



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

**EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA
EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS
UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR:

Jhoao Alexander Rea Tonato

TUTOR:

Ing. M.Sc. Jiménez Jiménez Diego Leonardo

LATACUNGA, AGOSTO 2024



DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Rea Tonato Jhoao Alexander declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **“EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS”**, siendo el Ing. MSc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Rea Tonato Jhoao Alexander
C.C: 0250141660



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título: “EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS”, de Rea Tonato Jhoao Alexander, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 20 de agosto del 2024

El Tutor
Firma

Ing. MSc. Jiménez Jiménez Diego Leonardo

C.C: 0503493702



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Rea Tonato Jhoao Alexander con el título de Proyecto de titulación: **“EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS”** ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 20 de agosto del 2024

Para constancia firman:

Lector 1 (Presidente)
Ing. MSc. Rueda Flores Walter Paúl
CC: 0503689895

Lector 2
Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván
CC: 0503287864

Lector 3
Ing. MSc. Mullo Pallo Mauricio Eduardo
CC: 0503755183

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme vivir y culminar con éxito esta etapa de mi vida. A mi tutor el Ing. MSc. Diego Jiménez por su guía y consejo a lo largo de este proyecto de investigación. A la Universidad Técnica de Cotopaxi por brindarme las herramientas para desarrollarme en esta carrera.

A mi familia que con su amor, comprensión y apoyo me han dado la motivación para lograr esta meta.

Por último, agradezco a mis amigos David, Erik, Diego, Jefferson, Eduardo, María José y Sheyla quienes fueron la mejor compañía que pude tener en esta etapa y que hicieron de ella una experiencia inolvidable.

Jhoao Rea

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a mis amados padres Darío y Jérica por su inmenso amor y apoyo en toda esta etapa. A mis hermanos Andrés y Monserrathe que con su cariño me han dado motivación por seguir adelante.

A mis tíos Anita y Edgar y mis primos Anderson y Paul por abrirme sus puertas en un momento difícil y compartir conmigo sus valores que me han sido de gran utilidad en mi desarrollo personal y académico.

A mi primo Javier por los momentos de alegría y las conversaciones divertidas que han sido instantes de desconexión y felicidad.

A Emily, una persona especial en mi vida que con su confianza y apoyo supo escucharme en mis mejores y peores momentos.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo de investigación a la memoria de mi tía Daisy y mis abuelos Emma y Mario, donde se encuentren esto es por ustedes.

Jhaoa Rea

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

TITULO: “EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS”

Autor: Rea Tonato Jhoao Alexander

RESUMEN

En este trabajo se aborda el despacho económico de una microrred aislada, usando generación distribuida que se compone de fuentes de energía renovable no convencional ERNC en conjunto con un generador diésel y un banco de baterías BESS. Se usaron escenarios de entrada aleatorios donde a partir de datos reales de un año se generaron series sintéticas de la radiación solar y velocidad del viento usando el método de Monte Carlo. Se generaron 3 escenarios, uno donde las series generadas son menores a la media, el segundo donde las series se ajustan a la media, y el ultimo donde las series son mayores a la media. Los datos de demanda y meteorológicos son registros reales de la ciudad de Latacunga, Ecuador. Se desarrolló un modelo de optimización lineal entero mixto MILP, donde se expresó al comportamiento no lineal del generador diésel de forma lineal mediante la linealización por tramos. Se resolvió el despacho económico para 24 horas, donde en el primer escenario el aporte al abastecimiento de la demanda es de 32% de potencia solar, 18% del BESS, <1% de la potencia eólica y 50% del generador diésel, en el segundo escenario se tiene 33% de potencia solar, 21% del BESS, 4% de potencia eólica y 42% del generador diésel, por el generador diésel. Finalmente, en el escenario 3 la demanda, se suple en un 58% por potencia solar, 30% por el BESS, 5% de potencia eólica y 30% del generador diésel.

Palabras Clave: Despacho económico, problema de optimización lineal entero mixto, escenarios de entrada aleatorios, energía renovable no convencional.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

THEME: “OPTIMIZATION MODEL EVALUATION FOR THE ECONOMIC DISPATCH OF ISOLATED MICROGRID USING RANDOM INPUT SCENARIOS”

Author: Rea Tonato Jhoao Alexander

ABSTRACT

This work addresses the economic dispatch of an isolated microgrid, using distributed generation that is composed of non-conventional renewable energy sources NCRE in combination with a diesel generator and a BESS battery storage. Random input scenarios were used where, based on real data from one-year, synthetic series of solar radiation and wind speed were generated using the Monte Carlo method. Three scenarios were generated, one where the generated series are less than the average, the second where the series are adjusted to the average, and the last where the series are greater than the average. The demand and meteorological data are real records from the city of Latacunga, Ecuador. A mixed integer linear optimization model MILP was developed, where the nonlinear behavior of the diesel generator was expressed linearly through piecewise linearization. The economic dispatch was resolved for 24 hours, where in the first scenario the contribution to supplying the demand is 32% of solar power, 18% of the BESS, <1% of the wind power and 50% of the diesel generator, in the Second scenario, there is 33% solar power, 21% BESS, 4% wind power and 42% diesel generator. Finally, in scenario 3, the demand is supplied by 58% by solar power, 30% by the BESS, 5% by wind power and 30% by the diesel generator.

Keywords: Economic dispatch, mixed integer linear optimization problem, random input scenarios, non-conventional renewable energy

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto de investigación cuyo título versa: **“EVALUACIÓN DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DESPACHO ECONÓMICO DE MICRO REDES AISLADAS UTILIZANDO ESCENARIOS DE ENTRADA ALEATORIOS”** presentado por: **Jhoao Alexander Rea Tonato** egresado de la Carrera de: **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 21 de agosto del 2024

Atentamente,



Msc. Erika Cecilia Borja Salazar
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC
CI: 0502161094



CENTRO
DE IDIOMAS

INDICE DE CONTENIDO

1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
1. INTRODUCCIÓN	2
2.1 Situación Problemática	3
2.2 Formulación del Problema	3
2.3 Objeto y Campo de Acción	3
2.3.1 Objeto de Investigación	3
2.3.2 Campo de Acción	3
2.4 Beneficiarios	3
2.4.1 Directo.....	3
2.4.2 Indirecto	4
2.5 Justificación	4
2.6 Objetivos	4
2.6.1 General.....	4
2.6.2 Específicos	4
2.6.3 Sistema de Actividades	5
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
3.1 Antecedentes	6
3.2 Microrredes eléctricas aisladas.....	7
3.2.1 Sistemas híbridos de generación eléctrica	7
3.2.2 Generación solar fotovoltaica.	7
3.2.2.1 Radiación Solar	8
3.2.3 Generación eólica.....	8
3.2.4 Generador diésel	9
3.2.5 Sistemas de almacenamiento de energía	10
3.3 Despacho Económico.....	10

3.3.1 Solver de optimización Fico Xpress	11
3.3.2 Programación lineal entera mixta	11
3.3.3 Linealización por tramos de unidades de generación térmica	11
3.4 El método de Montecarlo	13
3.4.1 Función de densidad de probabilidad Normal	14
3.4.2 Raíz del error medio cuadrático normalizado NMRSE	15
3.5 Software de programación Matlab	16
3.5.1 Método de Montecarlo con función de densidad de probabilidad normal en Matlab.....	16
3.5.1 RMSE en Matlab.....	16
3. HIPÓTESIS	16
4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	17
4.1 Generación de los Escenarios de Entrada Aleatorios.....	17
4.1.1 Algoritmos de Generación de Series Sintéticas	17
4.1.2 Series Sintéticas Generadas y Conversión a Potencia de la Radiación Solar	20
4.1.3 Series Sintéticas Generadas y Conversión a Potencia del Viento Sintética Generada.....	21
4.2 Modelo de Optimización Lineal Entero Mixto	23
4.2.1 Función Objetivo.....	23
4.2.2 Restricciones	24
4.2.2.1 Restricciones del generador diésel.....	24
4.2.2.2 Restricciones de Operación.....	25
4.2.2.3 Restricciones del Banco de Baterías (BESS).....	26
4.3 Resolución del despacho económico	29
4.3.1 Demanda Eléctrica	30
4.3.2 Parámetros del BESS	31
4.3.3 Parámetros del generador diésel.....	32
4.3.3 Parámetros económicos.....	32
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	33

5.1 Resultados del despacho para el escenario de recursos energéticos bajos.....	34
5.2 Resultados del despacho para el escenario de recurso energéticos medios	37
5.3 Resultados del despacho para el escenario de recursos energéticos altos.....	41
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
6.1 Conclusiones	44
6.2 Recomendaciones.....	45
7. REFERENCIAS.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de sistema híbrido de generación eléctrica.	7
Figura 2. Esquema de un sistema fotovoltaico off-grid [9].	8
Figura 3. Partes básicas de un aerogenerador [12].	9
Figura 4. Generador diésel [14].	9
Figura 5. Función no lineal de costos característica [19].	12
Figura 6. Función de costos linealizada por tramos [19].	12
Figura 7. Ejemplo de función de densidad de probabilidad normal o gaussiana.	14
Figura 8. Etapas para la resolución del despacho económico.	17
Figura 9. Proceso de la generación de series sintéticas solares y su conversión a potencia solar.	18
Figura 10. Proceso de la generación de series sintéticas eólicas y su conversión a potencia eólica.	19
Figura 11. Series sintéticas solares generadas para los tres escenarios.	20
Figura 12. Series sintéticas eólicas generadas para los tres escenarios	22
Figura 13. Linealización por tramos de la función del consumo de combustible del generador diésel [27].	24
Figura 14. Proceso para la resolución del despacho económico.	30
Figura 15. Demanda eléctrica de la microrred.	31
Figura 16. Diagrama resumen del modelo de optimización.	33
Figura 17. Resultados del modelo para el caso de recursos menores.	34
Figura 18. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de bajos recursos energéticos.	35
Figura 19. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de bajos recursos energéticos.	36
Figura 20. Estado de carga del BESS para el escenario de bajos recursos energéticos.	36
Figura 21. Resultados del modelo para el caso de recursos medios.	38
Figura 22. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de recursos energéticos medios.	39
Figura 23. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de recursos energéticos medios.	39
Figura 24. Estado de carga del BESS para el escenario de recursos energéticos medios.	40
Figura 25. Resultados del modelo para el caso de mayores recursos.	41
Figura 26. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de recursos energéticos altos.	42

Figura 27. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de recursos energéticos altos.	43
Figura 28. Estado de carga del BESS para el escenario de recursos energéticos altos.	43

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistema de Tareas del Plan de Titulación.	5
Tabla 2. Parámetros correspondientes al BESS.	32
Tabla 3. Cantidad de diésel consumida dada la potencia producida por el generador diésel.	32
Tabla 4. Costos del sistema.	33
Tabla 5. Costos totales para la resolución del despacho económico en el primer escenario.	37
Tabla 6. Costos totales para la resolución del despacho económico en el segundo escenario.	40
Tabla 7. Costos totales para la resolución del despacho económico en el tercer escenario.	44

1. INFORMACIÓN GENERAL

Tema del proyecto: Evaluación de un modelo de optimización para el despacho económico de microrredes aisladas utilizando escenarios de entrada aleatorios.

Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

Fecha de inicio: ABRIL 2024

Fecha de finalización: AGOSTO 2024

Lugar de ejecución: Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia: Carrera de Electricidad

Proyecto de investigación vinculado: Desarrollo de sistemas eléctricos eficientes a nivel residencial, comercial e industrial

Equipo de Trabajo:

Ing. Msc. Jiménez Diego

Sr. Rea Tonato Jhoao Alexander

Área de Conocimiento:

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Educación el área de conocimiento se encuentra bajo 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación:

Energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera:

Control y optimización en el uso de la energía del sector industrial, comercial y residencial.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico en la actualidad debe ser confiable y estable, es decir mantener su funcionamiento de manera normal y continua, sin embargo, es necesario un factor a priorizar es el ahorro monetario al momento de la operación para abastecer la demanda del sistema, es así que, para lograr un manejo óptimo de los recursos energéticos con la finalidad de abastecer la demanda energética de un sistema, considerando principalmente el apartado económico, se debe desarrollar un despacho económico. La finalidad de un despacho económico es hallar la forma óptima y con el menor costo de operación posible para abastecer una demanda energética manejando las unidades de generación de energía disponibles y respetando las restricciones que tenga el sistema [1].

La combinación de tecnologías de generación que intervienen para suplir la demanda en tiempos recientes ha adquirido un enfoque en la utilización de energías renovables no convencional ERNC, debido a que promover el uso y la transición a ERNC se presenta como una gran opción por su aporte a la conservación ambiental y sus costos que en la actualidad compiten con las alternativas convencionales de generación de energía. Sin embargo, hay que considerar que, si bien las ERNC son una gran opción frente a los medios de generación convencionales, estos tipos de energías provienen de elementos de la naturaleza como puede ser la radiación solar, cuyo comportamiento es de tipo estocástico, es decir son variables con el tiempo [2], [3].

En este contexto en el presente trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de optimización del despacho económico de microrredes aisladas que incorporando el uso de ERNC junto con una unidad de generación térmica como lo es el generador diésel, se desarrollaron dos algoritmos que haciendo uso del método de Montecarlo para la interpretación de la aleatoriedad de la radiación solar y la velocidad del viento, ambas fuentes de ERNC, el objetivo de utilizar dicho método es emular el comportamiento futuro de la radiación solar y la velocidad del viento a través de la generación de series sintéticas de dichos elementos. Las series sintéticas generadas servirán como predicciones que se utilizan como escenarios de entrada aleatorios en el despacho económico.

Para la resolución del despacho económico el tipo de modelo de optimización utilizado es lineal entero mixto MILP, para ello fue necesario considerar de la unidad de generación térmica la adaptación la función de costos de una representación no lineal a una lineal usando el concepto de la linealización por tramos. El modelo planteado se ejecutó en tres escenarios distintos que buscan simular casos en los que los recursos energéticos son escasos, se comportan de manera promedio y abundan. En última instancia las respuestas arrojadas son analizadas para corroborar si los resultados del despacho económico son óptimos.

2.1 Situación Problemática

La continua evolución de la tecnología y la transición en la generación de energía eléctrica ha tomado un especial enfoque en las fuentes de energía amigables con el medio ambiente, las llamadas energías renovables no convencionales, estas mismas gozan de varios aspectos positivos como la accesibilidad global de estas, sin embargo, presentan un problema el cual es el hecho que no son fáciles de tratar, no se puede predecir de manera arbitraria el comportamiento de este tipo de fuentes de energía. Esto crea incertidumbre al momento de contemplar el uso del recurso en el desarrollo de modelos de optimización de la operación de los sistemas, ya que se debe contar con un correcto tratamiento de la aleatoriedad de las fuentes de ERNC.

2.2 Formulación del Problema

La necesidad de tratar la aleatoriedad de las fuentes de ERNC para poder optimizar la operación de sistemas eléctricos que contemplan el uso de dichas fuentes en el abastecimiento de la demanda.

2.3 Objeto y Campo de Acción

2.3.1 Objeto de Investigación

Aleatoriedad de las fuentes de ERNC, radiación solar y velocidad del viento.

2.3.2 Campo de Acción

Optimización de sistemas eléctricos con penetración de ERNC

2.4 Beneficiarios

El desarrollo de un modelo de optimización del uso de recursos energéticos considerando la aplicación de energías renovables no convencionales basado en programación lineal entera mixta, supone la oportunidad de estudiar el problema de despacho económico considerando aspectos como la aleatoriedad de las fuentes de ERNC con el fin de poder aprovechar los recursos energéticos al máximo.

2.4.1 Directo

Habitantes y propietarios de microrredes aisladas que busquen suplir su demanda energética utilizando fuentes de energía renovable no convencional de manera óptima.

2.4.2 Indirecto

Estudiantes e investigadores que buscan estudiar el desarrollo modelos de optimización de sistemas eléctricos con penetración de ERNC.

2.5 Justificación

Las energías renovables no convencionales ERNC, en particular la energía solar fotovoltaica y la energía eólica, son recursos accesibles para una amplia gama de aplicaciones, incluyendo su integración en microrredes aisladas. Sin embargo, una de las principales características de estas fuentes es su naturaleza aleatoria, lo que introduce incertidumbre en los sistemas que las utilizan. Por ello, es esencial abordar y gestionar esta aleatoriedad adecuadamente.

En cuanto al desarrollo de modelos de optimización, se pueden utilizar tanto técnicas de programación lineal como no lineal. Mientras que los modelos no lineales pueden presentar el riesgo de converger a mínimos locales dependiendo de su convexidad, los modelos lineales garantizan siempre la obtención del mínimo global, eliminando este riesgo. Además, los modelos lineales requieren menos recursos computacionales, lo que permite una resolución más rápida y eficiente.

En este contexto, el desarrollo de un modelo de optimización utilizando programación lineal entera mixta (MILP) para el despacho económico en microrredes aisladas que emplean ERNC se presenta como un estudio de gran relevancia. Este enfoque es aún más significativo si se incluye el tratamiento de la aleatoriedad de las fuentes ERNC, lo que permite una planificación más robusta y confiable del sistema energético.

2.6 Objetivos

2.6.1 General

Evaluar un problema de despacho económico mediante el uso de un solver de optimización para abastecer la demanda eléctrica de una microrred aislada incluyendo escenarios de entrada aleatorios.

2.6.2 Específicos

- Generar series sintéticas para los datos de entrada del despacho económico mediante el método de Montecarlo.
- Modelar el problema de optimización lineal entero mixto considerando los datos de entrada aleatorios
- Simular el problema de optimización para tres escenarios de estudio relacionados con los recursos energéticos

2.6.3 Sistema de Actividades

Tabla 1. Sistema de Tareas del Plan de Titulación.

