



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

## DIRECCIÓN DE POSGRADO

### MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD

#### MODALIDAD: INFORME DE INVESTIGACIÓN

**Título:**

---

Sistema de gestión de energía dentro de una micro - red aislada basada en un problema de optimización estocástica

---

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Magister en Electricidad  
mención sistemas eléctricos de potencia

**Autor:**

Chasi Cajas Christian Paúl

**Tutor:**

Jiménez Jiménez Diego Leonardo M.Sc.

**LATACUNGA –ECUADOR**

**2023**

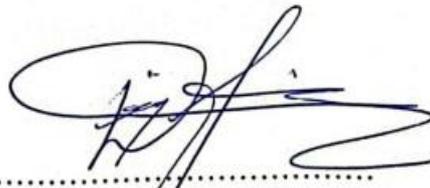
## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación “Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica”, presentado por Chasi Cajas Christian Paúl para optar por el título de magíster en Electricidad Mención Sistemas Eléctricos de Potencia.

## CERTIFICO

Que dicho trabajo de investigación ha sido revisado en todas sus partes y se considera que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación para la valoración por parte del Tribunal de Lectores que se designe y su exposición y defensa pública.

Latacunga, octubre, 30, 2023



M.Sc. Diego Leonardo Jiménez Jiménez

CC: 0503493702

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El trabajo de Titulación: “Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica”, ha sido revisado, aprobado y autorizado su impresión y empastado, previo a la obtención del título de magíster en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia; el presente trabajo reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la exposición y defensa.

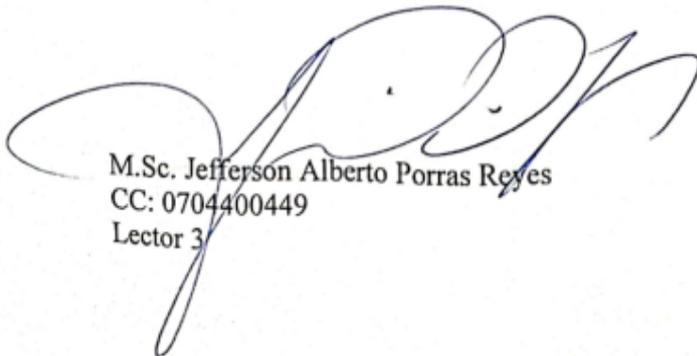
Latacunga, octubre, 30, 2023



M.Sc. Carlos Iván Quinatoa Caiza  
CC: 0503287864  
Presidente del tribunal



M.Sc. Fernando Rafael Arias Atiaja  
CC: 0502556251  
Lector 2



M.Sc. Jefferson Alberto Porras Reyes  
CC: 0704400449  
Lector 3

## **DEDICATORIA**

A mis padres por el apoyo brindado en todos los proyectos que me he propuesto.

*Christian Chasi*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por bendecirme y permitirme alcanzar la meta propuesta.

A mis padres por ser un ejemplo y guía durante toda mi vida, nunca terminaré de agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mi amigo y tutor Diego por guiarme en el desarrollo del proyecto de investigación.

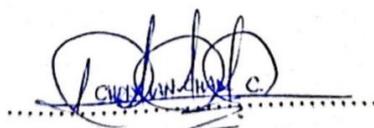
A todas las personas que estuvieron cuando más las necesité, a ellos gracias.

*Christian Chasi*

## **RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Quien suscribe, declara que asume la autoría de los contenidos y los resultados obtenidos en el presente trabajo de titulación.

Latacunga, octubre, 30, 2023



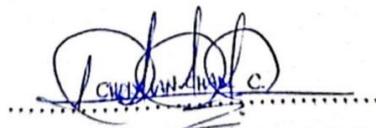
Ing. Christian Paúl Chasi Cajas

CC: 0503252215

## **RENUNCIA DE DERECHOS**

Quien suscribe, cede los derechos de autoría intelectual total y/o parcial del presente trabajo de titulación a la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Latacunga, octubre, 30, 2023



Ing. Christian Paúl Chasi Cajas

CC: 0503252215

## **AVAL DEL PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

Quien suscribe, declara que el presente Trabajo de Titulación: Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica, contiene las correcciones a las observaciones realizadas por los lectores en sesión científica del tribunal.

Latacunga, octubre, 30, 2023



M.Sc. Carlos Iván Quinatoa Caiza

CC: 0503287864

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Título:** Sistema de gestión de energía dentro de una micro-red aislada basada en un problema de optimización estocástica.

**Autor:** Chasi Cajas Christian Paúl

**Tutor:** Jiménez Jiménez Diego Leonardo M.Sc.

**RESUMEN**

En la última década el uso de las fuentes de energía no convencionales (ERNC) como la solar y eólica, ha crecido de manera exponencial, para generar energía eléctrica en microrredes, con el objetivo de mitigar las emisiones de  $CO_2$ , reducir el uso de combustibles fósiles, minimizar los costos de adquisición de equipos de generación convencionales y abastecer la demanda. En este contexto es necesario analizar el despacho económico (ED) como un problema de optimización estocástica debido a la variabilidad del recurso solar, la fuente de energía eólica no se consideró debido a las bajas velocidades del viento. Con relación al sistema almacenamiento de energía se utilizó baterías de Ion-Litio, por sus características técnicas como alta potencia, alta eficiencia, longevidad y seguridad. El sistema de simulación diseñado está basado en tres etapas la primera la red neuronal artificial (ANN) que utiliza 18 entrada, el mes, el día, la hora, y los datos de los 15 días anteriores de irradiación, para predecir los valores del recurso solar, el modelo fue validado con el cálculo del RMSE con valores menores o iguales al 5% y con valores del R superiores a 0.8 en todas las pruebas. La segunda etapa consistió en utilizar los datos predicho como entrada al problema de optimización MILP, donde se evidencio que la energía solar aporta con el 59% de energía, el excedente permitió cargar las baterías y cuando entran en modo descarga aportan con un 25% de potencia, que permitió que el generador diésel se encienda en intervalos pequeños de tiempo aportando un 16%, abasteciendo de esta manera la demanda analizada. Finalmente, en la etapa tres, se realizó la comparación de costos entre el enfoque estocástico y determinista. En el horizonte de 24h no existió cambios, en el horizonte de 48h el determinista fue mejor con un ahorro de \$0.42. Sin embargo, en el horizonte de 168h se ahorró \$0.44 utilizando el método estocástico, concluyéndose que mientras más amplio es el horizonte de tiempo. El enfoque estocástico es mejor, entendiéndose que los costos de operación son menores, el generador diésel reduce su desgaste mecánico, la utilización de combustible fósil es menor y se prioriza las ERNC.

**PALABRAS CLAVE:** Predicción solar, modelo de optimización MILP, baterías de Ión-Litio.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN ELECTRICIDAD**  
**MENCIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

**Topic:** Energy management system within an isolated microgrid based on a stochastic optimization problem.

**Author:** Chasi Cajas Christian Paúl

**Tutor:** Jiménez Jiménez Diego Leonardo M.Sc.

**ABSTRACT**

In the last decade, the usage of non-conventional renewable energy (ERNC) such as solar and wind has grown exponentially in order to generate electrical energy in microgrids, the objective is to mitigate  $CO_2$ , reduce the use of fossil fuels, minimize the costs of conventional generation equipment, and supply the demand. In this context, it is necessary to analyze the economic dispatch (ED) as a stochastic optimization problem due to the variability of solar resources, wind energy source was not considered due to low wind speeds. Regarding the energy storage system, Lithium-Ion batteries were used, due to their technical characteristics such as high power, high efficiency, longevity, and safety. The designed simulation system is based on three stages: the first stage is the artificial neural network (ANN) which uses 18 inputs, including the month, day, hour, and data from the previous 15 days of irradiation, to predict solar resource values, the model was validated using RMSE calculations with values less than or equal to 5% and with R values greater than 0.8 in all tests. The second stage consisted of using the predicted data as input to the MILP optimization problem, where it was found that solar energy contributes 59% to the energy, the surplus allowed the batteries to be charged, and when batteries are in discharge mode, they contribute 25% of the energy, allowing the diesel generator to turn on in short intervals of time, contributing 16% and thus supplying the analyzed demand. Finally, in the third stage, the cost comparison between the stochastic and deterministic approach was performed. In the 24-hour horizon, there were no changes, in the 48-hour horizon, the deterministic was better with a savings of \$0.42. However, in the 168h horizon was saved \$0.44 by using the stochastic method, concluding that the longer the time horizon, the stochastic approach is going to be better, the operating cost are lower, the diesel generator reduces its mechanical wear. The use of fossil fuel is less and the non-conventional renewable energies is prioritized.

**KEY WORDS:** Solar prediction, MILP optimization model, Lithium-Ion batteries.

Yo, Diana Maribel Panchi Herrera con cédula de identidad 0503977985, Licenciada en: Ciencias de la Educación Mención Inglés con número de registro de la SENESCYT: 1020-2016-1736817; **CERTIFICO** haber revisado y aprobado la traducción al idioma inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: "Sistema de gestión de energía dentro de una micro-red aislada basada en un problema de optimización estocástica" del Ing. Christian Paúl Chasi Cajas, aspirante a magister en Electricidad mención Sistemas Eléctricos de Potencia.



.....  
Lic. Diana Maribel Panchi Herrera  
CC: 0503977985

Latacunga, octubre, 30, 2023

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN .....	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema .....	3
Objetivo General .....	3
Objetivos Específicos.....	3
Justificación .....	5
Hipótesis.....	6
CAPÍTULO I.....	7
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA-METODOLÓGICA .....	7
1.1 Antecedentes de la investigación .....	7
1.2 Fundamentación Teórica.....	13
1.2.1 Fundamentos microrredes. ....	14
1.2.1.1 Características de una Microrred.....	15
1.2.1.2 Estructura y elementos de una microrred .....	16
1.2.2 Optimización dentro de una microrred.....	22
1.2.2.1 Optimización Matemática. ....	22
1.2.2.2 Técnicas de Optimización Matemática. ....	25
1.2.3 El problema de Despacho Económico. ....	27
1.2.3.1 Despacho económico convencional. ....	29
1.2.3.2 Despacho económico no convencional. ....	30
1.2.4 Fundamentos de las redes neuronales artificiales .....	30
1.2.4.1 Redes Neuronales artificiales. ....	32
1.2.4.2 Arquitecturas neuronales. ....	34
1.2.4.3 Funciones de Activación.....	36
1.2.4.4 Métodos de aprendizaje.....	37

1.2.5	Conceptos dentro de la radiación solar.	38
1.2.6	Criterios de evaluación.	39
1.2.6.1	Error cuadrático medio.	39
1.2.6.2	Raíz del Error Medio Cuadrático	39
1.2.6.3	Coefficiente de correlación de Pearson.	39
1.3.4	Tipos de investigación	40
1.3.4.1	Investigación descriptiva	40
1.3.4.2	Investigación teórica-conceptual	40
1.3.4.3	Investigación aplicada	41
1.3.7	Técnicas de comprobación de Hipótesis.	41
1.4	Conclusiones Capítulo I	41
CAPÍTULO II. PROPUESTA		43
2.1	Título de la propuesta	43
2.2	Objetivo de la propuesta	43
2.3	Justificación de la propuesta	43
2.4	Descripción de la propuesta	44
2.5	Desarrollo de la metodología	45
2.5.1	Red Neuronal	45
2.5.1.1	Análisis de Datos	46
2.5.1.2	Desarrollo de la Red Neuronal	47
2.5.2	Diseño de la microrred aislada	49
2.5.2.1	Función objetivo	50
2.5.2.2	Balance de potencia	50
2.5.2.3	Límites de unidades de generación despachables	50
2.5.2.4	Energía	51
2.5.2.5	Estado de las variables binarias del pack modular de baterías	51

2.5.2.6 Estado de carga -----	51
2.5.3 Costo de uso del pack modular de baterías-----	52
2.5.4 Demanda eléctrica -----	52
2.5.5 Energía solar-----	53
2.5.6 Cálculo de potencia de paneles solares fotovoltaicos-----	54
2.5.7 Sistema de almacenamiento (Banco de baterías)-----	56
2.5.7 Implementación del modelo de optimización-----	57
2.5.7.1 Flujograma para solucionar el problema de optimización -----	57
2.5.7.2 Costos para realizar el despacho económico-----	59
2.5.8 Requerimientos del hardware y software -----	59
2.5.8.1 Hardware -----	59
2.5.8.2 Software -----	60
2.5 Descripción del caso de estudio-----	62
2.5 Conclusiones Capítulo II-----	62
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	64
3.1 Análisis de resultados -----	64
3.2 Resultados de la red neuronal artificial -----	65
3.3 Resultados en diferentes horizontes de programación -----	66
3.3.1 Despacho Económico con enfoque estocástico para 24 horas. -----	66
3.3.2 Despacho Económico con enfoque estocástico para 48 horas. -----	68
3.3.3 Despacho Económico con enfoque estocástico para 168 horas.-----	69
3.4 Análisis del despacho económico-----	70
3.5 Análisis de calidad-----	71
3.5 Conclusiones Capítulo III-----	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES-----	74
CONCLUSIONES -----	74

RECOMENDACIONES -----	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	77
ANEXOS -----	82
Anexo 1: Hoja de especificaciones técnicas de la Batería -----	82
Anexo 2: Hoja de especificaciones técnicas del generador diésel -----	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Sistema de tareas en relación con los objetivos .....	4
<b>Tabla 2:</b> Expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos [26] .....	24
<b>Tabla 3:</b> Funciones de activación aplicadas a redes neuronales [45].....	36
<b>Tabla 4:</b> Irradiación máxima en diferentes estaciones del año .....	47
<b>Tabla 5:</b> Resumen de diseño y arquitectura de la ANN .....	48
<b>Tabla 6:</b> Características que describen la demanda típica de enero del 2022 .....	53
<b>Tabla 7:</b> Parámetros de los paneles fotovoltaicos .....	55
<b>Tabla 8:</b> Datos de la Batería marca CSBattery modelo LPF12V100 12.8V 100 Ah .....	56
<b>Tabla 9:</b> Precio internacional del diésel .....	59
<b>Tabla 10:</b> Costos utilizados para la optimización .....	59
<b>Tabla 11:</b> Características del hardware .....	60
<b>Tabla 12:</b> Costo total del despacho económico con enfoque estocástico y determinista.....	70
<b>Tabla 13:</b> Cálculo del EVPI para diferentes horizontes de tiempo.....	71
<b>Tabla 14:</b> Cálculo del VSS para diferentes horizontes de tiempo.....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

<b>Figura 1:</b> Diagrama de una Micro-red [23].....	14
<b>Figura 2:</b> Clasificación de las MG [24]. .....	16
<b>Figura 3:</b> Estructura de una nano-red renovable híbrida independiente [25]. .....	17
<b>Figura 4:</b> Estructura de un sistema fotovoltaico [27].....	18
<b>Figura 5:</b> Sistema de almacenamiento [29].....	19
<b>Figura 6:</b> Proceso de carga y descarga de una batería [30].....	21
<b>Figura 7:</b> Estructura general de una neurona biológica [40].....	31
<b>Figura 8:</b> Relación entre una neurona biológica y artificial [42].....	32
<b>Figura 9:</b> Esquema de una unidad de proceso típica [39].....	34
<b>Figura 10:</b> Red neuronal monocapa [43]. .....	34
<b>Figura 11:</b> Red neuronal multicapa [43].....	35
<b>Figura 12:</b> Red multicapa aplicando la propagación hacia adelante [44].....	35
<b>Figura 13:</b> Red multicapa aplicando la propagación hacia atrás [44].....	36
<b>Figura 14:</b> Ejemplos del coeficiente de correlación de Pearson [46]. .....	40

### CAPÍTULO II

<b>Figura 15:</b> Sistema de gestión de energía propuesta.....	45
<b>Figura 16:</b> Flujograma para la ANN diseñada. ....	48
<b>Figura 17:</b> Despacho económico propuesto.....	49
<b>Figura 18:</b> Demanda eléctrica diaria.....	53
<b>Figura 19:</b> Comportamiento de irradiación diaria.....	54
<b>Figura 20:</b> Comportamiento de irradiación diaria.....	58

### CAPÍTULO III

<b>Figura 21:</b> Comparación de la irradiación predicha versus la real .....	65
<b>Figura 22:</b> Relación valores predichos versus valores reales .....	66
<b>Figura 23:</b> Despacho económico para 24 horas .....	67
<b>Figura 24:</b> Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas .....	67
<b>Figura 25:</b> Despacho económico para 48 horas .....	68
<b>Figura 26:</b> Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas .....	69
<b>Figura 27:</b> Despacho económico para 168 horas .....	69
<b>Figura 28:</b> Ciclo de la batería en un tiempo de 168 horas .....	70

## INTRODUCCIÓN

En la última década, el uso de los sistemas de energías renovables (ER) ha crecido de manera exponencial, con la finalidad de reducir el consumo de combustibles fósiles que generan un impacto ambiental fulminante y minimizar costos en cuanto a la adquisición de equipos de generación convencionales, debido a lo mencionado las fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC) como la eólica y solar son utilizadas para la generación de energía eléctrica en microrredes, debido a las ventajas que presenta como la reducción en la explotación de los recursos naturales, mejor calidad de energía, gasto cero de utilización y potencial, y la reducción de las emisiones de  $CO_2$  al ambiente.

De acuerdo con los datos mostrados por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARC) y al Balance Nacional de Energía Eléctrica (BNEE) de Ecuador de finales del año 2022, se presenta una potencia nominal generada del 58.82% para centrales hidráulicas, un 2,3% para generación en base a ERNC como biomasa, eólica, fotovoltaica, y biogas y un 38,88% para ER para fuentes de generación como centrales térmicas, turbogas y turbovapor [1], se debe mencionar que en el intervalo de tiempo indicado la población del país aumentó de 15,3 millones de habitantes en 2011 a 17,8 millones en 2021, con un crecimiento porcentual del 16,3%, un factor que afecta de manera directa a la demanda de consumo de energía eléctrica que incremento en un 30,9%, pasando de 1.175 kWh a 1.537 kWh por persona.

En este contexto la Universidad Técnica de Cotopaxi propone varias líneas de investigación, que permiten solucionar diversos problemas de carácter social y tecnológico, y el tema propuesto denominado “Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica” está enmarcado en la línea de investigación de energías alternativas y renovables, eficiencia energética y protección ambiental, debido a que factores como: las fuentes de ERNC, luego de un tratamiento adecuado permiten abastecer la demanda de energía eléctrica de forma óptima y con un impacto ambiental mínimo [2] [3].

Dentro de la línea de investigación indicada, la sublínea que acoge los parámetros indicados para desarrollar el presente trabajo es **Conversión y uso racional de la**

**energía eléctrica**, debido a que la optimización energética, permite aprovechar al máximo los recursos renovables en especial: el solar y eólico, mediante un adecuado despacho económico (del inglés, economic dispatch, ED). En este contexto el aumento de generación en base a ERNC a nivel mundial, presenta ciertos inconvenientes con relación a la incertidumbre y la variabilidad en los sistemas eléctricos, los cuales presentan desafíos de investigación, operación, costos, análisis de los recursos renovables, entre otros; con el objetivo de obtener un sistema óptimo que garantice un suministro de energía confiable y estable a menores costos de operación e intermitencia.

