadores incorporados que transforman la energía eólica en energía eléctrica [9]. Para generar energía eléctrica eficazmente a partir del sistema eólico, el lugar de evaluación debe tener la velocidad de viento necesaria para impulsar el aerogenerador. Existen diversos tipos de aerogeneradores para la generación de energía eléctrica y pueden operar a diferentes velocidades de viento, determinadas por los fabricantes, con velocidades que van desde los 2.5 m/s en el inicio de la velocidad del viento y alcanzar velocidades hasta los 25 m/s [10].

En esta evaluación, la velocidad media del viento en el año en la ubicación caso de estudio es de 3.05 m/s a una altura de 50 m. La velocidad del viento varía entre 2.660 y 3.340 m/s durante todo el año en este lugar. La información utilizada para esta investigación se obtuvo de la NASA mediante el software HOMER Pro y se presenta en la tabla 10. Hay una velocidad del viento más baja en el mes de septiembre y una velocidad del viento más alta de 3.34 m/s durante el período de marzo. Sin embargo, la velocidad del viento promedio en el lugar de la investigación se encuentra dentro de la velocidad del viento necesaria que se puede utilizar para aprovechar la energía y generar electricidad.

4.5.3 Temperatura Ambiente

La temperatura ambiente tiene un impacto significativo en la eficiencia y el rendimiento de diversas tecnologías, como los paneles solares y los sistemas de almacenamiento de energía. Las variaciones en la temperatura pueden influir en la producción de energía fotovoltaica, afectando directamente la eficiencia de las celdas solares. Asimismo, la temperatura ambiente influye en la capacidad de almacenamiento y la vida útil de las baterías utilizadas en estos sistemas. Comprender y tener en cuenta estos efectos térmicos es crucial para optimizar la operación y la eficiencia global del sistema híbrido, asegurando así un rendimiento sostenible y confiable a lo largo del tiempo. En la localidad seleccionada se miden valores de temperatura que van desde los 23.520 grados Celsius hasta los 29.970 grados Celsius. La temperatura más baja se encuentra en el mes de diciembre y la más alta en el mes de mayo. En la **Tabla 10** se pueden apreciar los valores promedios mensuales y en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa gráficamente el comportamiento de los parámetros vistos anteriormente.

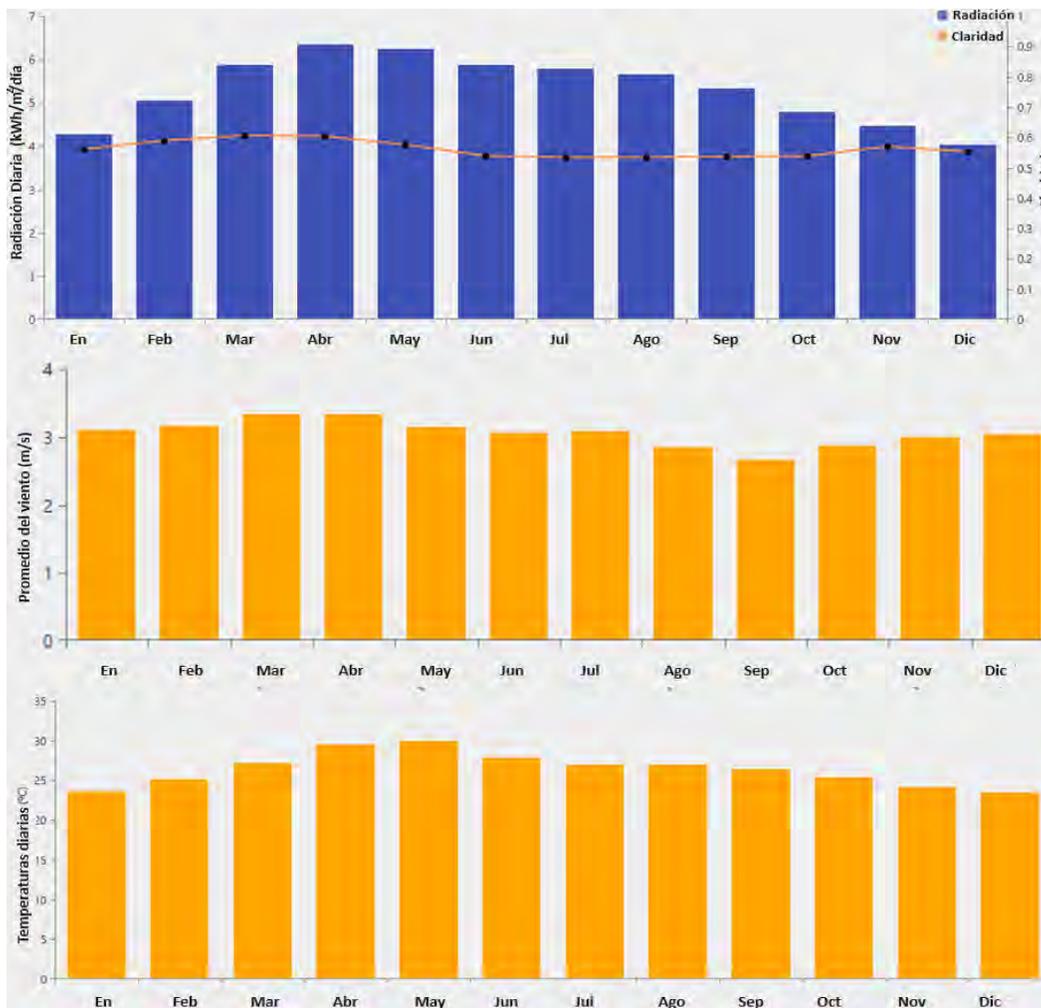


Figura 15. Recolección de datos meteorológicos.

Tabla 10. Valores promedios mensuales de viento, temperatura y radiación.

Meses	Claridad	Radiación Diaria (kW.h/m ² /Dia)	Velocidad del viento	Temperaturas
Enero	0.559	4.280	3.100	23.540
Febrero	0.588	5.060	3.160	25.150
Marzo	0.605	5.880	3.340	27.170
Abril	0.603	6.350	3.320	29.570
Mayo	0.575	6.250	3.150	29.970
Junio	0.538	5.870	3.060	27.890
Julio	0.533	5.780	3.080	26.970
Agosto	0.533	5.650	2.840	26.920
Septiembre	0.535	5.330	2.660	26.410
Octubre	0.537	4.780	2.870	25.430
Noviembre	0.569	4.460	3.000	24.100
Diciembre	0.552	4.040	3.040	23.520
Promedio Anual W.h/m²/Dia)	0.56	5.31	3.05	26.39

4.6 Área de estudio y Perfil de carga

El sistema híbrido aislado ha sido diseñado meticulosamente para proporcionar una fuente confiable de electricidad para el poblado del Arca, ubicada en ciudad del Carmen, Campeche. El poblado cuenta con un potencial solar y eólico. Esta comunidad consta de varias viviendas y se centra principalmente en actividades agrícolas. La demanda de energía consta de 25 viviendas que requieren un suministro para luces y electrodomésticos.

Para la elaboración de un perfil de carga el cual estime la demanda de veinticinco viviendas se tomaron en cuenta ciertos criterios. En datos obtenidos de encuestas de INEGI donde se caracterizan el consumo de un hogar rural promedio en México, se tomaron los valores consumo promedio de los equipos eléctricos más comunes encontrados en una vivienda promedio en México, así como los horarios de mayor utilización de estos en el día [59].

Detalles específicos del consumo de energía revelan que la demanda total de una vivienda es de 4.8 kW con un consumo de energía de 177.14 kWh/día y un factor de carga de 0.123. Al incorporar una variable aleatoria del 52.184 % de hora en hora y del 11.082 % de día a día, se introduce variabilidad en los datos de carga a lo largo del año. En la **Tabla 11** se muestran los equipos a tomar en cuenta para la estimación del perfil.

Estos datos de carga se introducen en el software HOMER, lo que permite representaciones gráficas de perfiles de carga horarios y mensuales, como se muestra en la **Figura 16**.

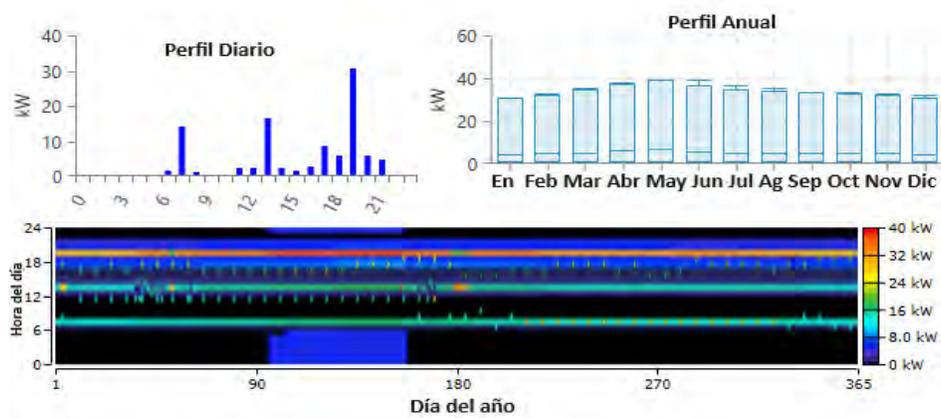


Figura 16. Perfil de carga diario y mensual del poblado El Arca.

Tabla 11. Perfil de carga diario y mensual del poblado El Arca.

Equipos x Vivienda	Potencia (W)	Unidades (u)	Carga Total (kW)	Tiempo de operación (h/día)	Consumo de energía (kW.h/día)
Refrigerador	60	1	0.06	5	0.3
Ventiladores	85	2	0.17	5	0.85
Cocina Eléctrica	1000	1	1	2	2
Bombillos led	9	8	0.072	16	0.238
Televisor	60	1	0.06	6	0.36
Lavadora	450	1	0.45	1	0.450
Plancha	1200	1	1.2	0.5	0.6

CAPÍTULO 5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HÍBRIDA DE ENERGÍAS RENOVABLES

El proceso de diseño y simulación implica la integración de tecnologías avanzadas, algoritmos de gestión energética y modelos matemáticos precisos para evaluar el rendimiento de la red en diferentes condiciones.

Esta metodología permite anticipar y abordar desafíos, como la variabilidad inherente de algunas fuentes renovables, optimizando así la generación, almacenamiento y distribución de energía. La implementación exitosa de estas redes híbridas no solo contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la independencia energética y la adaptación a un panorama cambiante en el sector de la energía.

Para los diferentes escenarios a analizar se definieron algunos criterios los cuales serán implementados de igual manera a todos los escenarios. En la **Tabla 12** y **Tabla 13** se muestran los criterios establecidos para el diseño de los sistemas híbridos. Para la evaluación económica de estos sistemas se manejaron variables como la inflación, con un valor del 4.42% y la tasa de descuento con un valor del 5.5%.

Tabla 12. Niveles de voltaje por etapas [60].

Fuentes	Voltaje de salida (V)	Convertidores (V)	Voltaje del BUS (V)	Inversor (V)
Paneles Solares	348	348/48	48	48/127
Aerogeneradores	48/110	110/48	48	
Generador Diésel	110	110/48	48	
Sistemas de Baterías	24	24/48 (Bidireccional)	48	

Tabla 13. Datos Técnico-económicos [61].

Parámetros	Aerogenerador	Paneles	Baterías	Generador	Inversor
Modelo	Aeolos-V1kW	CS6K-285M	Genérico	Genérico	TS 3000-148
Fabricante	Lotus Energy	Canadian Solar	Genérico	Genérico	MEAN WELL
Capacidad (kW)	1	0.285	1.02	50	3000
Costo capital (\$)	5320	240	3500	500	1600
Remplazos (\$)	5320	240	3500	500	1600
Mantenimientos (\$/año)	200	10	50	0.03/op.hr	
Tiempo vida (años)	20	25	15	15	10
Voltaje nominal (V)	48/110	38.6	3.7	110	48/120
Corriente (A)	20.8/9	9.5	276	-	75

Para la etapa de conversión entre las fuentes y el inversor se utilizarán convertidores con seguidores MPPT del fabricante Victron Energy [62, 63].