Objetivos Específicos	Actividades	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Generar series sintéticas para los datos de entrada del despacho económico mediante el método de Montecarlo.	Tratamiento probabilístico de los datos reales obtenidos de la radiación solar y velocidad del viento.	Cálculo de la media, desviación estándar y NRMSE de los datos reales.	Hojas de cálculo en Excel.
	Generación de series sintéticas de la radiación solar y velocidad del viento usando el método de Montecarlo	Series sintéticas validadas que se ajusten al comportamiento real de los recursos.	Creación de un algoritmo usando programación en Matlab.
Modelar el problema de optimización lineal entero mixto considerando los datos de entrada aleatorios	Modelado matemático de la operación del sistema para el óptimo abastecimiento de la demanda, minimizando costos.	Lograr una correcta función objetivo y restricciones para el modelo.	Métodos matemáticos para representar la operación de sistemas eléctricos.
	Linealización por tramos de la función de consumo de combustible del generador diésel.	Realizar una correcta representación lineal del comportamiento no lineal del generador diésel	Adaptación de la ecuación de la recta en la linealización por tramos.
Simular el problema de optimización para tres escenarios de estudio de recursos energéticos.	Resolución el despacho económico en los escenarios de menores, medios y mayores recursos energéticos.	Respuestas optimas en los escenarios planteados.	Programación en Matlab y solver de optimización Fico Xpress

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En esta sección se va a recopilar la teoría necesaria que se utilizó para desarrollar el trabajo de investigación. Se presentan métodos, definiciones y fórmulas para la generación de series sintéticas de la radiación solar y la velocidad del viento, y para el modelado matemático del despacho económico considerando energías renovables no convencionales y programación lineal entera mixta.

3.1 Antecedentes

Varios autores han planteado estudios que destacan la importancia de integrar energías renovables y considerar la incertidumbre y variabilidad de estas fuentes en el problema del despacho económico. En el trabajo realizado por [4], se desarrolló un modelo de optimización que incorpora restricciones medioambientales. Este estudio utilizó unidades generadoras de energías renovables, como aerogeneradores y paneles fotovoltaicos, y demostró que es posible reducir significativamente la emisión de contaminantes. Los resultados corroboran la importancia ambiental de incluir ERNC en sistemas de generación distribuida, subrayando la necesidad de n la planificación y operación de sistemas eléctricos con ERNC.

Por otro lado, en [5], se desarrollaron dos modelos de previsión estocástica a corto plazo de la radiación solar basados en datos históricos reales. Estos modelos transformaron las predicciones en potencia solar, y al compararlas con métodos estándar de previsión, se obtuvieron resultados precisos y óptimos. Este enfoque permite mejorar la precisión de las predicciones de generación solar, lo cual es crucial para la integración efectiva de la energía solar en sistemas eléctricos y para la planificación de la operación.

Mientras tanto, el trabajo realizado por [13] se centra en el despacho económico a muy corto plazo, enfrentando la incertidumbre inherente a la energía eólica. Este estudio desarrolla métodos para generar escenarios de entrada eólicos que pueden ser utilizados en el despacho económico. Mediante la simulación de estos escenarios, se lograron resultados válidos que demuestran la eficacia del modelo para manejar la variabilidad de la generación eólica, lo que es fundamental para garantizar la estabilidad y eficiencia operativa de las microrredes que incorporan esta fuente de energía.

Estos estudios reafirman tanto directa como indirectamente que se requiere el desarrollo de modelos de optimización que se enfoquen en la operación óptima de sistemas híbridos con penetración de ERNC y que contemplen el comportamiento aleatorio de este tipo de fuentes. Las microrredes aisladas vienen a ser un tipo sistema con características que requieren de un modelo de optimización en este caso de corto plazo.

2.2 Microrredes eléctricas aisladas

Una microrred aislada es un sistema eléctrico de baja tensión el cual no está conectado a la red, y que está compuesto por recursos energéticos de distribuidos, sistemas de almacenamiento de energía y cargas controlables. La demanda de este tipo de sistemas suele estar en el orden de menos de 50 kW y su independencia de la red puede deberse a razones de ubicación o al deseo de auto sustentación eléctrica [6].

3.2.1 Sistemas híbridos de generación eléctrica

Un sistema híbrido de generación eléctrica es aquel que se compone de diferentes tipos de tecnologías de generación de energía, como lo pueden ser las tradicionales y energías renovables, así como también puede incluir sistemas de almacenamiento de energía como, por ejemplo, las baterías [7].

Los sistemas híbridos pueden ser desde grandes redes hasta redes pequeñas, como por ejemplo las microrredes aisladas, en la Figura 1 se ejemplifica un sistema híbrido uni-nodal, el cual consta de generación solar fotovoltaica, eólica y térmica, además de un sistema de almacenamiento. Esta composición es la misma usada para el presente trabajo de investigación.

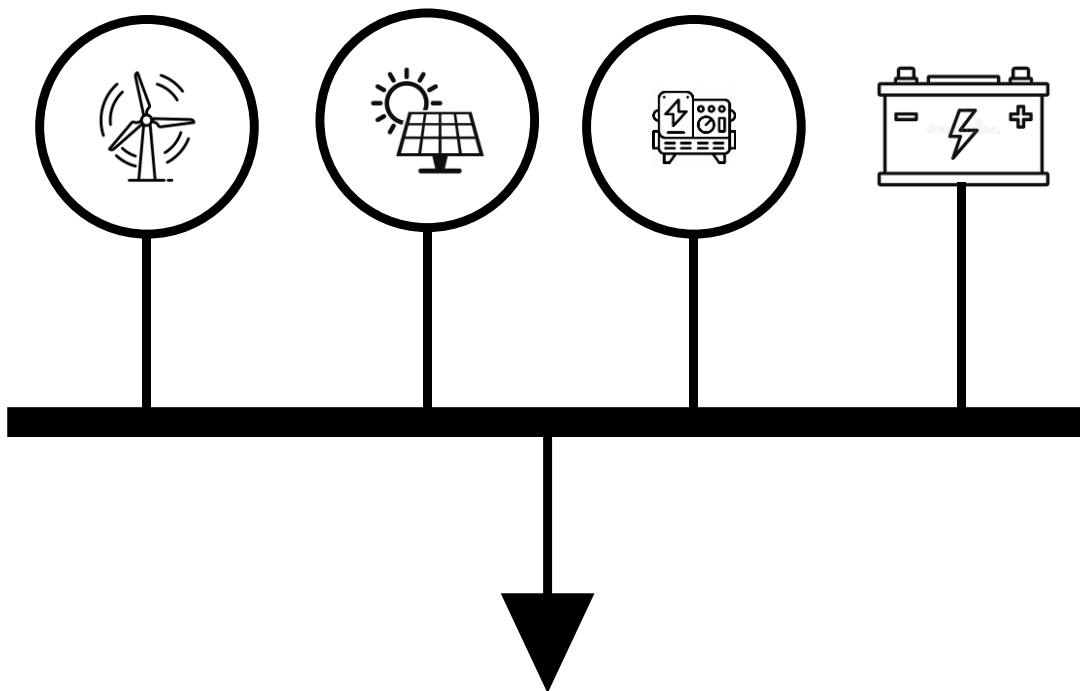


Figura 1. Ejemplo de sistema híbrido de generación eléctrica.

3.2.2 Generación solar fotovoltaica.

Este tipo de generación se clasifica dentro de las energías renovables no convencionales, siendo esta un tipo de fuente de energía limpia. En la Figura 2 se puede evidenciar un sistema de generación

fotovoltaico aislado de la red, el principio de la energía solar fotovoltaica es el aprovechamiento de la radiación solar para transformar este recurso en energía eléctrica mediante paneles solares fotovoltaicos [8].

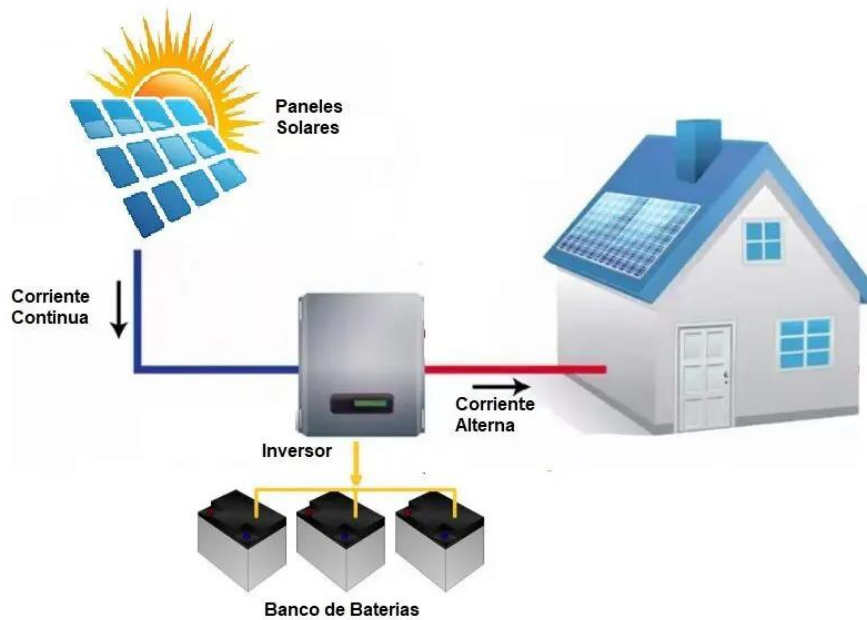


Figura 2. Esquema de un sistema fotovoltaico off-grid [9].

3.2.2.1 Radiación Solar

La radiación solar es la energía emitida por el Sol que llega hasta la Tierra. En su trayecto hacia la superficie terrestre, una parte de esta radiación es reflejada por las nubes y otra es absorbida por la atmósfera. Además, una fracción de la radiación solar directa es dispersada debido a las densas capas atmosféricas y nubosas, creando así la radiación difusa. Parte de esta radiación difusa también es reflejada por el suelo. La combinación de la radiación solar difusa y directa que finalmente alcanza la superficie terrestre se conoce como Radiación Global [10].

3.2.3 Generación eólica

El viento es el recurso aprovechado para la generación eólica, una fuente de energía renovable no convencional limpia que con el uso de turbinas en aerogeneradores transforman la velocidad del viento para transformarla en energía eléctrica, las partes básicas de un aerogenerador son mostradas en la Figura 3. La generación eólica aporta soluciones en el abastecimiento de demandas aisladas y demandas conectadas a la red [11].

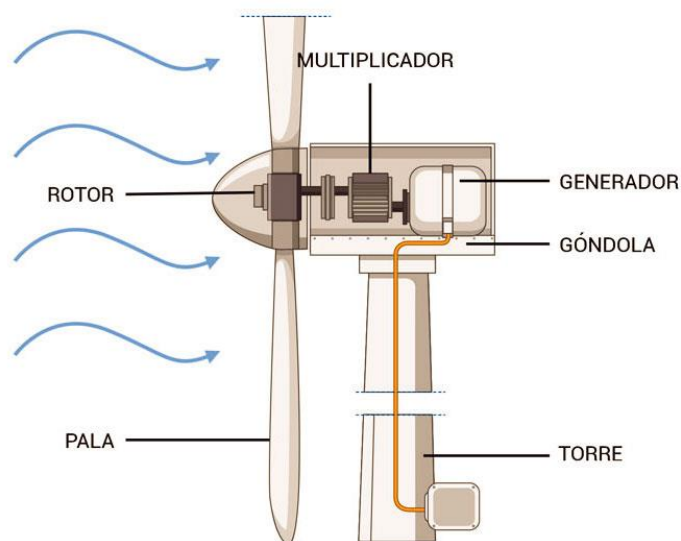


Figura 3. Partes básicas de un aerogenerador [12].

3.2.4 Generador diésel

Este equipo es de generación de tipo térmica del cual se puede observar un ejemplo en la Figura 4, a través de un motor de combustión interna que comúnmente está montado sobre un bastidor acciona un generador eléctrico que puede ser síncrono o asíncrono, este tipo de generadores suelen ser más económicos que otros como lo pueden ser los de gas o gasolina, además son más robustos y con tiempos más prolongados de funcionamiento, lo que vuelve a este equipo una gran opción para ser aplicada en microrredes aisladas [13].



Figura 4. Generador diésel [14].

3.2.5 Sistemas de almacenamiento de energía

Los sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías (en inglés Battery Energy Storage System BESS) pueden ser aplicados en redes eléctricas de distribución y transmisión, las baterías de tipo ion litio son comunes en este ámbito, al cargar energía los átomos de litio desprenden un electrón que llega al ánodo de carbono y viceversa en el caso de descarga. En el contexto del presente trabajo de investigación son pieza clave al permitir el almacenamiento de energía en periodos de menor demanda, para luego utilizar dicha energía almacenada y descargarla en los periodos de mayor demanda [15].

3.3 Despacho Económico

Corresponde a un problema de optimización de corto plazo, es decir que el periodo máximo de análisis es de 1 semana. El objetivo principal al resolver el problema del despacho económico es la operación de las distintas unidades de generación de un sistema al menor costo posible. El continuo avance en la inserción de tecnologías de generación de fuentes alternativas de generación, ha arrojado que el despacho económico se pueda realizar considerando sistemas híbridos, trabajo el cual se aborda en esta investigación [16].

El despacho económico es un modelo de optimización y como tal consta de elementos primordiales para su desarrollo los cuales son:

- **Parámetros:** son datos cuyos valores se conocen y son las entradas de los diferentes modelos, estos dependen de los datos de operación del sistema y dentro de los parámetros más importantes los costos de operación juegan un rol imprescindible en el caso del despacho económico.
- **Variables:** Las variables son aquellas que serán alteradas con el fin de establecer el óptimo valor de cada una que satisfaga lo especificado al modelar el sistema, estas pueden ser de 3 tipos principalmente, discretas, continuas y binarias.
- **Función Objetivo:** Parte fundamental de los modelos de optimización y la que debe ser modelada con la mayor precisión posible, de esta parte la lógica por la que se tomaran valores de las variables. Se pueden tener dos enfoques posibles en la función objetivo la minimización y la maximización.
- **Restricciones:** Estas corresponden a la modelación matemática de la operación del sistema establecido en el modelo de optimización, en el caso del despacho económico, se incluyen límites operativos y lógicas de funcionamiento.

3.3.1 Solver de optimización Fico Xpress

Para el desarrollo de problemas de optimización como lo es el despacho económico se hace uso de un solver de optimización que es el que se encarga de resolver el problema, uno de ellos es FICO Xpress Optimization Suite el cual se adapta fácilmente a varios tipos de problemas de optimización. El solucionador principal de esta suite es FICO Xpress Optimizer, que combina facilidad de uso con velocidad y flexibilidad. Permite la interconexión mediante la línea de comandos Console Optimizer, o usando la aplicación de interfaz gráfica.IVE, su biblioteca puede ser usada desde las principales plataformas de programación, permite al usuario manejar los problemas cada vez más complejos que surgen en la industria y la academia [17].

3.3.2 Programación lineal entera mixta

Para la resolución de modelos de optimización se pueden establecer técnicas de programación, la programación lineal entera mixta (Mixed Integer Lineal Porgraming MILP) por su nombre comprende modelos matemáticos lineales que incluyen tanto variables enteras como continuas. Puesto que, las técnicas de optimización no lineales pueden arrojar resultados cuya solución no es la global, el uso de la técnica MILP presenta una opción viable, para ello suele ser necesario expresar de forma lineal los comportamientos no lineales de los modelos [18].

3.3.3 Linealización por tramos de unidades de generación térmica

Debido a que el comportamiento de las unidades de generación térmica se expresa normalmente de forma no lineal, para el uso de técnicas de programación lineal surge la necesidad de expresar el comportamiento de las unidades de generación térmica de forma lineal. Para ello surge la representación lineal mediante la linealización por tramos, en unidades de generación térmica grandes se suele optar por linealizar la función de costos de las unidades de generación térmica [19].

Partiendo de la función de costos no lineal de una unidad de generación térmica como la que se muestra en la ecuación (1).

$$F_i(P_{gen_i}) = a + b \cdot P_{gen_i} + c \cdot P_{gen_i}^2 \quad (1)$$

Donde:

a : representan los costos fijos de una unidad de generación térmica

b, c : representan los costos variables de una unidad de generación térmica

P_{gen_i} : representan la potencia generada por una unidad de generación térmica

Gráficamente se puede ejemplificar mediante la Figura 5 a una función de costos característica como la expresada en la ecuación (1).

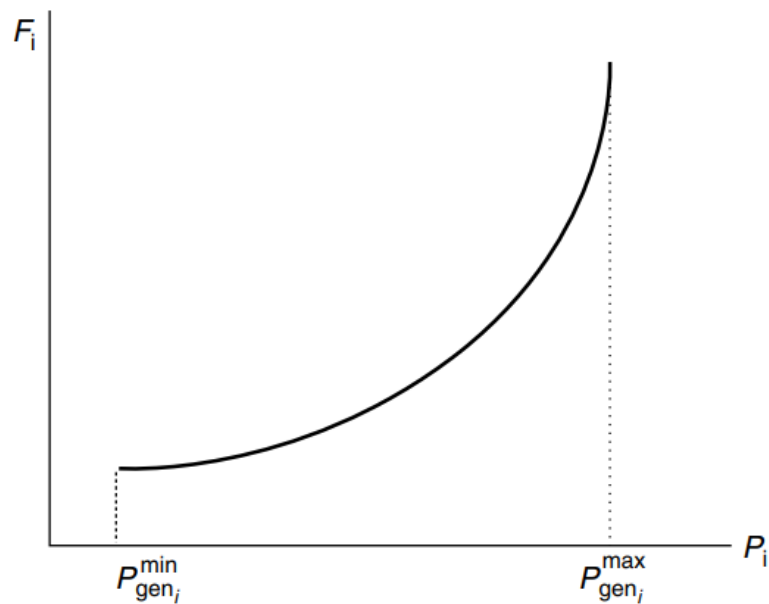


Figura 5. Función no lineal de costos característica [19].

La curva característica de la función de costos se divide por segmentos que son líneas que buscan parecerse y representar lo más fielmente posible el comportamiento de la curva, como se muestra en la Figura 6.