El presente trabajo de investigación, está estructurado en tres capítulos: en el Capítulo I se realizará la recopilación de la Fundamentación Teórica-Metodológica, que tiene relación con las definiciones, fórmulas y trabajos de despacho económico, optimización energética, formas para predecir el recurso de ER, y todo lo relacionado con los ejes que conforman el proyecto a desarrollarse con citas bibliográficas realizadas en normas IEEE. En la segunda parte del Capítulo I, se definirá la metodología utilizada en el ED basado en un problema de optimización estocástica. En el Capítulo II se presenta la propuesta de solución al problema descrito, la misma que contiene puntos como: Título de la propuesta, Objetivo, Justificación, Fundamentación y Desarrollo de la metodología, finalmente en el Capítulo III se desarrolla la aplicación y/o validación de la propuesta, es decir la aplicación práctica de lo establecido en la misma. Posteriormente se detallan las conclusiones y recomendaciones con la bibliografía detallada y los anexos existentes.

### **Planteamiento del problema**

En la actualidad la generación de energía eléctrica en su mayoría emplea dos centrales principales las hidroeléctricas y las termoeléctricas, sin embargo, las hidroeléctricas no abastecen la demanda de energía, debido en gran medida a las condiciones climáticas y a la ubicación geográfica de los consumidores, por lo que se hace necesario utilizar de acuerdo a las zonas, diversas plantas de generación de energía, que, dependiendo de la fuente, generan altas cantidades de emisiones de efecto invernadero que afectan al medio ambiente. Por esta razón, en las últimas

décadas, se han investigado nuevos sistemas de gestión de energía, aplicados a microrredes, basados en algoritmos matemáticos, que permiten administrar de forma óptima la energía en un determinado intervalo de tiempo, con el objetivo de minimizar los costos de operación, abastecer la demanda eléctrica y reducir la contaminación.

El ED en una microrred aislada, se presenta como un problema estocástico, que describe un comportamiento no determinista, debido a la variabilidad propia del recurso energético. Por esta razón es necesario determinar una metodología adecuada para predecir en cierta forma, el comportamiento de la variable mencionada antes de ser ingresadas al sistema, con la finalidad de planificar de manera óptima la distribución de energía en una microrred. Se utilizará un modelo matemático de optimización basado en programación lineal entera mixta (del inglés, mixed-integer linear programming, MILP), para el sistema, utilizando los datos de predicción de la irradiación en tres horizontes de tiempo (24h, 48h y 168h). Se debe mencionar que los métodos deterministas, utilizan un solo valor que alimenta a la demanda eléctrica en un cierto rango de tiempo, que da como consecuencia una planificación operativa inadecuada para el sistema de generación.

### **Formulación del problema**

¿Se puede simular un sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada considerando la predicción del recurso solar en un problema de optimización lineal entero mixto?

### **Objetivo General**

Simular un sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada considerando la variabilidad del recurso solar en un problema de optimización lineal entero mixto.

### **Objetivos Específicos**

1. Investigar problemas de optimización para la resolución de un despacho económico en el contexto de las microrredes utilizando energía renovable no convencional.

2. Establecer un sistema de predicción considerando la variabilidad del recurso solar como entrada al problema de optimización lineal entero mixto.
3. Simular el sistema de gestión de energía utilizando los datos de entrada del sistema de predicción para la resolución del problema de optimización.
4. Comparar la respuesta del despacho económico considerando el sistema de predicción versus la respuesta del sistema determinista.

En la Tabla 1 se detallan las actividades correspondientes a cada uno de los objetivos específicos planteados.

**Tabla 1:** Sistema de tareas en relación con los objetivos

<b>Objetivo Específicos</b>	<b>Actividades (tareas)</b>	<b>Resultado de la actividad</b>	<b>Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)</b>
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación bibliográfica de trabajos relacionados a la aplicación de modelos matemáticos de optimización estocástica para el despacho económico.</li> <li>• Recopilación de información técnica de las ERNC utilizadas en microrredes aisladas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración de marco teórico acerca de las metodologías utilizadas para realizar el DE en el contexto de las microrredes.</li> <li>• Definiciones, unidades de cálculo, metodologías y antecedentes relacionados a modelos matemáticos de optimización dentro de las microrredes.</li> <li>• Datos técnicos de una microrred aislada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Libros.</li> <li>• Tesis.</li> <li>• Artículos científicos.</li> <li>• Revistas tecnológicas.</li> <li>• Normativas.</li> <li>• Informes.</li> <li>• Técnicos.</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento de los datos obtenidos de la investigación bibliográfica del despacho económico.</li> <li>• Revisión de los fundamentos de redes neuronales artificiales.</li> <li>• Análisis de los factores que intervienen en la predicción de irradiación solar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración de un marco teórico acerca de las metodologías utilizadas para predecir la irradiación solar.</li> <li>• Reconocimiento de los parámetros requeridos para el desarrollo y validación de un sistema de predicción de irradiación solar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Libros.</li> <li>• Tesis.</li> <li>• Artículos científicos.</li> <li>• Revistas tecnológicas.</li> <li>• Normativas.</li> <li>• Informes Técnicos.</li> </ul>

3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión del método de optimización con MILP para incluir el enfoque estocástico en las entradas para simular realizar el despacho económico de una microrred aislada, tomando en cuenta la función objetivo y las restricciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulación del ED de una microrred aislada, para tres horizontes de tiempo (24h, 48h y 168h), mediante el software FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE</li> <li>• Determinar el comportamiento de las unidades generadores renovables y no renovables, verificando el abastecimiento de la demanda eléctrica.</li> <li>• Realizar las gráficas del despacho económico y del comportamiento de las baterías en modo carga y descarga mediante el software MATLAB R2018b.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.</li> <li>• MATLAB R2018b.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El despacho económico se realizará desde el punto determinista utilizando MILP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar la comparación de costos entre el enfoque estocástico y determinista, para establecer cuál de los dos métodos establece un costo menor de operación, y una reducción del uso de combustibles fósiles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FICO EXPRESS OPTIMIZATION SUITE.</li> <li>• MATLAB R2018b.</li> </ul>

### Justificación

El presente trabajo de investigación, representa un aporte significativo en el estudio de generación de energía eléctrica, en microrredes aisladas, las cuales están formadas por sistemas de generación renovable, sistemas de almacenamiento y grupos electrógenos. El despacho económico permite dar soluciones para abastecer la demanda de forma óptima, al combinar diversas tecnologías, que aprovechan las ERNC junto a la reducción del costo operativo.

De acuerdo a diversas investigaciones el ED, se plantea de forma determinista, mediante un modelo matemático, con una función objetivo y restricciones para el balance de energías, con una resolución basado en programación lineal y/o programación lineal entera mixta. Sin embargo; al utilizar datos deterministas no se

puede realizar una planificación operativa a futuro, por lo que es necesario realizar un ED considerando la variabilidad de los recursos renovables, que se comportan de forma estocástica, y que deben tomarse en cuenta al momento de ingresar al sistema, considerando la forma en que se comporta la demanda en un rango determinado de tiempo.

En el presente trabajo se analizará datos reales de irradiación del sector rural Chan del cantón Latacunga de la provincia de Cotopaxi, para determinar e interpretar el comportamiento estocástico del recurso, con la finalidad de predecir datos futuros para ser ingresado al sistema. La investigación será de utilidad para determinar los puntos de operación óptimos dentro de una microrred asilada que cumpla con los aspectos técnicos y operativos al mínimo costo mediante la estocasticidad en las entradas de las ERNC, para el análisis se utilizará un modelo matemático de optimización con MILP, con el objetivo de lograr una operación adecuada y una correcta planificación.

### **Hipótesis**

¿Será factible simular un problema de optimización con MILP utilizando datos de irradiación predichos en el contexto de las microrredes?

## **CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

En el presente capítulo, se presenta una revisión de la fundamentación teórica y metodológica que tiene relación con el tema de investigación “Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica”. En la Sección 1.1 se hace un resumen de los trabajos realizados con relación a los sistemas de gestión de energía basados en problemas de optimización, en la Sección 1.2 se analiza la fundamentación teórica sobre los temas y subtemas que abarcan todos los conceptos que respaldan la investigación. En la Sección 1.3 se indica la fundamentación metodológica, que muestra el procedimiento para obtener los datos requeridos para plantear la propuesta de solución al problema planteado y finalmente en la Sección 1.4 se concluye ciertos parámetros y definiciones necesarios para el desarrollo de los objetivos propuestos.

### **1.1 Antecedentes de la investigación**

El Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) permite realizar amplios estudios que abarcan la generación, transmisión, distribución y demanda con el fin de brindar energía eléctrica de calidad a los clientes finales, para ello; se consideran requisitos técnicos en función de la cantidad, confiabilidad y estos en relación con la calidad del servicio. Tal SEP debe planificarse en su expansión y operación para satisfacer el aumento de la demanda de electricidad [4] [5]. En los SEP, la operación y el control son referidos como múltiples procesos que requieren diferentes niveles de iteración, analizados en el tiempo; de ahí surge el estudio del ED, el cual está relacionado con el rápido crecimiento de la población mundial; y por lo tanto, la

demanda de energía eléctrica, el problema del despacho económico se presenta en diferentes sistemas de cada país, por lo que la planificación de la generación y demanda hará que todo el sistema funcione al menor costo y minimice las fallas que se puedan presentar en el SEP [6], [7].

En este contexto el uso de ERNC promueve un aumento considerable en la generación de electricidad, también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero de las centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles, y se ha convertido en una solución alternativa para el suministro de energía eléctrica a zonas remotas, que no pueden conectarse a la red de distribución, siendo la eólica y la solar las fuentes más utilizadas en las microrredes, para ello es necesario disponer de un modelo de ED, que debe analizar las limitaciones de las microrredes y las características de costo de las unidades generadoras, ya sean eólicas, fotovoltaicas, entre otras [2]. Para realizar el ED por penetración de ERNC, se debe analizar los diversos métodos, que determinan el costo de generación de las centrales eólicas, fotovoltaicas y otras unidades de energías renovables necesarias, para que puedan ser despachadas de manera óptima en la microrred. En este contexto se discutirán modelos y metodologías utilizados en investigaciones de despacho económico basadas en la penetración de ERNC.

En el trabajo de investigación " A Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy", se propuso un sistema de gestión de energía (EMS) basado en la estrategia horizonte rodante (RH) para su aplicación en microrredes basadas en energías renovables. Cada uno de estos pasos de decisión resuelve un problema de optimización de enteros mixtos basado en un modelo predictivo. Así, el EMS puede proporcionar puntos de ajuste en línea para cada unidad generadora y señales a los consumidores de acuerdo con el Mecanismo de Gestión de la Demanda (DSM). El proyecto fue implementado para una microrred compuesta por paneles fotovoltaicos, dos aerogeneradores, un generador diésel y sistemas de almacenamiento de energía como bancos de baterías (BESS). En el caso de estudio se propuso un esquema consistente de información predictiva y un marco de comparación económica entre los recursos humanos y los compromisos unitarios estándar (UC), indicando que las previsiones solares y eólicas se basan en modelos fenomenológicos con datos actualizados [8].

Carlos Batlle, publicó en el Banco Interamericano de Desarrollo, que las nuevas fuentes de ER (solar o la eólica), presentan un conjunto de características, como la variabilidad temporal y geográfica, que representan desafíos importantes a la hora de convertirse en una fuente de energía eléctrica de elección. En consecuencia, los impactos relacionados en la operación del sistema eléctrico pueden ir desde la necesidad de mayores reservas de generación en el sistema para la seguridad operativa y cambios en la planificación de la red de transmisión eléctrica. Además, se menciona que el sistema eléctrico existente en América Latina es principalmente hidroeléctrico, por lo que es menos problemático en términos de integración intermitente de recursos, más importante aún, cuando existen centrales hidroeléctricas con una importante capacidad de almacenamiento. En este contexto la integración de recursos renovables plantea desafíos para el desarrollo futuro de la generación de energía, por sus características descentralizadas y distribuidas, y la proliferación de la pequeña y mediana generación en las redes de distribución que exige una redefinición no solo de los procedimientos de operación de la red, sino también de los criterios para su expansión y, sobre todo, de las normativas que las rige [9].

El trabajo “Gestión Óptima Energética en Microrredes de Energías Renovables”, se centra en el problema del funcionamiento óptimo de una microrred, que es un conjunto de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento de energía, aislados o conectados a la red, que pueden ser gestionados de manera coordinada y confiable. Esta publicación presenta el diseño del controlador predictivo basado en modelos (MPC), para el caso de varias fuentes de energía renovables, incluidas la solar y la eólica, con el apoyo de almacenamiento híbrido de hidrógeno, lo que permite la gestión del balance energético, en diferentes escalas de tiempo [10].

Los autores Dario Arango, Ricardo Urrego, y Sergio Raúl Rivera, en el trabajo de investigación “Despacho Económico en Microrredes con Penetración de Energías Renovables Utilizando Algoritmos de Punto Interior y Restricciones Lineales”, se muestran varios resultados de simulación para el posible despacho económico de sistemas con penetración de ER, teniendo en cuenta las posibles variaciones de la velocidad del viento y la energía solar, en diferentes momentos del día. El trabajo realizado fue validado con una metodología, que ayuda a minimizar el costo total

de un sistema eléctrico utilizando el método del punto interior, utilizando la función `fmincon` de MATLAB, permitiendo determinar varios resultados, considerando las limitaciones de los sistemas de potencia con sintaxis de función lineal [11].

Los investigadores Diego Jiménez; Diego Ortiz Villalba; Aramis Pérez & Marcos E. Orchard, determinaron que un sistema de almacenamiento basado en baterías de iones de Litio, son parte fundamental para resolver inconvenientes de suministro de energía en microrredes aisladas, por el rendimiento, alta eficiencia, alta potencia, vida útil (extensa) y baja auto descarga. Se presenta una metodología que analiza el proceso de degradación de las baterías, cuando son utilizadas en una microrred, basados en el ED, que fue formulado como un problema de optimización MILP que permite a las baterías abastecer la demanda eléctrica en un intervalo de tiempo 168 horas a la semana [12].

Con respecto a la predicción de la irradiación solar podemos citar las siguientes investigaciones.

Los autores Fariba Besharat, Ali A. Dehghan, Ahmad R. Faghieh [13], realizan una investigación de los modelos que se utilizan para estimar la radiación solar global diaria promedio usando correlaciones apropiadas, de manera empírica, con la utilización de los datos medidos en algunas ubicaciones seleccionadas, las correlaciones estiman los valores de la radiación solar global a partir de parámetros meteorológicos, climatológicos y geográficos. Las ecuaciones empíricas desarrolladas fueron probadas con una excelente respuesta, por lo que no se puede elegir la correlación más apropiada para un propósito y sitio en particular, clasificándose en cuatro categorías, modelos basados en la luz solar, basados en las nubes, basados en la temperatura y otros basados en parámetros meteorológicos, en el que los coeficientes de regresión en los modelos indicados, se diferencian por el lugar donde se ubiquen, esto se debe a los cambios locales, estacionales en las nubes, su grosos, velocidad del viento, efectos de las superficies cubiertas de nieve, temperatura, entre otros.

Los autores Neelamegam, Amirtham Valan [14], utilizaron redes neuronales artificiales (del inglés, artificial neural networks, ANNs), mediante parámetros meteorológicos de los últimos 10 años utilizados como entrada de la red neuronal

como: latitud, longitud, altitud, año, mes, temperatura ambiente media del aire, nivel de presión media de la estación, velocidad media del viento y humedad relativa media, obteniendo en la salida un valor predecible de radiación solar global promedio mensual, mediante el uso de los siguientes cuatro algoritmos de propagación hacia atrás: descenso de gradiente (GD), gradiente conjugado escalado (SCG), algoritmo de propagación hacia atrás resiliente (RP) y Levenberg-Marquardt (LM), los modelos se desarrollaron en MATLAB versión 2012, siendo el LM el mejor algoritmo de la ANN, con un RMSE y coeficiente de Pearson (R), menor al 5% y mayor al 0.90 respectivamente.

En [15] el autor Orbea David, realiza un análisis de probabilidad estocástico de los datos históricos de las ERNC, obtenidos de la “base meteorológica Cotocollao”, para formar un año meteorológico típico (TMY), determinando el comportamiento de la velocidad del viento y de la radiación solar para cualquier instante del día. Para programar el ED se utilizó un modelo heurístico para corto plazo, en base a los resultados obtenidos respecto a la disponibilidad de los recursos diarios. Los resultados obtenidos entre los datos de variabilidad de las ERNC y la demanda en el SEP no dieron resultados favorables, pero al determinar en qué momento del día de un TMY es más aprovechado el recurso; fue aplicado el flujo de corriente continua (DC) y respectivamente el despacho económico (lambda-iterativo), logrando cubrir la demanda aleatoria diaria disminuyendo la generación convencional.

Los autores A. Cuesta, J Constante y D. Jijón [16], utilizan dos arquitecturas de ANN, Elman y Jordan (RNRE y RNRJ) para predecir un día de radiación solar y temperatura ambiente. Para las entradas del modelo de predicción fueron utilizados los datos meteorológicos registrados brindado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético como: la velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa y precipitación, utilizados para el entrenamiento, validación y predicción. La red se entrenó con tres funciones de aprendizaje, retropropagación, retropropagación de momento y retropropagación resiliente. Para evaluar el modelo se utilizó los parámetros estadísticos de R, RMSE y el comportamiento de la predicción sobre las gráficas reales de radiación solar y temperatura, obteniéndose

un R mayores a 0.9 en validación, y en la etapa de predicción con R mayores a 0.8 y con un RMSE inferiores al 5% para radiación solar y temperatura ambiente.

Los investigadores, Fermín Rodríguez, Alice Fleetwood, Ainhoa Galarza y Luis Fontan [17], propuso una metodología basada en ANN realizada en MATLAB, para predecir la generación de energía solar producida por generadores fotovoltaicos, para las entradas se utilizó la estación del día que se pronosticaba, la hora del día y los valores de irradiación en intervalos de 10 min durante las 24 h anteriores. La salida que se obtuvo en la ANN es el valor de irradiación previsto. El desempeño y el error de las predicciones fue realizado mediante un número de neuronas ocultas y retrasos para elegir la mejor arquitectura, el retraso adecuado se obtuvo haciendo que el número de neuronas ocultas se mantengan constante, y cambiando el valor del retraso de forma gradual para cada prueba. El procedimiento para fijar el número de neuronas ocultas fue exactamente el mismo, pero en este caso se mantuvo la demora. La validación de los resultados, se realizaron en base al RMSE de la predicción para los días fuera de la base de datos utilizada para entrenar, obteniéndose un error aproximado del 0.5% a 9%, entre la energía realmente producida y la prevista, demostrando que la herramienta desarrollada fue suficiente para instalarse en sistemas que tienen generadores solares integrados.