5.1 Escenario 1

El sistema híbrido de energía eléctrica aislado de la red consta de matrices fotovoltaicas, generador eólico, generador diésel, batería, convertidor, bus de CD y carga eléctrica, tal y como se muestra en la **Figura 17**. Las baterías se utilizan para almacenar el excedente de energía que puede utilizarse cuando los sistemas solares fotovoltaico y eólico no son capaces de satisfacer la demanda de carga, mientras que el generador diésel actúa como potencia de refuerzo flexible cuando los sistemas solares, eólico y las baterías tampoco son capaces de satisfacer las necesidades de carga. Se han propuesto varias combinaciones de sistemas híbridos en distintas partes del mundo en función de los recursos renovables accesibles en esas regiones. En esta evaluación se utiliza HOMER Pro para diseñar el sistema híbrido FV-AG-GD-SB y analizar las viabilidades tecno-económicas, la optimización de la potencia y la sensibilidad. Simula varios diseños de estructuras utilizando fuentes de información, por ejemplo, información climática para la ubicación elegida, especificaciones técnicas de los componentes, costo de los componentes e información sobre la carga. El software HOMER Pro simula una amplia gama de configuraciones de la estructura y elige el diseño óptimo con menos NPC (por sus siglas en inglés).

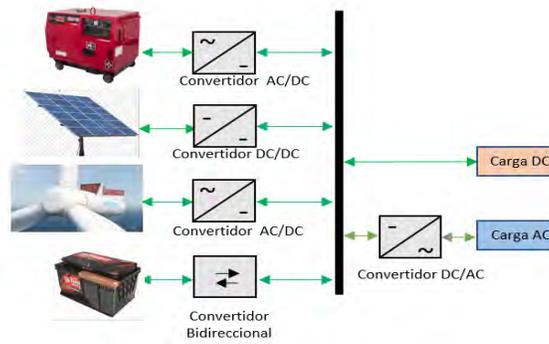


Figura 17. Sistema Híbrido (FV-AG-GD-SB).

5.1.1 Sistema Fotovoltaico

En la tabla de parámetros tecno-económicos derivados de la simulación, se evidencian resultados cruciales que destacan la viabilidad y eficiencia del sistema propuesto. Estos indicadores, fundamentales para la evaluación de la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto, proporcionan una visión integral de su desempeño. En la **Figura 18** se muestra la demanda en el año y la generación de electricidad derivada de esta.

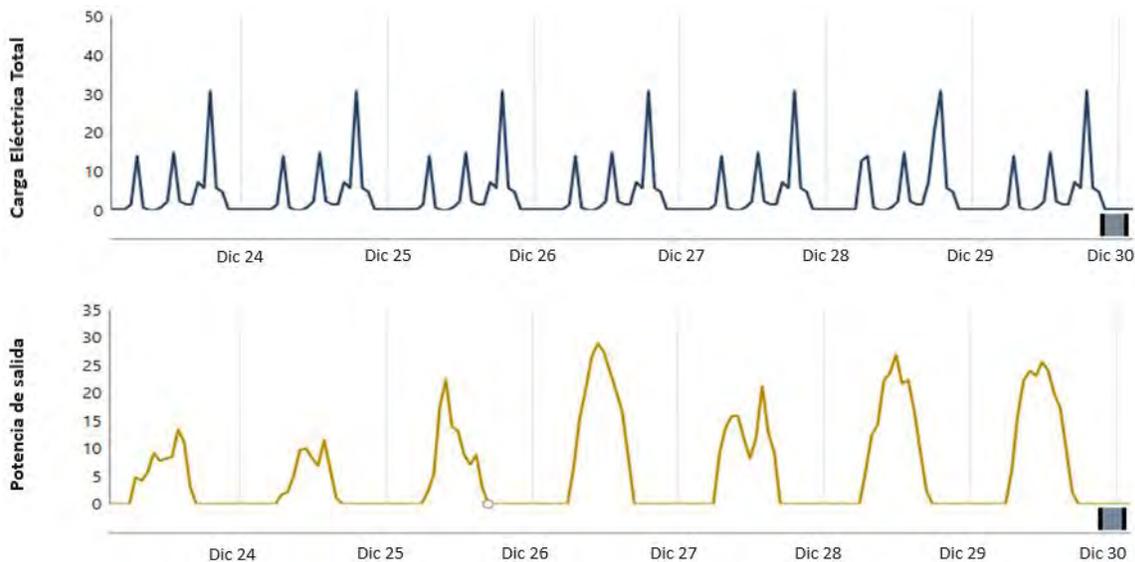


Figura 18. Generación de los paneles y los la carga demandada.

Con los valores obtenidos de la simulación, en la **Tabla 14** se muestran parámetros técnicos económicos del sistema de paneles.

Estos datos proporcionan información detallada con la cual se pueden realizar análisis para determinar los mejores sistemas híbridos en el ámbito técnico-económico.

Tabla 14. *Parámetros técnico-económico del sistema de paneles solares.*

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	45.7	kW
Generación media	204	kWh/d
Voltaje del BUS	224	V
Factor de Capacidad	18.7	%
Producción Total	74,633	kWh/año
Salida Máxima	43.1	kW
Penetración FV	175	%
Horas de Operación	4,340	hrs/años
Costo Nivelado	0.0557	\$/kWh

Entre los aspectos más notables se muestra la capacidad nominal de kilowatts instalados del sistema de paneles fotovoltaicos para lograr suplir de forma eficiente la demanda requerida. Además, se muestra el costo de la energía generada por los paneles, el cual es un factor clave que determina la rentabilidad de este sistema en comparación con otros. De esta forma el sistema de paneles quedaría conformado por 162 paneles y según los valores de corriente y voltaje mostrados en la **Tabla 13** su arquitectura sería una conexión serie-paralelo con dieciocho grupos en paralelo de nueve paneles en serie cada uno, arrojando un voltaje de salida de 348 V y 171 A. Con esta información se selecciona el regulador de carga comercial tipo MPPT Smart Solar aislado de 450V/200A 4000W.

5.1.2 Sistema Eólico

La segunda fuente renovable del sistema en cuestión es la energía eólica. La producción eléctrica de los aerogeneradores está fuertemente influenciada por la velocidad y consistencia del viento, así como por las características específicas de cada aerogenerador [4]. En la **Figura 19** se puede observar la relación entre la velocidad del viento y la generación eléctrica de la turbina.

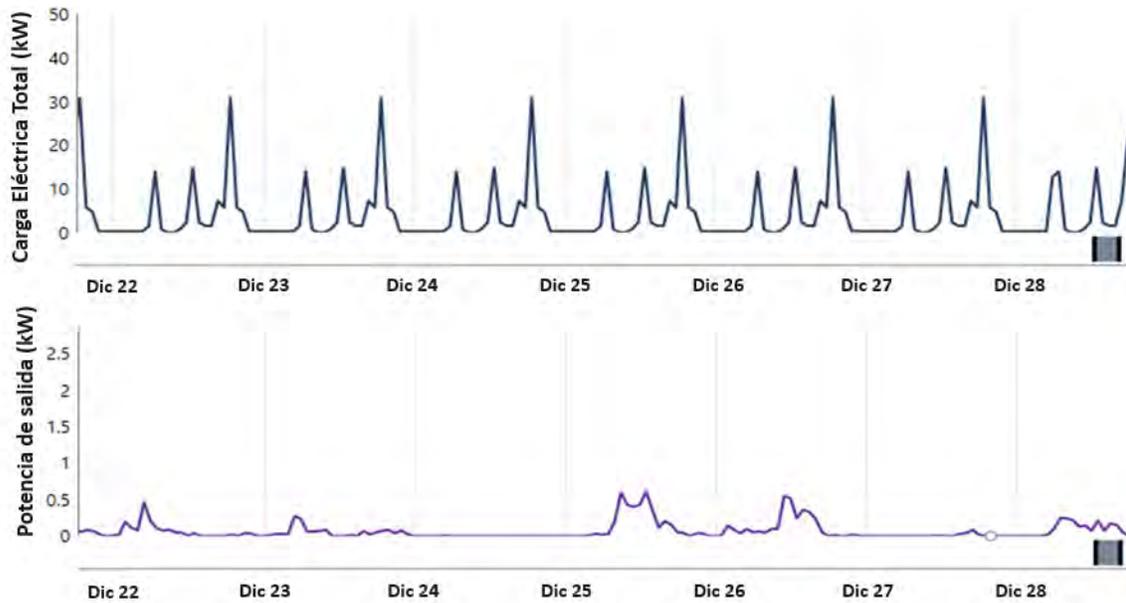


Figura 19. Velocidad del viento y la generación asociada.

A continuación, se presenta un análisis detallado de la **Tabla 15** sobre los parámetros técnicos y económicos asociados con la implementación de un aerogenerador. Estos datos ofrecen una visión exhaustiva de la eficiencia y la viabilidad económica de esta tecnología eólica. La capacidad de generación, la eficiencia, los costos de instalación y otros indicadores claves permiten una evaluación completa del rendimiento del aerogenerador.

Tabla 15. Parámetros técnicos económicos del sistema de generación eólica.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	1	kW
Generación media	1.97	kWh/d
Factor de Capacidad	5.64	%
Producción Total	494	kWh/año
Salida Máxima	1.27	kW
Penetración Viento	1.16	%
Horas de Operación	6,199	hrs/año
Costo Nivelado	1.39	\$/kWh

Como se puede observar en la tabla, la capacidad nominal instalada necesaria para satisfacer la demanda del sistema sería de un 1 kW, con un costo de la energía de 1.39 dólares por kilowatts hora, lo cual representa un valor elevado. Este análisis técnico y económico subraya la capacidad del aerogenerador para generar energía de manera eficiente, aunque con costos de operación y mantenimiento anuales algo elevados.

5.1.3 Generador Diesel

En situaciones de alta demanda de electricidad, es posible que el generador diésel se utilice como respaldo o para satisfacer la carga en un horario pico en el mes. Se muestra en un período de aproximadamente una semana, los momentos en los que el generador diésel entra en funcionamiento para que no sea interrumpido el flujo de energía. Además, en la **Tabla 16** se muestra los parámetros arrojados en la simulación para su posterior análisis.

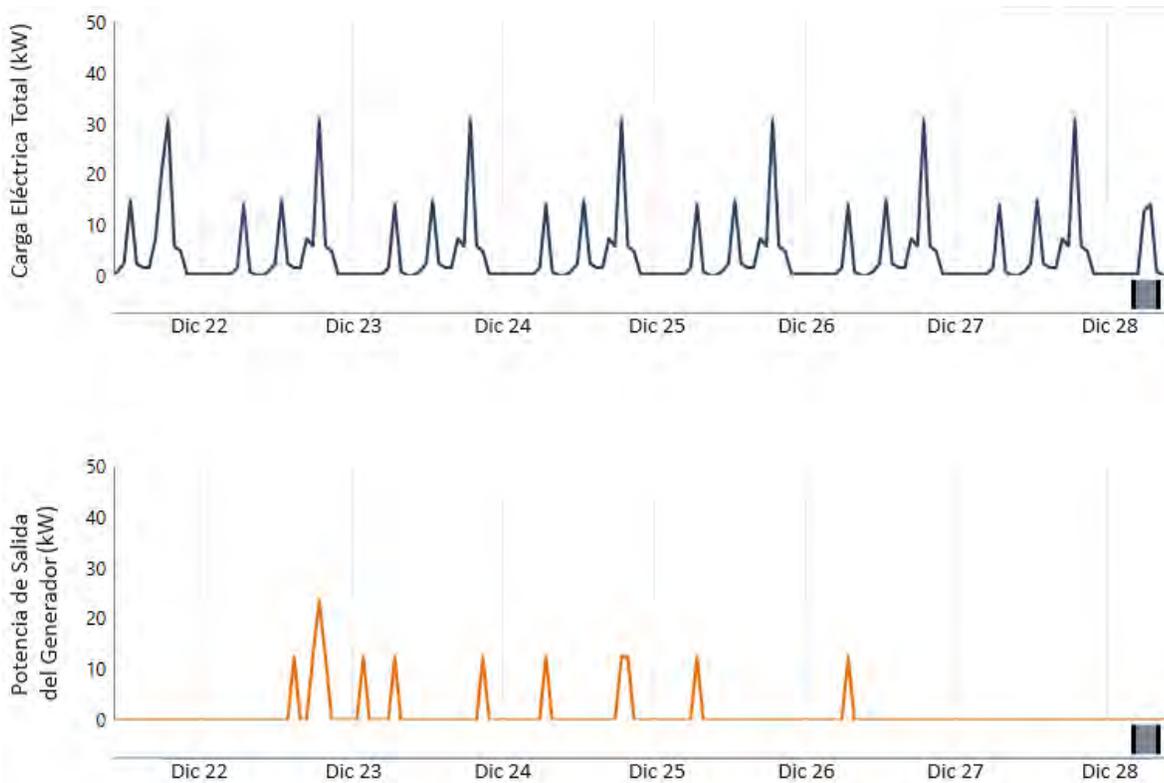


Figura 20. Generación eléctrica de un generador diésel en un mes.