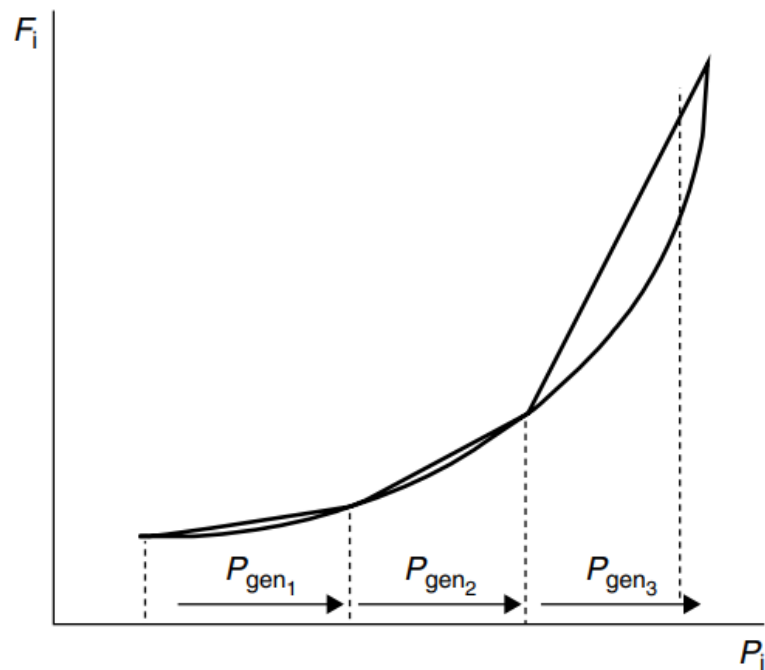


Figura 6. Función de costos linealizada por tramos [19].

Surge la ecuación (2) para representar lo realizado gráficamente siendo esta la representación lineal de la función de costos no lineal donde se tienen tres tramos k linealizados.

$$F_i(P_{gen_i}) = P_{gen_i}^{min} + s_{i1} \cdot P_{gen_{i1}} + s_{i2} \cdot P_{gen_{i2}} + s_{i3} \cdot P_{gen_{i3}} \quad (2)$$

Donde:

P_{gen_i} : representan la potencia generada por una unidad de generación térmica

$P_{gen_i}^{min}$: representan la potencia generada mínima por una unidad de generación térmica

$P_{gen_{ik}}$: representan la potencia generada por una unidad de generación térmica cuando esta se encuentra en el tramo k de linealización

s_{ik} : representan la pendiente de la recta de potencia generada por una unidad de generación térmica cuando esta se encuentra en el tramo k de linealización

En la ecuación (3) se muestra el cálculo de la pendiente s_{ik} que se usa en la ecuación (2):

$$s_{ik} = \frac{F_i(P_{gen_{i,k+1}}) - F_i(P_{gen_{i,k}})}{P_{gen_{i,k+1}} - P_{gen_{i,k}}} \quad (3)$$

Donde:

s_{ik} : representan la pendiente de la recta de potencia generada por una unidad de generación térmica cuando esta se encuentra en el tramo k de linealización

$P_{gen_{ik}}$: representan la potencia generada por una unidad de generación térmica cuando esta se encuentra en el tramo k de linealización.

3.4 El método de Montecarlo

En el contexto del presente trabajo de investigación el método de Montecarlo se basa en el uso de una considerable cantidad de datos reales de parámetros de interés, los cuales se caracterizan probabilísticamente para que mediante el uso de una función de densidad de probabilidad se generen aleatoriamente datos nuevos los cuales son aleatorios y varían en cada generación estos se ajustan a la función de densidad de probabilidad escogida para el parámetro que se especifique [20].

La generación de series sintéticas de fenómenos naturales para ser usadas como escenarios de entrada aleatorios, ha sido comprobada en la literatura como una opción viable. Como en [21] donde se logró evaluar la generación de series sintéticas para la predicción del índice de precipitación estandarizado en sectores de Irán.

3.4.1 Función de densidad de probabilidad Normal

Se define como distribución de probabilidad a una función que establece a cada posible valor de x una probabilidad de ocurrencia. Una de las funciones de densidad de probabilidad de uso más frecuente es la conocida como normal o gaussiana, misma que posee la característica de ser simétrica con respecto a la media y con disminución veloz hacia cero en ambos extremos, lo que establece que la probabilidad de observar valores extremadamente altos o extremadamente bajos es baja [22].

La Figura 7 muestra gráficamente un ejemplo de la campana de gauss formada por la función de densidad de probabilidad normal, la cual considera una media de 0 y una desviación estándar de 1 para fines de ejemplificación grafica.

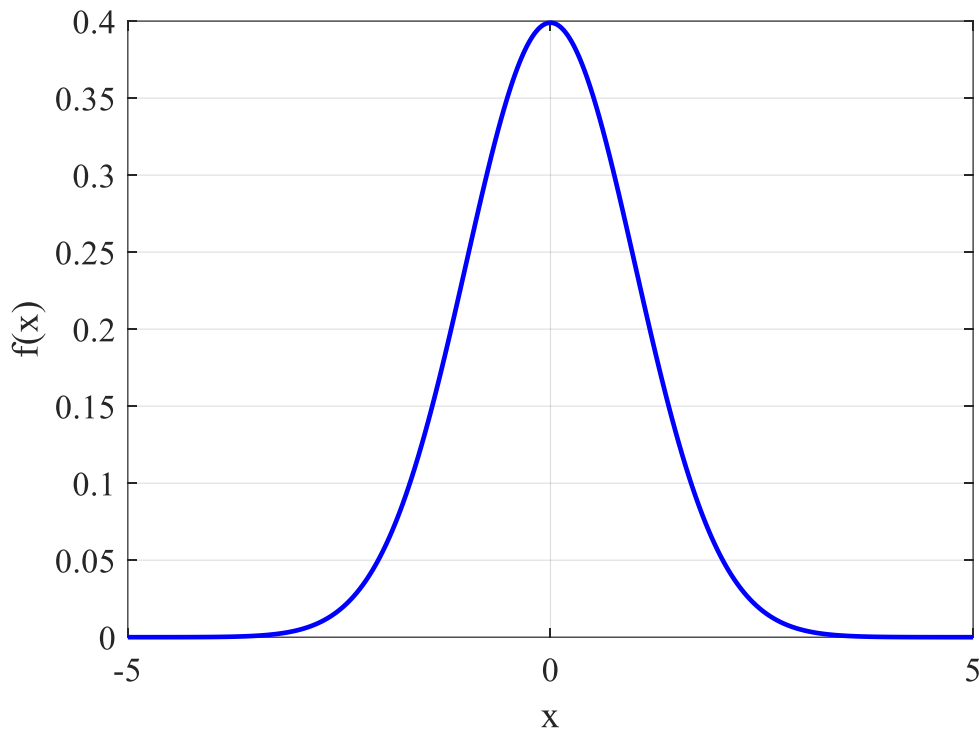


Figura 7. Ejemplo de función de densidad de probabilidad normal o gaussiana.

Por otro lado, la ecuación (4) corresponde a la expresión de la función de densidad de probabilidad normal o gaussiana:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

Donde:

$f(x)$: es la función de densidad de probabilidad

x : es variable de estudio de probabilidad

μ : es la media de la distribución

σ : representa la desviación estándar de la distribución

3.4.2 Raíz del error medio cuadrático normalizado NRMSE

El criterio de evaluación de las series sintéticas generadas es emplear la raíz del error medio cuadrático normalizado (en inglés Normalized Root Mean Square Error NRMSE). El uso del RMSE es admisible en casos con variables normalmente distribuidas y que las mismas tienen tendencia a producir errores normalmente distribuidos. Sin embargo, al normalizar el RMSE se tiene una idea más clara al ser el NRMSE expresado en porcentaje, este último ha sido usado como indicador del rendimiento de modelos de predicción [23], [24].

Para hallar el NRMSE es necesario en primera instancia hallar el RMSE, para el cálculo de este último se utiliza la ecuación (5):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (5)$$

Donde:

n : es el número de observaciones

y_i : es el valor observado

\hat{y}_i : es el valor estimado

Una vez se ha definido el cálculo del RMSE para normalizarlo se puede optar por principalmente dos caminos, en la ecuación (6) se muestra la normalización por rango para la obtención del NRMSE:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{y_{max} - y_{min}} \quad (6)$$

Donde:

y_{max} : es el valor máximo de las observaciones

y_{min} : es el valor mínimo de las observaciones

Por otra parte, en la ecuación (7) se muestra la normalización del RMSE usando la media para así obtener el NRMSE:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (7)$$

Donde:

y_{max} : es la media de las observaciones

3.5 Software de programación Matlab

MATLAB (Matrix Laboratory), desarrollado por MathWorks, es un software muy usado en ingeniería y ciencias. Destaca por su habilidad para manejar matrices, realizar cálculos numéricos complejos, implementar algoritmos y crear gráficos sofisticados. Ofrece un entorno interactivo y fácil de usar, con una amplia gama de funciones predefinidas que facilitan la resolución de problemas matemáticos y simulaciones. Su flexibilidad permite la integración con otros lenguajes de programación y herramientas, convirtiéndolo en una herramienta esencial para el análisis de datos, modelado y diseño de sistemas [25].

3.5.1 Método de Montecarlo con función de densidad de probabilidad normal en Matlab

La función *normrnd(mu,sigma)* de Matlab genera un número aleatorio de la distribución normal con el parámetro principal μ que representa la media de los datos y el parámetro de desviación estándar de los datos σ . La salida serán n números aleatorios normales devueltos como un valor de escalar o un arreglo de valores de escalar.

3.5.1 RMSE en Matlab

La función *rmse(F,A)* devuelve el error cuadrático medio (RMSE) entre la matriz prevista (pronosticada) F y la matriz real (observada) A . Para esta función es primordial considerar que F y A deben ser del mismo tamaño o tener tamaños compatibles. Para normalizar el error y obtener el NMRSE basta con realizar lo especificado en el punto 3.4.2 usando cualquiera de las dos formas de normalización del error.

3. HIPÓTESIS

Se logrará desarrollar y evaluar un modelo de optimización en tres casos de estudio planteados según en base a la disponibilidad de recursos, para resolver el despacho económico de una microrred aislada con penetración de ERNC, considerando la aleatoriedad de las fuentes de generación ERNC.

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La presente sección detalla el proceso llevado a cabo para la resolución del despacho económico, considerando como demanda energética una microrred aislada que está ubicada en la ciudad de Latacunga, Ecuador. Como fuentes de energía se establece el uso del potencial energético fotovoltaico y eólico con el aporte de un generador diésel.

En la Figura 8 se identifican las tres etapas que componen la metodología utilizada para el problema de despacho económico. En primera instancia se debe realizar la generación y entrada de los escenarios aleatorios, a continuación, se plantea el modelo de optimización lineal entero mixto y, para finalizar se procede con la resolución del despacho económico.

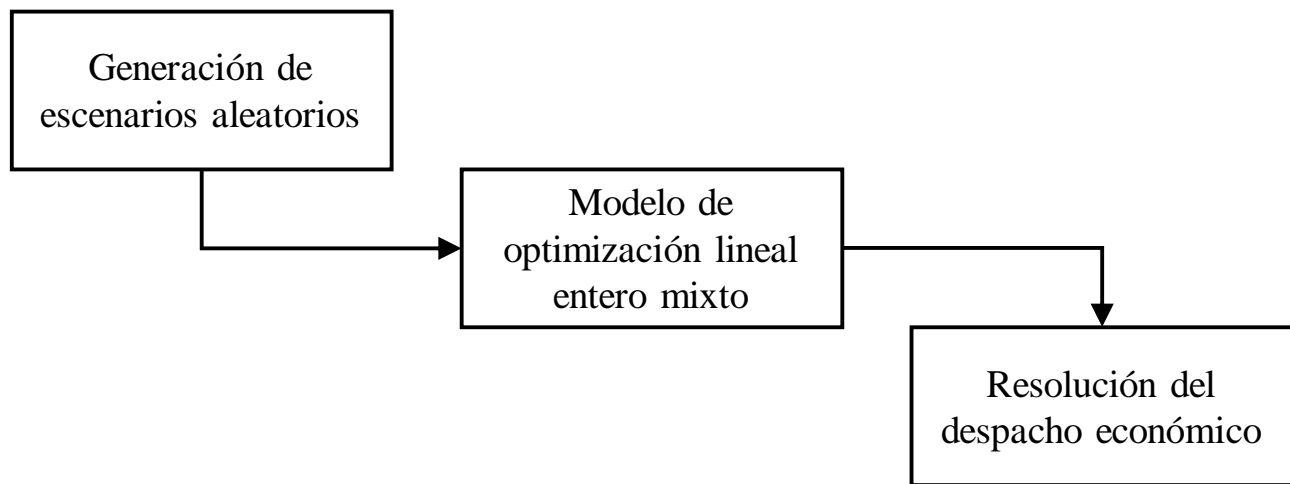


Figura 8. Etapas para la resolución del despacho económico.

4.1 Generación de los Escenarios de Entrada Aleatorios

En este apartado se abordará la primera etapa del trabajo realizado la cual es la generación de los escenarios de entrada aleatorios, es decir la generación de series sintéticas de la radiación del sol y velocidad del viento para posteriormente desarrollar la conversión a potencia solar y eólica, todo esto a partir de datos reales del comportamiento de los parámetros solares y eólicos, mismos que han sido obtenidos de las medidas tomadas por una estación meteorológica ubicada en el cantón Latacunga.

4.1.1 Algoritmos de Generación de Series Sintéticas

Las series sintéticas tanto de la radiación solar, como de la velocidad del viento fueron generadas con el uso del método de Montecarlo, considerando la función de de distribución de probabilidad normal. Para ello se utilizaron los datos reales horarios de un año de la radiación solar y velocidad del viento, de estos datos fue necesario hallar y guardar en una base de datos la media y la desviación estándar, dos argumentos de entrada necesarios para aplicar la función normrnd de Matlab.

Considerando lo mencionado para las series sintéticas solares se desarrolla el proceso que se muestra en la Figura 9. Donde en primera instancia se importan desde el documento de base de datos la media y la desviación estándar de los datos reales, además se importan también los datos de 10 series reales, que servirán para realizar una comparación gráfica. Seguidamente hay que indicar el número de series sintéticas que se desean generar. Para la generación de las series sintéticas se establece un NRMSE permisible que para las series sintéticas solares es del 7%. Una vez generadas las series sintéticas se procede con la conversión de radiación solar a potencia solar y de velocidad del viento a potencia eólica, para finalmente exportar el escenario creado.

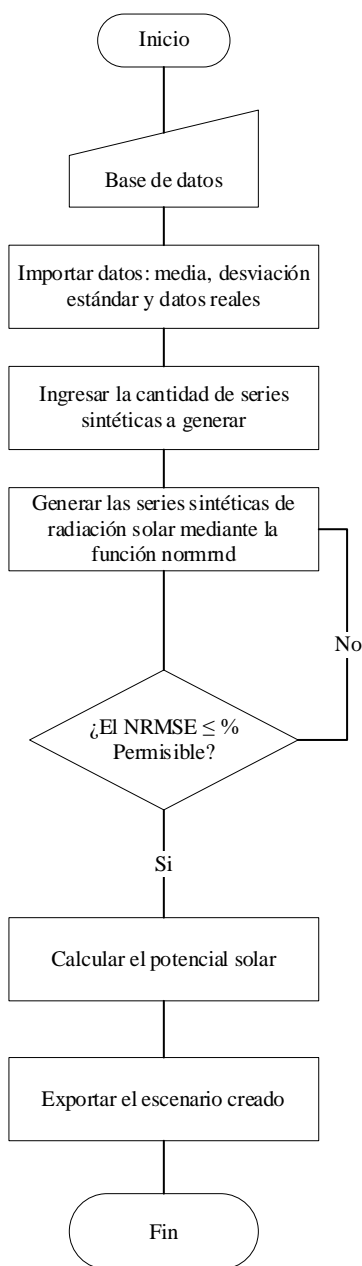


Figura 9. Proceso de la generación de series sintéticas solares y su conversión a potencia solar.

En el caso de la generación de series sintéticas de la velocidad del viento se aplica casi el mismo proceso que con las series solares el cual se muestra en la Figura 10. Las diferencias son que para las series sintéticas eólicas el NRMSE es de 10% y que en este caso se incluye una restricción en la que la velocidad del viento se convierte a potencia eólica si y solo si esta se encuentra dentro del rango permisible de generación, es decir debe ser mayor a 3 m/s y menor a 25 m/s límites establecidos en base al aerogenerador utilizado, caso contrario se descartan los valores cambiando dichos valores inválidos por nulos.