Los autores Hussein Sharadga, Shima Hajimirza, Robert S. Balog [18], presentaron en su investigación un análisis de predicción de la producción fotovoltaica, en especial en lugares donde no se haya registrado algún tipo de medición históricas de radiación solar u otros parámetros meteorológicos. En este trabajo, se analizan diversos métodos de predicción de series de tiempo incluyendo los métodos estadísticos y los basados en inteligencia artificial (IA) En la investigación se realiza la comparación de varios métodos de predicción como, el modelo autorregresivo de media móvil (ARMA), modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA) y modelos autorregresivos integrados de medias móviles estacionales (SARIMA). Para lo mencionado se utilizaron datos de 3640 h de datos de operación tomados de una estación fotovoltaica conectada a la red de 20 MW en China. Se determinó que las ANNs, tienen una mejor precisión con respecto a los modelos estadísticos, al momento de ser utilizados para las predicciones de series temporales de la producción de energía fotovoltaica con un menor tiempo de

cálculo. Sin embargo, las ANNs, así como los modelos estadísticos, predicen de forma eficiente la energía producida por las plantas fotovoltaicas utilizando una hora de anticipación sin tener acceso a las mediciones de radiación solar o cualquier parámetro meteorológico. Por lo tanto, el pronóstico de series temporales para plantas de energía fotovoltaica solo es confiable para la predicción con una hora de anticipación.

## **1.2 Fundamentación Teórica**

La generación de electricidad en la actualidad es un sector fundamental y estratégico, utilizado en gran cantidad en diversas aplicación residenciales, comerciales e industriales, generados en gran cantidad en lugares específicos y distribuidas a distancias extensas hasta los centros de consumo, donde se convierte y se utiliza para todo tipo de aplicaciones. Sin embargo, en ciertos proyectos de electrificación por lo general en sectores rurales o alejados, se intenta abordar el problema de proporcionar energía a las comunidades que han sido excluidas de los proyectos de electrificación tradicionales, debido a inconvenientes generados por sus características geográficas y/o económicas. Un paradigma típico de los proyectos de electrificación de áreas rurales generalmente considera dos enfoques del problema: en primer lugar, la utilización de generadores autónomos que utilizan combustibles fósiles, en segundo lugar, la expansión de las redes de distribución existentes, estas estrategias conllevan una serie de desventajas, principalmente durante la fase de operación y mantenimiento (O&M), dado el marco de tiempo que se debe considerar [19].

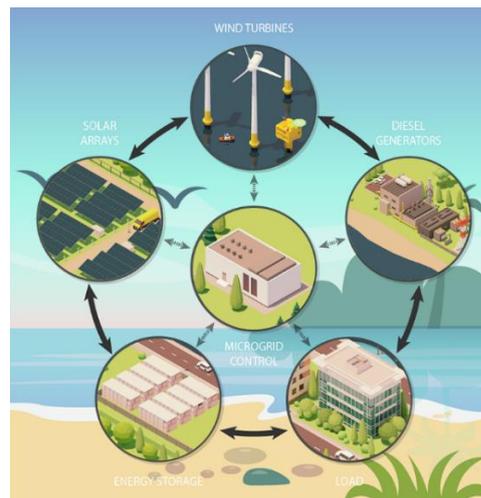
En este contexto, las ER, han adquirido gran importancia en la búsqueda de soluciones factibles y apropiadas para sitios específicos y de acuerdo a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) [20], ofrecen un estímulo para el crecimiento económico para los sectores indicados, cuando se utiliza una estrategia sólida y coherente; sin embargo, sus beneficios de desarrollo no son automáticos. Las energías renovables han producido recientemente una fuerza impulsora detrás de la proliferación de recursos energéticos distribuidos (DER), que en sí mismos son de pequeña escala y están ubicados cerca de los clientes finales, proporcionando y permitiendo diversas

ventajas como nuevas técnicas para redes de distribución activas, sistemas eléctricos aislados en microrredes, el aumento de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo tanto, existe la necesidad de aumentar la penetración de las ER y acelerar la descarbonización del sistema energético para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero entre un 80 % y un 95 % [21] .

### 1.2.1 Fundamentos microrredes

Las microrredes (MG) son sistemas de distribución de energía de bajo voltaje que integra de manera confiable los DER, sistemas de almacenamiento de energía y cargas controlables, que trabajan en conjunto para su operación (Figura 1). Los sistemas basados en microrredes, deben cumplir con ciertas características para que se puedan ser utilizadas [22].

- Proporcionar a los consumidores energía ininterrumpida y suficiente.
- Mantener estable la tensión nominal con un rango de variación de  $\pm 10\%$ .
- Mantener la frecuencia estable, con una variante entre  $\pm 0.1\text{Hz}$
- Obtener costos razonables de suministro de energía.



**Figura 1:** Diagrama de una Microrred [23]

Las MG pueden operar en modo isla y conectado a la red de distribución, lo que mejora la confiabilidad del suministro de energía. Tradicionalmente, en el modo isla, el control jerárquico es ampliamente utilizado para lograr los objetivos de control de regulación de frecuencia y regulación de voltaje, minimizando el costo de generación de energía; mientras que, en el modo conectado a la red, las MG

permiten solo minimizar el costo de generación de energía, porque la frecuencia y el voltaje son mantenidos principalmente por la red principal.

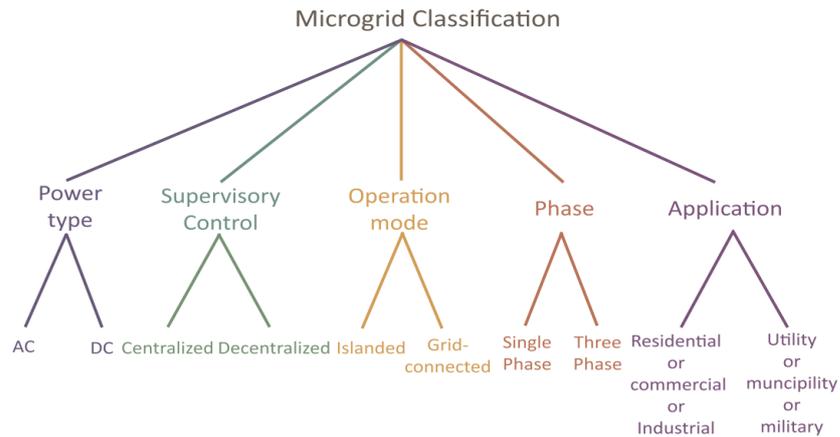
### **1.2.1.1 Características de una Microrred**

Las microrredes tienden a ser sistemas energéticos sostenibles desde una perspectiva socioeconómica debido a la creciente concienciación sobre el cambio climático. La principal fuente de generación de energía son las ER, acompañada de sistemas eficientes de generación de energía, está formada por diferentes elementos de generación distribuida y cargas que requieren energía. Las MG suelen estar conectadas a la red de suministro a través de puntos de conexión, para medir, controlar y alcanzar los objetivos, cada grupo electrógeno dispone de un sistema de electrónica de potencia, todo esto también es aplicado a microrredes en modo isla.

Las MG que están conectadas a la red, permiten obtener beneficios de compra y venta de energía con la red principal, como por ejemplo una de las principales ventajas es cuando se produce una perturbación en la red principal, además tienen la capacidad de cambiar a modo isla para garantizar la estabilidad del sistema, proporcionando un suministro continuo a cargas críticas mediante una operación integrada eficiente de los DER, y desconexión de carga (LS). La operación de las MG es coordinada y controlada por el controlador central de las microrredes y los controladores locales (LC). La gestión y coordinación efectivas de los DER en MG da como resultado un mejor rendimiento del sistema y un desarrollo sostenible [24].

Debido al cambio climático, el desarrollo socioeconómico y la necesidad de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), las MG son utilizadas principalmente en sistemas de energía sostenible, para generar energía eléctrica en base a fuentes de ER y sistemas de eficiencia energética que utilizan el calor residual local. La optimización de estos sistemas energéticos se logra mediante EMS que resuelven estrategias de toma de decisiones, estas estrategias consideran una mayor eficiencia energética del sistema, mayor confiabilidad, menor consumo de energía, disminución del costo operativo de los DER, reducción de pérdidas del sistema y mitigación de las emisiones de GEI para el desarrollo sostenible, además del modo de operación, las MG también se clasifican con respecto al tipo de

potencia generada, control de supervisión, modo de operación, fase de suministro y tipos de aplicación, como se muestra en la Figura 2.



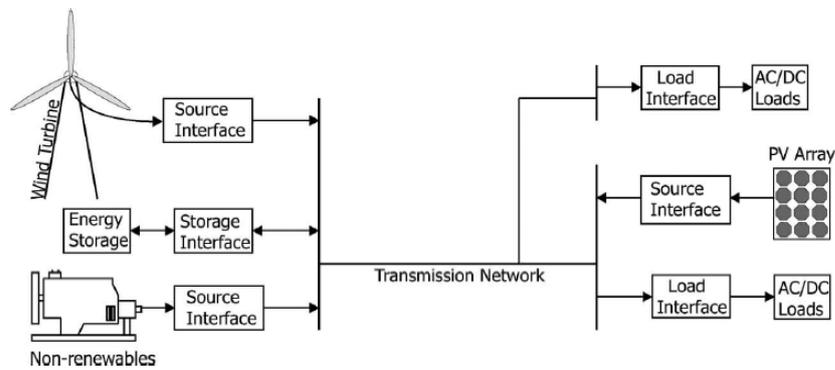
**Figura 2:** Clasificación de las MG [24]

### 1.2.1.2 Estructura y elementos de una microrred

Una microrred está compuesta por diferentes tipos de fuentes de generación convencionales y no convencionales, cargas de respuesta y cargas críticas; conectadas a la red principal a través de un punto de conexión común, sin tomar en cuenta el modo de operación de la MG, las fuentes de energías están conectadas a una interface de electrónica de potencia para lograr objetivos de control, medición y protección. Una nano-red puede considerarse como un componente básico de una microrred, por lo que una red de múltiples nano-redes forma una microrred; además proporciona la generación de energía local, como turbinas eólicas, paneles solares fotovoltaicos, entre otras, utilizados en el suministro principal para alimentar las cargas de determinado sector. El elemento más común en una nano-red es el sistema de almacenamiento de energía (del inglés battery energy storage systems, BESS) el cual acumula la energía producida por las fuentes de energía renovable y alimenta la demanda eléctrica cuando sea necesario.

En la Figura 3, se muestra la estructura de una nano-red renovable híbrida independiente, que está formada básicamente por convertidores de interfaz electrónicos de potencia, los convertidores elevadores permiten que fuentes de bajo voltaje se descarguen en la nano-red, y los convertidores reductores permiten que las cargas extraigan energía de la misma. Un convertidor bidireccional permite que el nodo de almacenamiento se cargue y descargue en la nano-red, además opera en

CD y presenta ventajas como una mayor eficiencia de transmisión y la facilidad de interconectar fuentes asíncronas como turbinas eólicas al sistema. En los sistemas renovables híbridos independientes, las fuentes renovables incontrolables satisfacen la demanda de carga promedio, mientras que el almacenamiento actúa como un amortiguador de energía, equilibrando las diferencias a corto plazo entre la potencia de la fuente y la carga. Se incluye la generación no renovable para mejorar la confiabilidad del sistema en caso de una escasez a largo plazo de energía renovable [25].



**Figura 3:** Estructura de una nano-red renovable híbrida independiente [25]

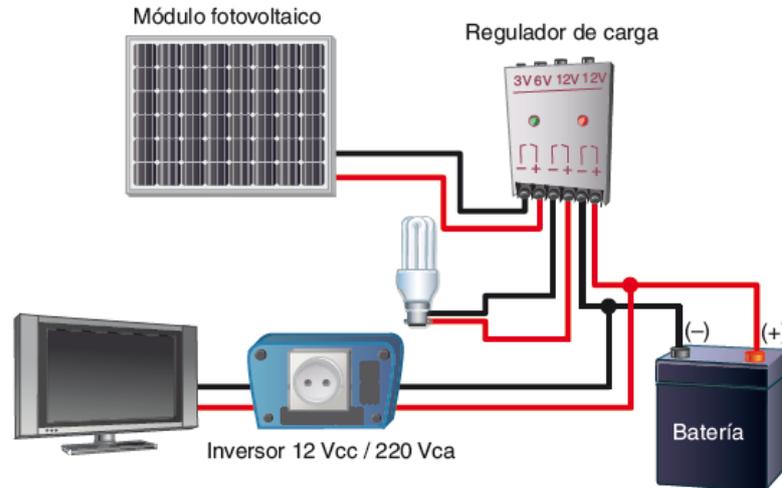
### Equipos de generación

En una microrred, se pueden seleccionar diversos equipos de generación, dependiendo de la fuente de energía primaria que utilicen, que se traduce como una ventaja hacia el usuario. A continuación, se presentan algunos tipos de generación:

#### Energía fotovoltaica

Se obtiene por conversión directa de la radiación solar, es una tecnología actual en el mercado. Los fotones golpean la superficie de un semiconductor y es capaz de suministrar energía a sus capas exteriores, resultando en diferencias de potencial. Es una fuente de energía sostenible a largo plazo que tiene un impacto positivo en el medio ambiente, su funcionamiento es silencioso, sin embargo; tiene algunas consideraciones como costos altos de instalación, baja eficiencia energética, entre otras [26]. La eficiencia media de los paneles fotovoltaicos oscila entre el 14 % y el 22%, en la conversión de la irradiación solar en electricidad, y estimada en un 6,9% en el mercado mundial. Sin embargo; se espera que este porcentaje aumente

en los próximos años, reduciendo los costos de producción y mejorando el nivel de eficiencia energética (Figura 4).



*Figura 4: Estructura de un sistema fotovoltaico [27]*

Los paneles, agrupan diferentes celdas fotovoltaicas para generar energía eléctrica, una de las ventajas que presenta es que es modular, permitiendo la agrupación de diferentes módulos en serio o paralelo, de acuerdo al tamaño del sistema deseado, hay que mencionar que existen diversos usos como: el suministro de energía a una microrred, la inyección de energía eléctrica en las redes eléctricas, y aplicaciones específicas, como suministrar energía a un satélite o recargar vehículos eléctricos.

### **Motores Alternativos de Combustión Interna (MACI)**

Es una tecnología común para la generación distribuida y utiliza esencialmente dos tipos: motores de gas natural y generadores diésel. La tecnología maneja rangos amplios de potencia, desde los  $15kW$  hasta los  $20000kW$ ; utilizando diésel, gasóleo o gas natural; logrando eficiencias eléctricas en torno a los 40% y eficiencias térmicas cercanas al 33%, la temperatura de combustión es alrededor de  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presenta ventajas como un bajo costo de inversión de capital, una vida útil de alrededor de 25 años, alta eficiencia con carga baja, consumo moderado de agua, tecnología compacta, amplio rango operativo, alta capacidad de ajuste, alta tasa de conversión de energía, fuerte robustez de operación entre otras, su principal desventaja son las altas emisiones de dióxido de carbono.

Su uso en microrredes es casi obligatorio, debido a que actúa como fuente de energía de respaldo, cuando sea necesario, reduciendo el almacenamiento de las baterías, el mayor inconveniente son los costos de operación que dependen de factores externos, por lo tanto, los consumidores pueden verse afectados por las fluctuaciones en los precios del combustible [26] [28]. Para una microrred se debe dimensionar correctamente el grupo electrógeno, debido a que este sistema debe funcionar como mínimo del 20% al 30% de carga, con la finalidad de mantener funcionales los elementos del motor de combustión. La operación de los grupos puede ser de manera manual o automática y se debe optar por la opción más conveniente dependiendo del diseño de la instalación, las necesidades de funcionamiento y la capacidad de la comunidad local.

### **Sistemas de almacenamiento**

Los sistemas son instalados para almacenar energía, los acumuladores actuarán como cargas en el sistema ya que absorberán energía de la microrred. Los elementos de almacenamiento también pueden actuar como generadores, ya que pueden transferir la energía almacenada al sistema, lo que ayuda a satisfacer la demanda. Se pueden mencionar algunos ejemplos como: superconductores, supercondensadores, baterías, baterías de flujo entre otros (Figura 5).



*Figura 5: Sistema de almacenamiento [29]*

En este contexto se puede mencionar que las tecnologías superconductoras, los capacitores, supercondensadores, y los volantes de inercia tienen densidades de energía muy bajas, sin embargo; tienen una alta densidad de potencia, que significa

que estas tecnologías son adecuadas para aplicaciones de calidad de energía con altas tasas de transferencia de potencia y tiempos de respuesta cortos, para finalizar se puede mencionar que las baterías y baterías de flujo tienen niveles moderados de potencia y densidad energética [28].

Para elegir el tipo de batería, se debe considerar los siguientes aspectos:

- La capacidad de la batería, para definir cuánta energía puede almacenar.
- Los límites de carga y descarga de la batería.
- El máximo límite de descarga, define el porcentaje de la batería que puede ser descargado respecto a la capacidad total.

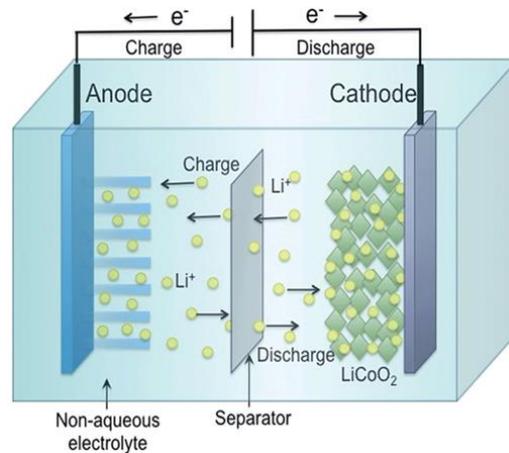
Se debe considerar como relevante el estado de carga en las baterías, que define la energía existente en los elementos de almacenamiento en un rango determinado en el que opera, definido por las características físicas de los elementos. El estado de carga es dinámico y cambiante debido a que los sistemas de almacenamiento se cargan y se descargan, y tiene relación directa con la eficiencia de carga y descarga.

Las baterías tienen la capacidad de ceder o absorber energía dentro de una microrred, y visto desde el punto de vista del sistema pueden consumir o aportar potencia, convirtiéndose en generadores o cargas, en este contexto, se debe considerar las características físicas del elemento existe y un rango de potencia máxima.

### **Baterías de Ion-litio**

Las BESS de iones de Litio son dispositivos utilizados para generar fuentes de energía renovable formados por celdas que contiene uno o más compartimentos generadores. Las celdas presentan una composición de tres componentes: un electrodo positivo hecho de un compuesto químico llamado Óxido de Cobalto de Litio ( $\text{LiCoO}_2$ ) o Fosfato de Hierro y Litio ( $\text{LiFePO}_4$ ), un electrodo negativo hecho de carbono de litio y entre ellos está una sustancia química llamada electrolito que varía de acuerdo al tipo de batería. En la Figura 6, se indica el proceso de carga y descarga de las BESS de Ion-Litio, en el proceso de carga, los iones cargados positivamente se mueven del ánodo al cátodo, como resultado, el cátodo se carga más positivamente que el ánodo. Esto, a su vez, atrae electrones cargados

negativamente al cátodo. Los electrolitos forman un catalizados que promueven el movimiento de iones a través del mismo y es lo que permite que los electrones se muevan a través del dispositivo al que está conectada la batería. Las baterías de iones de litio son recargables. Al recargarse, los iones de litio pasan por el mismo proceso, pero en sentido contrario, esto restaura la batería para uso adicional [30].