A continuación, se presenta un análisis detallado de la tabla 16 de parámetros técnicos y económicos relacionados con la utilización de un generador diésel. Estos datos ofrecen una perspectiva integral de la eficiencia y la viabilidad económica de esta fuente de energía. La capacidad de generación, el consumo de combustible, los costos de generación y otros indicadores clave permiten evaluar a fondo el rendimiento del generador diésel.

Tabla 16. Parámetros técnicos económicos del generador diésel.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	50	kW
Producción media	13.1	kW
Factor de Capacidad	1.47	%
Producción Total	5,922	kWh/año
Salida Mínima	12.50	kW
Salida Máxima	35	kW
Costo fijo de generación	5.35	\$/ hr
Horas de Operación	436	hrs/año
Numero de Arranques	420	Arranques/año
Consumo de Combustible	2,575	L
Consumo Especifico	0.399	L/kWh
Eficiencia Eléctrica	25.5	%

Este análisis técnico y económico destaca la capacidad del generador diésel para ofrecer una fuente de energía confiable, pero también resalta los costos asociados con el combustible y el mantenimiento. Como se puede apreciar en la tabla, la capacidad nominal del generador sería de 50 kW. En nuestro caso, el generador sería de unos 50kW, con un costo fijo de generación de electricidad de unos 5.35 dólares por hora lo cual se puede considerar elevado.

5.1.4 Sistemas de Baterías

Es importante destacar que el uso de las baterías en sistemas híbridos es de primordial importancia debido a la confiabilidad que le otorga al sistema. En la actualidad las baterías de lón litio a pesar de ir mostrando características mejores que las de ácido plomo aun poseen un elevado costo que las antes mencionadas. En la **Figura 21** se muestra el comportamiento de las baterías durante sus estados de carga y descarga y en la tabla 19 se muestran los parámetros para el análisis técnico económico del sistema.



Figura 21. Estados de carga y descarga.

A continuación, se presenta un análisis detallado de la **Tabla 17** con los parámetros técnicos y económicos asociados a la implementación de un sistema de baterías. Estos datos ofrecen una visión completa de la eficiencia y la viabilidad económica de este componente esencial para el almacenamiento de energía. La capacidad nominal, la productividad anual, las pérdidas por año y otros indicadores claves, permiten evaluar en profundidad el rendimiento del sistema de baterías.

Tabla 17. Parámetros técnico económico del sistema de baterías.

Parámetros	Valores	Unidades
Tipo	ION-LITIO	148
Capacidad Nominal	148	kWh
Autonomía	21.7	hr
Vida Útil	15	años
Energía de entrada	29,504	kWh/año
Energía de salida	27,003	kWh/año
Agotamiento del almacenamiento	64.4	kWh/año
Pérdida	2,566	kWh/año
Productividad anual	28,658	kWh/año

Este análisis técnico y económico resalta la capacidad del sistema de baterías para proporcionar almacenamiento eficiente de energía, con costos iniciales y de mantenimiento anuales claves para la evaluación de su viabilidad económica.

Como se muestra en la tabla, el banco de baterías seleccionado para este sistema es de iones de litio y cuenta con una capacidad instalada de 151kWh, una vida útil de 15 años y una autonomía de 21.7 horas.

5.1.5 Inversor

La eficiencia de un convertidor se refiere a la proporción de corriente continua que transforma en corriente alterna. Por otro lado, la eficiencia de un rectificador indica la relación de conversión de potencia de corriente alterna a corriente continua [4]. En este análisis, se utiliza un convertidor genérico con una eficiencia del 95%. Los detalles técnicos y económicos del convertidor se encuentran detallados en la **Figura 22** y en la **Tabla 18**.

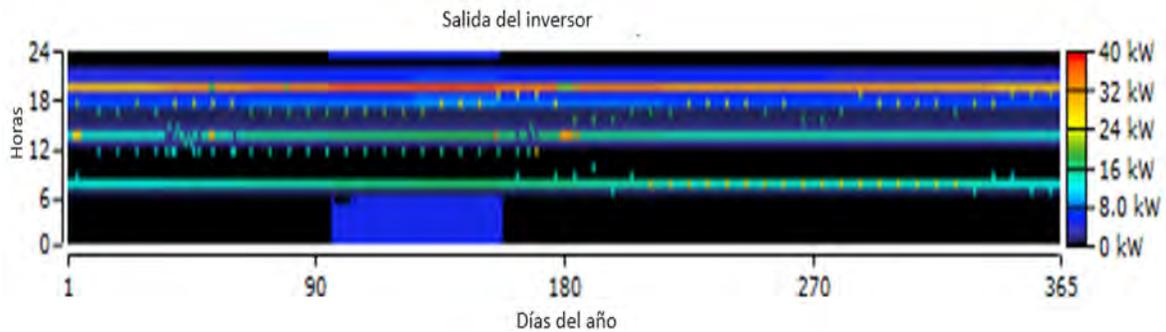


Figura 22. Valores de potencia del convertidor en horas, días y año.

Tabla 18. Parámetros técnicos de los inversores y rectificadores.

Parámetros	Inversor	Unidades
Capacidad nominal	42.4	kW
Producción media	4.88	kW
Factor de Capacidad	11.5	%
Salida Máxima	39.6	kW
Horas de Operación	8,031	hrs/año
Pérdida	4,229	kWh/año
Voltaje de Operación	48/120	V

En esta tabla se muestra que la potencia de salida necesaria para el sistema sería de 42.4 kW y un total de horas de operación y de pérdidas en el año de 8031 y 4229 respectivamente.

5.1.6 Análisis del Sistema

Este sistema este compuesto por varias fuentes de generación las cuales son totalmente independientes y diferente las unas de las otras. En la **Figura 23** se muestra las fuentes de generación con más incidencia en este sistema en todo el año pudiéndose apreciar que la energía solar es la que más generación aporta al sistema seguida por la generación del generador diésel. Además, se puede apreciar como la energía eólica no cuenta con el potencial para alcanzar mayores niveles de productividad y rentabilidad del sistema propuesto.



Figura 23. Energía producida por cada elemento de generación.

En la **Figura 24** se muestra el comportamiento del sistema ante la demanda existente en una semana, pudiéndose apreciar por independiente el papel que juega cada fuente de generación en el sistema. En este sistema, la mayor fuente de generación es la energía solar. En la figura se muestra como la energía solar satisface la demanda durante el día y a la vez carga las baterías las cuales son las que suplen la demanda en la noche. El generador en este caso entra en operación en el pico de la mañana.

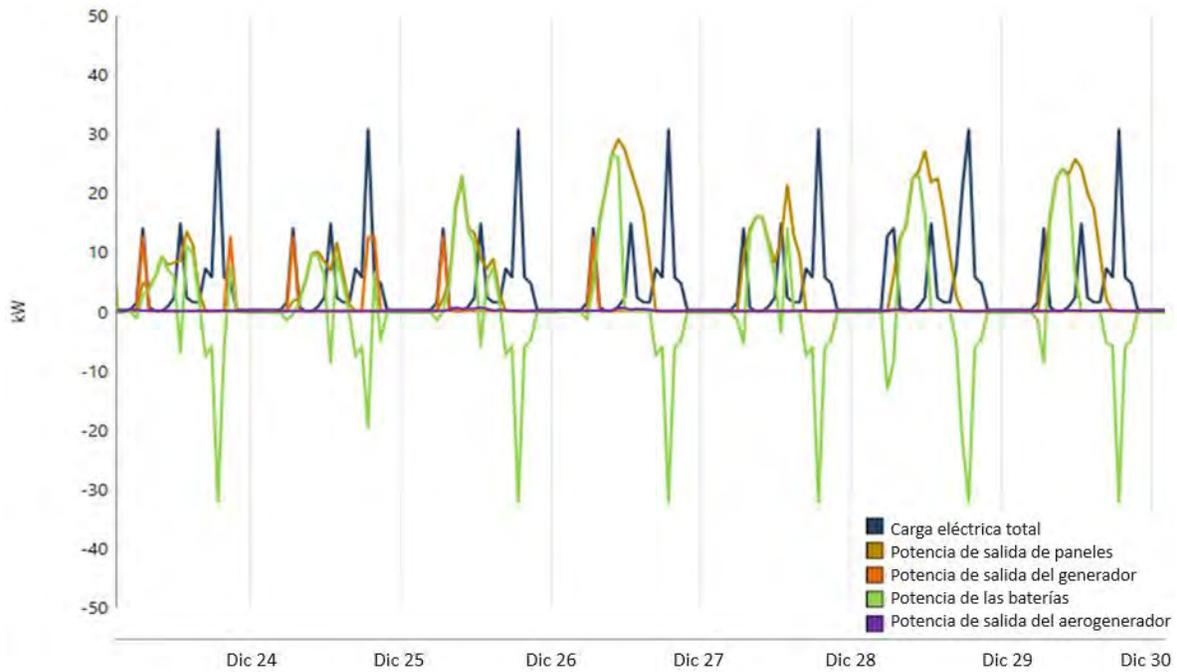


Figura 24. Comportamiento del sistema en siete días.

A continuación, se presenta un análisis integral de la **Tabla 19**, con los parámetros técnicos y económicos asociados a la implementación de un sistema que incluye paneles solares, aerogeneradores, generadores diésel y sistemas de baterías. Estos datos ofrecen una visión de la eficiencia y la viabilidad económica de este sistema energético diversificado. Capital inicial, costos de instalación, mantenimientos, combustibles y otros indicadores clave permiten evaluar en profundidad el rendimiento y la rentabilidad del sistema.

Tabla 19. Resumen de los costos del sistema.

Componentes	Capital (\$)	Reemplazos (\$)	Mantenimientos (\$)	Combustible (\$)	Retorno (\$)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)
Baterías	81,810	43,116.67	19,663.37	0.00	-9,377.38	120,682.60	0.193
Paneles	38,464.9	\$0.00	24,105.37	0.00	0.0	87,341.34	0.0557
Aerogenerador	5,320	2,264.78	4,073.16	0.00	-1,358.28	23,727.84	1.39
Generador	25,000.0	\$0.0	11,099.83	51,315.07	-1,547.41	79,040.43	0.362
Convertidores	15,530.76	8,185.19	2,123.54	\$0.0	-1,780.18	17,921.86	-
Sistema	166,126.2	53,566.65	61,065.27	51,315.07	-14,063.2	318,010	0.4945

De los valores mostrados en la tabla anterior, se puede apreciar que los elementos más costosos del sistema son los paneles fotovoltaicos y el sistema de baterías, aunque el generador presentaría mayores gastos de mantenimiento y de combustible. El Costo Neto Presente (NPC) para el sistema en su conjunto es de \$318,010, lo que refleja el valor actual neto de los costos y beneficios a lo largo de la vida útil del proyecto. El Costo de Energía (COE) para el sistema es de \$0.4945/kWh, indicando el costo promedio por unidad de energía generada.