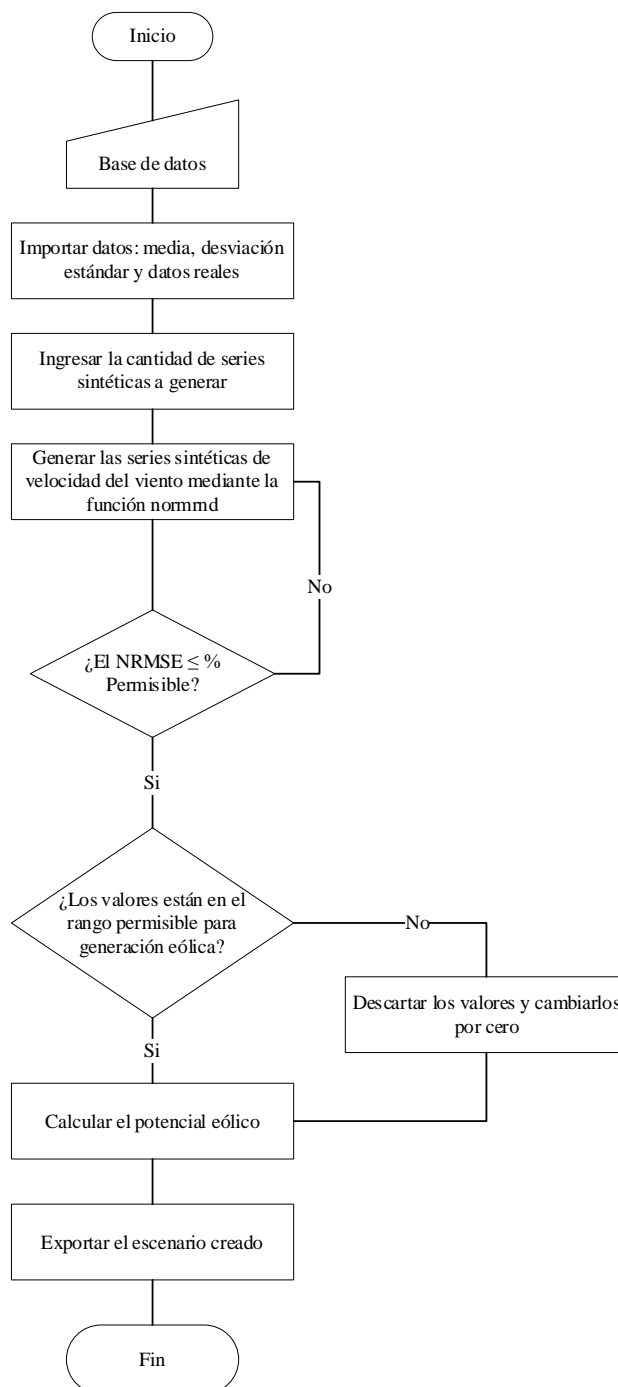


Figura 10. Proceso de la generación de series sintéticas eólicas y su conversión a potencia eólica.

En lo que se refiere a los NMRSE escogidos, hay que aclarar que estos parten de un análisis probabilístico, donde al 90% de los datos reales que se usaron para la generación de series sintéticas y dado que estos se basan en la media, esta misma se evaluó con el 10% de los datos reales restantes obteniendo varios NMRSE con valores variados, de estos valores de error se halló el valor de error medio y así se obtuvo el error con el cual dada la serie sintética generada debe ajustarse con respecto a la media, es decir el NMRSE especificado para ambos tipos de series sintéticas son para que la serie que se genere tenga mayor probabilidad de parecerse a valores futuros. Una vez realizado esto también se consideró evaluar varias series sintéticas con las series reales correspondientes al 10% no utilizado y se obtuvieron errores no mayores a los especificados y en ocasiones valores de 5% o menos, validando la generación de las series sintéticas.

4.1.2 Series Sintéticas Generadas y Conversión a Potencia de la Radiación Solar

La Figura 11 muestra el resultado de la generación de las series sintéticas solares para tres escenarios, donde en color rojo se representa la serie sintética generada para un escenario de menor radiación, en magenta se muestra la serie sintética cuya radiación se ajusta a la media y en azul la serie graficada corresponde al escenario de mayor radiación solar, además se incluyen las 10 series reales graficadas en escala de grises, de las cuales 5 fueron escogidas de manera arbitraria y las 5 restantes son series reales que están dentro de los rangos medios de todos los datos reales.

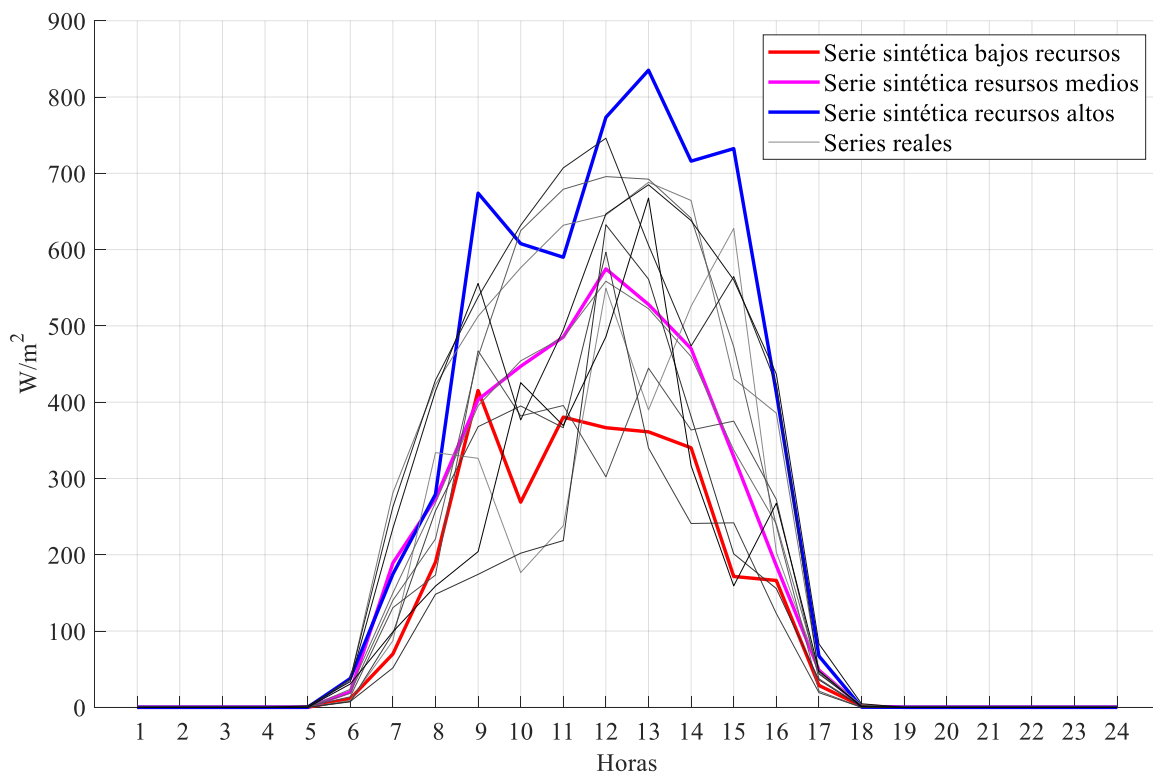


Figura 11. Series sintéticas solares generadas para los tres escenarios.

Para la conversión de radiación solar a potencia solar se tomó en cuenta que los paneles fotovoltaicos generan su potencia nominal cuando se tiene una radiación solar de 1000 W/m^2 , partiendo de esta relación se planteó la ecuación (8).

$$P_s = R_{solar} \cdot \frac{P_{nomfv}}{1000 \text{ W/m}^2} \cdot N_p \quad (8)$$

Donde:

P_s es la potencia solar generada en vatios

R_{solar} es la radiación solar de ese momento en W/m^2

P_{nomfv} es la potencia nominal fotovoltaica de los paneles en Watos

N_p es el número de paneles fotovoltaicos.

Considerando que el sistema fotovoltaico es parte fundamental del modelo ya que el aporte al abastecimiento de la demanda por parte de la generación solar será el de mayor porcentaje del mix energético establecido para el modelo.

Tomando en cuenta la demanda pico del sistema la cual que se especifica más adelante, siendo esta 32.69 kW y considerando la radiación media obtenida de 360 W/m^2 se estableció el numero de paneles basados en la potencia nominal de estos y usando la ecuación (8) anteriormente descrita. Los paneles que se usan son de una potencia nominal de 450 W siendo un total de 200 dado lo descrito anteriormente.

4.1.3 Series Sintéticas Generadas y Conversión a Potencia del Viento Sintética Generada

La Figura 12 muestra el resultado de la generación de las series sintéticas eólicas para los mismos tres escenarios que se mencionaron en las series solares, en color rojo se representa la serie sintética generada para un escenario de menor velocidad del viento, en magenta se muestra la serie sintética con velocidad del viento que se ajusta a la media y en azul la serie graficada corresponde al escenario de mayor velocidad del viento, también se incluyen las 10 series reales graficadas en escala de grises, 5 escogidas de manera arbitraria y 5 elegidas considerando que sus valores estén dentro de los rangos medios de todos los datos reales.

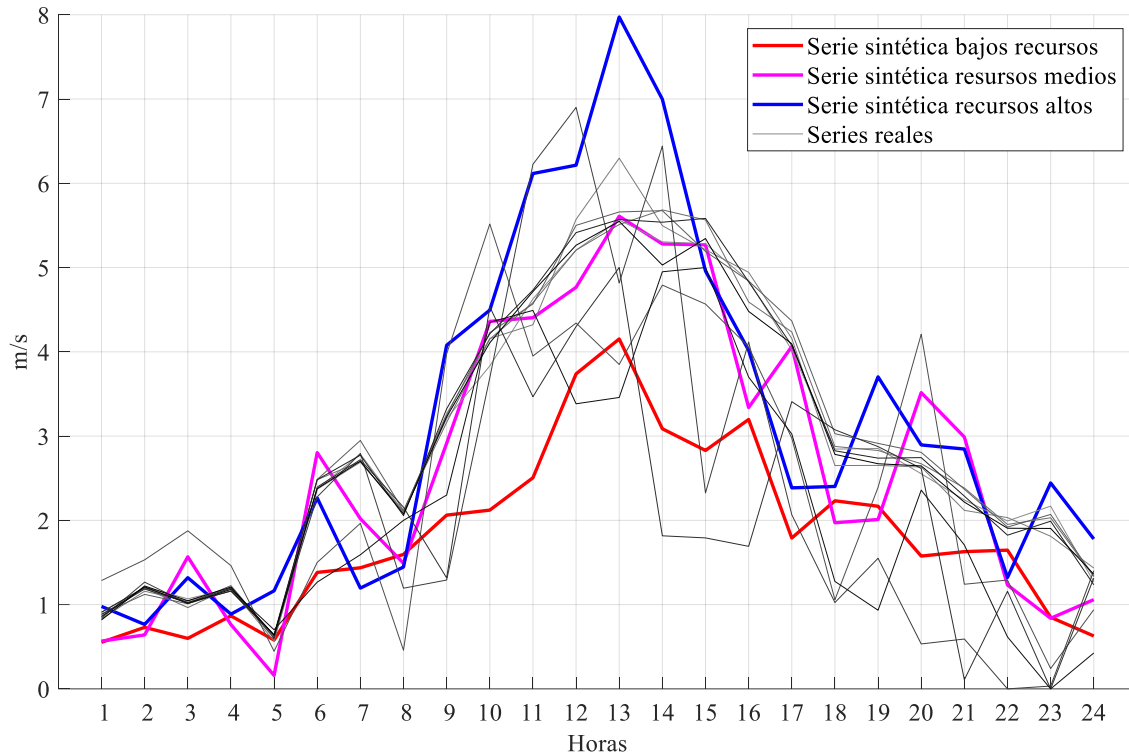


Figura 12. Series sintéticas eólicas generadas para los tres escenarios

Para la conversión de la velocidad del viento generada por las series sintéticas a potencia eólica, se hace uso de la ecuación (9) siendo está ampliamente usada en la literatura para el cometido especificado [26].

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot \eta \cdot B \quad (9)$$

Donde:

P_e es la potencia eólica generada en vatios

ρ es la densidad del viento

A es el área de las aspas del aerogenerador

v es la velocidad del viento

η es el rendimiento del aerogenerador

B corresponde al valor del parámetro del Betz.

En el caso del sistema eólico, se considera un menor aporte al abastecimiento de la demanda al este generalmente representar un costo alto de inversión. Es así que para el sistema planteado se usara un aerogenerador de 3 palas con un 97% de rendimiento y cuya área es de 11.4 m^2 .

4.2 Modelo de Optimización Lineal Entero Mixto

En este apartado se explica el modelo de optimización lineal entero mixto para el despacho económico de una microrred aislada, donde se consideró lo demostrado por [27], en el modelo los parámetros dependientes y las variables se adjuntan al índice t que corresponde las horas del periodo de análisis.

4.2.1 Función Objetivo

La función objetivo establecida para resolver el despacho económico en un periodo T , se basa en el trabajo realizado por [28] y se muestra en la ecuación (10), en este trabajo se considera resolver el problema para un periodo de tiempo de 24 horas.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \left[C_D \cdot q(t) + C_{ENS} \cdot P_{ENS}(t) + C_{SH} \cdot P_{SH}(t) + C_{UBESS} \left(P_B^C(t) \cdot \eta^C + \frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \right) \right] \quad (10)$$

Donde:

T : es el periodo de tiempo

C_D : corresponde al costo internacional del diésel

$q(t)$: representa la cantidad de combustible que se ocupa en función de la potencia producida por el generador diésel

C_{ENS} : es el costo de la energía no suministrada

$P_{ENS}(t)$: es el valor de la potencia no suministrada

C_{SH} : corresponde al costo del vertimiento que es la energía que se desperdicia

$P_{SH}(t)$: es la cantidad de potencia vertida

C_{UBESS} : se le atribuye al costo del uso del BESS que es el sistema de banco de baterías

$P_B^C(t)$: representa la potencia de carga del banco de baterías

$P_B^D(t)$: es la potencia de descarga del banco de baterías

η^C : corresponden a la eficiencia en estado de carga

η^D : corresponden a la eficiencia en estado de descarga

4.2.2 Restricciones

Para lograr una respuesta óptima del despacho económico hay que establecer varias restricciones como lo son las asociadas a la unidad de generación térmica, restricciones correspondientes a la a la operación del sistema y restricciones del sistema de almacenamiento de banco de baterías (BESS).

4.2.2.1 Restricciones del generador diésel

Para lo que corresponde al generador diésel, la cantidad de combustible que ocupa viene dada en función a la potencia que el mismo produce, esta relación se representa por una función cuadrática, es decir no lineal, desarrollando una linealización por tramos de la función del consumo de combustible del generador diésel se puede pasar de una función no lineal a una aproximación lineal.

La Figura 13 muestra la relación entre la potencia producida por el generador diésel y el consumo de combustible, donde se aprecia que la curva de la función cuadrática puede expresarse en tramos linealizados para calcular la cantidad de combustible que se ocupa dada un valor de potencia generado dentro de los límites de cada tramo.

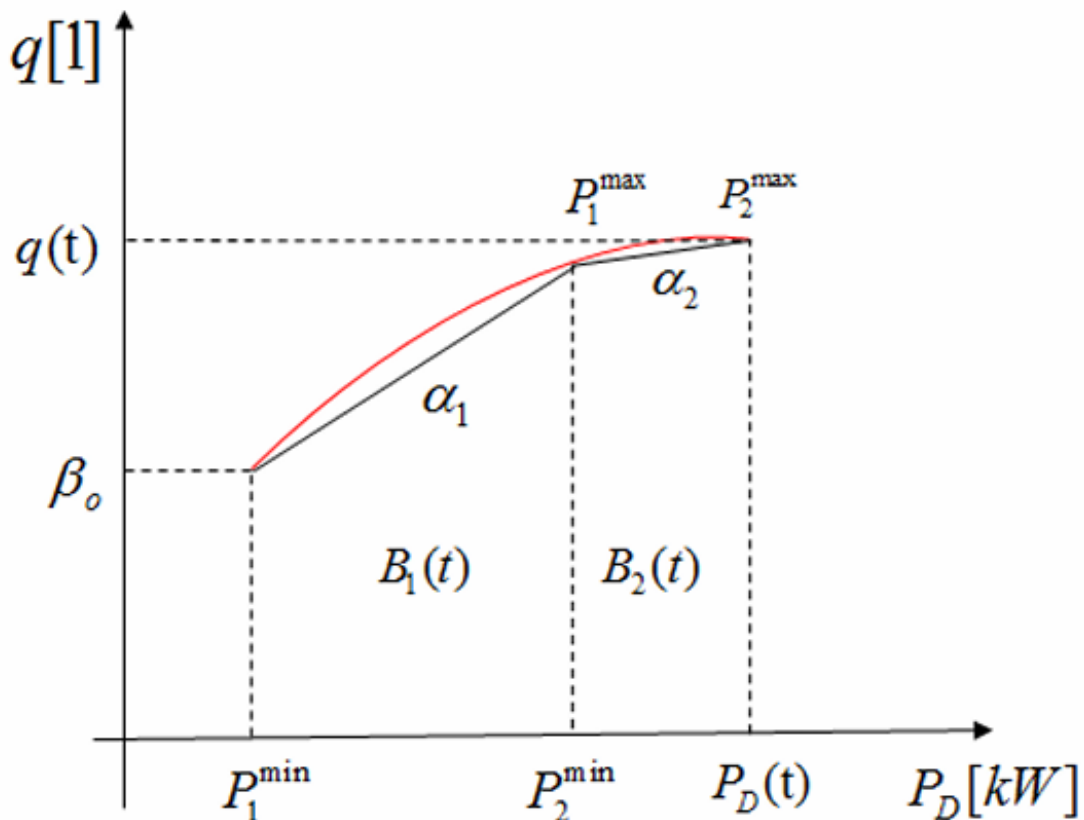


Figura 13. Linealización por tramos de la función del consumo de combustible del generador diésel [27].

Es así que para el cálculo de la cantidad de combustible ocupado por el generador diésel en función de la potencia que produce se establece la restricción expresada en la ecuación (11) siendo esta una representación de la ecuación de la recta.

$$q(t) = \alpha \cdot P_D(t) + \beta \cdot B(t) \quad (11)$$

Donde:

α : representa la pendiente del tramo linealizado

$P_D(t)$: es el valor de la variable de potencia que produce el generador diésel en un rango específico para el tramo

β : es el punto de origen en el eje de las ordenadas

$B(t)$: es una variable binaria que representa la puesta en marcha del generador.