**Figura 6:** Proceso de carga y descarga de una batería [30]

Las BESS de iones de Litio presentan ciertas ventajas al ser una principal fuente de energía de los aparatos portátiles, pues pueden almacenar más energía por unidad de peso (densidad de energía por masa (Wh/kg)) y de volumen (densidad de energía por volumen (Wh/L)), es decir son livianas con respecto a acumuladores secundarios, otra ventaja es que no sufren de auto-descarga pues no presentan el efecto memoria y los ciclos de operación que pueden entregar son elevados, presentan diversas formas con alto rendimiento, que pueden ser utilizadas en la industria electrónica de consumo. Sin embargo, su uso presenta algunas desventajas como: un envejecimiento prematuro de las celdas generado al exceder el rango de voltaje de operación, la generación de riesgos de explosión debido a los componentes reactivos en las celdas, cambios de temperatura por defectos de fabricación, un costo de adquisición elevando entre otras.

### **Estado de Carga (del inglés, State-of-Charge, SOC)**

El SOC se define como la cantidad de energía que es almacenada en cada celda y se mide en porcentaje, por ejemplo, si la batería tiene un SOC del 100% quiere decir que la batería está en óptimas condiciones y completamente cargada, por el contrario, si se tiene un SOC del 0% entonces la batería está descargada [31].

Cuando la batería presenta un estado de carga alto, el ánodo tiene una gran cantidad de iones y está altamente energizado que da como resultado una celda más reactiva, una degradación acelerada y una autodescarga mayor. Hay que mencionar también que el cátodo puede sufrir una mayor deformación al tener un mayor déficit de iones de Litio y puede presentar en las celdas una mayor inestabilidad termodinámica [30].

### **Estado de Salud (del inglés, State-of-Health, SOH)**

El SOH indica la condición o estimación de salud de una batería con relación a cuando era nueva, un SOH del 100% significa que la batería es nueva mientras que un SOH del 0% quiere decir que la batería está completamente degradada, sin embargo; en la parte real, si una batería de ion-litio alcanza un punto entre 70%-80% del SOH se considera degradada.

### **Profundidad de descarga (del inglés, Depth of Discharge)**

Se relaciona con el SOC, debido a que representa el porcentaje de cuanta energía es utilizada por la batería desde una carga completa del 100% del SOC.

## **1.2.2 Optimización dentro de una microrred**

La optimización pasa por la reducción del consumo de combustibles fósiles, unidades de almacenamiento y gestión de cargas para garantizar la estabilidad y funcionamiento fiable del sistema, teniendo en cuenta aspectos económicos, medioambientales y las herramientas de control de microrredes considerando su función de costo y ciertas restricciones.

### **1.2.2.1 Optimización Matemática**

La optimización matemática se puede definir como la selección del mejor elemento de un conjunto de alternativas disponibles. Por ejemplo, un problema de optimización puede ser encontrar el máximo o mínimo valor de una función de un conjunto permitido bajo ciertas restricciones que deben cumplirse [33]. La optimización tuvo un rápido progreso con relación a su algoritmo, que incluye la "Mejor Alternativa" ante a otras. Puede definirse como la aplicación de métodos científicos para mejorar la eficacia de los negocios, la toma de decisiones y la gestión; tiene muchas formas lineal, no lineal, entera, estocástica, multiobjetivo,

teoría de decisiones y juegos, teoría de colas y simulación, teoría de grafos o flujo de redes, todo para la satisfacción óptima de un objetivo específico [26]. Existen diversos problemas de optimización, que están formados generalmente de tres componentes fundamentales:

### **Función Objetivo**

Una función objetivo es una función matemática sujeta a optimización (maximización o minimización). El codominio de esta función es un subconjunto de los números reales. El dominio se conoce como espacio temporal y puede representar cualquier tipo de elementos como números reales, enteros, binarios, listas, tareas a realizar, recursos disponibles, entre otros. Las funciones objetivo van desde funciones matemáticas simples hasta complejos algoritmos de cálculo, además define el problema a optimizar, y devuelve como resultado un valor real o un vector de valores reales que representan la utilidad, respecto del problema en cuestión y con valores correspondientes del dominio.

### **VARIABLES DE DECISIÓN**

El espacio de un problema puede tener  $n$  dimensiones. Se define como variables de decisión a las variables  $n$ -dimensionales que identifican cada solución en el espacio del problema  $X$  en forma unívoca.

### **Restricciones**

En algunos problemas existen restricciones de igualdad y restricciones de desigualdad con la que deben cumplir las soluciones para ser una solución válida. Estas restricciones dividen el espacio de búsqueda en regiones factibles y regiones no factibles. Usualmente, la proporción de las mismas, así como su distribución en el espacio del problema definen la complejidad de un problema de optimización [34].

Dependiendo de las restricciones y la función objetivo, un problema de optimización puede clasificarse en lineal, entero, entero mixto o no lineal. Por tanto, la programación matemática se puede clasificar en programación lineal (LP), programación entera (IP), programación lineal entera mixta (MILP), programación no lineal entera mixta (MINLP) y programación no lineal (NLP), entre otras. El

óptimo global se puede lograr con problemas convexos como LP. Curiosamente, aunque IP y MILP no son convexos, pueden resolverse a la optimización global [33]. En la Tabla 2, se muestra las expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización que son parte de los métodos clásicos, los problemas mostrados presentan diferencias por el carácter de las funciones que intervienen (lineales o no lineales) y las variables (reales/continuas o enteras/discretas).

**Tabla 2:** Expresiones matemáticas generales de algunos tipos de problemas de optimización dentro de los métodos clásicos [26]

<p align="center"><b>Programación lineal (linear programming) LP</b></p>	$\min_x c^T x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$
<p align="center"><b>Programación lineal entera mixta (mixed integer linear programming) MILP</b></p>	$\min_x c^T x + d^T y$ $Ax + By = b$ $x, y \geq 0$ $x \in \mathbb{Z}^n, y \in \mathbb{R}^l, c \in \mathbb{R}^n, d \in \mathbb{R}^l$ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}, B \in \mathbb{R}^{m \times l}, b \in \mathbb{R}^m$
<p align="center"><b>Programación cuadrática (quadratic programming) QP</b></p>	$\min_x c^T x + \frac{1}{2} x^T Q x$ $Ax = b$ $x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, Q \in \mathbb{R}^{n \times n}, b \in \mathbb{R}^m$
<p align="center"><b>Programación no lineal (non linear programming) NLP</b></p>	$\min_x f(x)$ $g(x) = 0$ $h(x) \leq 0$ $l \leq (x) \leq u$ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ $g, h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$
<p align="center"><b>Programación multiobjetivo (multiobjective programming) PMO</b></p>	$\min_x (f_1(x), \dots, f_k(x))$ $Ax = b$

	$x \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n, c \in \mathbb{R}^n, A \in \mathbb{R}^{m \times n}, b \in \mathbb{R}^m$ $f, (x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$
--	--

Al buscar soluciones, surgen decisiones que no se pueden representar adecuadamente, es decir, mediante variables continuas, por ejemplo, las decisiones de inversión son variables discretas (planificación o ampliación de generación o red, adquisición de equipos únicos, contratación de personal) o variables binarias (ubicación de fábrica o almacén), por lo que es adecuado utilizar el método q mejor represente a las variables utilizadas. Hay que mencionar que, dentro del tipo de problemas de optimización, se presentan diversos tipos que alteran ligeramente el esquema planteado [26].

### 1.2.2.2 Técnicas de Optimización Matemática

Algunos métodos clásicos de optimización incluyen la programación mixta de enteros lineales y no lineales. La función objetivo y restricciones empleadas en la programación lineal, son funciones lineales con variables de decisión reales y enteras. Los métodos de programación dinámica son utilizados para la resolución de problemas más complejos que se pueden discretizar y secuenciar. Generalmente el problema se divide en subproblemas que se resuelven de manera óptima, luego las soluciones parciales se superponen para desarrollar una solución óptima para problema original. Las metaheurísticas son otra alternativa importante en la optimización de microrredes, se emplean diferentes técnicas heurísticas para aproximar la solución óptima, mediante algoritmos genéticos, evolución biológica y mecanismos estadísticos para un rendimiento y control óptimo de la energía de la microrred.

El control predictivo se utiliza en aplicaciones donde es necesario pronosticar la generación y las carga para garantizar una gestión eficiente de la energía almacenada, que suele combinar programación y control estocástico, las más notables entre estas tecnologías son aquellas que pueden predecir la degradación de los elementos de la red, principalmente los sistemas de almacenamiento. Los métodos de optimización basados en múltiples agentes utilizados en microrredes,

permiten una gestión descentralizada y están formadas de partes con comportamiento autónomo para realizar tareas con objetivos definidos. Estos agentes incluyendo (cargas, generadores distribuidos y sistemas de almacenamiento) se comunican para obtener un menor costo. Se utilizan métodos estocásticos, programación robusta para resolverlos y funciones de optimización cuando los parámetros tienen variables aleatorias, especialmente en lógica difusa, teoría de juegos y ANNs.

En la actualidad se presentan métodos derivados, generados por la combinación de las técnicas mencionadas anteriormente, como métodos heurísticos, estocásticos, y algoritmos de enumeración. Diversos investigadores han propuesto diversas metodologías que se relacionan con la gestión energética en microrredes, basado en la gran mayoría en enfoques clásicos, como la LP y MILP. La LP se considera como un buen enfoque en función del objetivo y las limitaciones, mientras que los métodos de IA, se orientan para abordar escenarios en que otros métodos no muestran resultados satisfactorios, incluida la previsión de generación renovable y el óptimo funcionamiento del almacenamiento de energía, tomando en cuenta, modelos de degradación de batería, entre otros.

Otros autores consideran que las operaciones en modo aislado, son las soluciones alternativas de suministro, se concentran principalmente en zonas rurales de difícil acceso, o simplemente en lugares donde no hay una red tradicional, otros autores incluyen modelos de baterías en la optimización del sistema, también hay trabajos para optimizar las microrredes que pueden operar individualmente o interconectadas [35].

### **Programación Lineal**

La optimización lineal, consiste en aplicar la técnica clásica por excelencia, y de las más desarrolladas, produciendo que sus modelos sean los más utilizados con respecto a otros tipos de optimización y cubre la mayoría de los modelos de la actividad humana, como las finanzas, economía, planificación, selección de procesos, entre otros. Su importancia radica en técnicas potentes, estables y robustas para encontrar el valor óptimo [36].

### **Programación Lineal Entera Mixta**

Un problema de MILP, intervienen variables que toman valores reales, pero en la realidad, algunas de las variables no son reales sino enteras, siendo restringidas con valores binarios entre (0-1). el empleo de variables enteras hace más complejo el problema de programación lineal, debido a la ausencia de continuidad [36].

### **Programación No Lineal**

Los problemas de NLP son muy comunes cubriendo una gran cantidad de aplicaciones, en la realidad, se debe enfrentar a diversos problemas no lineales, cuando el conjunto de restricciones, la función objetivo o ambos son no lineales, se denomina Problemas de programación no lineal. Un NLP se plantea de la siguiente forma, mediante la ecuación 1.

$$\min_x f(x) \tag{1}$$

$$g_i(x) \leq b_i \quad i = 1, \dots, m$$

Donde  $x \in \mathbb{R}^n$ ,  $f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  y  $g_i(x) = \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . Se puede observar que la no negatividad de las variables no es parte de la definición. Se debe considerar que una función objetivo puede ser de maximización o minimización, y que no siempre la solución óptima se encuentra en un punto extremo de la región de la factibilidad, y en que ciertos casos donde el punto óptimo está en el interior de la región factible [26]- [37].

#### **1.2.3 El problema de Despacho Económico**

Los generadores y las demandas se encuentran en diferentes partes de la red de distribución. El objetivo del problema de ED es calcular la potencia en un momento dado que produce los generadores de tal manera que cubra la demanda a un mínimo costo, al mismo tiempo que satisfaga varias limitaciones técnicas de la red y los generadores. La red transmite electricidad por cada línea desde un nodo de suministro a un nodo de recepción [36]. La potencia enviada es proporcional a la diferencia de ángulos de estos nodos, la susceptancia es la constante de proporcionalidad. La potencia que se transmite desde el nodo  $i$  al nodo  $j$  por la línea  $i - j$  es:

$$B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

Donde  $B_{ij}$ , es la susceptancia de la línea  $i - j$ , y  $\delta_i$  y  $\delta_j$  los ángulos de los nodos  $i$  e  $j$  respectivamente. Debido a razones físicas, la potencia transmitida a través de una línea de potencia tiene limitaciones, la cual se justifica por consideraciones térmicas o de estabilidad, por lo cual; una línea debe funcionar de forma que la limitación de transporte no se supere en ningún caso, se formula:

$$-P_{ij}^{max} \leq B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \leq P_{ij}^{max} \quad (3)$$

Donde  $P_{ij}^{max}$ , es la capacidad máxima de  $i - j$ . No hay que olvidar que la potencia transmitida es proporcional a la diferencia de ángulos y no a un ángulo dado, como resultado el valor de un ángulo arbitrario puede fijarse a 0 y considerarlo como el origen, donde  $k$  es un nodo arbitrario:

$$\delta_k = 0 \quad (4)$$

Como consecuencia de seleccionar el origen con arbitrariedad, es que los ángulos son variables no restringidas en signo, la potencia generada presenta una magnitud positiva con cota inferior y superior. La cota inferior se debe a condiciones de estabilidad (como un vehículo no puede moverse con velocidades por debajo de un límite). La cota superior sigue las consideraciones térmicas (como un vehículo no puede superar una velocidad superior). Las restricciones anteriores pueden expresarse como:

$$P_i^{min} \leq p_i \leq P_i^{max} \quad (4)$$

Donde  $p_i$  es la potencia producida por el generador  $i$  y  $P_i^{max}$  y  $P_i^{min}$  que representan la potencia de salida máxima y mínima con valores positivos. En cada nodo, la potencia de llegada debe coincidir con la potencia de salida (ley de conservación de energía), y se expresa como:

$$\sum_{j \in \Omega_i} B_{ij}(\delta_i - \delta_j) + p_{ij} = D_i, \quad \forall i \quad (5)$$

Donde  $\Omega_i$ , es el conjunto de nodos conectados a través de la línea  $i$  y  $D_i$  la demanda. Según se ha indicado antes, la potencia transmitida a través de cada línea está acotada, de esta manera tenemos:

$$-P_{ij}^{max} \leq B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \leq P_{ij}^{max}, \quad \forall j \in \Omega_i, \forall i \quad (6)$$

En la cual cada elemento presenta:

### Datos

$n$	Número de generadores.
$P_i^{min}$	Potencia mínima del generador $i$
$P_i^{max}$	Potencia máxima del generador $i$
$B_{ij}$	Susceptancia de la línea $i - j$
$P_{ij}^{max}$	Capacidad de transporte máxima de la línea $i - j$
$C_i$	Coste de producción de potencia del generador $i$
$\Omega_i$	Conjunto de nudos conectados al nudo $i$
$D_i$	Demanda en el nudo $i$

### Variables

$p_i$	Potencia que debe producir el generador $i$
$\delta_i$	Ángulo del nudo $i$

### Restricciones

$$\begin{aligned} \delta_k &= 0 \\ \sum_{j \in \Omega_i} B_{ij}(\delta_i - \delta_j) + p_{ij} &= D_i; \quad i = 1, 2, \dots, n \\ -P_{ij}^{max} &\leq B_{ij}(\delta_i - \delta_j) \leq P_{ij}^{max}; \quad \forall j \in \Omega_i, i = 1, 2, \dots, n \\ P_i^{min} &\leq p_i \leq P_i^{max}; \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

**Función a minimizar.** El objetivo del problema de ED es minimizar el precio total de la producción de potencia, que puede considerarse como:

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i p_i \quad (7)$$

#### 1.2.3.1 Despacho económico convencional

El ED convencional, permite determinar, cuánta potencia de generación debe ser atribuida para cada unidad para satisfacer la demanda requerida, en los diferentes

periodos de tiempo, al menor costo en el que se pueda generar. Está constituido por centrales que utilizan combustibles fósiles o grandes centrales hidroeléctricas, cuando se analizan los recursos, se considera diversos aspectos técnicos, geográficos y económicos, se considera también los casos críticos que presenta la demanda en un intervalo de tiempo, la asignación de la potencia de salida, las unidades que ingresan al SEP y una inversión a futuro para el desarrollo de nuevos sistemas de generación y transmisión. Hay que mencionar que un ED convencional, presenta diversos problemas en contra del medio ambiente, generando graves impactos ambientales debido a las emisiones de  $CO_2$  y las partículas que emiten, provocando daños a la atmósfera [38].

### **1.2.3.2 Despacho económico no convencional**

El ED no convencional define sus beneficios como el despacho convencional, pero considera diferentes recursos para generar energía. Las centrales de generación eléctrica son más respetuosas con el medio ambiente y forman parte de las nuevas tecnologías limpias, su fuente principal ya no depende únicamente de los combustibles fósiles, si no se basan en ERNC. Las fuentes de energía renovables no tradicionales, como la, solar, eólica, mareomotriz, geotérmica, hidroeléctrica y los biocombustibles, permiten disminuir las emisiones de gases nocivos para el medio ambiente, reduciendo el efecto invernadero, diversifican el suministro de energía y contribuyen a la reducción de los mercados con combustibles fósiles como el petróleo y el gas [38].

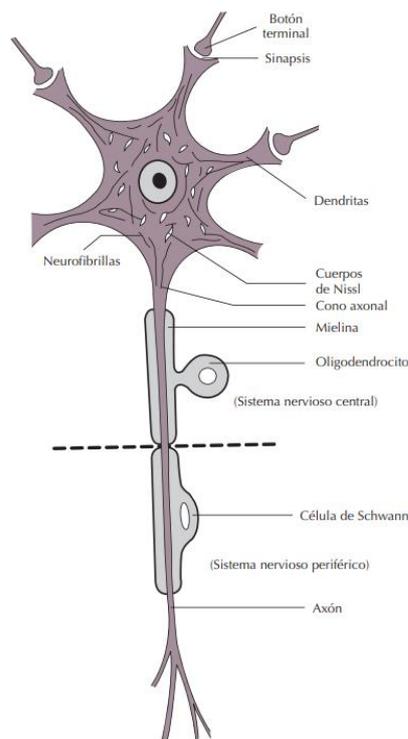
### **1.2.4 Fundamentos de las redes neuronales artificiales**

Los dispositivos de comunicación neuronal en animales y humanos, está formado por el sistema nervioso y hormonal, y se conecta con los órganos sensoriales y efectores (glándulas y músculos) con la misión de recoger información, la procesan y la transmiten, para luego elaborarlas, almacenarla y transmitirlas de nuevo. El sistema de comunicación neuronal presenta tres partes.

1. Los receptores, se encuentran en las células sensoriales, recogen las informaciones en forma de estímulos, bien del ambiente o del interior del organismo.

2. El sistema nervioso, recibe los datos los procesa, en parte las almacena y las envía en forma elaborada a los órganos efectoros y a otras zonas del sistema nervioso.
3. Órganos diana o efectoros, que reciben los datos los interpretan en forma de acciones motoras, hormonales, entre otras.

El elemento estructural y funcional más importantes en los sistemas de comunicación neuronal, es la célula nerviosa o neurona. En su mayoría las neuronas utilizan sus secreciones, como señales químicas (transmisores) para enviar información, hacia diversas redes de neuronas conectadas entre sí, mediante prolongaciones, en las cuales se elabora y almacena información, algunas neuronas también están asociadas con los receptores por donde llegan las comunicaciones del exterior o del interior del organismo hasta las redes neuronales [39]. A una distancia más o menos extensa de su origen, se genera ramificaciones formando botones terminales para contactar con otras neuronas o células efectoras, pero sin fusionarse con ellas, a esta zona de contactos se la llama sinapsis. Un diagrama típico de una célula nerviosa se muestra en la Figura 7.