5.2 Escenario 2

El sistema híbrido de paneles solares, baterías y generador diésel (FV-SB-GD) emerge como una estrategia integral para abordar los desafíos de suministro eléctrico en diversas condiciones y entornos. Este sistema innovador combina la generación de energía solar mediante paneles fotovoltaicos, la capacidad de almacenamiento a través de baterías y la confiabilidad adicional proporcionada por un generador diésel. La combinación de estas tres fuentes de energía crea un sistema robusto que optimiza la eficiencia, minimiza los cortes de energía y se adapta a una variedad de necesidades, desde aplicaciones domésticas hasta entornos industriales.

En este contexto, se analizarán las características, beneficios y consideraciones técnicas y económicas asociadas con este sistema híbrido representado en la **Figura 25**.

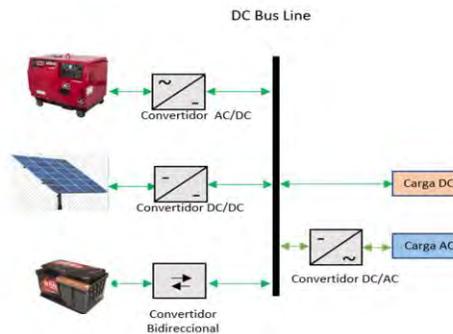


Figura 25. Configuración del Sistema híbrido.

5.2.1 Paneles Solares

En este sistema, la energía solar es la principal fuente de energías renovables por lo que la condición climática deberá ser favorable para obtener una generación adecuada para satisfacer la demanda del sistema. En la **Figura 26** se muestra la cantidad de irradiación en el año y la generación derivada de esta. En la **Tabla 20** se presenta los parámetros tecno-económicos derivados de la simulación y se arrojan resultados cruciales que resaltan la factibilidad y eficacia del sistema propuesto.

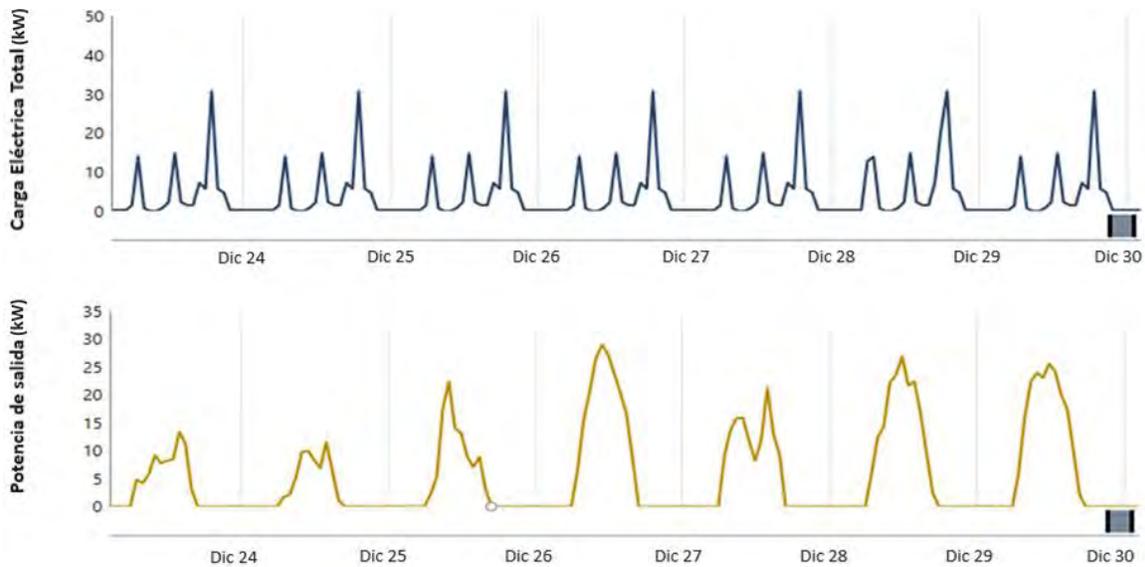


Figura 26. Irradiación solar y generación de electricidad de los paneles.

El análisis de los parámetros técnico-económicos de un sistema de paneles solares ofrece una perspectiva esencial sobre su rendimiento y viabilidad financiera.

La capacidad de generación, eficiencia, costo de instalación, y vida útil de los paneles son factores cruciales en la evaluación técnica. Simultáneamente, los costos iniciales y los reemplazos a lo largo del tiempo impactan directamente en la inversión total y en el retorno financiero.

Parámetros como el Costo de Energía (COE) presentados en la tabla 20, ofrecen una visión económica completa, revelando la rentabilidad del sistema a lo largo de su vida útil. Este análisis técnico y financiero es esencial para la implementación de sistemas de paneles solares que sean tanto eficientes como económicamente sólidos.

Tabla 20. Parámetros técnicos económicos del sistema de energía solar.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	41	kW
Generación media	183	kWh/d
Factor de Capacidad	18.7	%
Producción Total	66,961	kWh/año
Salida Máxima	38.7	kW
Penetración FV	157	%
Horas de Operación	4,340	hrs/años
Costo Nivelado	0.0557	\$/kWh

Como se muestra en la tabla el sistema de paneles necesario para satisfacer la demanda de la carga propuesta, sería de una capacidad nominal instalada de 41 kW por lo que se utilizarían dieciséis filas en paralelo con nueve paneles conectados en serie para arrojar un voltaje en el Bus de 348 V y una corriente de 152 A.

Con esta información ya se puede seleccionar los convertidores para el acondicionamiento de la energía, resultando en el mismo que el mencionado en el escenario anterior. El costo nivelado de la energía sería de unos 0.0557 \$/kWh lo cual se considera adecuado.

5.2.2 Generador Diesel

La **Figura 27** representa la generación de un generador diésel en relación con la carga ofrece una visualización dinámica y esclarecedora de cómo responde el sistema a variaciones en la demanda eléctrica. Esta representación gráfica ilustra claramente la capacidad del generador diésel para ajustar su producción en función de la carga, evidenciando de manera efectiva la relación proporcional entre la generación de energía y los niveles de demanda.

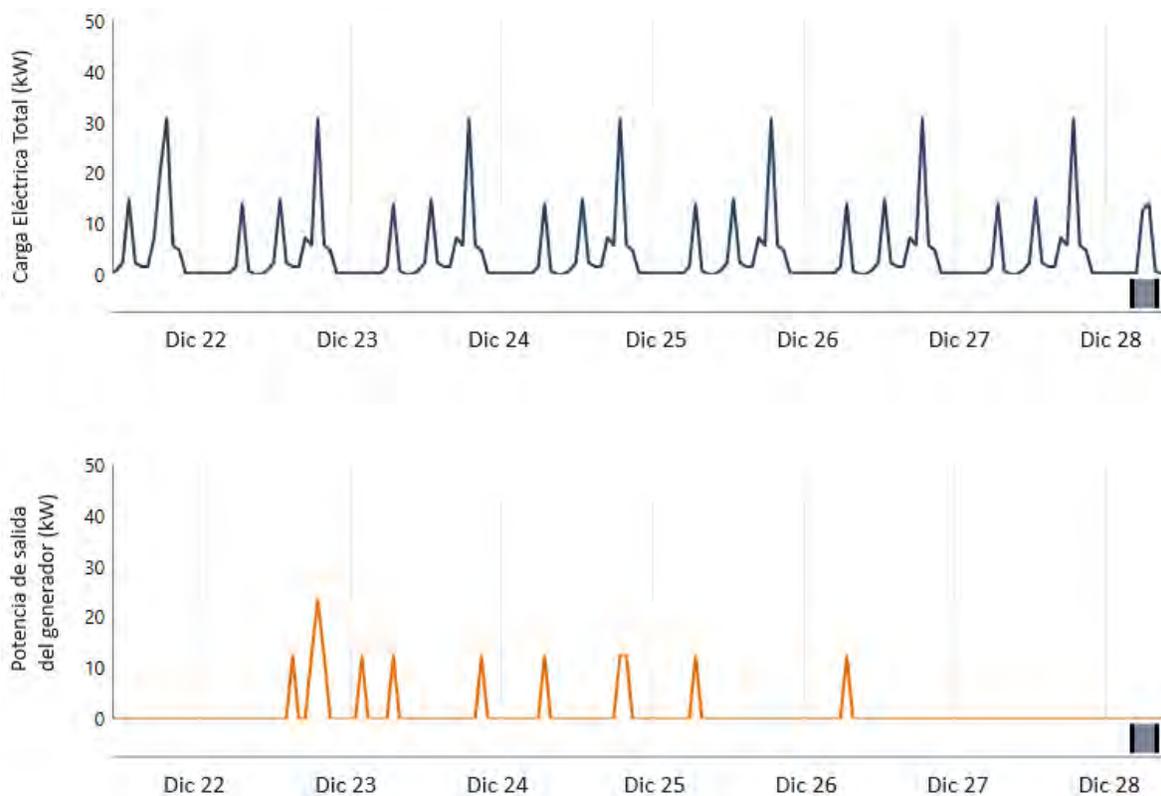


Figura 27. Comportamiento del generador diésel en el mes de mayo.

La **Tabla 21** presenta los parámetros de un generador diésel, este constituye un recurso esencial para evaluar su desempeño y eficiencia operativa. Detalles como la capacidad de generación, consumo de combustible, eficiencia y consumo específico se convierten en indicadores claves que permiten una comprensión integral de las características técnicas del generador diésel.

Tabla 21. Parámetros técnicos económicos de un generador diésel.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	50	kW
Producción media	13.3	kW
Factor de Capacidad	1.57	%
Producción Total	6,864	kWh/año
Salida Mínima	12.50	kW
Salida Máxima	40.1	kW
Costo fijo de generación	5.35	\$/ hr
Horas de Operación	515	hrs/año
Numero de Arranques	419	Arranques/año
Consumo de Combustible	2,724	L
Consumo Especifico	0.397	L/kWh
Eficiencia Eléctrica	25.8	%

En la tabla 21 se puede apreciar que el generador más óptimo para este sistema es de 50kW y un costo fijo de generación de 5.35 \$/horas lo cual representa un gran costo para el sistema. Además, en la figura 27 se muestra el régimen de trabajo del generador pudiéndose apreciar que cumple con la función de suplir el déficit de generación.

5.2.3 Baterías

Las microrredes aisladas confían en el sistema de baterías como un componente crucial, especialmente cuando se contempla como una fuente de energía en situaciones donde no hay radiación solar u otras fuentes de energías. Esto se fundamenta en la capacidad del sistema para acumular energía durante el día y suministrar esta carga cuando es necesario, procedente del banco de baterías. En la **Figura 28** se muestra el estado de carga y descarga del sistema de baterías propuesto.

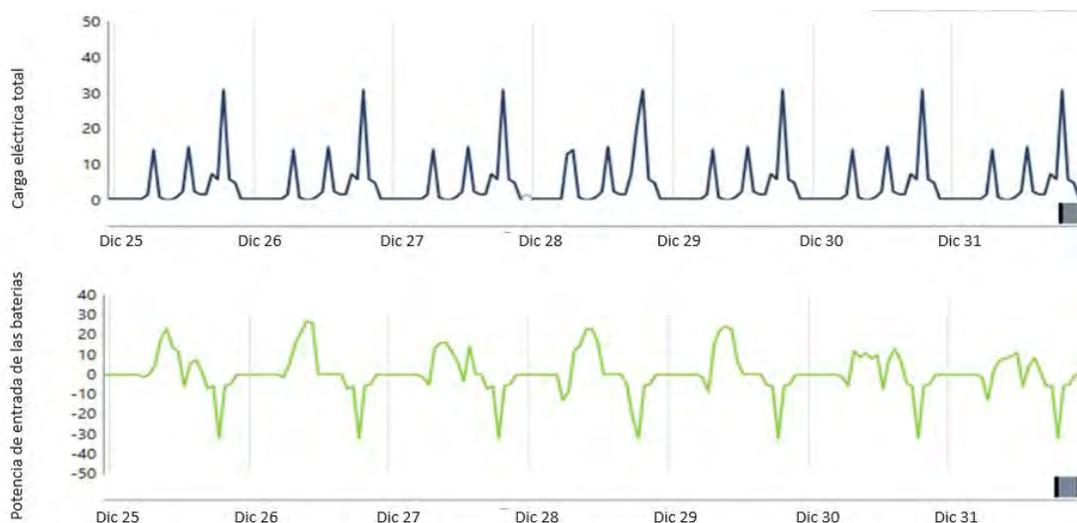


Figura 28. Régimen de trabajo de la batería en un mes.