Por otra parte, se establece la restricción de límites operativos del generador diésel en la ecuación (12)

$$P_{Dmin} \leq P_D(t) \leq P_{Dmax} \quad (12)$$

Donde:

$P_D(t)$: es el valor de la variable de potencia que produce el generador diésel en un rango específico para el tramo

P_{Dmin} : es el límite mínimo de valor de la variable de potencia que produce el generador diésel en un rango específico para el tramo

P_{Dmax} : es el límite máximo valor de la variable de potencia que produce el generador diésel en un rango específico para el tramo

4.2.2.2 Restricciones de Operación

La primera restricción de operación corresponde al balance de potencia del sistema, la cual hace que la potencia generada por el sistema sea igual a la demanda, considerando el vertimiento, la potencia no suministrada y la carga o descarga del BESS. Esta restricción se expresa en la ecuación (13).

$$P_D(t) + P_s(t) + P_e(t) - P_{SH}(t) + P_B^D(t) = D(t) - P_{ENS}(t) + P_B^C(t) \quad (13)$$

Donde:

$P_D(t)$: es el valor de la variable de potencia que produce el generador diésel en un rango específico para el tramo

$P_s(t)$: es la potencia solar estimada para el periodo de análisis

$P_e(t)$: es la potencia eólica estimada para el periodo de análisis

$P_{SH}(t)$: es el valor de la potencia vertida por el sistema durante el periodo de análisis

$P_B^C(t)$: representa la potencia de carga del banco de baterías

$D(t)$: es la potencia demanda por el sistema durante el periodo de análisis

$P_{ENS}(t)$: es el valor de la potencia no suministrada por el sistema durante el periodo de análisis

$P_B^D(t)$: es la potencia de descarga del banco de baterías

El límite de potencia no suministrada viene dado en función de la demanda, ya que será un indicador de lo que al sistema le falta para abastecer la demanda. La restricción de límite de potencia no suministrada se representa mediante la ecuación (14).

$$0 \leq P_{ENS}(t) \leq D(t) \quad (14)$$

Donde:

$D(t)$: es la potencia demanda por el sistema durante el periodo de análisis

$P_{ENS}(t)$: es el valor de la potencia no suministrada por el sistema durante el periodo de análisis

El límite de potencia que se puede verter estará en función de la potencia solar y eólica estimadas para su aprovechamiento, es decir el vertimiento representa la potencia no aprovechada de los recursos solares y eólicos. La restricción de vertimiento viene dada por la ecuación (15).

$$0 \leq P_{SH}(t) \leq P_s(t) + P_e(t) \quad (15)$$

Donde:

$P_s(t)$: es la potencia solar estimada para el periodo de análisis

$P_e(t)$: es la potencia eólica estimada para el periodo de análisis

$P_{SH}(t)$: es el valor de la potencia vertida por el sistema durante el periodo de análisis

4.2.2.3 Restricciones del Banco de Baterías (BESS)

La energía almacenada por el banco de baterías dependerá tanto de la potencia como de la eficiencia de carga y descarga, además dicha energía debe ser expresada para el estado inicial y para el resto de puntos del periodo de análisis. En el caso del estado inicial en $t = 0$ se representa la energía del BESS mediante la ecuación (16).

$$E(t) = E_o + (P_B^C(t) \cdot \eta^C) - \frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \quad (16)$$

Donde:

$E(t)$: representa la energía almacenada por el BESS durante el periodo de análisis

E_o : representa la energía almacenada por el BESS en el estado inicial $t = 0$

$P_B^C(t)$: representa la potencia de carga del banco de baterías

$P_B^D(t)$: es la potencia de descarga del banco de baterías

η^C : corresponden a la eficiencia en estado de carga

η^D : corresponden a la eficiencia en estado de descarga

Para el caso del almacenamiento de energía del BESS en el resto del periodo de análisis, se utiliza la ecuación (17).

$$E(t) = E_{t-1} + (P_B^C(t) \cdot \eta^C) - \frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \quad (17)$$

Donde:

$E(t)$: representa la energía almacenada por el BESS durante el periodo de análisis

E_{t-1} : representa la energía almacenada por el BESS en el punto anterior durante el periodo de análisis.

$P_B^C(t)$: representa la potencia de carga del banco de baterías

$P_B^D(t)$: es la potencia de descarga del banco de baterías

η^C : corresponden a la eficiencia en estado de carga

η^D : corresponden a la eficiencia en estado de descarga

Es necesario ajustar el almacenamiento de energía del BESS en su límite máximo y mínimo se utiliza la ecuación (18).

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (18)$$

Donde:

$E(t)$: representa la energía almacenada por el BESS durante el periodo de análisis

E_{min} : representa la energía mínima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

E_{max} : representa la energía máxima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

El BESS puede operar únicamente en dos modos, carga y descarga de energía, es así que para limitar el modo de uso en el que se encuentra el BESS durante el periodo de análisis se utilizan variables binarias. La ecuación (19) representa la lógica binaria utilizada para que el BESS opere únicamente en modo carga o descarga.

$$X_C(t) + X_D(t) \leq 1 \quad (19)$$

Donde:

$X_C(t)$: variable binaria que representa el uso del BESS en modo de carga durante el periodo de análisis

$X_D(t)$: variable binaria que representa el uso del BESS en modo de descarga durante el periodo de análisis

La ecuación (20) representa la limitación de potencia del BESS cuando este opera en el modo de carga.

$$E_{min} \geq P_B^C(t) \geq E_{max} \cdot X_C(t) \quad (20)$$

Donde:

$P_B^C(t)$: representa la potencia de carga del banco de baterías

E_{min} : representa la energía mínima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

E_{max} : representa la energía máxima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

$X_C(t)$: variable binaria que representa el uso del BESS en modo de carga durante el periodo de análisis

De manera similar a la anterior la ecuación (21) representa la limitación de potencia del BESS, pero cuando este opera en el modo de descarga.

$$E_{min} \geq P_B^D(t) \geq E_{max} \cdot X_D(t) \quad (21)$$

Donde:

$P_B^D(t)$: es la potencia de descarga del banco de baterías

E_{min} : representa la energía mínima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

E_{max} : representa la energía máxima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

$X_D(t)$: variable binaria que representa el uso del BESS en modo de descarga durante el periodo de análisis

El estado de carga del BESS, en ingles State of Charge (SOC) es el porcentaje de energía almacenada en un momento del periodo y se representa mediante la ecuación (22).

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_{max}} \quad (22)$$

Donde:

$SOC(t)$: representa el estado de carga del BESS durante el periodo de análisis

$E(t)$: representa la energía almacenada por el BESS durante el periodo de análisis

E_{max} : representa la energía máxima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

Se establece que el SOC está en función de un rango del 0% a 100% y este límite se representa mediante la ecuación (23).

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (23)$$

Donde:

$SOC(t)$: representa el estado de carga del BESS durante el periodo de análisis

SOC_{min} : representa el mínimo estado de carga del BESS durante el periodo de análisis

SOC_{max} : representa el máximo estado de carga del BESS durante el periodo de análisis

4.3 Resolución del despacho económico

Para la resolución del despacho económico se establece el proceso que se muestra en la Figura 14. En primera instancia se ejecuta el subprograma para la generación de series sintéticas y su conversión a potencia tanto solar como eólica, además se ingresan también los datos de la demanda del sistema y parámetros del BESS. Luego considerando el modelo de optimización lineal entero mixto MILP descrito anteriormente se utilizó el solver FICO Xpress para la resolución del modelo planteado.

Finalmente se analiza si los resultados arrojados son óptimos, esto con la comprobación de que principalmente no exista energía no suministrada y preferiblemente no demasiado vertimiento, de ser el caso de tener energía no suministrada se redimensiona la cantidad de paneles y baterías para llegar a aprovechar la óptima cantidad de energía.

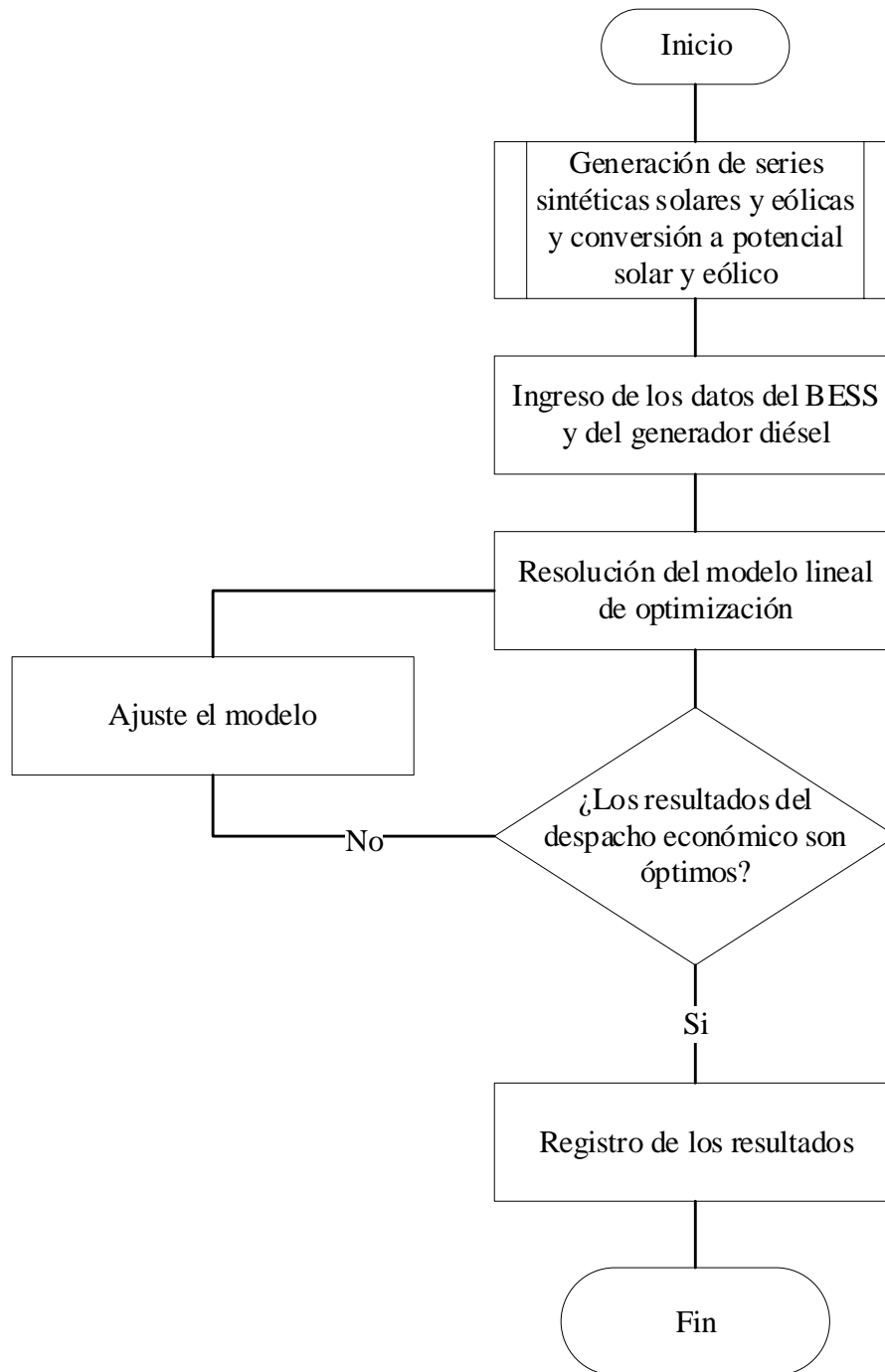


Figura 14. Proceso para la resolución del despacho económico.

4.3.1 Demanda Eléctrica

La demanda eléctrica corresponde a una microrred aislada ubicada en el cantón Latacunga Ecuador y ha sido planteada mediante un recopilatorio de datos reales medidos en el sector. Es así que la curva de demanda que se usara para el modelo se muestra en la Figura 15 y representa la demanda típica horaria de un día, basada en datos reales medidos durante un año. La demanda pico que presenta el sistema es 32.69 kW y esta se usó para el dimensionamiento de tanto el sistema fotovoltaico, como del generador diésel.

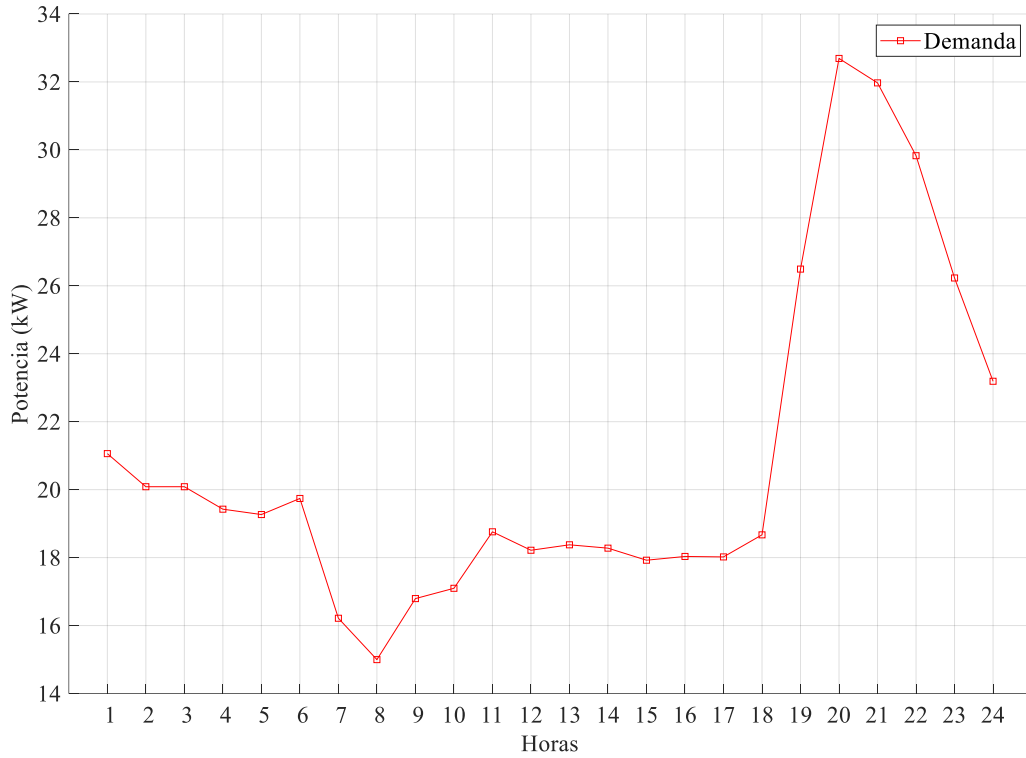


Figura 15. Demanda eléctrica de la microrred

4.3.2 Parámetros del BESS

Los parámetros del BESS son datos de entrada para el modelo, uno de los más importantes es el costo del uso del BESS para el cual se utiliza la ecuación (24) para su cálculo a partir de la inversión, la energía que puede almacenar y la vida útil.

$$C_{UBESS} = \frac{C_{InvBESS}}{E_{max} \cdot N_{ciclos}} \quad (24)$$

Donde:

C_{UBESS} : se le atribuye al costo del uso del BESS

$C_{InvBESS}$: representa el costo de inversión del BESS

E_{max} : representa la energía máxima que se puede almacenar por el BESS durante el periodo de análisis

N_{ciclos} : es el número de ciclos de vida útil del BESS

El costo del uso del BESS y el resto de parámetros de entrada de este, son especificados en la Tabla 2 con su respectivo símbolo y unidad. Cabe aclarar que en el caso del dimensionamiento del BESS se realizó un análisis de cantidad de energía posible a almacenar dado la potencia solar y eólica estimada, donde considerando varias generaciones de series sintéticas, restando de las horas solares

picos la demanda abastecida se obtiene la cantidad de energía posible para almacenar. Este costo es representativo de la inversión del BESS es decir no es un costo que se desembolse con efectivo sino con el activo correspondiente al banco de baterías.

Tabla 2. Parámetros correspondientes al BESS.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Energía máxima	E_{max}	204.81	kWh
Tiempo de Vida	N_{ciclos}	2000	Ciclos
Eficiencia de carga	η^C	100	%
Eficiencia de descarga	η^D	0.98	%
SOC mínimo	SOC_{min}	0	%
SOC máximo	SOC_{max}	100	%
Costo de uso	C_{UBESS}	0.29	USD

4.3.3 Parámetros del generador diésel

En el caso del generador diésel es necesario establecer el consumo de combustible de este en los diferentes tramos linealizados para poder realizar lo establecido en el punto 4.2.2.1, es así que en la Tabla 3 se muestran los datos del generador diésel que se usara el cual se escogió considerando la demanda pico del sistema.

Tabla 3. Cantidad de diésel consumida dada la potencia producida por el generador diésel.

Potencia (kW)	Cantidad de diésel necesaria (Lt)
10	6
30	11.4
40	12.7

4.3.3 Parámetros económicos

Finalmente, como parámetros de entrada de suma importancia para el modelo, están los costos del sistema, los cuales se especifican en la Tabla 4. El costo del diésel es el del valor internacional del costo en dólares de un litro de diésel, el costo de energía no suministrada es 5 veces el costo del diésel con el fin de penalizar que no se abastezca la demanda eléctrica del sistema, el costo del vertimiento es el doble del costo del diésel esto para penalizar el desperdicio de energía y que el sistema aproveche al máximo el recurso energético y el costo del uso del BESS corresponde al calculado anteriormente.

Tabla 4. Costos del sistema.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Costo internacional del diésel	C_D	1.25	USD
Costo de energía no suministrada	C_{ENS}	6.25	USD
Costo de vertimiento de energía	C_{SH}	2.5	USD
Costo del uso del BESS	C_{UBESS}	0.29	USD

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La metodología que se ha descrito en todo el apartado 4 se resume en la Figura 16 donde se puede apreciar de una manera gráfica como se llega a abastecer la carga mediante el despacho económico y el uso de escenarios de entrada aleatorios. En esta sección se muestran los resultados del trabajo realizado, para ello se ha considerado resolver el despacho económico de la microrred aislada para los tres casos de estudio expuestos de generación de series sintéticas descritos anteriormente, se considera un periodo de 24 horas para cada caso. Posteriormente se describen y analizan los resultados con la finalidad de validar modelo de optimización.