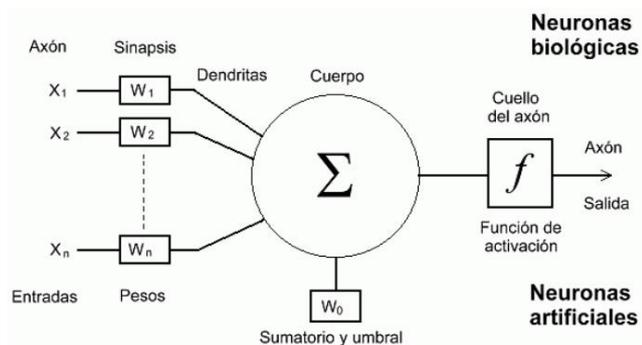


**Figura 7:** Estructura general de una neurona biológica [40]

Una neurona típica está formada por un cuerpo celular, un núcleo, y por una serie de componentes importantes, empezando por el axón, que es la rama de salida de la neurona a través de la cual se transmiten una serie de impulsos electroquímicos. Las neuronas tienen una gran cantidad de ramas de entrada, llamadas dendritas, que propagan señales dentro de la neurona. Para compartir información se realiza el siguiente procedimiento, la sinapsis recopilan información electroquímica de las células vecinas conectadas a las células asociadas; esta información llega al núcleo y se procesa allí hasta que el axón propague una respuesta. Las señales individuales luego viajan a lo largo de las ramas axonales y alcanzan las dendritas de otras células a través de las llamadas sinapsis. Las sinapsis son los elementos de conexión entre los axones y las dendritas.

#### 1.2.4.1 Redes Neuronales artificiales

Las ANNs, son sistemas formados por un gran número de procesadores simples, denominadas neuronas, que es un elemento procesador, con varias entradas que se combinan, normalmente como una suma básica caracterizados por un peso o valoración. En la Figura 8, se indica la equivalencia entre los componentes de las neuronas biológicas en contraste con las neuronas artificiales [41].



**Figura 8:** Relación entre una neurona biológica y artificial [42]

#### Modelo matemático de la red neuronal artificial

Para establecer el modelo matemático de una ANN, Warren McCulloch y Walter Pitts en 1943, se basaron en el funcionamiento de las neuronas biológicas. En todo modelo de una neurona artificial se tienen cuatro elementos básicos:

1. Conjuntos de conexiones, pesos o sinapsis que indican cómo se comporta la neurona, estas conexiones puede ser excitadoras (signo positivo) o inhibitoras (signo negativo),
2. Un sumador.
3. Una función de activación no lineal para limitar la amplitud de la salida de la neurona.
4. Un umbral exterior, que muestra el umbral por encima del cual la neurona se activa.

Cada neurona tiene una función, que cambia el nivel de activación a partir de las señales que reciben; denominada función de transición de estado o función de activación. Las señales de entrada que recibe una neurona, en ciertos casos son del exterior o de las neuronas a las cuales está conectada. El nivel de activación de una célula depende de las entradas recibidas y de los valores sinápticos, sin tomar en cuenta valores anteriores de estados de activación, para obtener este valor se debe calcular la entrada total a la célula,  $E_i$  (Figura 9). Se tiene un grupo de entradas  $x_1, x_2, \dots, x_n$  que se introducen a la neurona artificial, y se definen por un vector  $\bar{X}$ , corresponden a las señales de sinapsis de una neurona biológica, cada entrada se multiplica por un peso asociado  $w_1, w_2, \dots, w_n$  para posteriormente aplicarse el sumatorio [39]. Cada peso corresponde a la fuerza de una conexión sináptica, es decir el nivel de concentración iónica de la sinapsis, y se representa por un vector  $\bar{W}$ . El cuerpo de la neurona es representado por el sumatorio, que suma cada entrada multiplicada por el peso, y se obtiene la salida  $E$ .

$$E = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + x_nw_n \quad (8)$$

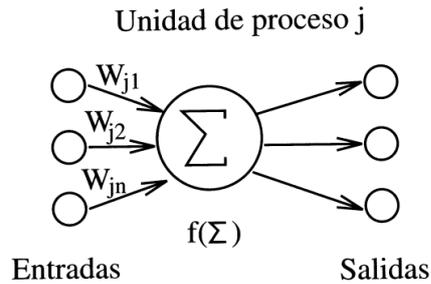
En forma vectorial se tendría:

$$E = X^T W \quad (9)$$

Las señales  $E$  se procesan por una función de activación o salida  $F$ , que genera la señal de salida de la neurona  $S$ . Dependiendo de la función  $F$ , se tendrán diferentes modelos, por ejemplo:

- Lineal:  $S = KE$  con  $K$  constante.
- Umbral:  $S = 1$  si  $E \geq \theta$ ,  $E < \theta$ ; siendo  $\theta$  el umbral constante.

- Para todo tipo de función  $S = F(I)$ ; siendo  $F$  una función cualquiera.

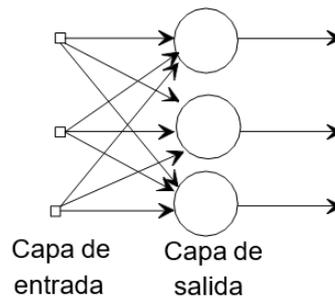


*Figura 9: Esquema de una unidad de proceso típica [39]*

### 1.2.4.2 Arquitecturas neuronales

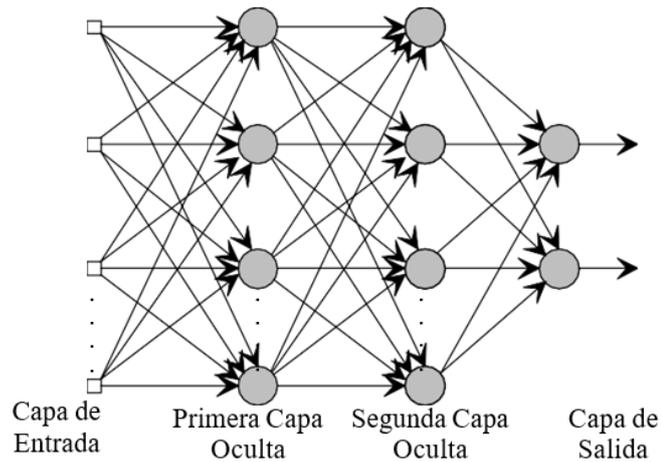
#### Según el número de capas

**Red neuronal de una sola capa:** Corresponde a la red neuronal más simple, ya que existe una capa de neuronas que proyectan la entrada a una capa de neuronas de salida que realizan diferentes cálculos. La capa de entrada no se cuenta ya que no realiza ningún cálculo, por lo cual se denomina redes neuronales de una sola capa (Figura 10). Una aplicación típica es el uso como memorias asociativas [43].



*Figura 10: Red neuronal monocapa [43]*

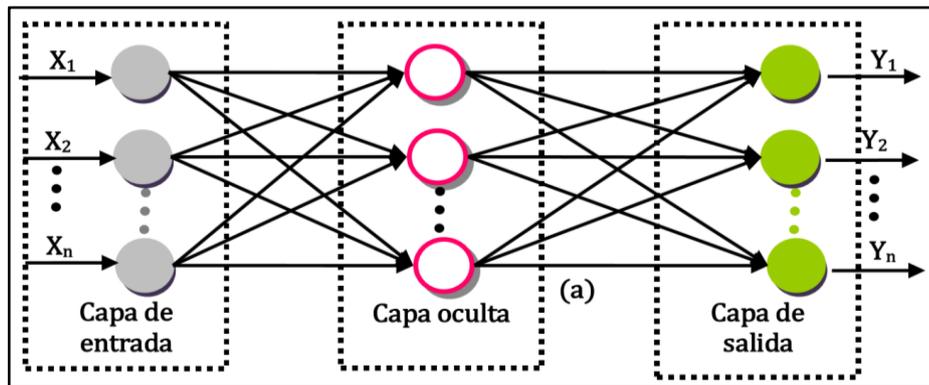
**Red neuronal multicapa:** Se generaliza a partir de la anterior, presentando un conjunto de capas intermedias entre la entrada y la salida (capas ocultas), esta red puede estar total o parcialmente conectada (Figura 11).



**Figura 11:** Red neuronal multicapa [43]

**Según el tipo de conexiones**

**Redes neuronales no recurrentes:** En la Figura 12 se indica una esta red no recurrente, en la cual, la propagación de la señal ocurre en una sola dirección y no hay posibilidad de retroalimentación. Lógicamente, estas estructuras no tienen memoria [43].



**Figura 12:** Red multicapa aplicando la propagación hacia adelante [44]

**Red neuronal recurrente:** Esta red se caracteriza por la presencia de bucles de retroalimentación. Estas conexiones pueden ser entre neuronas en diferentes capas, entre neuronas en la misma capa o, entre una misma neurona. Esta estructura es adecuada para el estudio de la dinámica de sistemas no lineales. En la Figura 13, se indica el diagrama que representa el esquema de una red recurrente.

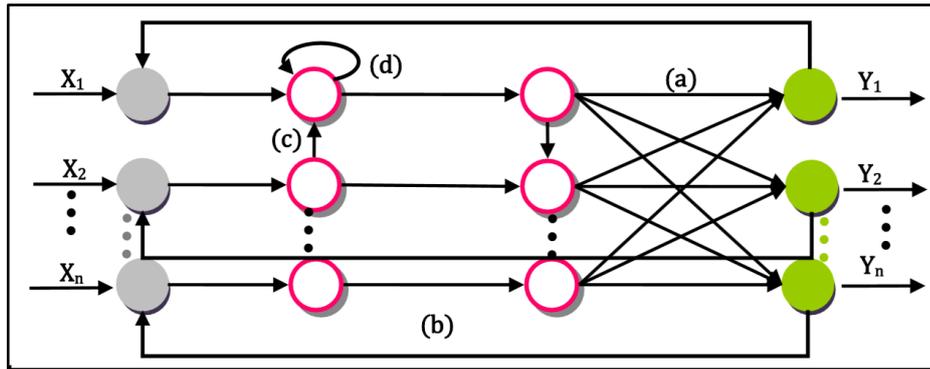


Figura 13: Red multicapa aplicando la propagación hacia atrás [44]

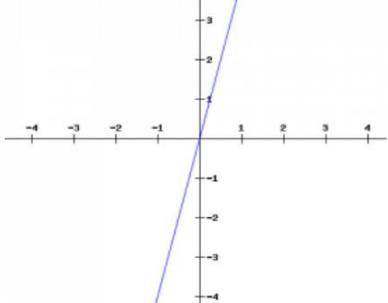
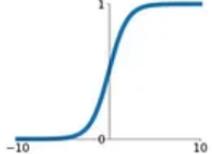
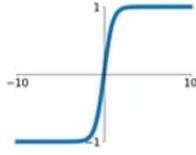
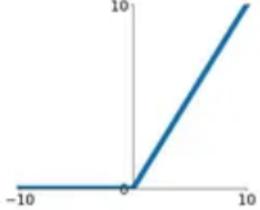
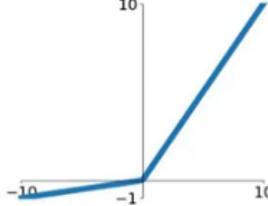
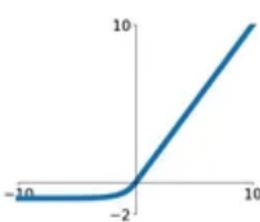
- (a): Conexiones hacia adelante.
- (b): Conexiones hacia atrás.
- (c): Conexiones laterales.
- (d): Conexiones autorrecurrentes

### 1.2.4.3 Funciones de Activación

Las entradas netas son las unidades más importantes en la estructura de una red neuronal que se procesan y transforman en un resultado de salida conocido como activación de la unidad mediante la aplicación de una función llamada función de activación (Tabla 3), función del umbral o función de transferencia que es una transformación escalar a escalar. Una función de activación, limita la amplitud de la señal de salida en un valor finito.

Tabla 3: Funciones de activación aplicadas a redes neuronales [45]

Función	Ecuación	Gráfica
Paso Binario	$f(x) = 1, x \geq 0$ $f(x) = 0, x < 0$	

<p style="text-align: center;"><b>Lineal</b></p>	$f(x) = ax$	
<p style="text-align: center;"><b>Sigmoide</b></p>	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
<p style="text-align: center;"><b>Tangente hiperbólica</b></p>	$y(x) = \text{tagh}(x)$	
<p style="text-align: center;"><b>Unidad de revestimiento rectificado (ReLU)</b></p>	$f(x) = x$ , si $x \geq 0$ $f(x) = 0$ , si $x < 0$	
<p style="text-align: center;"><b>Leaky ReLU</b></p>	$f(x) = x$ , si $x \geq 0$ $f(x) = 0.01$ , si $x < 0$	
<p style="text-align: center;"><b>Unidad Lineal Exponencial</b></p>	$f(x) = x$ , si $x \geq 0$ $f(x) = a(e^x - 1)$ , si $x < 0$	

#### 1.2.4.4 Métodos de aprendizaje

En una red neuronal, es necesario definir un proceso mediante el cual se cambien las conexiones del dispositivo para proporcionar la salida deseada (algoritmo de

aprendizaje). Los métodos de aprendizaje se pueden dividir en las siguientes categorías.

La primera división importante de los métodos de aprendizaje son los algoritmos supervisados y no supervisados. En los algoritmos no supervisados, se desconoce la señal que de salida de la ANN (señal deseada). En este caso, la red se organiza agrupando distintas señales de entrada según sus características. Estos sistemas proporcionan una forma de clasificar diferentes entradas a través de técnicas de agrupación. Con relación al aprendizaje supervisado proporciona a la red las salidas que se deben generar para la señal que se le presente, se debe observar la salida de la ANN para determinar la diferencia entre ésta y la señal deseada, finalmente se modifican los pesos, de acuerdo a los errores presentados [39].

### 1.2.5 Conceptos dentro de la radiación solar

La radiación solar es la energía liberada por el sol a través de una serie de reacciones de fusión nuclear que producen la pérdida de masa del sol, que luego se convierte en energía. Existen tres tipos de radiación.

**Radiación directa:** Proporciona mayor energía, no posee cambios al ingresar a la superficie terrestre.

**Radiación difusa:** Presenta obstáculos debido a la nubosidad, polución o partículas contenidas en la atmósfera, lo que ocasiona su desviación.

**Radiación global:** Es la suma de la radiación directa y difusa.

Se debe considerar también los siguientes conceptos que se relacionan directamente con la radiación solar.

- **Irradiación:** Es la densidad de energía solar recibida en un período de tiempo en  $Wh/m^2$
- **Irradiancia:** Magnitud que describe la radiación o intensidad de iluminación solar recibida como una potencia instantánea por unidad de superficie, se mide en  $W/m^2$
- **Constante Solar:** Es la irradiancia que recibe una superficie perpendicular al sol en el exterior de la atmósfera. Su valor es de unos  $1367.7 W/m^2$

## 1.2.6 Criterios de evaluación

### 1.2.6.1 Error cuadrático medio

El error cuadrático medio (MSE) determina la cantidad de error que existe entre los valores reales y los predichos, mediante la ecuación 10, el valor es penalizado, debido a un error mayor, generados por valores altos en la predicción, y por la elevación del mismo al cuadrado, la predicción mejora cuanto más pequeño es el valor del MSE [17].

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (10)$$

### 1.2.6.2 Raíz del Error Medio Cuadrático

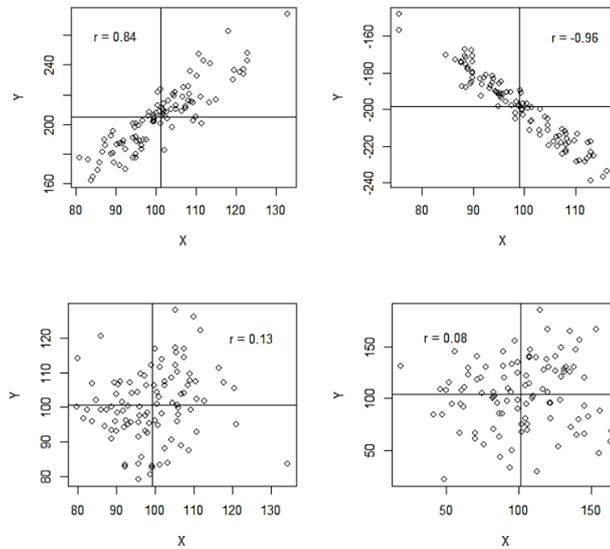
La raíz del error cuadrático medio, dado por la ecuación 10, analiza la diferencia entre los datos reales y los predichos, esta es la forma más común de medir la eficiencia y corrección de una red durante el proceso de prueba y validación, sin embargo, a veces el valor RMSE no es lo suficientemente preciso debido a que algunos valores pueden arruinar el resultado global [17].

### 1.2.6.3 Coeficiente de correlación de Pearson

El R, es un método de medición ampliamente utilizado en diversos campos del trabajo científico, incluyendo la investigación técnica, econométrica o de ingeniería; investigación relacionada con las ciencias sociales, salud, entre otros. Es un índice de medida del grado de covariación entre diferentes variables linealmente relacionadas, esto significa que puede haber variables fuertemente correlacionadas, pero no linealmente, en cuyo caso no se debe aplicar el R, por ejemplo, la relación entre ansiedad y rendimiento tiene forma de U invertida; de igual forma, si tomamos la población y tiempo, con una relación exponencial [46]. Si se relación dos variables el coeficiente de Pearson toma valores absolutos que oscilan entre 0 y 1, pero en la realidad se considera el signo del coeficiente que oscila entre  $-1$  y  $+1$ . El R presenta las siguientes características, (Figura 14):

- Si  $R = 1$ , existe correlación positiva perfecta.
- Si  $R = 0$ , no existe correlación.

- Si,  $R = -1$ , existe correlación negativa perfecta.



*Figura 14: Diferentes valores del R [46]*

### 1.3.4 Tipos de investigación

La investigación propone realizar un sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica, para optimizar y aprovechar el uso de la energía, para obtener el resultado final del proyecto se van a utilizar los siguientes tipos de investigación.

#### 1.3.4.1 Investigación descriptiva

La investigación descriptiva permite determinar los elementos constitutivos de las áreas que conforman los diversos métodos de optimización de energía, que tiene como finalidad obtener el conocimiento adecuado y específico de los modelos de optimización matemática para determinar su funcionamiento, ventajas, desventajas, entre otras, con el objetivo de describir correctamente el despacho económico y los recursos energéticos utilizados, para la realización correcta del sistema de gestión de energía.

#### 1.3.4.2 Investigación teórica-conceptual

La investigación teórica, se basa en indagar la bibliografía, a través de artículos científicos, libros, tesis de pregrado, posgrado, doctorado entre otros, para analizar las metodologías y procedimientos para realizar el ED, de forma óptima. Se debe discernir la información obtenida, para descartar aquellas que no tiene relación con

el tema de investigación, es primordial conocer los métodos clásicos para resolver las funciones de optimización como, la LP, NLP y MILP, además de los métodos derivados como, métodos heurísticos, estocásticos, y algoritmos de enumeración. Otro campo que se analizará son los métodos de predicción para la irradiación solar, cuáles son los más adecuados para los datos de entradas y cuáles presentarían los mejores resultados.