En la **Tabla 22** se presentan diferentes parámetros relacionados con el sistema de baterías, detallando indicadores técnicos como la capacidad nominal, autonomía, vida útil, etc. Estos datos ofrecen una visión comparativa de las distintas opciones, permitiendo evaluar fiabilidad y sostenibilidad en función de las tecnologías utilizadas.

Tabla 22. Parámetros del sistema de baterías.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad Nominal	152	kWh
Autonomía	22.3	hr
Vida Útil	15	años
Energía de entrada	29,866	kWh/año
Energía de salida	27,356	kWh/año
Agotamiento del almacenamiento	76.2	kWh/año
Pérdidas	2,586	kWh/año
Productividad anual	28,633	kWh/año

Como se observa en la tabla, el sistema constará con unos 152kWh con una cantidad de 152 baterías con 38 filas de cuatro baterías en serie y constará con una autonomía de 22.3 horas y una vida útil de 15 años.

5.2.4 Inversores

En la **Tabla 23** se observan los valores de potencia del inversor. Como se aprecia apenas varía con respecto al escenario anterior ya que la carga del sistema es la misma.

Tabla 23. Parámetros técnicos de los convertidores.

Parámetros	Inversor	Unidades
Capacidad nominal	42.7	kW
Producción media	4.88	kW
Factor de Capacidad	11.4	%
Salida Máxima	39.6	kW
Horas de Operación	8,031	hrs/año
Pérdidas	4,229	kWh/año

5.2.5 Análisis del Sistema

En la **Figura 29** se muestra el comportamiento de las fuentes de generación de este sistema en una semana, donde se puede apreciar el modo en que deben entrar a generar cada elemento del sistema según la demanda prevista. Como se puede apreciar la energía solar es la de mayor incidencia durante el día, por lo que es la que representa mayor generación y da la posibilidad de cargar a las baterías, las cuales junto con el generador diésel son las encargadas de satisfacer en ocasiones los picos de demanda.

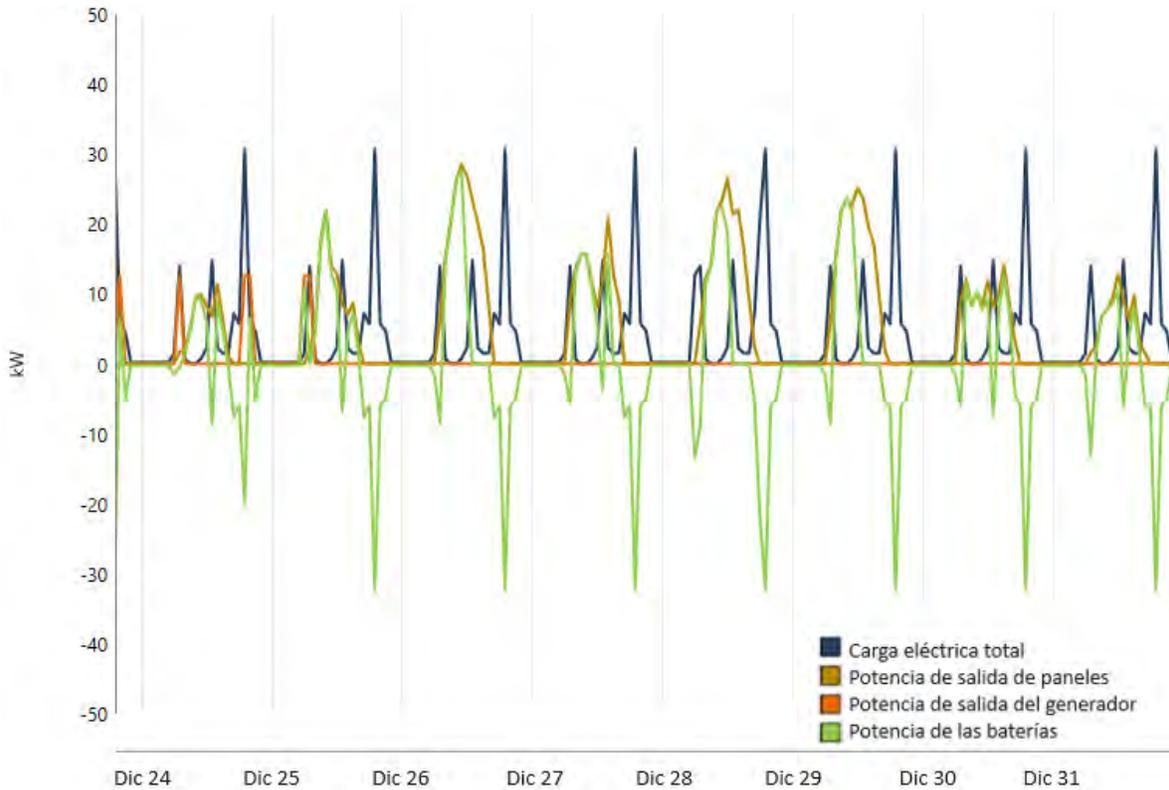


Figura 29. Comportamiento de cada elemento de generación.

Este análisis presenta diversos elementos de generación de energía, detallando los costos asociados con cada elemento del sistema. Las variables clave incluyen los costos del capital inicial, los reemplazos, mantenimiento, combustibles y el retorno de la inversión. Los indicadores económicos, como el Costo Neto Presente (NPC), el Costo de Energía (COE) anual, así como los costos operativos y de inversión inicial, se examinan en profundidad. En la **Tabla 24** se proporciona una visión completa de los aspectos financieros de cada elemento del sistema, permitiendo una toma de decisiones informada sobre la implementación de sistemas de generación de energía.

Tabla 24. Aspectos económicos del sistema.

Componentes	Capital (\$)	Reemplazos (\$)	Mantenimientos (\$)	Combustible (\$)	Retorno (\$)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)
Baterías	83,978.95	44,259.5	20,233.32	0.00	-9,625.93	13,8845.84	0.1690
Paneles	34,511.07	\$0.00	21,627.54	0.00	0.00	56,138.6	0.0557
Generador	25,000.0	\$0.00	11,618.72	54279	-1,217.87	89,679.91	0.3620
Convertidores	15,651.48	8,248.81	2,140.04	\$0.00	-1,794.02	24246.31	-
Sistema	159,141.49	52,508.31	54,279.06	49372.5	-12,637.8	308910.66	0.4804

El análisis económico revela distintas configuraciones de sistemas de generación de energía, destacando aspectos financieros clave. La variabilidad en la capacidad de paneles solares (FV) y el generadores diésel impacta directamente en los indicadores económicos. La configuración "FV-GD-SB" emerge como una opción eficiente con un costo neto presente (NPC) de \$308910.66 y un costo de energía (COE) anual de \$0.4804.

5.3 Escenario 3

La implementación de sistemas de paneles solares y baterías ha emergido como una solución innovadora y sostenible para abordar las crecientes demandas de energía en la actualidad. Estos sistemas aprovechan la energía del sol, una fuente inagotable y renovable, a través de paneles solares fotovoltaicos que convierten la luz solar en electricidad. Complementariamente, las baterías desempeñan un papel crucial al almacenar el excedente de energía generada durante períodos de alta radiación solar, permitiendo su uso durante momentos de menor disponibilidad de luz. Esta simbiosis entre paneles solares y baterías no solo contribuye a la reducción de la dependencia de fuentes de energía convencionales, sino que también impulsa la resiliencia del suministro eléctrico al ofrecer almacenamiento eficiente y una generación continua de energía limpia. En este contexto, exploraremos más a fondo los beneficios y las aplicaciones prácticas de esta combinación tecnológica en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles y eficaces.

5.3.1 Paneles Solares

En este sistema los paneles son la fuente principal de energía por lo que se puede apreciar en la **Tabla 25** un aumento considerable de la capacidad instalada con respecto a los demás sistemas debido a que debe tener la capacidad para alimentar la energía demandada. En la **Figura 30** se muestra la irradiación solar la cual cumple con los valores mínimos necesarios para poder ofrecer la energía solar necesaria para la generación de electricidad demandada.

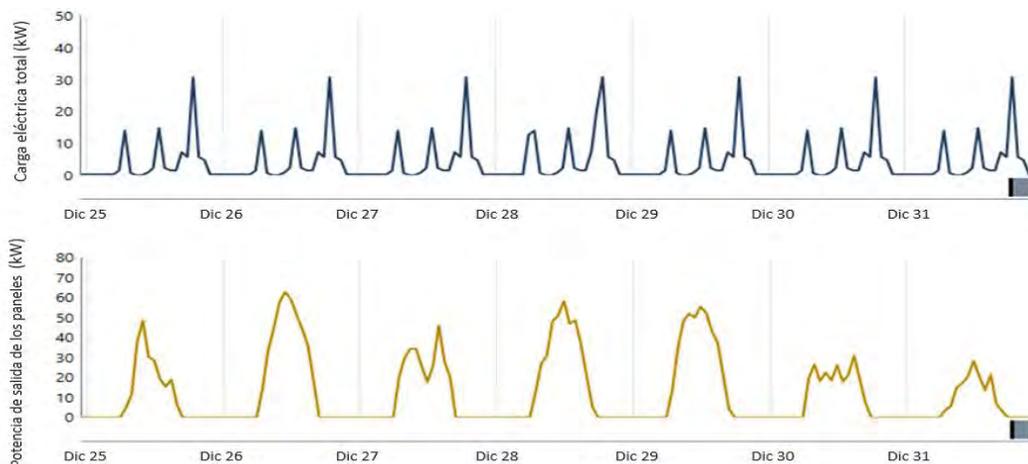


Figura 30. Irradiancia solar y la generación producida.

La **Tabla 25** se detallan parámetros técnicos y económicos fundamentales de un sistema de paneles solares, proporcionando una visión detallada de su rendimiento y viabilidad. Esta recopilación de datos incluye la capacidad de generación, costo de la energía y otros indicadores clave que definen la eficacia y la rentabilidad del sistema. Explorar estos parámetros permitirá una comprensión más completa de cómo los paneles solares no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino también a la optimización económica en la implementación de soluciones energéticas basadas en fuentes renovables.

Tabla 25. *Parámetros técnico económico del sistema de paneles.*

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad nominal	94.9	kW
Generación media	425	kWh/d
Factor de Capacidad	18.7	%
Producción Total	155,032	kWh/año
Salida Máxima	89.5	kW
Penetración FV	363	%
Horas de Operación	4,340	hrs/años
Costo Nivelado	0.0557	\$/kWh

Con los datos mostrados en la tabla anterior, para que este sistema pueda cumplir con la demanda estimada, deberá contar con una capacidad instalada de 94.9 kW, una capacidad de generación media de 425 kWh/d y una producción total de 155032 kWh/año.

Para este sistema serían necesarios 333 paneles donde se conectarán 37 filas de paneles en paralelo con 9 paneles en serie cada una. Con esta configuración se obtiene un voltaje en el BUS de 347 V y una corriente total de 351.5 A pudiéndose seleccionar el mismo convertidor con MPPT utilizado en los escenarios anteriores.