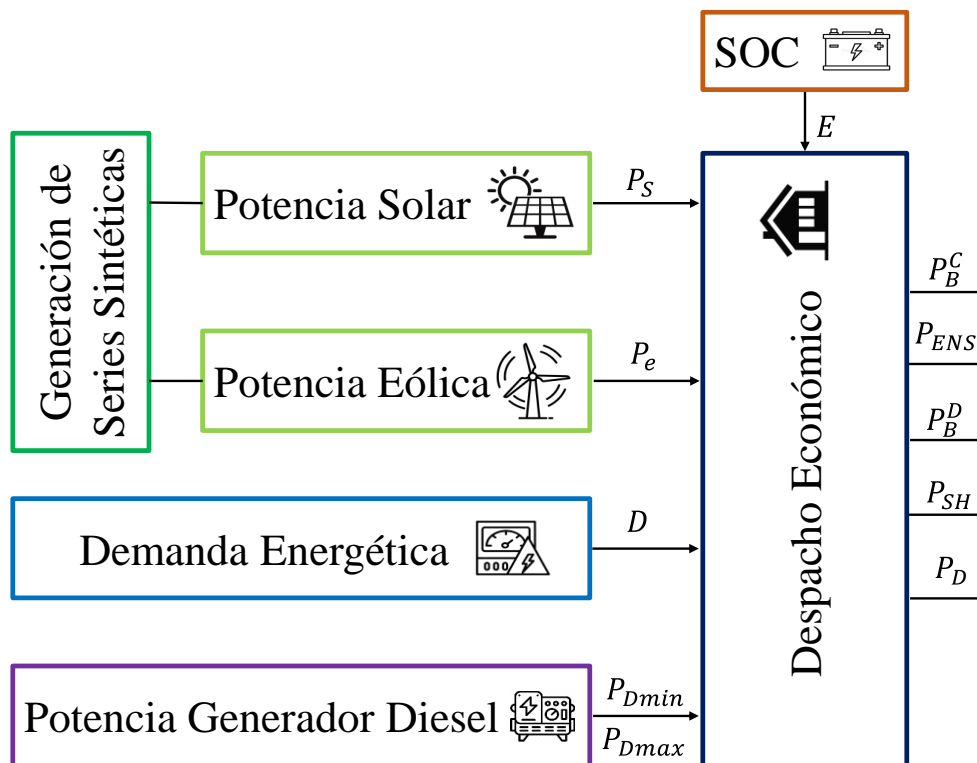


Figura 16. Diagrama resumen del modelo de optimización.

5.1 Resultados del despacho para el escenario de recursos energéticos bajos

La Figura 17 muestra la respuesta del modelo para un periodo de tiempo de 24 horas, considerando un escenario de generación de series sintéticas con bajos recursos aprovechables, es decir una radiación solar y velocidad del viento menores a los medios. Se observa la demanda en color rojo con marcadores cuadrados, en color naranja se representa a la potencia solar, la potencia eólica se expresa en color negro, el generador diésel se corresponde al color morado. El funcionamiento del banco de baterías en modo carga y descarga de energía se expresan con los colores verde y azul respectivamente, mientras que la energía no suministrada y el vertimiento de energía se representan con los colores amarillo y vino respectivamente.

Se puede ver como las primeras horas y en parte de las últimas entra en funcionamiento el generador diésel, puesto que hay ausencia de radiación solar. Al comenzar las horas de presencia de sol la demanda se abastece con la potencia solar y además se carga el banco de baterías usando toda la energía solar disponible. El BESS intercambia en un momento su uso en modo descarga con el generador diésel, además presenta un comportamiento en carga y descarga progresivo y no agresivo. La potencia eólica, aunque mínimamente, apoya al abastecimiento de la demanda.

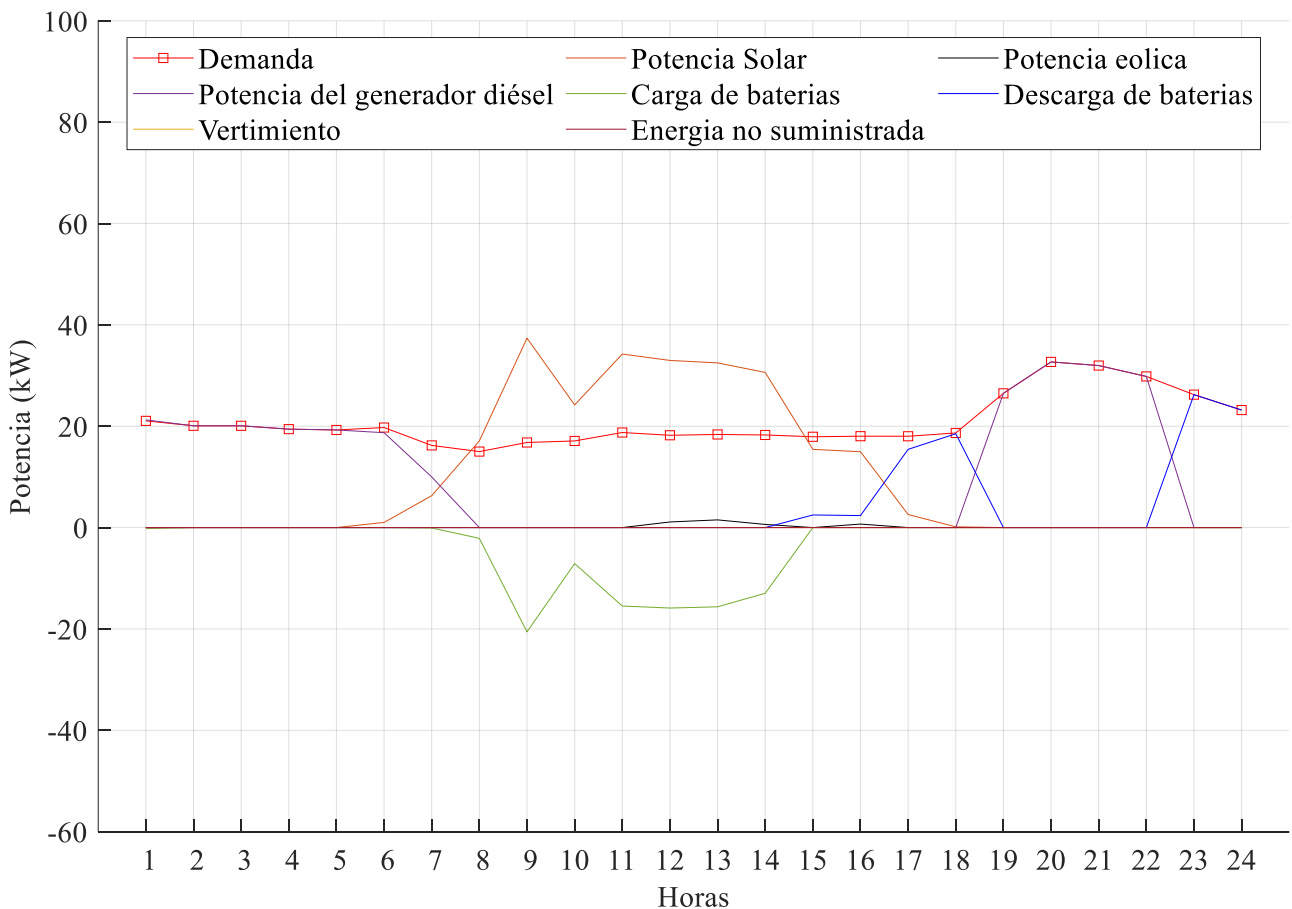


Figura 17. Resultados del modelo para el caso de recursos menores.

Puesto que los resultados son potencia en cada unidad de hora de un día, se hace la aclaración que tanto los valores pueden ser expresados en potencia como en energía en cada hora ya que cada valor se multiplica por 1 hora, por lo que su sumamos los valores de todas las horas se obtendrá la energía total arrojada. La Figura 18 muestra el total de energía arrojada por cada una de las fuentes y se usa la misma paleta de colores establecida. En color naranja se representa a la energía solar que es la segunda fuente que más genera con un total de 249.48 kWh producidos, por otra parte, la potencia eólica se expresa en color negro y es la que menor generación presenta con 3.93 kWh, el generador diésel se corresponde al color morado y es la mayor fuente de generación con 249.83 kWh. El funcionamiento del banco de baterías en modo carga (barra verde) almaceno un total de 90.03 kWh y en modo descarga (barra azul) descargo 88.23 kWh, mientras que la potencia no suministrada y el vertimiento de potencia que se representan con las barras amarilla y vino respectivamente presentan valores nulos de potencia.

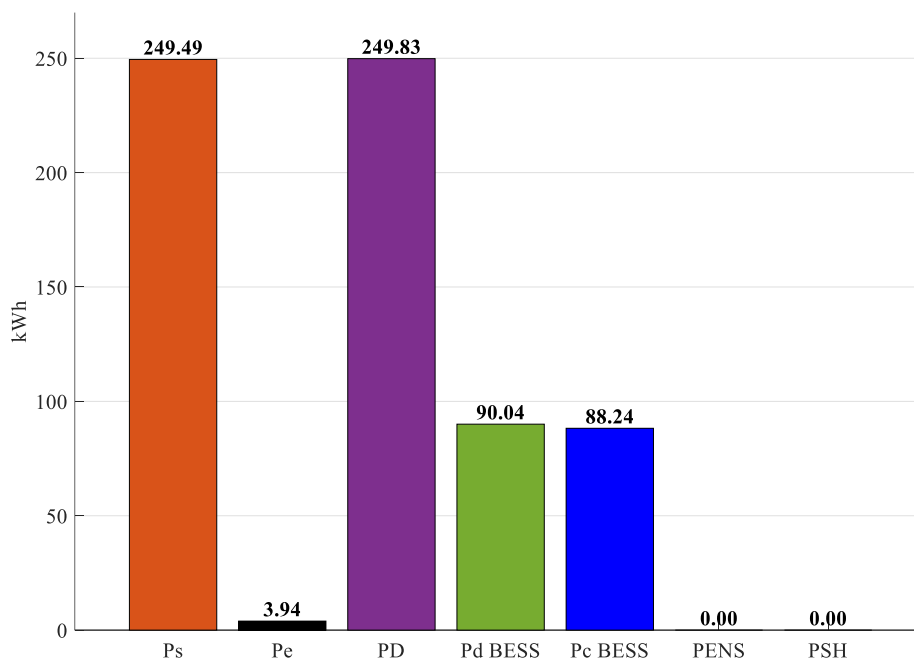


Figura 18. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de bajos recursos energéticos.

La Figura 19 muestra el porcentaje de aporte al abastecimiento de la demanda por parte de las fuentes de generación. En color naranja se representa el porcentaje de abastecimiento a la demanda por parte de la energía solar que es del 32%, por otra parte, la fuente eólica representada en color negro colabora mínimamente al abastecimiento de la demanda aportando menos del 1%, en el caso del generador diésel graficado en color morado es el que en este escenario más aporte al abastecimiento de la demanda presentando este del 50%, por último, el BESS en modo de descarga mostrado en color azul abastece la demanda en un 18%.

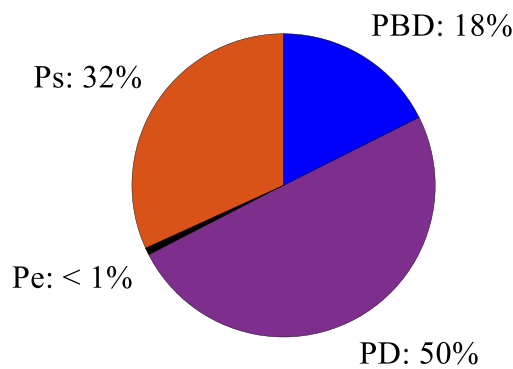


Figura 19. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de bajos recursos energéticos.

En lo que al uso del BESS se refiere en la Figura 20 se muestra el estado de carga durante el periodo de análisis, donde se puede evidenciar que la carga máxima a la que el BESS llega es del 44%, esto siendo normal ya que al estar en el escenario de bajos recursos es evidente que no se podrá llegar a llenar el almacenamiento en su totalidad. En lo que a tiempo de uso del sistema de almacenamiento se refiere el BESS ha estado operativo durante 12 horas, un total de 7 horas en modo de carga y 6 horas en modo descarga repartidas en dos periodos uno 4 horas y el otro de 2 horas. Al final del periodo se presenta un almacenamiento residual del 0%.

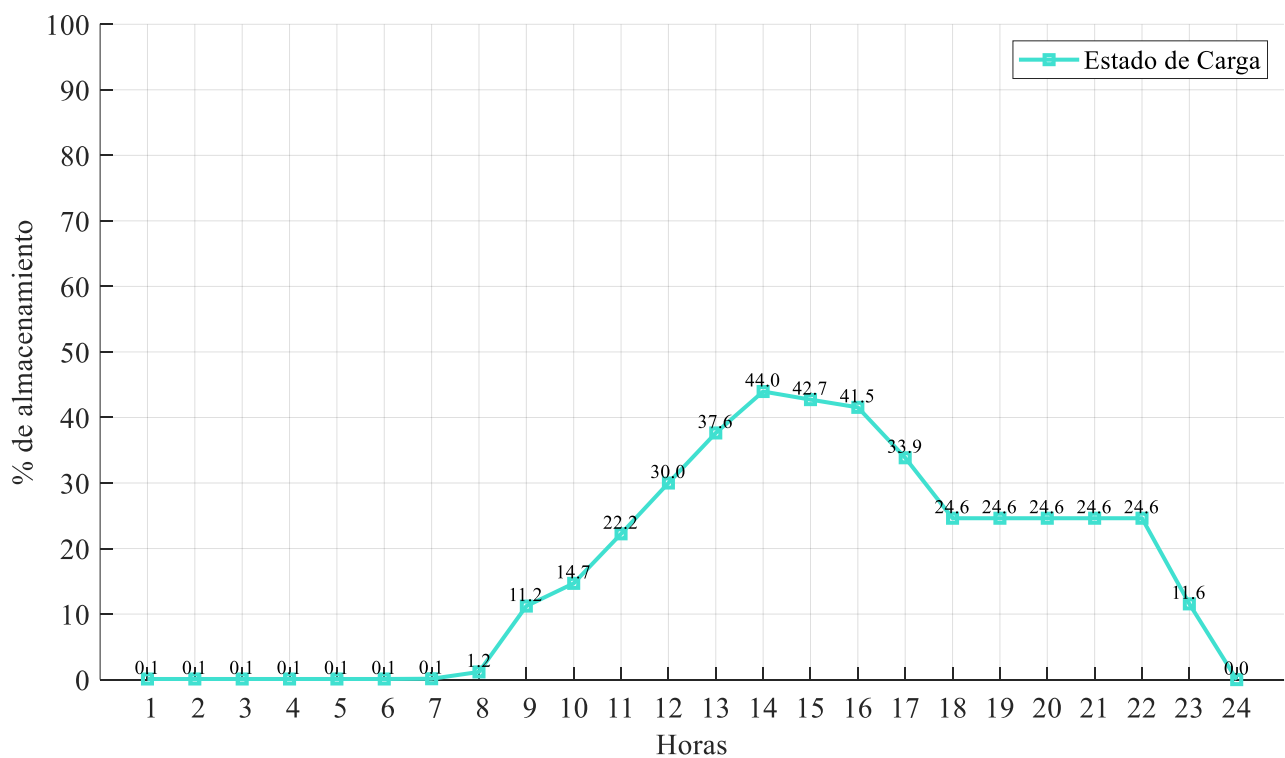


Figura 20. Estado de carga del BESS para el escenario de bajos recursos energéticos.

Finalmente, en la Tabla 5 se presentan los costos totales arrojados en la resolución del despacho para el primer escenario con recursos energéticos bajos, siendo el costo total por el uso del BESS el más bajo con 52.22 USD, caso contrario al costo total del generador diésel haciende a 113.96 USD, siendo el costo total de operación de 166.18USD. Cabe recalcar que en el caso de potencia no suministrada y de vertimiento los costos son nulos siendo esto un buen indicador de que el modelo arroja buenos resultados.

Tabla 5. Costos totales para la resolución del despacho económico en el primer escenario.

Costo especificado	Valor	Unidad
Costo total por operación del BESS	52.22	USD
Costo total por operación del generador diésel	113.96	USD
Costo total por potencia no suministrada	0	USD
Costo total por vertimiento de potencia	0	USD
Costo total por la operación de todo el sistema	166.18	USD

5.2 Resultados del despacho para el escenario de recurso energéticos medios

La Figura 21 ilustra la respuesta del modelo bajo un escenario en el que se generan series sintéticas con valores de recursos energéticos ajustados a la media, es decir, considerando una radiación solar y una velocidad del viento moderadas. Al igual que en el primer caso, se utiliza la misma paleta de colores, lo que se puede observar en la caja de leyendas para facilitar la interpretación visual. En este escenario, similar al anterior, durante las primeras y últimas horas del día, la demanda es abastecida principalmente por el generador diésel. Sin embargo, durante las horas de mayor radiación solar, la demanda se cubre predominantemente con la energía solar, que en este caso ofrece un aporte mayor en comparación con el escenario de bajos recursos.

El banco de baterías (BESS) desempeña un papel más significativo en este escenario, ya que, gracias al mayor recurso solar disponible, se logra una carga más eficiente del sistema, permitiendo un mayor aporte para suplir la demanda en comparación con el escenario anterior. Asimismo, la potencia eólica también contribuye de manera más sustancial, haciéndose más visible en la gráfica.

De manera similar al escenario de bajos recursos, el generador diésel y el BESS se alternan en su uso, evidenciando un proceso de carga y descarga del BESS que es progresivo. A diferencia del primer caso, el generador diésel tiene un menor uso debido a la mayor capacidad de carga alcanzada por el banco de baterías. Además, en este escenario, no se observa ni potencia no suministrada ni vertimiento de energía, lo que indica una utilización más eficiente de los recursos disponibles.