#### **1.3.4.3 Investigación aplicada**

La investigación aplicada, permite poner en práctica los conocimientos adquiridos realizando simulaciones a prueba y error, para obtener los resultados requeridos en el proyecto de investigación, mediante la utilización de software especializados para realizar la optimización de un sistema de energía ante diversos escenarios, basados en la predicción de la irradiación solar.

#### **1.3.7 Técnicas de comprobación de Hipótesis**

Para comprobar la hipótesis, se aplicará métodos estadísticos, para validar la predicción de la irradiación solar se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson, para observar la correlación entre el valor real y el predicho, junto con el cálculo de la raíz del error cuadrático medio. El sistema solar fotovoltaico será dimensionado de acuerdo a la demanda presentada y estos datos serán enviados para realizar el despacho económico, en el cual se verificará si se cumple o no con la hipótesis presentado en el trabajo investigativo.

### **1.4 Conclusiones Capítulo I**

Para pronosticar los parámetros climáticos necesarios para obtener la energía solar producida por los generadores fotovoltaicos, se utiliza una clasificación de dos elementos: el primero es el enfoque de modelo único que se subdivide en modelos físicos, como la predicción numérica del tiempo y métodos estadísticos, que incluyen método de persistencia, modelos autorregresivos, redes neuronales artificiales y máquinas de vectores de soporte. El segundo elemento presenta los modelos múltiples que surgen de una combinación de métodos de modelo único, que permiten determinar de diferentes formas los parámetros climáticos.

Para realizar la optimización de energía existen diversas técnicas como: métodos clásicos incluyendo LP, MILP, QP, NLP y PMO, métodos de programación dinámica para solucionar problemas más complejos, métodos metaheurísticos para aproximar la solución óptima mediante algoritmos genéticos, evolución biológica y mecanismos estadísticos para un rendimiento y control óptimo de la energía de la microrred. Se utiliza también el control predictivo para pronosticar la generación y las carga para garantizar una gestión eficiente de la energía almacenada, que suele combinar programación y control estocástico. Los métodos basados en múltiples agentes, permiten la gestión descentralizada de la microrred para realizar tareas con objetivos definidos. Los métodos estocásticos y programación robusta resuelven funciones de optimización cuando los parámetros tienen variables aleatorias, especialmente en lógica difusa, teoría de juegos y redes neuronales artificiales.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Título de la propuesta**

Sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basada en un problema de optimización estocástica.

### **2.2 Objetivo de la propuesta**

Establecer un sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada basado en un problema de optimización estocástica.

### **2.3 Justificación de la propuesta**

En la actualidad, el problema del calentamiento global existente, los elevados costos de generación de energía y la reducción de los combustibles fósiles, ha impulsado el uso de nuevas fuentes de tecnologías eficientes y limpias para generación. En nuestro país la ARC y al BNEE de Ecuador, de finales del año 2022, presentan una potencia nominal generada del 58.82% para centrales hidráulicas, un 2,3% para generación en base a ERNC como la eólica, fotovoltaica, biomasa y biogás y un 38,88% para ER para fuentes de generación como centrales térmicas, turbogas y turbovapor, con un aumento en la demanda de 1.175 kWh a 1.537 kWh por persona, en los últimos 10 años, da como consecuencia un aumento en el incremento de la generación de energía.

En este contexto el uso de ERNC (solar y eólico) es una solución para reducir el consumo de combustibles fósiles, evitar impactos ambientales, y abastecer energía

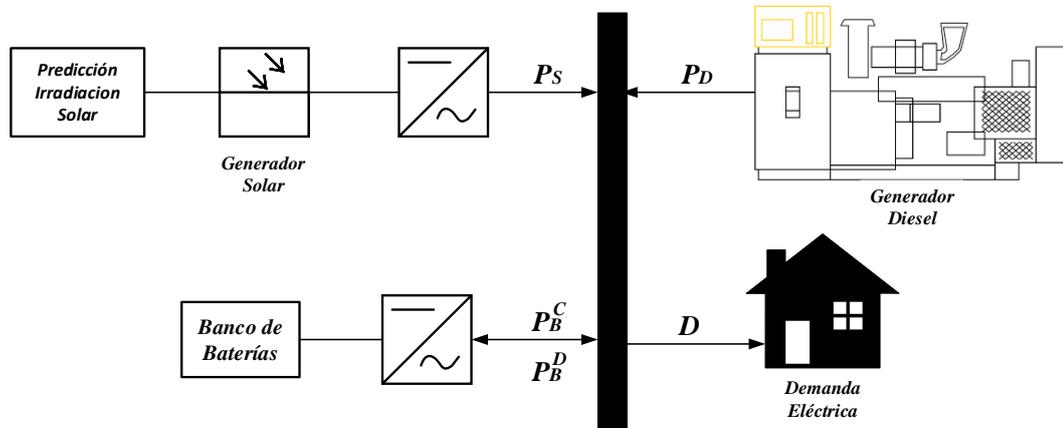
a zonas alejadas o que no están conectadas a la red de distribución eléctrica, esta operación se realiza mediante el uso de microrredes en modo isla, que se forma básicamente de fuentes de renovables, y no renovables, además de sistemas de almacenamiento (BESS), para posteriormente generar las potencias que deben establecerse, para cada unidad disponible, con el objetivo de cubrir la demanda requerida. En este contexto el uso de técnicas de pronóstico del recurso solar, son de gran interés para el crecimiento actual y futuro, pues su variabilidad e incertidumbre en su disponibilidad compromete la calidad, seguridad y confiabilidad del SEP. Por esta razón, es muy importante contar con un modelo de pronóstico eficiente que pueda predecir un horizonte de tiempo que se ajuste a las necesidades del sistema. La predicción de irradiación solar, es un proceso muy importante pues permite conocer el comportamiento de los recursos renovables, considerando su naturaleza estocástica, con la finalidad de cubrir la demanda de energía mediante una correcta planificación y operación de los sistemas eléctricos. Debido a lo analizado se requiere desarrollar un algoritmo que tome el pronóstico de la irradiación para optimizar el uso de la energía, de esta manera, la aplicación de optimización estocástica permite realizar un despacho económico adecuado.

#### **2.4 Descripción de la propuesta**

El problema del ED de los SEP, requieren utilizar centrales de generación convencionales y no convencionales, considerando dos ejes, las restricciones operativas del sistema para satisfacer la demanda de potencia, y el costo de producción de las unidades, para minimizar el costo total de operación. El sistema de gestión de energía está formado por cuatro secciones. En la primera se muestra la predicción de la irradiación solar utilizando una base de datos de 4 años anteriores mediante ANNs. La segunda es la microrred aislada, que representa una visión para una optimización digital de las redes de distribución y transmisión de energía eléctrica aplicada a las operaciones actuales, mejorando la seguridad de la red y abriendo nuevas formas de aprovechar fuentes de energía alternativas y convencionales. En la tercera y cuarta sección se realizará el despacho económico basado en un problema de optimización MILP, que tomará un enfoque estocástico por la predicción realizada en la primera sección.

En la Figura 15, se indica el sistema de gestión de energía propuesto, que está formado, por una fuente de energía renovable, con valores de irradiación predichos, utilizados para instaurar el sistema fotovoltaico, compuesto por paneles solares, evitando un gasto económico en la utilización del recurso de generación, eje fundamental para la realización del despacho económico.

Otro elemento que se considera en la microrred es el generador diésel, que comienza su funcionamiento cuando la fuente de energía renovable no actúa, con el objetivo de abastecer la demanda, sin embargo; esta acción repercute en el costo de operación. Al utilizar el sistema fotovoltaico, se reduce el uso del combustible diésel y se reduce los costos de operación, las baterías abastecen la potencia requerida por la demanda, cuando el generador diésel deja de aportar, se debe considerar que la batería debe estar con un SOC de 0% al inicio y pasar al 100% para que actúe como una fuente de energía.



*Figura 15: Sistema de gestión de energía propuesta.*

## 2.5 Desarrollo de la metodología

### 2.5.1 Red Neuronal

En el presente caso de estudio se determinará el valor predicho de la irradiación solar, para realizar esta predicción existen diversos métodos, de los cuales se puede mencionar dos categorías: enfoques de modelo único y enfoques de modelo múltiple, con respecto a los enfoques de modelo único, estos se pueden separar en dos grupos diferentes, modelos físicos, como la predicción numérica del tiempo y métodos estadísticos, que incluyen el método de persistencia, modelos autorregresivos, redes neuronales artificiales y máquinas de vectores de soporte.

Para que los métodos sean confiables se debe considerar dos factores principales: el horizonte de predicción y la disponibilidad de datos históricos fiables. Los métodos de modelo múltiple se derivan de la combinación de métodos de modelo único, debido a los parámetros meteorológicos que no pueden obtenerse con un solo método debido a su variabilidad, agregan también una mayor complejidad a la predicción de los parámetros, obteniendo resultados satisfactorios, a partir de los enfoques de modelo único, por lo que se seleccionó el enfoque de modelo único para el presente estudio de caso.

### **2.5.1.1 Análisis de Datos**

Para el diseño de la ANN, la selección de datos, es posiblemente el paso más importante. Es esencial para un buen rendimiento de la red neuronal, que la base de datos empleada para el aprendizaje tenga la mayor precisión. Se debe considerar la proximidad al sitio y si los datos son válidos. El presente caso de estudio se desarrolló en el sector rural Chan del cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi, con las coordenadas 0°57'1.8"S 78°37'32.2"O, los históricos de la irradiación solar se obtuvieron del sitio web: <https://power.larc.nasa.gov/>, posteriormente se realizó el cambio de extensión de .csv a .xlsx, discriminando los datos con valor de cero o vacíos, para tener una base de datos confiable, los cuales serán utilizados como entradas a la ANN.

Se analizó los datos históricos de irradiación solar desde el año 2018 hasta el año 2021, con mediciones horarias, con el objetivo de determinar si la base de datos se debe dividir por estaciones, en Ecuador se presentan solo dos: verano que inicia desde el mes de junio y finaliza en el mes de noviembre, e invierno que empieza desde el mes de diciembre y finaliza en el mes de mayo. En la Tabla 4 se indica la irradiación solar máxima en diversas horas y estaciones del año, pudiéndose observar que tienen correlación, entre datos de diversos años en la misma fecha. Para finalizar se observó, que las horas de salida y puesta del sol no varían a lo largo del año, obteniéndose el valor pico máximo a las 12:00 del mediodía y un valor de cero desde las 18:00 de la noche hasta las 6:00 de la mañana del día siguiente.

**Tabla 4:** Irradiación máxima en diferentes estaciones del año

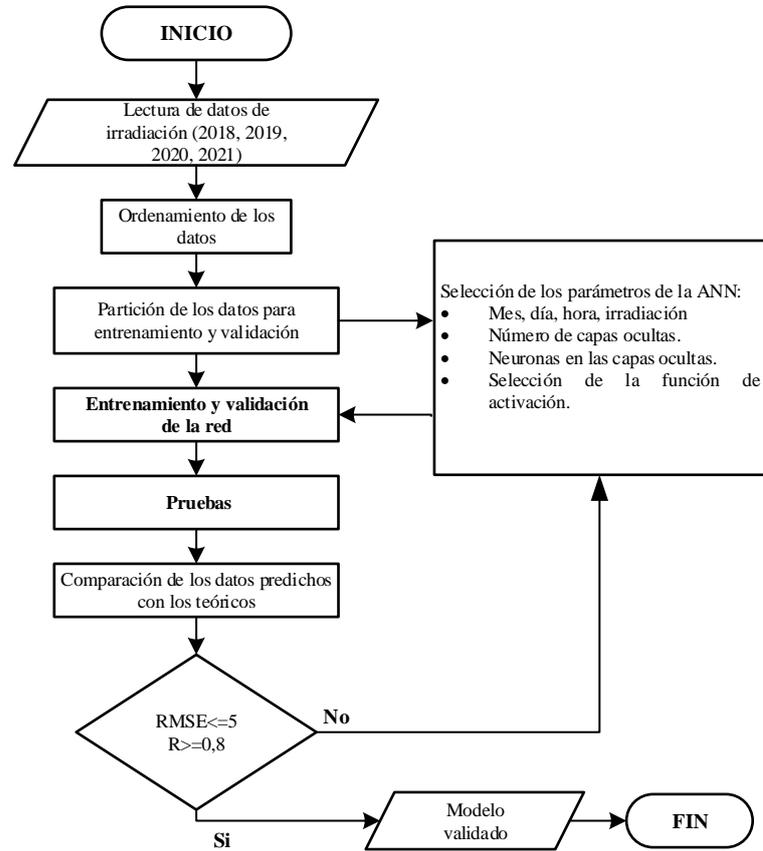
<b>Estación: Verano</b>	<b>Irradiación máxima <math>W/m^2</math></b>
12/01/18	511,675
12/03/19	512,635
16/04/20	518,96
16/04/21	512,175
04/03/18	509,235
04/03/20	511,46
<b>Estación: Invierno</b>	<b>Irradiación máxima <math>W/m^2</math></b>
04/07/18	412,865
04/07/19	432,231
28/07/20	444,064
28/07/21	466,165
04/03/18	457,048
04/03/20	432,062

### 2.5.1.2 Desarrollo de la Red Neuronal

Una vez identificada y analizada la información, se obtuvo como resultado un total de 35040 datos, y se entregó a la red un vector de 18 valores como entrada, y un único objetivo de entrenamiento. El primero de estos valores fue el mes del año, el segundo el día correspondiente, el tercero la hora y el cuarto los datos relacionados con los 15 días anteriores irradiación solar, medido en forma horaria. La única salida de la ANN es el valor de irradiación previsto. Para determinar el diseño óptimo de la red neuronal, se utilizaron datos para probar diferentes arquitecturas. Se evaluó el desempeño y error de las predicciones para una ANN con diferentes números de capas y neuronas ocultas.

Para el entrenamiento se utilizó un conjunto de 27994 datos que representan el 80% del total, en conjunto con el solucionador derivado de la estimación del momento adaptativo (ADAM), que actualiza los parámetros usando un subconjunto de datos en cada paso. Para asegurar la mejor arquitectura, cada prueba se realizó cinco veces, y para validar la red se consideró el RMSE y el R. Para validar el modelo de la ANN se utilizó un conjunto de 6998 datos, que representan el 20% del total. Para validar los resultados se comparó los datos de irradiación predichos con los reales

del año 2022, obteniéndose un RMSE menor o igual al 5% y un R mayor a 0.8 que indica una tendencia a una correlación perfecta positiva. En la Figura 16 se muestra el diagrama de flujo de la red neuronal diseñada.



*Figura 16: Flujograma para la ANN diseñada*

En la Tabla 5, se muestra un resumen de los elementos que conforma la ANN.

*Tabla 5: Resumen de diseño y arquitectura de la ANN*

Características de red	Parámetros
<b>Entradas</b>	Mes, día, hora, irradiación
<b>Datos</b>	35040
<b>Salida</b>	1, valor de irradiación solar
<b>Número de iteraciones</b>	3450
<b>Número de capas</b>	1 entrada, 2 ocultas y 1 de salida
<b>Neuronas en la capa oculta</b>	360
<b>Función de activación</b>	ReLU

### 2.5.2 Diseño de la microrred aislada

El ED, combina de manera óptima, las unidades generadoras para garantizar un costo mínimo de operación, para de abastecer la demanda de energía eléctrica. En la Figura 17, se indica la propuesta del despacho económico, que establecen los puntos de consigna para las unidades generadoras despachables y no despachables. El sistema considera las siguientes variables: la potencia del generador diésel  $P_D$ , la potencia generada por las baterías, en modo carga  $P_B^C$  o descarga  $P_B^D$ , en conjunto con las variables binarias utilizadas para definir el estado del banco de baterías en modo carga  $X^C$  y en modo descarga  $X^D$ . Finalmente se considera la energía no suministrada  $P_{ENS}$  y el vertimiento de energía renovable  $P_{SH}$  que son variables de holgura.

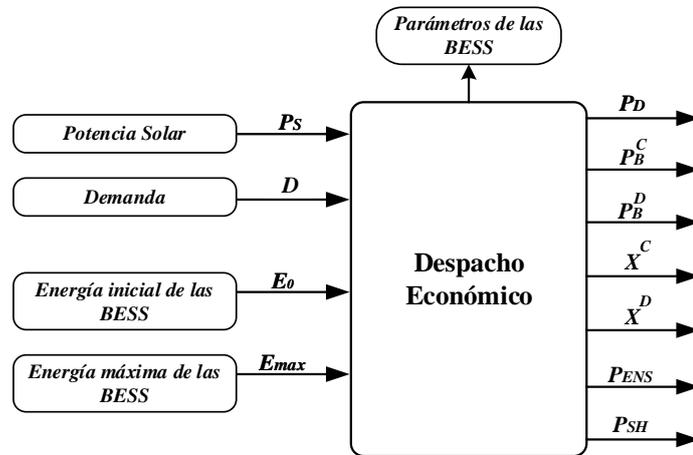


Figura 17: Despacho económico propuesto

Como entradas al ED, se tiene la potencia solar  $P_s$ , que corresponde a una fuente de ER, la demanda  $D$ , la energía inicial  $E_0$  y energía máxima  $E_{max}$  del pack modular de las baterías, que depende del SOC en  $t = 0$ , y del SOH, respectivamente. Para resolver el ED, se utilizará la MILP que tomará un enfoque estocástico al utilizar la predicción de la irradiación solar obtenidas de la ANN, por lo cual, es necesario considerar la función objetivo, bajo diferentes restricciones, formular diferentes ecuaciones y desarrollar sus propios algoritmos para ser compiladas en un software dedicado, para obtener los resultados esperados, considerando siempre el uso máximo de las ERNC.