5.3.2 Baterías

La **Figura 31** adjunta representa el estado dinámico de carga y descarga de un sistema de baterías, proporcionando una visualización clara de su rendimiento a lo largo del tiempo. La línea de carga refleja la acumulación de energía durante los períodos de generación excedente, mientras que la línea de descarga ilustra la liberación de energía para satisfacer la demanda durante intervalos de menor producción. Este gráfico dinámico no solo ofrece una representación visual de la eficiencia del sistema de baterías en la gestión de flujos de energía fluctuantes, sino que también destaca la capacidad de respuesta y la estabilidad que aporta al suministro eléctrico. Al analizar este gráfico, se pueden identificar patrones y tendencias que informan sobre la eficacia operativa y la optimización del rendimiento de dicho sistema en distintas condiciones de carga y descarga.



Figura 31. Estados de carga y descarga del sistema de baterías.

La **Tabla 26** presenta parámetros técnicos y económicos esenciales que delinear la eficiencia y la viabilidad de un sistema de baterías.

La capacidad de almacenamiento, la eficiencia de carga y descarga, así como los costos asociados, se destacan para proporcionar una visión integral de la funcionalidad y el impacto económico de este componente. Este análisis detallado facilita una comprensión más profunda de cómo los sistemas de baterías contribuyen a la estabilidad y sostenibilidad en el contexto de la transición hacia soluciones energéticas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

Tabla 26. Parámetros técnico económicos del sistema de baterías.

Parámetros	Valores	Unidades
Capacidad Nominal	268	kWh
Autonomía	39.3	hr
Vida Útil	15	años
Energía de entrada	29,767	kWh/año
Energía de salida	27,301	kWh/año
Agotamiento del almacenamiento	63	kWh/año
Perdidas	2,528	kWh/año
Productividad anual	28,531	kWh/año
Voltaje del Bus	14.8	V

La configuración usada en este sistema, requiere de un sistema de baterías que sea capaz de satisfacer la demanda en horarios de menor incidencia solar, en la tabla se muestra que la capacidad nominal con la que debe contar el sistema es de 268kWh con un total de 268 baterías conectadas en 67 filas en paralelo con cuatro baterías en serie, una autonomía de 39.3 horas y una productividad anual de 28,531 kWh/año.

5.3.3 Convertidores

Como se muestra en la **Tabla 27** se puede apreciar la capacidad instalada nominal de los inversores con un valor de 44.2 kW.

Tabla 27. Parámetros de los convertidores e inversores.

Parámetros	Inversor	Unidades
Capacidad nominal	44.2	kW
Producción media	4.88	kW
Factor de Capacidad	11	%
Salida Máxima	39.6	kW
Horas de Operación	8,031	hrs/año
Pérdidas	4,226	kWh/año

5.3.4 Análisis del Sistema

La combinación sinérgica de paneles solares y sistemas de almacenamiento de baterías constituye un enfoque integral para abordar las demandas energéticas de manera sostenible. La **Figura 32** revela la interacción dinámica entre la generación solar y el almacenamiento de energía. El gráfico no solo ilustra la contribución significativa de los paneles solares a la generación de electricidad, sino también cómo las baterías desempeñan un papel crucial en suavizar las variaciones de producción y satisfacer la demanda durante períodos de menor irradiación solar.

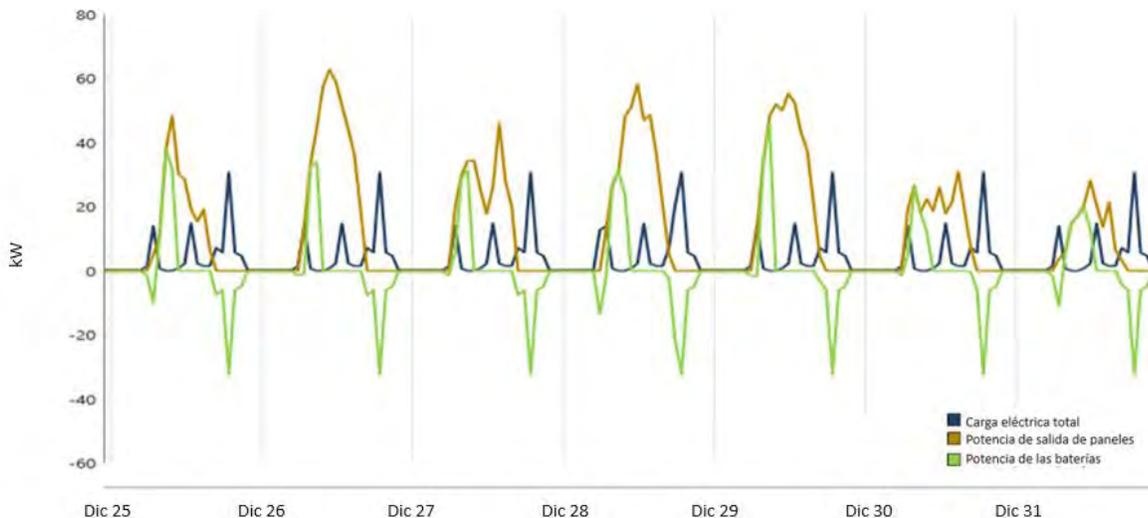


Figura 32. Comportamiento del sistema entre sus fuentes de energías.

La **Tabla 28** que se presenta a continuación resume los parámetros económicos clave asociados con el sistema integrado de paneles solares y baterías. Estos indicadores ofrecen una perspectiva detallada sobre la rentabilidad y la viabilidad financiera de la implementación de este sistema. Incluyendo datos sobre el Costo Neto Presente (NPC), el Costo de Energía (COE), los Costos de Operación y el Capital Inicial, esta tabla proporciona un análisis económico completo.

CAPÍTULO 5. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED HÍBRIDA DE ENERGÍAS RENOVABLES

Explorar estos parámetros permitirá evaluar la eficacia financiera del sistema, respaldando la toma de decisiones informada en la transición hacia soluciones energéticas más sostenibles.

Tabla 28. Resumen económico del sistema.

Componentes	Capital (\$)	Remplazos (\$)	Mantenimientos (\$)	Combustible (\$)	Retorno (\$)	NPC (\$)	COE (\$/kWh)
Baterías	13,7955	72,706.84	35,141	0.00	-15,812.8	229,990.6	0.322
Paneles	79,901.67	0.00	50,073.11	0.00	0.00	129,974.79	0.0557
Convertidores	16,188.74	8,531.97	2,213	0.00	1,855.6	25,078.61	-
Sistema	234,045.97	81,238.8	87,427.72	0.00	17,668.5	385,044	0.5991

El análisis detallado de parámetros económicos clave, como el Costo Neto Presente (NPC) y el Costo de Energía (COE), demuestra que la inversión en este sistema conlleva beneficios económicos significativos. La tabla 28 revela que los costos de operación son manejables, lo que indica una eficiencia en la gestión continua del sistema. Este enfoque integrado también destaca la capacidad del sistema para minimizar la dependencia de fuentes externas de energía, contribuyendo así a la autosuficiencia energética y reduciendo los riesgos asociados con las fluctuaciones de precios de los recursos energéticos convencionales.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las siguientes tablas se proporciona un desglose detallado de diferentes escenarios de generación y almacenamiento de energía, centrándose en la combinación de paneles solares (PV), aerogeneradores (AG), sistemas de baterías (SB) y generadores diésel (GD). Cada escenario representa una configuración única que aborda la necesidad de balancear la generación sostenible de energía solar con la capacidad de almacenamiento y la disponibilidad de respaldo mediante generadores diésel. A continuación, se presenta un análisis de estos escenarios, destacando las capacidades clave y resaltando las estrategias adoptadas para asegurar un suministro eléctrico robusto y confiable. Este análisis busca ofrecer una visión integral de las opciones disponibles en términos de generación y almacenamiento de energía, considerando diferentes combinaciones para satisfacer las demandas energéticas en diversos contextos.

Tabla 29. Dimensionamiento del cada sistema.

Escenarios	PV (kW)	AG (kW)	SB (kW)	GD (kW)	INVERSORES
FV-AG-SB-GD	45.7	1	148	50	42.4
FV-SB-GD	41	-	152	50	42.7
FV-SB	94.9	-	268	-	44.2

En la **Tabla 29** se pueden apreciar la capacidad instalada de cada elemento de generación para los diferentes escenarios y en ella podemos deducir que en los dos primeros escenarios los valores de cada componente son casi iguales a pesar de no tener la misma cantidad de elementos, eso quiere decir que en el primer escenario la generación eólica no aporta casi generación al sistema. El tercer escenario presenta valores más altos lo cual significa que para satisfacer la demanda es necesario aumentar la capacidad de los paneles ya que no cuenta con otras fuentes de generación.

Tabla 30. Costos generales de cada escenario.

Escenarios	Costo de Operación (\$)	Costo Inicial (\$)	COE (\$)	NPC (\$)	NPC (%)
FV-AG-SB-GD	10,098	166,126	0.495	318,010	3
FV-SB-GD	9,958	159,141	0.480	308,911	-
FV-SB	10,039	234,046	0.599	385,044	25.3

En la **Tabla 30** podemos definir los escenarios basándonos en la rentabilidad de cada uno. Podemos concluir que el segundo escenario es el que presenta un menor costo neto actual (NPC por sus siglas en inglés), así como un menor costo de la energía y de operación por lo que es el sistema más rentable de los propuestos. En la tabla a continuación se muestran otros gastos del cada escenario, donde el segundo escenario tiene menos gastos que los demás.

Tabla 31. Gastos de cada sistema.

Escenarios	Reemplazos (\$)	Mantenimientos (\$)	Retorno (\$)	Combustible (\$)
FV-AG-SB-GD	53,566.65	61,065.27	-14,063.26	51,315.07
FV-SB-GD	52,508.31	55,619.63	-12,637.82	54,279.06
FV-SB	81,238.8	87,427.72	-17,668.5	0

En la **Tabla 31** se aprecia como el segundo escenario posee el menor costo por reemplazos y mantenimientos. A pesar de tener el mayor gasto de combustible y ser el de menor retorno, en total es el que menor gasto presenta.

En la **Tabla 32** se muestran los valores de generación y los consumos energía de cada sistema. Además, se muestra el porcentaje de energía renovable por cada escenario.

Tabla 32. Índices de producción de energía.

Escenarios	Producción de Energía (kWh/año)	Consumo de Energía (kWh/año)	Exceso de Energía (kWh/año)	Fracción Renovable (%)	Combustible Total (L/año)
FV-AG-SB-GD	81,586	42,756	32,100	84.9	2,575
FV-SB-GD	77,825	42,756	24,332	83.9	2,724
FV-SB	155,032	42,728	105,612	100	0

De la tabla 32 se puede ver que para una misma demanda el segundo escenario es el que produce la menor cantidad de energía, por lo cual, es el que menos energía desperdicia por año y por consiguiente tiene un menor costo de la energía como se muestra en la tabla 30.

En la siguiente tabla se muestra el impacto medioambiental que ejercen estos sistemas. Donde se aprecia la cantidad de contenido en sustancias que se arrojan sobre el medio ambiente.

Tabla 33. Parámetros medioambientales.

Contaminantes	FV-AG-GD-SB (kg/año)	FV-GD-SB (kg/año)	FV-SB (kg/año)
Dióxido de carbono	6,741	7,130	0
Monóxido de Carbono	42.1	44.5	0
Hidrocarburos sin quemar	1.85	1.96	0
Dióxido de Sulfuro	16.5	17.5	0
Óxido de Nitrógeno	39.5	41.8	0
Partículas en Suspensión	0.252	0.267	0
Total	6,841	7,237	0

En esta Tabla 33 se puede apreciar que el segundo escenario es el más contaminante, pues es el que más usa el generador diésel, que es el elemento más contaminante. El tercer escenario al estar compuesto solamente por paneles solares no se considera contaminante.