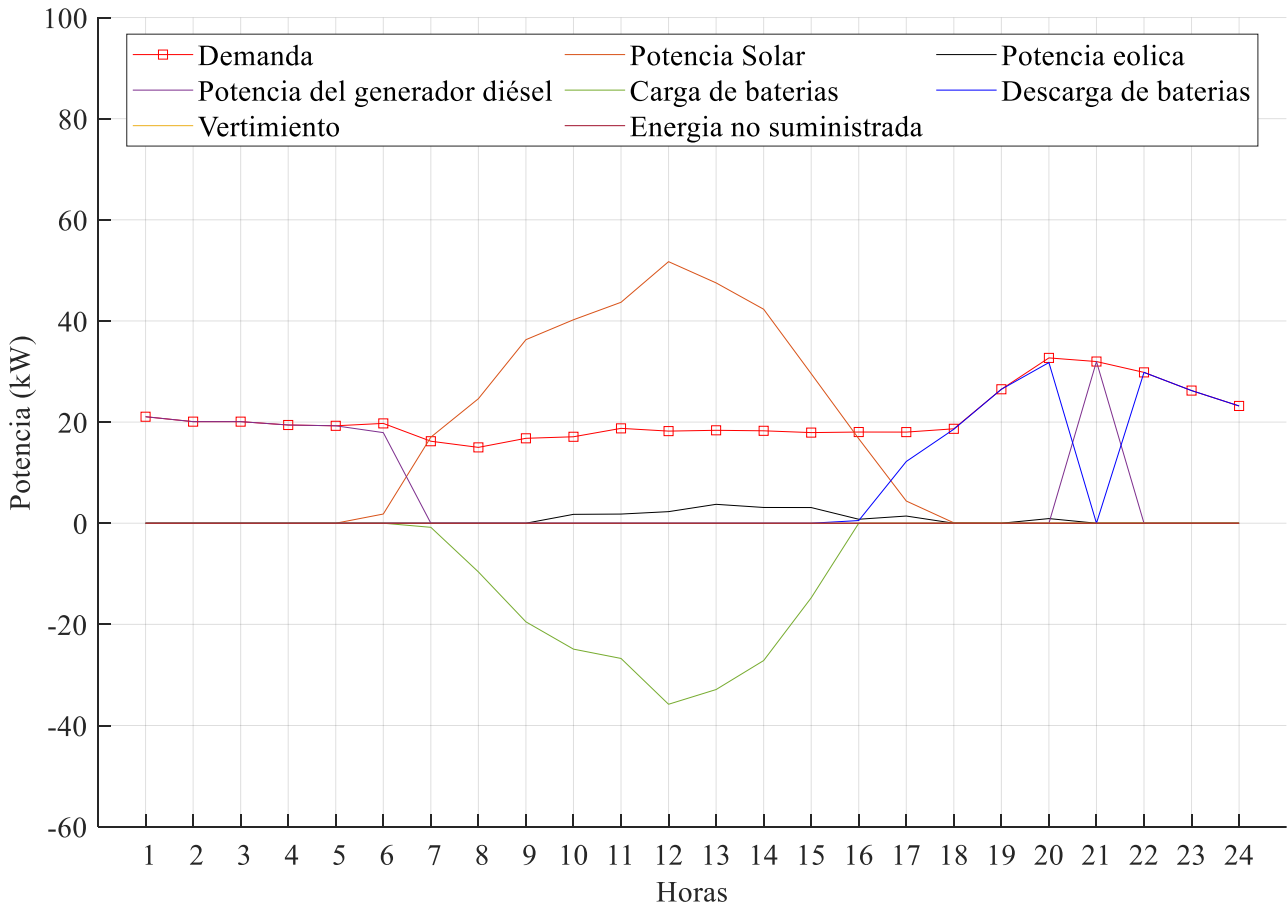


Figura 21. Resultados del modelo para el caso de recursos energéticos medios.

La Figura 22 presenta el total de energía generada por cada una de las fuentes en el escenario con recursos energéticos medios, utilizando la misma paleta de colores previamente establecida para mantener la coherencia visual. En este escenario, la energía solar se destaca como la fuente principal, produciendo un total de 356.01 kWh. En contraste, la energía eólica es la que menor generación aporta, con una producción de 18.94 kWh. El generador diésel se posiciona como la segunda mayor fuente de generación, suministrando 149.82 kWh para cubrir la demanda.

El banco de baterías (BESS) opera eficientemente en ambos modos: en modo carga, almacena un total de 192.17 kWh, mientras que en modo descarga libera 168.83 kWh. En este escenario, no se observa energía no suministrada, ni se reporta vertimiento de energía, lo que indica un equilibrio adecuado entre generación y consumo.

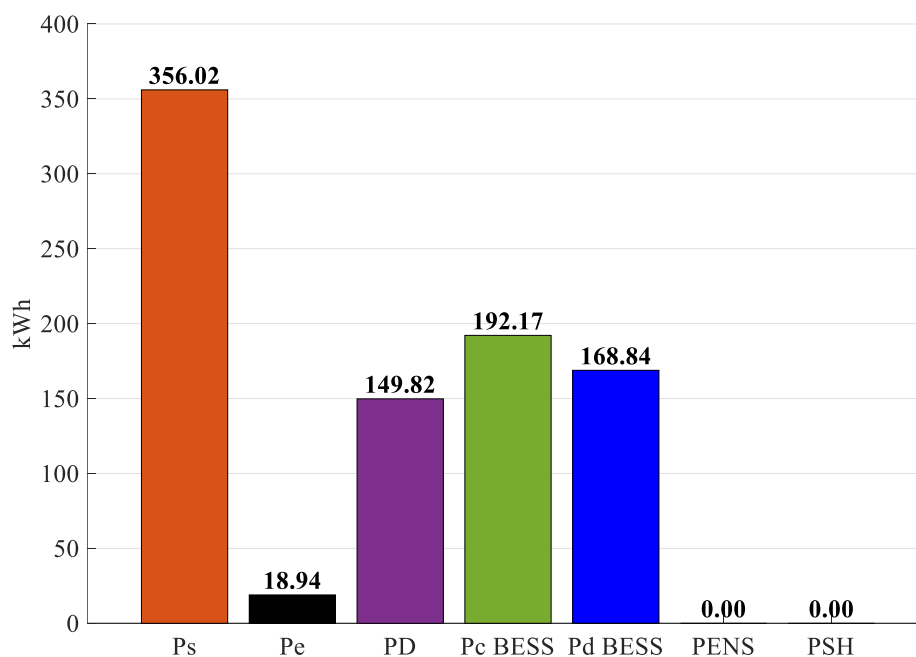


Figura 22. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de recursos energéticos medios.

La Figura 23 muestra el porcentaje de aporte al abastecimiento de la demanda por parte de las fuentes de generación, el generador diésel aporta en un 42% en este escenario, la demanda se abastece en un 33% con la potencia solar, siendo un aporte similar, aunque mayor que en el escenario 1. Sin embargo, en el caso del BESS ahora se tiene un aporte para suplir la demanda del 21%, lo que es mayor al del escenario 1. Finalmente, el aporte de la potencia eólica para suplir la demanda es del 4%, mucho más que en el escenario 1.

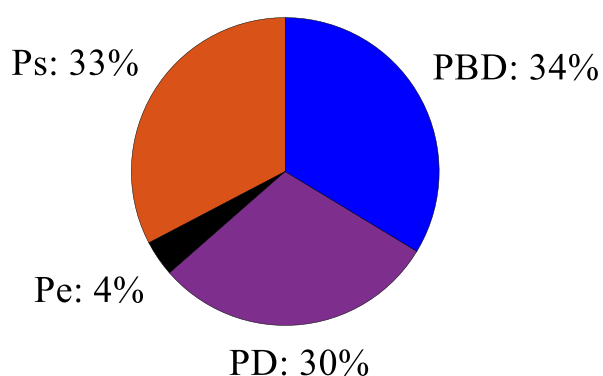


Figura 23. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de recursos energéticos medios.

En lo que al uso del BESS se refiere en la Figura 24 se muestra el estado de carga durante el periodo de análisis, donde se puede evidenciar que la carga máxima a la que el BESS llega es del 93.8% que es mayor al anterior escenario al tener. En lo que a tiempo de uso del sistema de almacenamiento se refiere el BESS ha estado operativo durante 16 horas, de las cuales un total de 8 horas han sido en

modo de carga y 8 horas han sido en modo descarga en dos periodos uno de 5 horas y otro de 3 horas. Al final del periodo se presenta un almacenamiento residual del 9.7%.

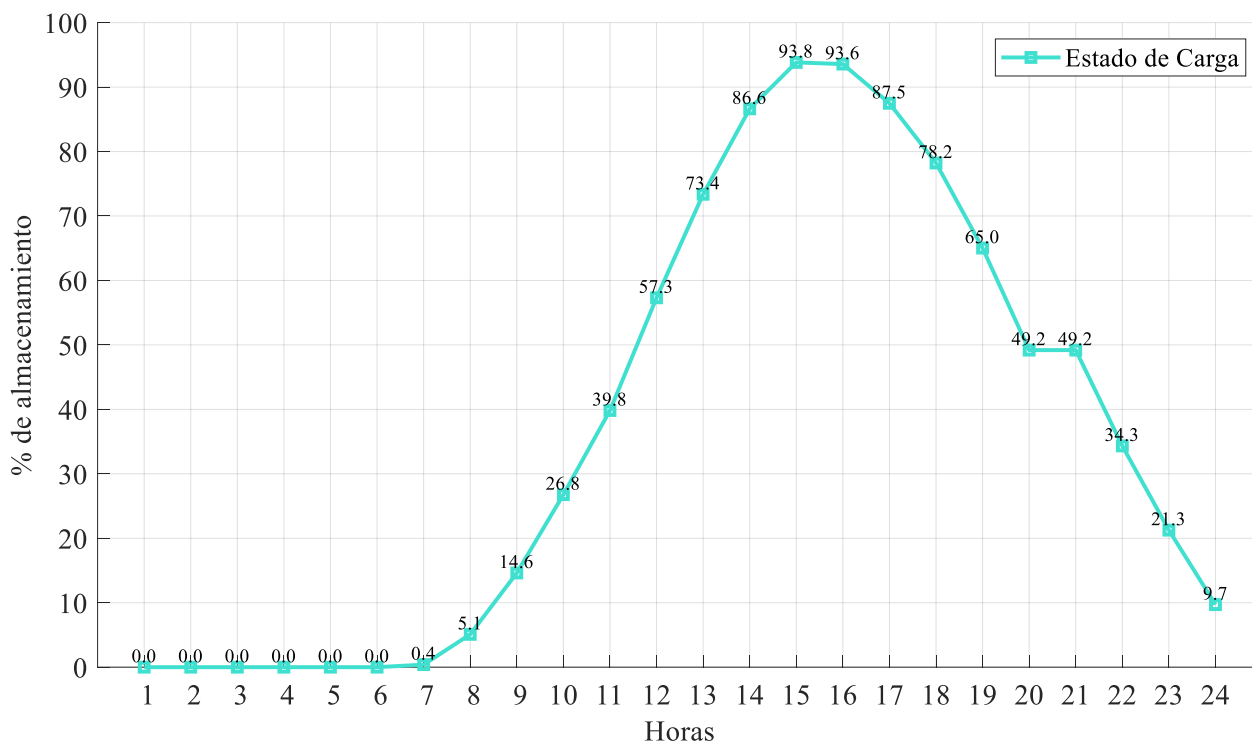


Figura 24. Estado de carga del BESS para el escenario de recursos energéticos medios.

Finalmente, en la Tabla 6 se presentan los costos totales arrojados en la resolución del despacho para el primer escenario con recursos energéticos bajos, siendo el costo total por el uso del BESS el más alto con 105.69 USD, por otro lado, el costo total del generador diésel es de 70.46 USD, siendo el costo total de operación de 176.15 USD, el hecho de que sea mayor que el anterior caso se debe a que en este caso el despacho opto por dejar almacenamiento de energía residual al final debido a cumplir un funcionamiento correcto en la descarga del BESS. En este escenario tampoco se presenta costos por energía no suministrada y de vertimiento.

Tabla 6. Costos totales para la resolución del despacho económico en el segundo escenario.

Costo especificado	Valor	Unidad
Costo total por operación del BESS	105.69	USD
Costo total por operación del generador diésel	70.46	USD
Costo total por potencia no suministrada	0	USD
Costo total por vertimiento de potencia	0	USD
Costo total por la operación de todo el sistema	176.15	USD

5.3 Resultados del despacho para el escenario de recursos energéticos altos

La Figura 25 ilustra la respuesta obtenida para el último escenario de estudio, en el cual se consideran recursos energéticos superiores al promedio. Como en los escenarios anteriores, se mantiene la misma codificación de colores utilizada en el primer y segundo caso para facilitar la comparación. Nuevamente, durante las primeras y últimas horas del día, la demanda es cubierta principalmente por el generador diésel. Sin embargo, en este escenario, la potencia solar se ve favorecida por un mayor nivel de radiación, lo que permite un aprovechamiento más eficiente del recurso solar en comparación con los escenarios anteriores.

El sistema de almacenamiento de energía mediante baterías (BESS) muestra un patrón de carga y descarga más uniforme y alcanza su capacidad máxima de almacenamiento, lo que resulta en vertimiento de energía debido a la imposibilidad de almacenar el exceso de generación. La potencia eólica también es mayor en este escenario, superando la observada en los casos anteriores. Aunque no se registra energía no suministrada, se observa un vertimiento de energía significativo debido al excedente de potencia solar disponible, que no puede ser totalmente aprovechado.

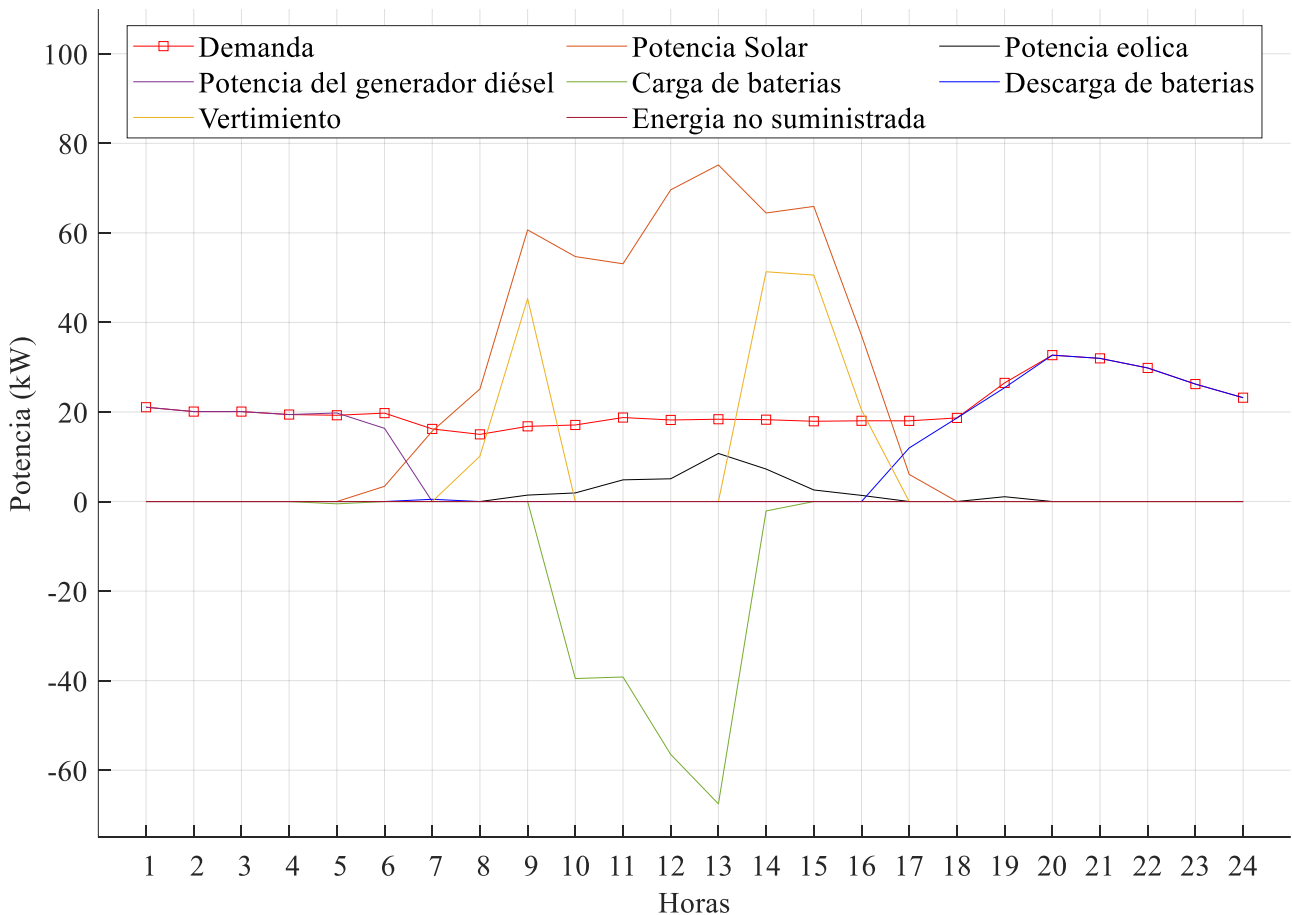


Figura 25. Resultados del modelo para el caso de mayores recursos energéticos.

La Figura 26 muestra el total de energía arrojada por cada una de las fuentes y se usa la misma paleta de colores ya establecida. La energía solar que es la fuente que por mucho más genera con un total de 530.98 kWh, por otra parte, la potencia eólica es la que menos genera con 36.30 kWh, el generador diésel se corresponde es la segunda mayor fuente de generación con 116.77 kWh. El funcionamiento del banco de baterías en modo carga almaceno un total de 204.81 kWh y en modo descarga descargo 200.44 kWh. Al igual que en los escenarios anteriores no se presenta energía no suministrada, sin embargo, si se presenta vertimiento debido a tener más recurso solar que el promedio, se vierte 177.76 kWh de todo el recurso solar, por lo que se ha aprovechado lo mejor posible la gran cantidad de radiación solar.