### 2.5.2.1 Función objetivo

La función objetivo, reduce el costo de operación de la microrred en el horizonte de tiempo  $T$ , la ecuación 11, indica la formulación de la función objetivo. Los términos  $C_D$ , es el costo del uso del generador diesel,  $C_{ENS}$  es el costo de la energía no suministrada. El costo del uso del pack modular de baterías se representa por  $C_{U\_BESS}$ , y las variables  $(\eta^C, \eta^D)$  representan la eficiencia de carga y descarga respectivamente.

$$J = \sum_{t=1}^T \left( C_D * P_{D_t} + C_{ENS} * P_{ENS_t} + \left( C_{U\_BESS} * P_{B_t}^C * \eta^C \right) + \left( C_{U\_BESS} * \frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \right) \quad (11)$$

### 2.5.2.2 Balance de potencia

La ecuación (12), muestra la restricción de balance de potencia, donde el pack modular de baterías se comporta como generador (modo descarga) y como demanda (modo carga). La restricción considera unidades de generación despachables y no despachables, energía de vertimiento si existe exceso de energía solar y energía no suministrada en el caso de que no se cumpla la restricción.

$$P_{D_t} + P_{S_t} - P_{SH_t} + P_{B_t}^D = D_t - P_{ENS_t} + P_{B_t}^C \quad (12)$$

### 2.5.2.3 Límites de unidades de generación despachables

Los límites de potencia del generador diésel se definen por la ecuación (13) que representa los límites de la generación diésel, la ecuación (14), representa los límites de la energía no suministrada y la ecuación (15) que representa lo límites de energía renovable de vertimiento.

$$P_{D\_min} \leq P_{D_t} \leq P_{D\_max} \quad (13)$$

$$0 \leq P_{ENS_t} \leq D_t \quad (14)$$

$$0 \leq P_{SH_t} \leq P_{S_t} \quad (15)$$

#### 2.5.2.4 Energía

El pack modular de baterías, suministra energía a la microrred, en modo descarga e incrementa la demanda cuando está en modo carga. En este contexto se modela las restricciones de la siguiente forma, la ecuación (16) representa la condición inicial de almacenamiento del pack que depende de la energía inicial  $E_0$  en función al estado de carga de cada batería, su eficiencia y la potencia de carga/descarga, en  $t = 1$ . En la ecuación (17), se define la energía restante del horizonte de evaluación ( $T$ ), que depende de la energía anterior  $E_{t-1}$ , de las baterías, la eficiencia y la potencia que corresponde a cada instante de tiempo  $t$ .

$$E_t = E_0 + \left( P_{B_t}^C * \eta^c \right) - \left( \frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \quad (16)$$

$$E_t = E_{t-1} + \left( P_{B_t}^C * \eta^c \right) - \left( \frac{P_{B_t}^D}{\eta^D} \right) \quad (17)$$

#### 2.5.2.5 Estado de las variables binarias del pack modular de baterías

La potencia de carga y descarga, se limita por la máxima energía que almacena/entrega el pack modular de baterías, cada límite está condicionado por una variable binaria que representa el modo carga  $X_t^C$  y modo descarga  $X_t^D$ . Las restricciones se indican en las ecuaciones (18) y (19), y representan los límites asociados a las variables binarias mientras que la ecuación (20) define la restricción para un solo modo de uso del pack modular de baterías a la vez.

$$E_{min} \geq P_{B_t}^C \geq -E_{max} * X_t^C \quad (18)$$

$$E_{min} \leq P_{B_t}^D \leq E_{max} * X_t^D \quad (19)$$

$$(X_t^C + X_t^D) \leq 1 \quad (20)$$

#### 2.5.2.6 Estado de carga

El SOC de cada batería para un instante de tiempo, está dado por la ecuación (21). Además, puede estar limitado por una política operacional de restricción presentado

en la ecuación (22), donde el rango de oscilación depende del máximo y mínimo estado de carga de cada batería.

$$SOC_t = \frac{E_t}{E_{max}} \quad (21)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (22)$$

### 2.5.3 Costo de uso del pack modular de baterías

Para determinar el costo del uso del pack modular de baterías, se utiliza la siguiente restricción, dada por la ecuación (23). El numerador representa el costo de inversión de cada batería  $C_{inv}$ , y el denominador muestra la cantidad total de energía en un instante de tiempo  $t$ . En la ecuación (24) se indica los límites del costo del uso del banco de baterías.

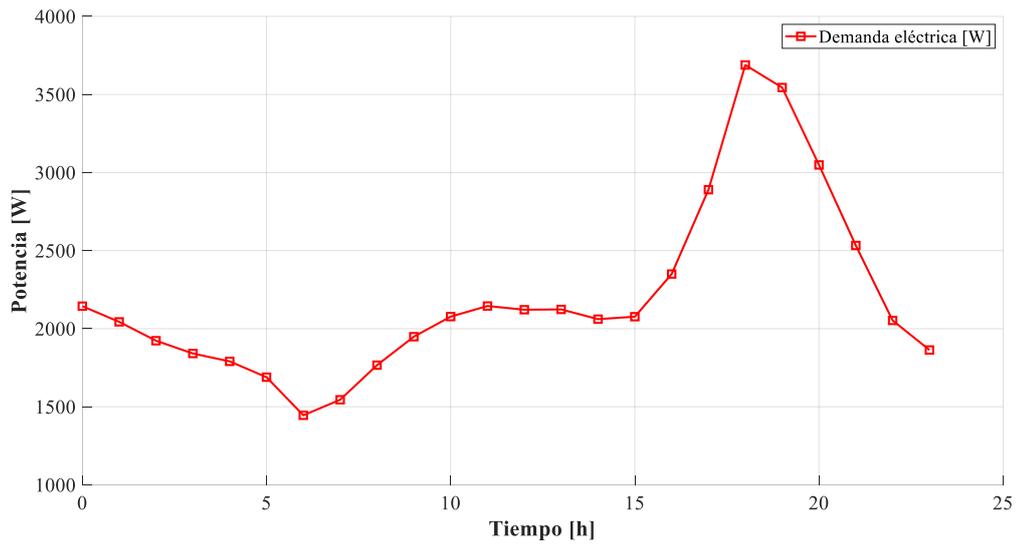
$$C_{U\_BESS} = \frac{C_{inv,n}}{E_{max,n}(N_{ciclos_{t,n}})} \quad (21)$$

$$0 \leq C_{UB_{t,n}} \leq C_{UB_{max,n}} \quad (22)$$

Es importante que se recuerde que la función objetivo mostrada en la ecuación (11), minimiza los costos de operación al reducir el uso del generador diésel, y los costos del uso del pack modular de baterías, en modo carga y modo descarga, debido al monto de inversión que se deteriora continuamente.

### 2.5.4 Demanda eléctrica

La demanda eléctrica es una variable variante en el tiempo, debido a factores que la afectan directamente, como: condiciones meteorológicas, variables económicas, eventualidades no previstas, calendario, y diversos factores que generan un cambio en el consumo eléctrico. Para el presente estudio se utilizará una base de datos de una demanda convencional. En la Figura 18 se muestra el comportamiento de la demanda horaria del 5 de enero del 2022.



**Figura 18:** Demanda eléctrica diaria

De acuerdo a la Figura 18, se puede observar que la demanda eléctrica se incrementa de forma crítica a partir de las 16h00 presentando su pico máximo a las 18h00 con un valor de 3.69kW, luego existe un decrecimiento hasta las 23h00, desde este punto aumenta hasta las 0h00, finalmente se reduce hasta las 6h00 de la mañana y de este punto se incrementa gradualmente hasta alcanzar su pico máximo de potencia. En la Tabla 6 se muestra las características de la demanda típica estudiada.

**Tabla 6:** Características que describen la demanda típica de enero del 2022

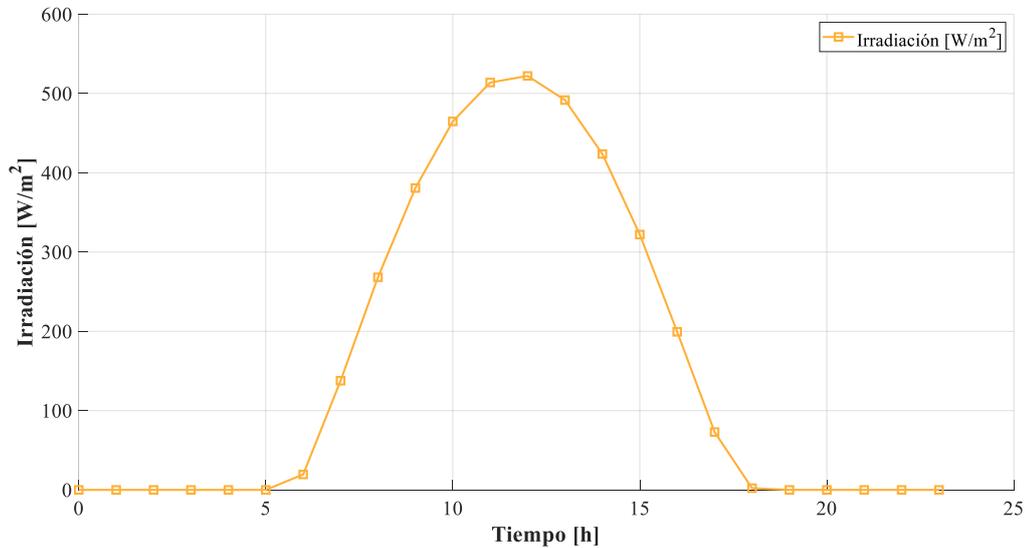
Características de la Demanda	Valores
Potencia total del mes	1822.462kWh
Energía diaria promedio	78.789kW/día
Valor máximo de demanda	4.167kWh

EL objetivo de analizar los históricos de la demanda es determinar el valor a cubrirse con el uso de las unidades generadoras que conforman la microrred.

### 2.5.5 Energía solar

Para generar energía solar, se considera factores geográficos, meteorológicos, temperatura, velocidad del viento, entre otros. Por esta razón es necesario realizar un pronóstico adecuado del recurso solar, con el objetivo de garantizar la óptima

operación del sistema y planificación coordinada entre las unidades despachables, para prevenir un costo elevado de generación por falta o exceso de potencia. En la Figura 19 se indica la irradiación solar diaria del 10 de enero del 2021, que permite determinar la forma en que incide el recurso renovable sobre el sector del caso de estudio.



**Figura 19:** Comportamiento de irradiación diaria

### 2.5.6 Cálculo de potencia de paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos, están formados por una serie de celdas que transforman la radiación solar en energía eléctrica. La potencia que generan los paneles, depende de ciertos factores como: condiciones meteorológicas, el número de módulos (paneles), temperatura y otros que se especifican en las hojas de datos técnicos de los fabricantes. El cálculo de conversión del recurso solar a potencia para el dimensionamiento fue realizado con el uso de las ecuaciones (23) y (24).

$$P_{PV} = P_{PV,ST} \cdot \frac{irrad}{1000} [1 - C_i \cdot (T_j - 25)] \cdot N_{PVs} \cdot N_{PVp} \quad (24)$$

Siendo:

- $P_{PV}$  Potencia solar fotovoltaica [W]
- $P_{PV,ST}$  Potencia nominal de cada módulo [W]
- $irrad$  Radiación solar [ $\frac{W}{m^2}$ ]

$C_i$	Coefficiente de temperatura de $P_{max}$ [ $^{\circ}C$ ]
$T_j$	Temperatura de celda [ $^{\circ}C$ ]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ]
$N_{PVs}$	Número de módulos en serie
$N_{PVp}$	Número de módulos en paralelo

El sistema fotovoltaico está conformado por un conjunto de paneles solares fotovoltaicos, cada panel está conformado por módulos fotovoltaicos y los módulos son la combinación de celdas fotovoltaicas. Para el presente trabajo de investigación se utilizará los datos de la Tabla 7. Se realizará un ejemplo que será replicado para los 8760 datos que representa un año de irradiación predichos por la ANN, en intervalos de 1 hora, que serán convertidos a potencia para ser utilizada en el despacho económico [47].

**Tabla 7:** Parámetros de los paneles fotovoltaicos

Parámetros	Valor
$P_{PV,ST}$	165W
$T_{amb}$	20[ $^{\circ}C$ ]
$C_i$	0.5 [%/ $^{\circ}C$ ]
$NOCT$	45.5 [ $^{\circ}C$ ]
$N_{PVs}$	72 módulos
$N_{PVp}$	1 módulo

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo, si se tiene un valor de irradiación predicho de  $irrad = 483W/m^2$ , con el uso de las ecuaciones (23) y (24) y los datos de la Tabla 7, se obtiene el valor de potencia de salida de los paneles solares fotovoltaicos, de la siguiente manera:

$$T_j = 20 + \frac{483}{800}(45.5 - 20) = 35.39$$

$$P_{PV} = 165 \cdot \frac{483}{1000} [1 - 0.005 \cdot (35.39 - 25)] \cdot 72(1) = 5439.94[W]$$

A continuación, con el valor de la demanda total del mes de 1822.4622kWh, una energía diaria promedio de 58789.10Wh/día y una energía solar fotovoltaica

promedio diaria de 575.19Wh/día se obtiene el número de paneles solares mediante la ecuación (25):

$$N_{\text{módulos}} = \frac{P_{\text{promedio diaria}}}{P_{PV\text{promedio diaria}}} \quad (25)$$

$$N_{\text{módulos}} \approx 103$$

### 2.5.7 Sistema de almacenamiento (Banco de baterías)

Para dimensionar el pack modular se utilizó baterías de Ion-Litio marca **CSB<sup>attery</sup>**, modelo LPF12V100 12.8V 100 Ah (Tabla 8), que presenta las siguientes características.

**Tabla 8:** Datos de la Batería marca CSB<sup>attery</sup> modelo LPF12V100 12.8V 100 Ah

TIPO	Batería de LiFePO <sub>4</sub> LPF12V100 12.8V 100 Ah
Ciclos	2000 @ 1C
DOD	100%
Voltaje Nominal ( $V_B$ )	12.8V
Capacidad Nominal	100Ah
Mees de autodescarga	<3%
Capacidad de la batería:	100
Eficiencia de carga	100% @ 0.2C
Eficiencia de descarga	96~99% @ 0.5C

Para calcular el número de baterías que conformarán el pack modular, se calcula la demanda promedio máximo a la semana, para este caso con un valor de aproximado de 58kWh, y se utilizan las ecuaciones (26) y (27)

$$C_{\text{capacidad total de baterías}} = \frac{E_d \cdot D_a}{DOD} \quad (26)$$

$$N_{\text{úmero de baterías}} = \frac{C_{\text{capacidad total de baterías}}}{Ah \cdot V_B} \quad (27)$$

Siendo:

$E_d$  Energía máxima demandada

$D_a$  Número de días de consumo eléctrico

$DOD$	Profundidad de descarga
$Ah$	Amperios hora
$V_B$	Voltaje nominal

Con los datos técnicos de la batería de Ión-Litio se procede a calcular la capacidad de almacenamiento y el número de baterías del pack modular con las ecuaciones (26) y (27).

$$C_{\text{capacidad total de almacenamiento}} = \frac{58kWh \cdot (\frac{1}{2})\text{día}}{1} = 29kWh$$

$$N_{\text{número de baterías}} = \frac{29kWh}{100Ah \cdot (12.8V)} \approx 23$$

Al aplicar las ecuaciones se tiene que el pack modular estará conformado por una total de 23 elementos. Se estima un precio aproximado de \$1000 por batería, para el cálculo del costo de inversión del pack modular de baterías se tiene:

$$C_{I\_BESS} = 23(\$1000) = \$23000$$

Para finalizar se determinar el valor del costo del uso del pack modular de baterías, mediante la ecuación (21).

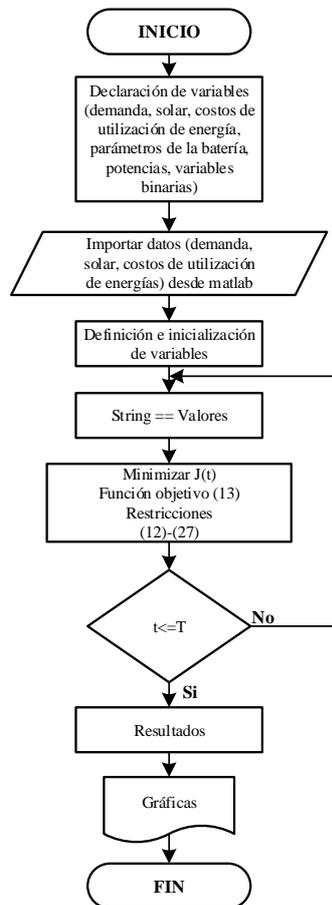
$$C_{U\_BESS} = \frac{23000}{58kWh(2000)} = 0.39$$

## 2.5.7 Implementación del modelo de optimización

### 2.5.7.1 Flujograma para solucionar el problema de optimización

El código que debe ser implementado en diferentes tipos de software se fundamenta en un flujograma, el cual proporciona información clara y concisa. Es indispensable empezar borrando localidades de memoria, para tener la seguridad que los datos que van a ser importados (datos de demanda y potencia solar) sean los reales. En la Figura 20, se indica el diagrama de flujo para solucionar el despacho económico, utilizando un software dedicado, en este caso FICO Xpress Optimization Suite, se declaran las variables de demanda, potencia solar, costos de utilización de energía

$C_D, C_{ENS}, C_{U\_BESS}$ , parámetros de las baterías como  $\eta^C, \eta^D, E_{max}, E_0$  y las potencias  $P_{ENS}, P_D, P_B^C, P_B^D$ , posteriormente son ubicados en un arreglo *array*, y se finaliza el proceso. Desde MATLAB R2022b se importan los datos de la demanda, y de la potencia solar predicha, en conjuntos con el  $C_D, C_{ENS}, C_{U\_BESS}, \eta^C, \eta^D, E_{max}, E_0$ , y  $P_D$ . Los datos importados son utilizados en la función objetivo que está formada por un conjunto de restricciones como el balance de potencia, límites de unidades de generación despachables, restricciones del pack modular de baterías, estado de las variables binarias, el estado de carga de las baterías y el costo del uso del pack modular, para posteriormente asignarse en un arreglo, para la evaluación rápida en diversos instantes de tiempo. Se realiza el *ED* en es software dedicado, y se analizará los resultados, si no se cumple con los parámetros requeridos, se procede a realizar una nueva iteración. Finalmente, los resultados son exportados al software MATLAB R2022b, para obtener las gráficas del comportamiento del sistema de gestión de energía.



**Figura 20:** Diagrama de flujo del despacho económico propuesto

### 2.5.7.2 Costos para realizar el despacho económico

En la Tabla 9, se indica los costos que se requiere para la realizar la optimización, se considera el valor del combustible fósil (diésel) a nivel internacional [48].

*Tabla 9: Precio internacional del diésel*

Diésel	Valores en dólares
Galones EE.UU.	1.70 USD/gal
Litro	0.462 USD/Litro

En Ecuador el costo de la energía no suministrada, está determinado por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), y es de 3 a 10 veces el precio del  $kWh$  del costo del diésel. Con respecto al costo de las baterías se tiene un valor de \$1000 por cada una, y considerando el número de baterías total que conforma el pack modular, se presenta una inversión de \$23000, y un costo de utilización del pack modular de baterías de 0.39. En la Tabla 10, se presenta los parámetros de costos, que serán utilizados para modelar la microrred aislada, con el objetivo de encontrar la mejor respuesta.

*Tabla 10: Costos utilizados para la optimización*

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Costo de inversión de las baterías	$C_{I\_BESS}$	23000	USD
Costo del uso de las baterías	$C_{U\_BESS}$	0.39	USD/ciclo
Costo operacional del diésel	$C_D$	1.70	USD/gal
Costo energía no suministrada	$C_{ENS}$	17	USD/kW

### 2.5.8 Requerimientos del hardware y software

#### 2.5.8.1 Hardware

Para el desarrollo de la investigación, que no considera la implementación si no el estudio de caso con sus resultados, en la Tabla 11 se muestra las características del equipo computacional utilizado.

**Tabla 11:** Características del hardware

Descripción	Características
Marca	DELL
Modelo	Inspiron 157000
Procesador	Intel(R) Core (TM) i7-8550U CPU @ 1.80GHz 1.99 GHz
RAM instalada	16 GB

### 2.5.8.2 Software

Para realizar las acciones detalladas anteriormente, es necesario utilizar software adecuados para cada etapa. Los datos obtenidos de la plataforma <https://power.larc.nasa.gov/> se descargaron en formato .csv, los cuales fueron transformados al formato .xls perteneciente a Excel 2019 con la utilización del software en línea Convertio. Posteriormente se realizó el tratamiento de la información para obtener una base de datos confiable.

Para la implementación del modelo de ED se utilizó el software dedicado FICO Xpress Optimization Suite, que presenta un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite desarrollar, perfilar y corregir de manera sencilla el modelo de optimización previsto. Presenta ventajas como una amplia documentación, con guías de instalación, ayuda para todos los módulos y ejemplos, con soporte para compartir y editar en conjunto. Se puede realizar programación entera mixta (MIP), programación cuadrática (QP), programación cuadrática entera mixta (MIQP), programación cuadrática restringida cuadráticamente (QCQP), programación no lineal (PNL), programación no lineal de enteros mixtos (MINLP) y programación de restricciones (CP) [49].