CONCLUSIONES

Los sistemas híbridos se consideran una alternativa viable para suministrar energía a una red. Para optimizar el sistema, las estrategias de diseño deben buscar una combinación adecuada de parámetros como el costo y la eficiencia del sistema. Los sistemas híbridos de energías renovables podrían beneficiarse enormemente de las tecnologías BESS. Muchos expertos trabajan para mejorar la coordinación y el desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía para su uso en microrredes con el fin de gestionar el equilibrio energético entre la oferta y la demanda, almacenando energía durante las horas a un costo menor. Aunque se reconoce su potencial, el desarrollo de un BESS eficiente y adecuado para aplicaciones de microrredes sigue siendo un reto importante.

En el campo de la optimización, la revisión bibliográfica revela que los investigadores se han centrado en tres métodos: clásico, artificial e híbrido. Los métodos clásicos se caracterizan por su rapidez y eficacia en el análisis tecno-económico, pero tienen la limitación de contar con un espacio de optimización restringido. Por otro lado, los métodos artificiales son los más utilizados en optimización debido a su mayor eficacia, precisión y rápida convergencia. Sin embargo, uno de los inconvenientes de este método es la necesidad de utilizar programas de procesamiento complejos.

Los métodos de gestión aplicados en los sistemas híbridos se seleccionan en función de los objetivos de cada estudio. La mayoría de los investigadores se centran en los objetivos tecno-económicos, ya que analizan tanto los aspectos técnicos (como la duración, el cumplimiento de la demanda y el rendimiento) como los económicos (como minimizar los costos del sistema, aumentar el ahorro y reducir el costo de la energía) de los sistemas híbridos de energías renovables para lograr una configuración óptima. Para alcanzar estos objetivos, se emplean diversos algoritmos, como la lógica difusa, la optimización por enjambre de partículas, las redes neuronales y softwares comerciales como HOMER, para monitorizar los componentes del sistema híbrido de energía renovable. Estos enfoques permiten evaluar y optimizar eficazmente el rendimiento y la viabilidad económica de los sistemas híbridos.

De los sistemas que se analizaron en este estudio, se llega a la conclusión que para esta localidad el escenario más adecuado es el compuesto por los sistemas de paneles fotovoltaicos, sistemas de baterías y un generador diésel (FV-SB-GD). Al centrarnos en el escenario FV-SB-GD, evidenciamos una combinación que destaca por su factibilidad económica y equilibrio operativo. El escenario FV-SB-GD demuestra una factibilidad económica sólida con el menor costo neto actual (NPC) de 308,910.66 dólares y un costo nivelado de la energía (COE) de 0.480 \$/kWh, integrando eficientemente la generación solar (PV) con baterías (SB) y generadores diésel (GD). La ausencia de aerogeneradores (AG) sugiere una estrategia de almacenamiento que prioriza la eficiencia y el control de costos. La combinación de paneles solares (PV) y baterías (SB) permite una generación continua y una mayor autonomía operativa, optimizando la utilización de recursos solares disponibles. La inclusión del generador diésel (GD) como respaldo estratégico garantiza la fiabilidad del suministro, especialmente en situaciones de baja generación solar o condiciones climáticas adversas. Por otra parte, el escenario III (FV-SB) es el que mayor NPC y COE evidenciando que los diseños híbridos propuestos para este caso de estudio resultan ser más económicos y confiables.

TRABAJOS FUTUROS EN LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS HÍBRIDOS

Con las mejoras en la investigación y el desarrollo de las tecnologías solar y eólica, se espera que el costo de las fuentes de energía renovables disminuya en contraste con el aumento anual del costo de los recursos energéticos convencionales. Por lo tanto, este sistema híbrido será más económico en el futuro y también es probable que los beneficios medioambientales fomenten su uso y aceptación.

Para futuros trabajos relacionados a los SHER se visualiza:

- El uso de la inteligencia artificial en la gestión energética para mejorar aún más el rendimiento de los sistemas.
- La asignación óptima de recursos en función de la demanda y la previsión de recursos renovables para reducir significativamente los costos de explotación del sistema.
- La aplicación de técnicas de control avanzadas mediante un controlador centralizado para mejorar el rendimiento de los sistemas eléctricos híbridos modulares.
- La aplicación de modernas técnicas de control para supervisar el funcionamiento de los sistemas energéticos híbridos modulares, que puede optimizar aún más el uso de los recursos renovables y mejorar la gestión energética.
- Trabajar en las tecnologías de almacenamiento de energía desarrollando métodos más eficientes para el almacenamiento térmico y el uso de hidrógeno como vector energético.
- Investigación en la integración de sistemas híbridos en redes inteligentes y micro redes para mejorar la resiliencia y la eficiencia energética.
- Desarrollar modelos más precisos para simular el comportamiento de sistemas híbridos en diversas condiciones.
- Desarrollo de modelos de negocio que hagan más accesible y rentable la implementación de sistemas híbridos.
- Realizar estudios detallados del ciclo de vida de sistemas híbridos para evaluar su impacto ambiental completo.
- Utilizar el INTERNET de las Cosas y el análisis de Big Data para mejorar la monitorización y optimización de sistemas híbridos.

La investigación y desarrollo en estos campos no solo mejorará la eficiencia y viabilidad de los sistemas híbridos de energías renovables, sino que también contribuirá significativamente a la transición global hacia una matriz energética más sostenible y resiliente.

ANEXOS

Anexo A. Datasheet de los inversores



3000W True Sine Wave DC-AC Inverter

TS-3000 series



■ Features :

- True sine wave output (THD<3%)
- High surge power up to 6000W
- High efficiency up to 92%
- Power ON-OFF switch
- Standby saving mode can be selectable
- Front panel indicator for operation status
- Thermostatically controlled cooling fan
- Protections: Bat. low alarm / Bat. low shutdown / Over voltage / Over I / Output short / Input polarity reverse / Overload / AC circuit breaker
- Application : Home appliance, power tools, office and portable equipment, vehicle and yacht ...etc.
- Optional monitoring software and connection cable (MW order No.: DS-TN-1500)
- 3 years warranty



SPECIFICATION

MODEL	TS-3000-112	TS-3000-124	TS-3000-148	TS-3000-212	TS-3000-224	TS-3000-248	
OUTPUT	RATED POWER (Typ.)	3000W					
	MAXIMUM OUTPUT POWER (Typ.)	3450W for 180 sec. / 4500W for 10 sec. / surge power 6000W for 30 cycles					
	AC VOLTAGE	Factory setting set at 110VAC 100 / 110 / 115 / 120VAC selectable by setting button S.W			Factory setting set at 230VAC 200 / 220 / 230 / 240VAC selectable by setting button S.W		
	FREQUENCY	60±0.1Hz / 50/60Hz selectable by setting button S.W			50±0.1Hz / 50/60Hz selectable by setting button S.W		
	WAVEFORM	True sine wave (THD<3%) at rated input voltage					
	AC REGULATION (Typ.)	±3%					
	SAVING MODE (Typ.)	Default disabled. Load ≤5W will be changed to standby mode					
INPUT	FRONT PANEL INDICATOR	Battery voltage level, output load level, saving mode, fault and operation status					
	BAT. VOLTAGE	12V	24V	48V	12V	24V	48V
	VOLTAGE RANGE (Typ.) Note.3,6	10.5 ~ 15VDC	21 ~ 30VDC	42 ~ 60VDC	10.5 ~ 15VDC	21 ~ 30VDC	42 ~ 60VDC
	DC CURRENT (Typ.) Note.4	300A	150A	75A	300A	150A	75A
	NO LOAD DISSIPATION (Typ.)	≤ 10W @ standby saving mode					
	OFF MODE CURRENT DRAW (Typ.)	≤ 1mA					
	EFFICIENCY (Typ.) Note.5	88%	90%	91%	89%	91%	92%
BATTERY INPUT PROTECTION	BATTERY TYPES	Open & sealed lead acid battery					
	FUSE	40A*12	40A*6	20A*6	40A*12	40A*6	20A*6
	BAT. LOW ALARM Note.6	11.3V	22.5V	45V	11.3V	22.5V	45V
	BAT. LOW SHUTDOWN Note.8	10.5V	21V	42V	10.5V	21V	42V
OUTPUT PROTECTION	REVERSE POLARITY	By internal fuse open					
	OVER TEMPERATURE	90°C ± 5°C	85°C ± 5°C	85°C ± 5°C	80°C ± 5°C	75°C ± 5°C	75°C ± 5°C
	OUTPUT SHORT	Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover					
	OVER LOAD (Typ.)	105 ~ 115% load for 180 sec., 115% ~ 150% load for 10 sec. Protection type : Shut down o/p voltage, re-power on to recover					
	CIRCUIT BREAKER	AC output receptacle:15A					
GFCI PROTECTION	Optional (Only type F)			None			

Anexo B. Data Sheet del convertidor

6. Especificaciones técnicas

MPPT RS SmartSolar aislado	450/100-Tr	450/100-MC4	450/200-Tr	450/200-MC4
CARGADOR				
Rango de tensiones de carga programables	Mínima: 36 V Máxima: 60 V ⁽⁸⁾			
Tensión de carga de "absorción"	Valores predeterminados: 57,6 V (regulable)			
Tensión de carga de "flotación"	Valores predeterminados: 55,2 V (regulable)			
Corriente máxima de carga	100 A		200 A	
Sensor de temperatura de la batería	Se incluye			
Sonda de tensión de la batería	Sí			
SOLAR				
Tensión FV CC máxima	450 V			
Tensión de arranque	120 V			
Rango de tensión de trabajo del MPPT	80 – 450 V ⁽¹⁾			
Número de rastreadores MPPT	2		4	
Máxima corriente de entrada FV operativa	18 A por rastreador			
Máx. corriente de cortocircuito FV para protección de polaridad inversa ⁽²⁾	20 A por rastreador			
Potencia de carga de salida CC máxima	4000 W por rastreador 5760 W total		4000 W por rastreador 11520 W total	
Tamaño máximo del conjunto FV por rastreador ⁽³⁾	7200 Wp (450 V x 20 A)			
Nivel de fallo del aislamiento FV ⁽⁴⁾	100 kΩ			

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. R. a. M. R. a. P. Rosado, " "Energy," Our World in Data," ed. [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/energy>, 2022.
- [2] G. Nima *et al.*, "Designing and Sensitivity Analysis of an Off-Grid Hybrid Wind-Solar Power Plant with Diesel Generator and Battery Backup for the Rural Area in Iran," *Journal of engineering*, 2022, doi: 10.1155/2022/4966761.
- [3] P. Roy, J. He, T. Zhao, and Y. V. Singh, "Recent Advances of Wind-Solar Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 3, pp. 81-104, 2022, doi: 10.1109/OJIES.2022.3144093.
- [4] K. Almutairi, "Use of a Hybrid Wind–Solar–Diesel–Battery Energy System to Power Buildings in Remote Areas: A Case Study," *MDPI*, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13168764>.
- [5] A. S. Sk *et al.*, "Performance Analysis of Solar-Wind-Diesel-Battery Hybrid Energy System for KLIA Sepang Station of Malaysia," 2015, doi: 10.1088/1757-899x/88/1/012074.
- [6] M. Thirunavukkarasu and S. Yashwant, "A Comparative Study of the Optimal Sizing and Management of Off-Grid Solar/Wind/Diesel and Battery Energy Systems for Remote Areas," *Frontiers in Energy Research*, 2021, doi: 10.3389/fenrg.2021.752043.
- [7] L. Sandar and Y. Aung Ze, "Solar/Wind/Diesel Hybrid Energy System with Battery Storage for Rural Electrification," 2014. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/4068123c2c316455b0380d80ae81bc3c14c2ce7b>.
- [8] Z. Cailing, L. Furong, H. Sheng, and L. Shu, "Research on capacity optimization of PV-wind-diesel-battery hybrid generation system," *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, 2018, doi: 10.23919/ipec.2018.8507525.
- [9] I. Md. Fatin, I. Md. Fatin, A. S. Sk, N. Jannati Nabiha, and I. Md. Shafiul, "Optimal sizing and performance investigation of a solar-wind-battery-DG