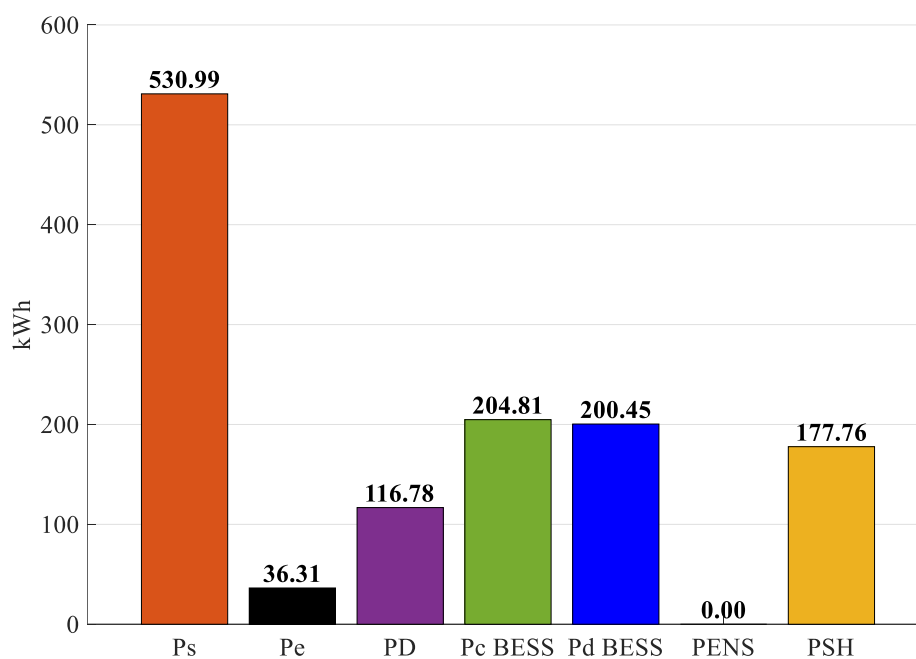


Figura 26. Energía producida por las fuentes de generación eléctrica en el escenario de recursos energéticos altos.

La Figura 27 muestra el porcentaje de aporte al abastecimiento de la demanda por parte de las fuentes de generación para el ultimo escenario de estudio planteado considerando la generación de series sintéticas con recursos energéticos mayores a la media, la potencia solar suple la demanda en un 48%, esto claramente surge del tener exceso de recurso solar aprovechando mucho más el sol a diferencia de los anteriores escenarios, mientras que por otra parte el generador Diesel aporta con un 17% en el abastecimiento de la demanda. En cuanto al BESS este aporta supliendo a la demanda en un 30%, la potencia eólica aporta supliendo a la demanda en un 5%, un aporte mayor que los anteriores escenarios.

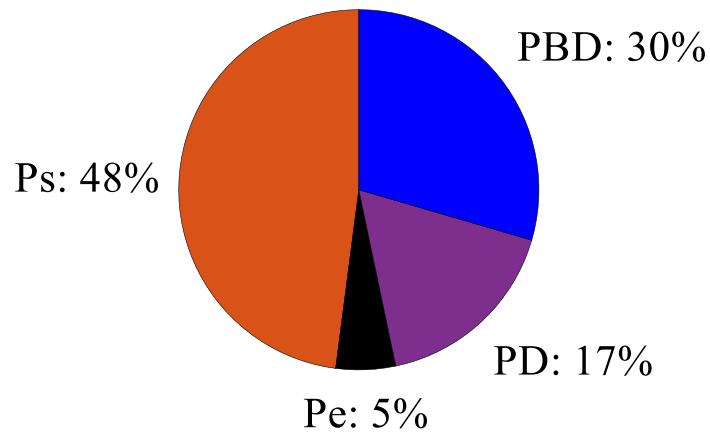


Figura 27. Abastecimiento de la demanda de las fuentes de generación en el escenario de recursos energéticos altos.

En la Figura 28 se muestra el estado de carga del BESS durante el periodo de análisis, donde se puede evidenciar que la carga máxima a la que el BESS llega es del 100%, es decir en este escenario el BESS se cargó completamente algo normal si se considera que hay exceso de energía solar disponible para llenar el almacenamiento en su totalidad. En lo que a tiempo de uso se refiere, el BESS ha estado operativo durante 13 horas, de las cuales un total de 5 horas han sido en modo de carga y 8 horas han sido en modo descarga. Al final del periodo se presenta un almacenamiento residual del 0.4%.

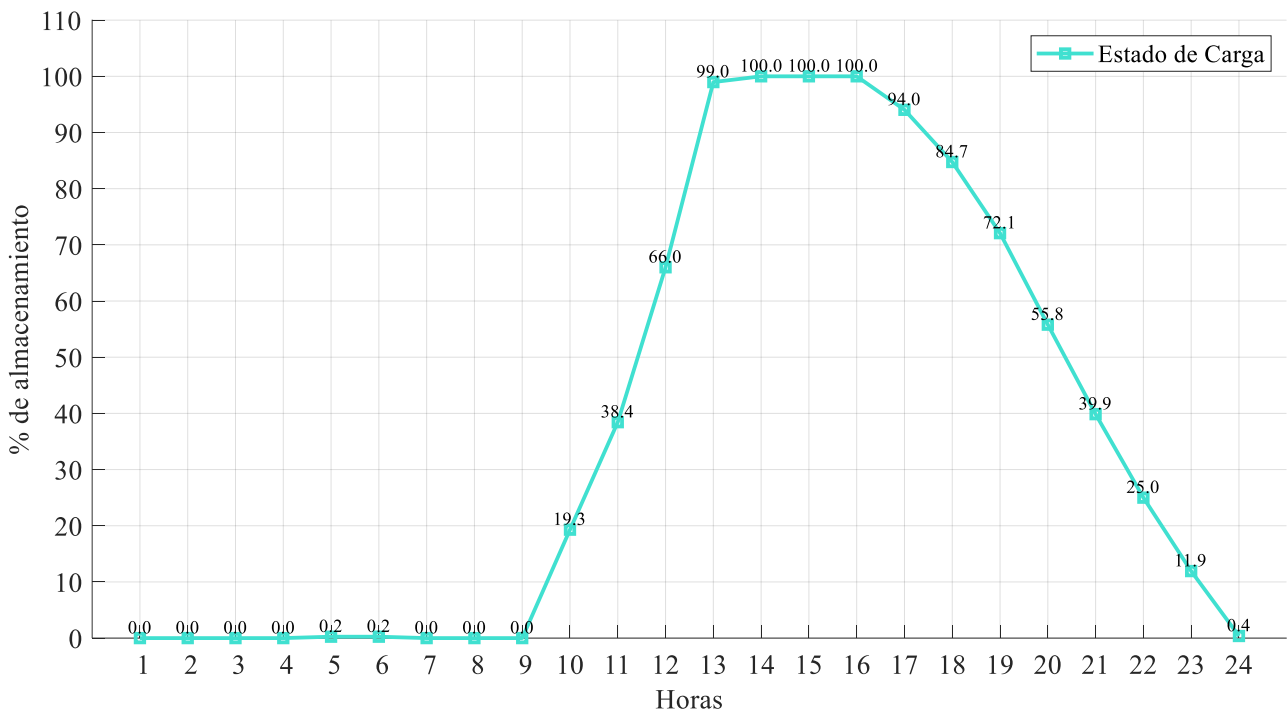


Figura 28. Estado de carga del BESS para el escenario de recursos energéticos altos.

Finalmente, en la Tabla 7 se presentan los costos totales arrojados en la resolución del despacho para el último escenario con recursos energéticos altos, siendo el costo total de uso del BESS de 105.69 USD, por otro lado, el costo total del generador diésel es de 57.77 USD, siendo el costo total de operación de 176.63 USD. En este escenario tampoco se presentan costos por energía no suministrada, pero sí por vertimiento siendo de 222.20 USD, sin embargo, este costo solo ha sido agregado con el fin de penalizar el vertimiento por lo que no cuenta para el costo total.

Tabla 7. Costos totales para la resolución del despacho económico en el tercer escenario.

Costo especificado	Valor	Unidad
Costo total por operación del BESS	118.86	USD
Costo total por operación del generador diésel	57.77	USD
Costo total por potencia no suministrada	0	USD
Costo total por vertimiento de potencia	222.2	USD
Costo total por la operación de todo el sistema	176.63	USD

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Para la generación de escenarios de entrada aleatorios se logró aplicar el método de Montecarlo, donde a partir de hallar la media y desviación estándar de los datos reales, usando la función de distribución de probabilidad normal se generan series sintéticas de la radiación solar y la velocidad del viento, mismas que fueron evaluadas mediante el NMRSE, siendo 7% el máximo permisible para las series solares y 10% para las eólicas. Siendo así que se contemplaron 3 escenarios para la generación de series sintéticas, un escenario con recursos bajos, otro con recursos promedio y finalmente uno con recursos mayores al promedio, para mediante la conversión a potencial solar y eólico, serán utilizados como entrada para el despacho económico.
- Se resolvió el despacho económico mediante un modelo MILP, donde para la modelación matemática del comportamiento del generador diésel se desarrolló la linealización por tramos de la curva cuadrática del consumo de combustible en función de la potencia generada, lo que resultó en una aproximación ideal para aplicarla en el modelo planteado y así resolver el despacho económico con programación lineal, además se utilizaron como entrada los parámetros de potencia solar y eólica generados a partir de las series sintéticas.

- Se logro obtener resultados del despacho económico para 24 horas, en cada uno de los tres escenarios propuestos. En el primer escenario todas las unidades entregan energía para suplir la demanda, aportando la generación solar con un 32%, el BESS con 18%, la generación eólica con <1% y el generador diésel con 50%. En el segundo escenario en cambio la demanda es suplida en un 33% por la generación solar, en un 21% por el BESS, en un 4% por la generación eólica y en un 42% por el generador diésel. Finalmente, en el escenario 3 las unidades de generación dan energía para suplir la demanda, aportando un 48% la generación solar, 30% por el BESS, 5% la generación eólica y 17% el generador diésel. En todos los escenarios no se presenta potencia de energía no suministrada, es decir que la demanda se abastece completamente en los tres escenarios. Mientras que únicamente en el escenario de mayores recursos se presenta vertimiento, lo cual es normal considerando que el BESS llega a la carga máxima y no puede almacenar el recurso excesivo.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda que para la generación de series sintéticas en los escenarios de entrada aleatorios se disponga de al menos un año de datos reales. Además, se sugiere probar distintas funciones de densidad de probabilidad, debido que no es estrictamente necesario utilizar la distribución normal. La elección de la función de densidad de probabilidad debe considerar el comportamiento específico de los datos, especialmente en el caso de la velocidad del viento.
- Se recomienda disponer de recursos computacionales robustos si se desea evaluar el modelo en un período de análisis mayor a un día. No obstante, en caso de no contar con tales recursos, el modelo ofrece la opción de ingresar la energía residual actualizando este valor en el parámetro de energía inicial (E_o) conforme los resultados de energía residual obtenidos en cada ejecución del modelo.
- Finalmente, se sugiere que para futuros trabajos se utilicen otros solvers para comparar y analizar las distintas respuestas que puedan generar. Se debe considerar que el modelo permite incorporar otras opciones de generación distribuida, como la evaluación del potencial de un generador de biomasa o la posibilidad de conexión con la red eléctrica.

7. REFERENCIAS

- [1] A. B. Kunya, A. S. Abubakar, and S. S. Yusuf, “Review of economic dispatch in multi-area power system: State-of-the-art and future prospective,” *Electric Power Systems Research*, vol. 217, p. 109089, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109089>.
- [2] D. Llarena, L. Souilla, S. A. Masiriz, and G. R. Lestard, “Variable Renewable Energy: How the Energy Markets Rules Could Improve Electrical System Reliability,” in *Advances in Green Electronics Technologies in 2023*, A. Sabban, Ed., Rijeka: IntechOpen, 2022, ch. 3. doi: [10.5772/intechopen.107062](https://doi.org/10.5772/intechopen.107062).
- [3] A. Shrestha, A. A. Mustafa, M. M. Htike, V. You, and M. Kakinaka, “Evolution of energy mix in emerging countries: Modern renewable energy, traditional renewable energy, and non-renewable energy,” *Renew Energy*, vol. 199, pp. 419–432, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.018>.
- [4] B. Dey, B. Bhattacharyya, and F. P. G. Márquez, “A hybrid optimization-based approach to solve environment constrained economic dispatch problem on microgrid system,” *J Clean Prod*, vol. 307, p. 127196, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127196>.
- [5] J. Dong *et al.*, “Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power,” *Renew Energy*, vol. 145, pp. 333–346, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.073>.
- [6] A. D. Bintoudi and C. Demoulias, “Optimal isolated microgrid topology design for resilient applications,” *Appl Energy*, vol. 338, p. 120909, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120909>.
- [7] Y. Duan, Y. Zhao, and J. Hu, “An initialization-free distributed algorithm for dynamic economic dispatch problems in microgrid: Modeling, optimization and analysis,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 34, p. 101004, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101004>.
- [8] R. J. Angulo Guerrero and W. J. González Santana, “Dimensionamiento de generación eléctrica fotovoltaica para abastecer un sistema de iluminación,” *Revista Ingeniería*, vol. 7, no. 17, pp. 265–273, Jan. 2023, doi: [10.33996/revistaingenieria.v7i17.105](https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v7i17.105).
- [9] “Sistema solar off grid: Tecnología solar aislada de la red.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://solarea.com.ar/sistema-solar-off-grid/>

- [10] Consejo Nacional de Energía, “Fomentando el uso de fuentes renovables de energía en El Salvador.” Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: <https://biblioteca.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=14145>
- [11] L. V. Clementi and G. P. Jacinto, “Energía eólica distribuida: oportunidades y desafíos en Argentina,” *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, no. 29, pp. 48–64, Mar. 2021, doi: 10.17141/letrasverdes.29.2021.4590.
- [12] “Funcionamiento de un aerogenerador - ALTTION Ronergy Wind Services.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://ronergy.com/funcionamiento-de-un-aerogenerador/>
- [13] M. Moroz, S. Korol, V. Yelistratov, O. Moroz, K. Korol, and V. Zahorianskyi, “Device for Stabilizing the Electrical Power of a Diesel Generator in Transport,” in *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240910.
- [14] “KOHLEK SDMO 40KW Generador Diesel Con Recinto Insonorizado | K40UM || Brags & Hayes Generators - Español.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://bnhgenerators.com/es/producto/k40um-kohler-sdmo-diesel-generator-40kw-with-soundproofed-enclosure/>
- [15] J. Rosero García, R. García Sierra, A. F. Cerón, and A. F. Zuñiga, “Una propuesta metodológica para la evaluación de la condición en sistemas de almacenamiento de energía con baterías (BESS) utilizando KPIs,” *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 40, no. 02, pp. 204–223, Dec. 2022, doi: 10.14482/inde.40.02.627.001.
- [16] J. Hetzer, D. C. Yu, and K. Bhattarai, “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 603–611, Jun. 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914171.
- [17] “FICO® Xpress Optimization.” Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/overview.html>
- [18] M. Javadi and T. Amraee, “Economic Dispatch: A Mixed-Integer Linear Model for Thermal Generating Units,” in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Jun. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/EEEIC.2018.8493794.
- [19] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheble, “Power generation, operation, and control - Third edition,” *Isbn: 978-1-118-73391-2*, p. 632, 2014, Accessed: Jul. 31, 2024. [Online].

Available: <https://www.wiley.com/en-us/Power+Generation%2C+Operation%2C+and+Control%2C+3rd+Edition-p-9781118733912>

- [20] D. Luengo, L. Martino, M. Bugallo, V. Elvira, and S. Särkkä, “A survey of Monte Carlo methods for parameter estimation,” *EURASIP J Adv Signal Process*, vol. 2020, no. 1, p. 25, 2020, doi: 10.1186/s13634-020-00675-6.
- [21] T. Raziei, “Performance evaluation of different probability distribution functions for computing Standardized Precipitation Index over diverse climates of Iran,” *International Journal of Climatology*, vol. 41, no. 5, pp. 3352–3373, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.7023>.
- [22] O. Fontanelli Espinoza, R. L. Mansilla Corona, and P. E. Miramontes Vidal, “Distribuciones de probabilidad en las ciencias de la complejidad: una perspectiva contemporánea,” *INTER DISCIPLINA*, vol. 8, no. 22, p. 11, Aug. 2020, doi: 10.22201/ceiich.24485705e.2020.22.76416.
- [23] T. O. Hodson, “Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not,” *Geosci Model Dev*, vol. 15, no. 14, pp. 5481–5487, 2022, doi: 10.5194/gmd-15-5481-2022.
- [24] C. N. Obiora, A. N. Hasan, A. Ali, and N. Alajarmeh, “Forecasting Hourly Solar Radiation Using Artificial Intelligence Techniques,” *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 44, no. 4, pp. 497–508, 2021, doi: 10.1109/ICJECE.2021.3093369.
- [25] “MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico.” Accessed: Aug. 04, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [26] M. Hussain and S. K. Park, “Systematic Analysis of Wind Resources for Eolic Potential in Bangladesh,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 17, 2021, doi: 10.3390/app11177924.
- [27] J. L. Proaño, D. O. Villalba, D. Saez, and D. O. Quero, “Economic dispatch for optimal management of isolated microgrids,” in *2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI)*, Nov. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/CONCAPAN.2016.7942382.
- [28] D. Jiménez, A. Jaya, D. Lagla, C. Chasi, R. S. A, and P. Zurita, “An Optimization Model Assessment for the Economic Dispatch of Isolated Microgrids,” in *2022 IEEE Sixth Ecuador*

Technical Chapters Meeting (ETCM), Oct. 2022, pp. 1–6. doi:
10.1109/ETCM56276.2022.9935730.