- based hybrid Microgrid system applicable to the remote school of Bangladesh," 2020, doi: 10.22541/au.158023308.89734879.
- [10] R. Rahul *et al.*, "Simulation and Optimization of Solar Photovoltaic–Wind–Diesel Generator Stand-alone Hybrid System in Remote Village of Rajasthan, India," 2020, doi: 10.1007/978-981-15-1059-5_31.
- [11] Y. Sk. Suzauddin, Y. Sk. Suzauddin, and N. M. Nirendra, "Design and simulation of an Optimal Mini-Grid Solar-Diesel Hybrid Power Generation system in a remote Bangladesh," *International Journal of Smart grid*, 2018, doi: 10.20508/ijsmartgrid.v2i1.7.g8.
- [12] K. M. Venkatachalam and V. Saravanan, "Techno economic environmental assessment of hybrid renewable energy system in India," *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 2021, doi: 10.11591/ijaas.v10.i4.pp343-362.
- [13] S. M. Shaahid and E.-A. Ibrahim, "Techno-economic evaluation of off-grid hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems for rural electrification in Saudi Arabia—A way forward for sustainable development," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.11.017.
- [14] j. losr, S. Payal, R. Saroj, M. Arvind, and M. Arvind, "Optimal Configuration of Wind/Solar/Diesel/Battery Hybrid Energy System for Electrification of Rural Area," 2015, doi: 10.6084/m9.figshare.1469504.v1.
- [15] M. Combe, "Cost-effective sizing of an AC mini-grid hybrid power system for a remote area in South Australia," 2018.
- [16] K. Mohammed *et al.*, "Developed Approach Based on Equilibrium Optimizer for Optimal Design of Hybrid PV/Wind/Diesel/Battery Microgrid in Dakhla, Morocco," *IEEE Access*, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3051573.
- [17] I. Padrón, D. Avila, G. N. Marichal, and J. A. Rodríguez, "Assessment of Hybrid Renewable Energy Systems to supplied energy to Autonomous Desalination Systems in two islands of the Canary Archipelago," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 221-230, 2019/03/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.009>.

- [18] A. Roth, M. Boix, V. Gerbaud, L. Montastruc, and P. Etur, "A flexible metamodel architecture for optimal design of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) – Case study of a stand-alone HRES for a factory in tropical island," *Journal of Cleaner Production*, vol. 223, pp. 214-225, 2019/06/20/2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.095>.
- [19] A. Khosravani, E. Safaei, M. Reynolds, K. E. Kelly, and K. M. Powell, "Challenges of reaching high renewable fractions in hybrid renewable energy systems," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1000-1017, 2023/12/01/2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.038>.
- [20] F. I. Bappy, M. J. Islam, A. K. Podder, D. R. Dipta, H. M. R. Faruque, and E. Hossain, "Comparison of Different Hybrid Renewable Energy Systems With Optimized PV Configuration to Realize the Effects of Multiple Schemes," in *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, 3-5 May 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICASERT.2019.8934824.
- [21] K. Lee and D. Kum, "The Impact of Energy Dispatch Strategy on Design Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems," in *2019 IEEE Milan PowerTech*, 23-27 June 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810977.
- [22] V. Suresh, M. M, and R. Kiranmayi, "Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 594-604, 2020/11/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.01.013>.
- [23] F. S. Mahmoud *et al.*, "Optimal sizing of smart hybrid renewable energy system using different optimization algorithms," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4935-4956, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.197>.
- [24] N. Muleta and A. Q. H. Badar, "Designing of an optimal standalone hybrid renewable energy micro-grid model through different algorithms," *Journal of Engineering Research*, vol. 11, no. 1, p. 100011, 2023/03/01/2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100011>.
- [25] H. N. Afrouzi *et al.*, "Sizing and economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic-wind system for rural electrification: A case study Lundu,

- Sarawak," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 4, p. 100191, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100191>.
- [26] G. K. Suman, S. Yadav, and O. P. Roy, "HOMER Based Optimal Sizing of a PV/Diesel/Battery Hybrid System for a Laboratory Facility," in *2020 3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, 5-7 March 2021 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEPE50861.2021.9404436.
- [27] S. Yashwant, S. C. Gupta, G. Sushma, and B. Aashish Kumar, "Techno-economic scrutiny of HRES through GA and PSO technique," *International Journal of Renewable Energy Technology*, 2018, doi: 10.1504/ijret.2018.10011069.
- [28] M. Mikati, "Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica," *ELSEVIER*, 2012. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791212000404>.
- [29] F. E. Tahiri, K. Chikh, K. Chikh, K. Chikh, and K. Mohamed, "Optimal Management Energy System and Control Strategies for Isolated Hybrid Solar-Wind-Battery-Diesel Power System," 2021, doi: 10.28991/esj-2021-01262.
- [30] Y.-P. Xu, P. Ouyang, S.-M. Xing, L.-Y. Qi, M. khayatnezhad, and H. Jafari, "Optimal structure design of a PV/FC HRES using amended Water Strider Algorithm," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 2057-2067, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.016>.
- [31] S. Ranjay and C. B. Ramesh, "Review of HRESs based on storage options, system architecture and optimisation criteria and methodologies," *Int Renewable Power Generation*, 2018, doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0603.
- [32] A. S. Alkafaji, A. A. Al-Samawi, and H. Trabelsi, "Hybrid Energy Storage Review for Renewable Energy System Technologies and Applications," in *2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, 22-25 March 2021 2021, pp. 1059-1067, doi: 10.1109/SSD52085.2021.9429424.

- [33] M. Stecca, L. R. Elizondo, T. B. Soeiro, P. Bauer, and P. Palensky, "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks," *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 46-65, 2020, doi: 10.1109/OJIES.2020.2981832.
- [34] S. K. B and L. Ramesh, "Review and Key Challenges in Battery to Battery Power Management System," in *2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA)*, 19-21 Sept. 2019 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCUBEA47591.2019.9129162. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9129162/>
- [35] M. Pourbehzadi, T. Niknam, J. Aghaei, G. Mokryani, M. Shafie-khah, and J. P. S. Catalão, "Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 139-159, 2019/07/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.025>.
- [36] S. Vendoti, M. Muralidhar, and R. Kiranmayi, "HOMER Based Optimization of Solar-Wind-Diesel Hybrid System for Electrification in a Rural Village," in *2018 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, 4-6 Jan. 2018 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCCI.2018.8441517.
- [37] C. E. Lin, B. C. Phan, and Y. C. Lai, "Optimal Design of Hybrid Renewable Energy System Using HOMER: A Case Study in the Philippines," in *2019 SoutheastCon*, 11-14 April 2019 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SoutheastCon42311.2019.9020552.
- [38] N. Saiprasad *et al.*, "Comparative Study of Optimization of HRES using HOMER and iHOGA Software," 2018. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/841cc5d0a8de98ab80f1709b2e28de8d5dea767a>.
- [39] M. Dharma and D. Rinaldy, "Optimization Electricity Supply for Thousand Island Jakarta Province by Using Hybrid Photovoltaic-Wind Turbine-Diesel Generator-Crude Palm Oil (CPO) Power Plant-Battery System," *Journal of*

- Physics: Conference Series*, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012035.
- [40] J. C. León Gómez, S. E. De León Aldaco, and J. Aguayo Alquicira, "A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques," *Eng*, vol. 4, no. 2, pp. 1446-1467, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-4117/4/2/84>.
- [41] S. I. Abba *et al.*, "Emerging Harris Hawks Optimization based load demand forecasting and optimal sizing of stand-alone hybrid renewable energy systems— A case study of Kano and Abuja, Nigeria," *Results in Engineering*, vol. 12, p. 100260, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100260>.
- [42] R. Singh and R. C. Bansal, "Optimization of an Autonomous Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 399-409, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2867626.
- [43] A. M. K. See, K. Mehrazamir, S. Rezania, N. Rahimi, H. N. Afrouzi, and A. Hassan, "Techno-economic analysis of an off-grid hybrid system for a remote island in Malaysia: Malawali island, Sabah," *Renewable and Sustainable Energy Transition*, vol. 2, p. 100040, 2022/08/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rset.2022.100040>.
- [44] A. Sari *et al.*, "New optimized configuration for a hybrid PV/diesel/battery system based on coyote optimization algorithm: A case study for Hotan county," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 15480-15492, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.059>.
- [45] A. Kwangkaew, T. Racharak, and C. Charoenlarnnoppa, "Toward Forecast Techniques in Optimal Sizing of Energy Storage System with Volatile Energy Sources for Hybrid Renewable Energy System," in *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, 23-26 Nov. 2020 2020, pp. 390-395, doi: 10.1109/SGES51519.2020.00075.
- [46] F. J. G. Gonzalez, I. V. Salazar, and A. P. N. Gomez, "Comparison of Optimization Methods for Hybrid Renewable Energy Systems," in *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*, 14-17 Oct. 2019 2019, vol. I, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEV.2019.8920522.

- [47] O. Krishan and Sathans, "Design and Techno-Economic Analysis of a HRES in a Rural Village," *Procedia Computer Science*, vol. 125, pp. 321-328, 2018/01/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.043>.
- [48] K. A. Kavadias and T. Panagiotis, "Hybrid Renewable Energy Systems' Optimisation. A Review and Extended Comparison of the Most-Used Software Tools," *Energies*, 2021, doi: 10.3390/en14248268.
- [49] U. Akram, "Optimal Sizing of a Wind/Solar/Battery Hybrid Grid-connected Microgrid System," *researchgate*, October 2017. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320303113_Optimal_Sizing_of_a_WindSolarBattery_Hybrid_Grid-connected_Microgrid_System?enrichId=rgreq-ce09de4ac7fbb34728eee2138a66eb71-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMyMDMwMzExMztBUzo2NDQ1MzgyODg4MzY2MDhAMTUzMDY4MTMxMTAzNQ%3D%3D&el=1_x_2&e_sc=publicationCoverPdf.
- [50] S. Kamal Kant *et al.*, "Economic evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software—a case study of rural India," *International Journal of Low-carbon Technologies*, 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctab012.
- [51] J. Kartite and M. Cherkaoui, "Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 323-330, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.197>.
- [52] A. Mohapatra, S. Mohapatra, and S. N. Bora, "Hybrid Renewable Energy System for Real-Time Power Management Techniques - a Review," in *2020 IEEE International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC)*, 16-17 Dec. 2020 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/iSSSC50941.2020.9358810.
- [53] M. Bagheri, N. Shirzadi, E. Bazdar, and C. A. Kennedy, "Optimal planning of hybrid renewable energy infrastructure for urban sustainability: Green Vancouver," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 95, pp. 254-264, 2018/11/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.037>.

- [54] "HOMER(Hybrid Optimization of Multiple Electric Renewables) ", ed, 2020.
- [55] M. J. Manwell JF, Rogers AL *Wind Energy Explained*, Wiley, ed., New York, NY, 2002.
- [56] S. P. Stevens MJM, " The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering*," vol. 3, pp. 132-145, 1979.
- [57] T. S. Brett AC, "The autocorrelation of hourly wind speed observations, *Journal of Applied Meteorology*," vol. 30, pp. 823-833, 1991.
- [58] [Online]. Available: <https://mexico.pueblosamerica.com/i/el-arca-4/>.
- [59] I. Fatih and K. Orhan, "The Determination of Load Profiles and Power Consumptions of Home Appliances," *Energies*, 2018, doi: 10.3390/en11030607.
- [60] A. Barbón, C. Bayón-Cueli, L. Bayón, and V. Carreira-Fontao, "A methodology for an optimal design of ground-mounted photovoltaic power plants," *Applied Energy*, vol. 314, p. 118881, 2022/05/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118881>.
- [61] A. E. Cueva Urgilez, "Diseño de sistemas híbridos de energías renovables usando algoritmos de optimización," 2019. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54744>.
- [62] VictronEnergy, "MPPT RS SmartSolar aislado," ed, 2023.
- [63] M. M. WELL, "3000W True Sine Wave DC-AC Inverter," ed, 2011.