Para desarrollar la ANN, y graficar el comportamiento de las potencias y el SOC de las baterías, se utilizó el software MATLAB R2022b, que recibe los datos desde FICO Xpress Optimization Suite, por medio de la línea de comando `addpath(fullfile(getenv('XPRESSDIR'),'matlab'))`. El comando utiliza la variable de entorno XPRESSDIR para localizar el directorio de instalación de Xpress; alternativamente, también se puede especificar la ruta directamente, como: `>> addpath 'c:\xpressmp\matlab'` [50]. El lenguaje de MATLAB se fundamenta en el

cálculo técnico basado en matrices, presenta un entorno de programación, para desarrollar algoritmos, analizar, visualizar y obtener de datos, diseñar sistemas, procesar señales, entre otros [51]. Para realizar el sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada, se utilizan una serie de programas, y a través de sus funciones, se ha solucionado el problema de optimización propuesto. A continuación, se muestra algunas de las librerías utilizadas en MATLAB R2020b y FICO Xpress Optimization Suite.

- **XLSREAD**

La función *xlsread*, permite devolver los campos de texto en el arreglo de celdas *txt*, los datos numéricos y de texto en el arreglo de celdas *raw* y la segunda salida de *processFcn* en el arreglo *custom*. La función *xlsread* no cambia los datos almacenados en la hoja de cálculo de Excel [52].

- **Derivado de estimación de momento adaptativo (ADAM)**

ADAM actualiza los parámetros de forma similar a RMSProp, añadiendo un término de momento, mantiene una media móvil a nivel de elemento, de los gradientes de parámetros y de sus valores cuadrados, utiliza las medias móviles para actualizar los parámetros de red, si los gradientes son similares a lo largo de varias iteraciones, utiliza una media móvil del gradiente y permite a las actualizaciones de parámetros coger impulso en una determinada dimensión. Si los gradientes contienen principalmente ruido, la media móvil del gradiente se reduce, de igual manera que las actualizaciones de los parámetros. Adam es utilizada para entrenar redes neuronales, y se debe especificar '*adam*' como la primera entrada para *trainingOptions*. Mientras se actualiza se incluye un mecanismo para corregir un sesgo que aparece al principio del entrenamiento [53].

- **Módulo *mmxprs***

El módulo *mmxprs*, permite el acceso a FICO Xpress Optimizer desde un modelo Mosel y requiere que la biblioteca Xpress Optimizer (XPRS) esté instalada en el sistema. Permite resolver problemas de programación lineal y programación lineal entera mixta. Proporciona una gran cantidad de rutinas relacionadas con la

optimización, que van desde aquellas para encontrar una solución al problema hasta aquellas para configurar devoluciones de llamadas y funciones de administrador de cortes [50].

- **Módulo *mmsystem***

El módulo *mmxprs*, proporciona un conjunto de procedimientos y funciones relacionadas con el sistema operativo. Al igual que la cadena de tipo básico Mosel, este nuevo tipo se puede generar a partir de todos los objetos que se pueden convertir a una representación de texto y admite las operaciones de cadena habituales (como concatenación o formato). Además, se pueden generar objetos de texto a partir de entidades estructuradas (como matrices o listas); alterado (se puede obtener y cambiar un solo carácter o una secuencia de caracteres en un texto); ofrecen un conjunto más amplio de operaciones (como inserción/eliminación/búsqueda de subcadenas) y, como todos los tipos de módulos, se pasan por referencia a subrutinas [50].

## **2.5 Descripción del caso de estudio**

Con lo expuesto en el presente capítulo se tiene claro, las herramientas necesarias para realizar el sistema de gestión de energía dentro de una microrred aislada. Para su desarrollo se utilizará una base de datos de irradiación solar de 4 años, obtenidas de la plataforma <https://power.larc.nasa.gov/> de la parroquia Chan del Cantón Latacunga provincia de Cotopaxi, con coordenadas: latitud 0°57'1.8"S y longitud 78°37'32.2"O.

El ED presenta repuestas para diferentes horizontes de tiempo (24h, 48h y 168h), para determinar si se abastece la demanda con las fuentes de generación, renovable y no renovable haciendo énfasis en las ERNC, otro eje a considerar es la comparación de costos entre la respuesta estocástica con la determinista, para conocer cuál de las dos genera un menor valor.

## **2.5 Conclusiones Capítulo II**

Para realizar la predicción de irradiación, se presentan diversos métodos, siendo escogido el modelo de tipo único, considerando el horizonte de predicción y una base de datos obtenida, transformada y tratada para generar información confiable

y cercana a la realidad, con el objetivo de dimensionar correctamente los equipos y el sistema. Para la simulación se utilizará un conjunto de datos de irradiación en un rango de cuatro años desde 2018 hasta el 2021 para realizar la predicción del año 2022 se utilizará el software MATLAB R2020b, con el solucionador ADAM, para obtener una respuesta con un RMSE menor o igual al 5% y R superior a 0.8, para validar el modelo de predicción.

Para implementar el algoritmo de ED, se utilizará el optimizador FICO Xpress Optimization Suite, el método utilizado para la optimización parte de un modelo con MILP que toma un enfoque estocástico debido a la irradiación solar predicha mediante ANNs. Los datos predecidos serán ingresados a la función objetivo con sus respectivas restricciones, de forma que se tendrá una fase de competencia entre las energías renovables y las no renovables, con el objetivo de reducir los costos de operación del sistema. La energía eólica presenta velocidades bajas en el sector de Chan, por consiguiente, no se consideró para la realización de la presente investigación. En este contexto el recurso solar, existe en gran cantidad, y se encuentra aportando en la mayor parte del día.

## **CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

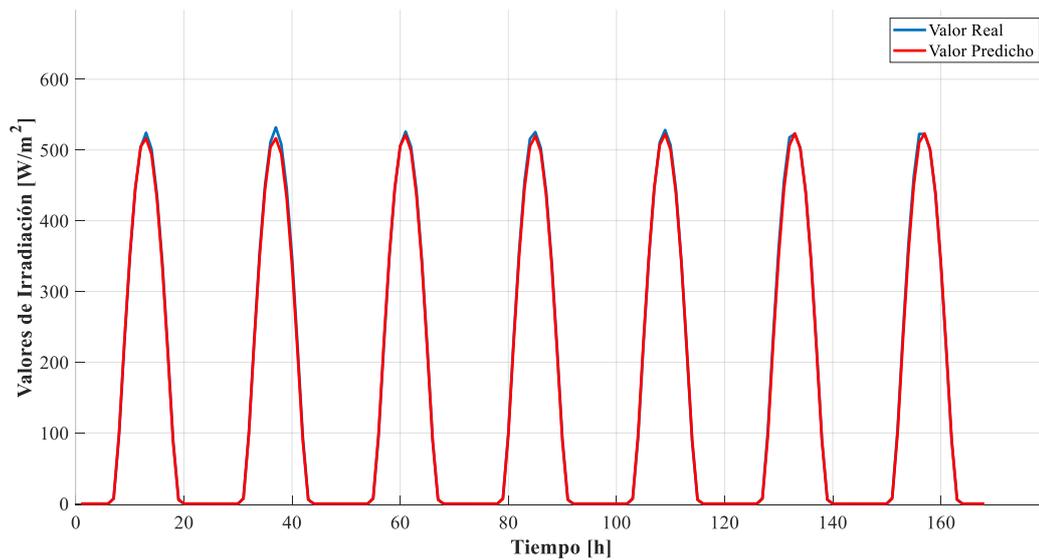
En este Capítulo se detallan los resultados obtenidos, en base a la fundamentación teórica y metodológica, del planteamiento de la propuesta que permitieron diseñar, realizar, aplicar y validar los resultados obtenidos experimentalmente durante el caso de estudio. La ANN desarrollada para predecir los valores de potencia predicha, la implementación de una microrred aislada y la MILP, permitieron realizar un análisis de despacho económico, donde el principal factor analítico es el consumo de combustible del generador de combustión, y la utilización del pack modular de baterías para el abastecimiento de la demanda, basándose en la reducción de costos de operación.

### **3.1 Análisis de resultados**

El análisis permite incorporar diferentes criterios e ideas, técnico-científico, generados por los resultados obtenidos de la investigación. Para analizar el comportamiento del ED, es fundamental resaltar que el estudio utilizó, recursos de potencia no renovable, pack modular de baterías, demanda eléctrica y valores de energía renovables obtenidos por redes neuronales artificiales considerados como un enfoque estocástico. Se presentan diferentes casos de estudio para 24h, 48h y 168h para la segunda semana del mes de abril del 2022, en los cuales se demuestra la efectividad y los beneficios del método implementado, además se analiza el impacto que tiene la inclusión de los sistemas de generación con fuentes de energía renovable y los sistemas de almacenamiento, basados en un pack modular de baterías.

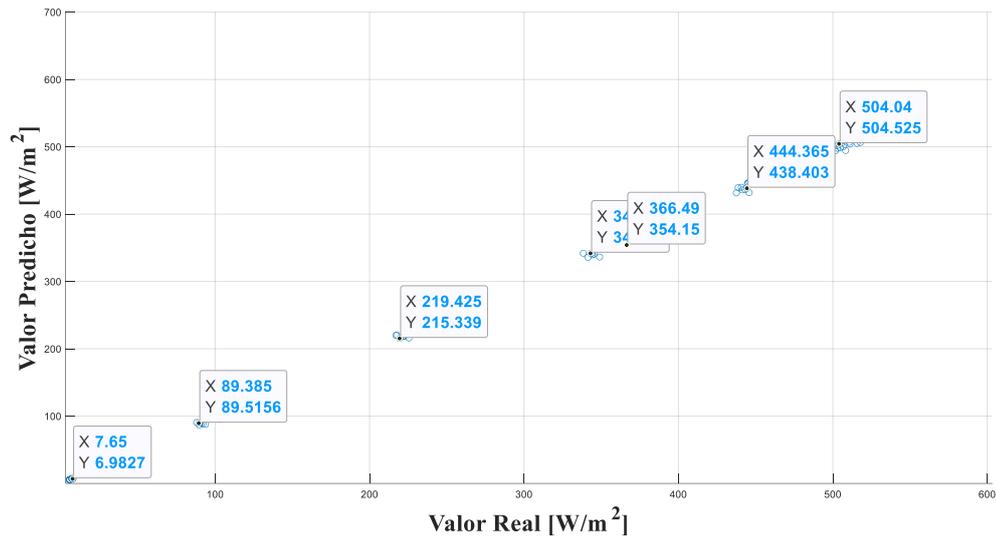
### 3.2 Resultados de la red neuronal artificial

La ANN se implementó en el software MATLAB R2018b, se realizó el análisis de su desempeño, para validar su funcionamiento. La Figura 21, muestra la comparación de los datos predichos versus los datos reales, correspondientes a la tercera semana del mes de enero del 2022, obteniéndose un R de 0.99 y un RMSE de 2.37%, demostrando una estrecha relación entre los resultados de la red y los valores reales, demostrando que el modelo de la red neuronal es válido y funcional.



*Figura 21: Comparación de la irradiación predicha versus la real*

En la Figura 22, se observa que la diferencia entre los datos predichos y reales, no fue grande y la tendencia de la línea de predicción sigue la línea real en todo momento. La mayor densidad de errores, se encuentran entre 510W/m<sup>2</sup> y 526 W/m<sup>2</sup>, pero solo se genera en los picos de irradiación, y son valores que no afectan en su mayoría en el cálculo del RMSE que sigue siendo menor al 5%.

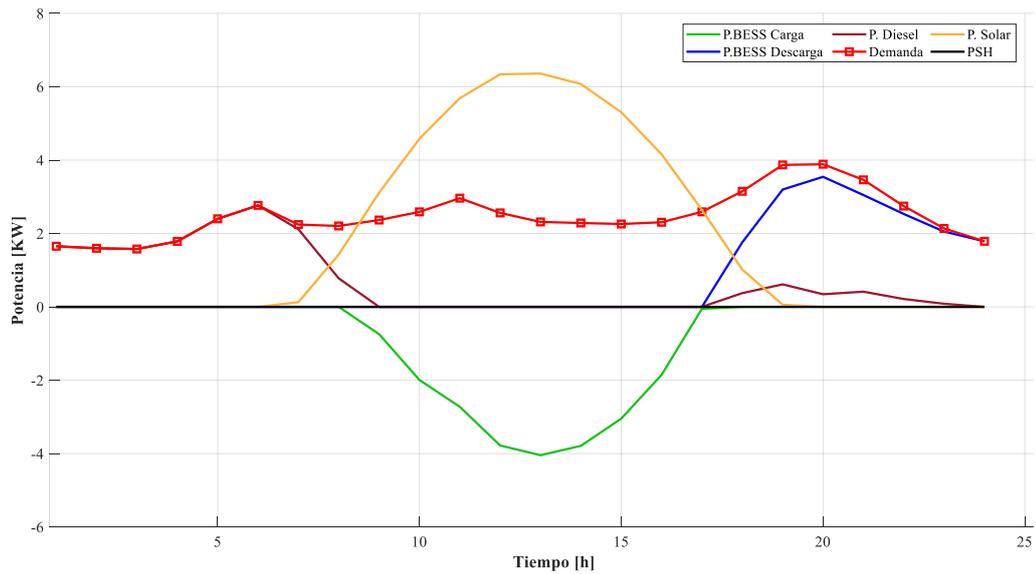


*Figura 22: Relación de irradiación entre los valores predichos versus los valores reales*

### 3.3 Resultados en diferentes horizontes de programación

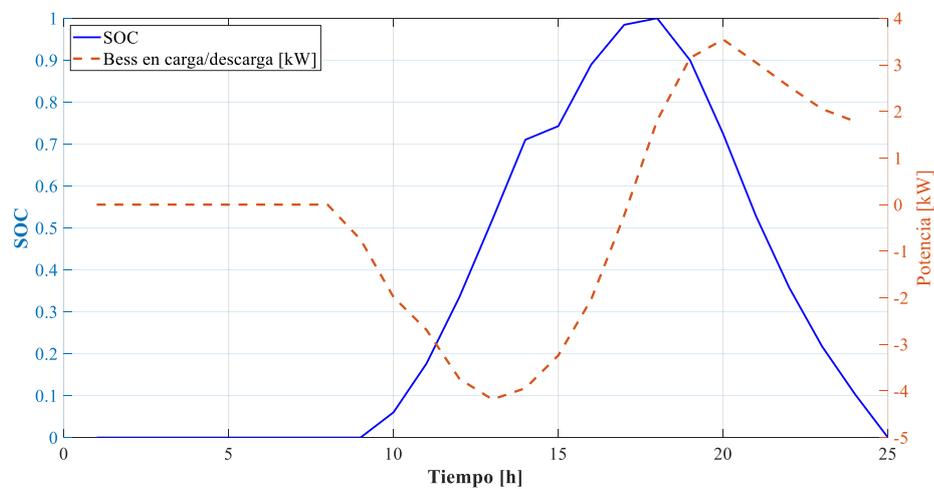
#### 3.3.1 Despacho Económico con enfoque estocástico para 24 horas.

Para el primer escenario de análisis del despacho económico de una microrred aislada se tiene un horizonte de tiempo de 24 horas (Figura 23), en las que intervienen fuentes de generación renovables y un pack modular de baterías. El comportamiento del generador diésel presente limitaciones por el consumo de combustibles fósiles, en este contexto se puede mencionar que la energía disponible durante el día aporta el 59% del total y el generador diésel el 16%, minimizando así su consumo. Como se mencionó la energía solar fotovoltaica es la fuente que genera mayor cantidad de potencia, que tiene la capacidad de suministrar de energía eléctrica al sistema alrededor de 12 horas aproximadamente, desde las 7:00 horas de la mañana hasta las 18:00 horas de la noche, en este intervalo de tiempo se carga la energía del pack modular de baterías, que suministra potencia al sistema desde las 18:00 debido a que la energía solar empieza a perder potencia. Finalmente, el generador a combustión funciona únicamente cuando el pack modular de baterías no interviene hasta las 6:00 horas del siguiente día.



**Figura 23:** Despacho económico para un horizonte de tiempo de 24h

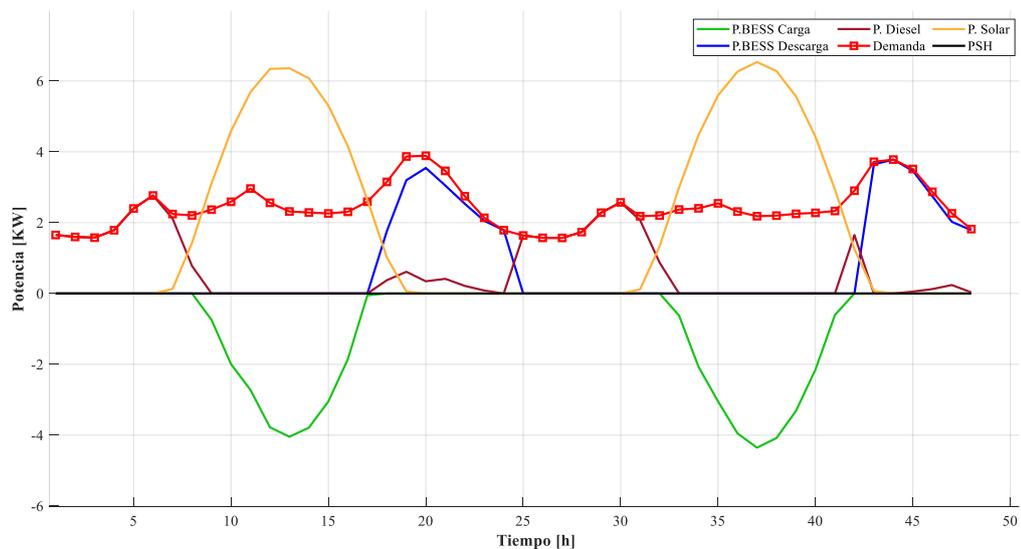
Con el uso de la fuente de energía renovable, el pack modular de baterías, empieza su ciclo de carga, que permite abastecer la demanda, se debe considerar que cuando el generador diésel comienza con su funcionamiento no lo realiza como un controlador de encendido y apagado, por el caso contrario es una acción controlada y de forma paulatina con el objetivo de reducir los daños mecánicos y aumentar su vida útil. Posteriormente cuando se ha cumplido el ciclo de carga en su totalidad, comienza el de generación que aporta energía. En la Figura 24, se muestra el porcentaje del SOC, que al llegar a un estado de carga cercano al 100% se reduce la degradación de las baterías.



**Figura 24:** Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas

### 3.3.2 Despacho Económico con enfoque estocástico para 48 horas.

Para el segundo escenario se presenta el despacho económico para un horizonte de tiempo de 48 horas, que además de minimizar los costos de las variables descritas anteriormente, se debe considerar tomar acciones en función de las condiciones reales, en la Figura 25, el generador diésel, funciona en determinados momentos del día, y en cortos períodos de tiempo, debido a lo mencionado se reduce su desgaste y contribuye a la realización de mantenimientos a largo plazo, debido a que la parte mecánica no arranca bruscamente, sino que entra en funcionamiento paulatinamente, y se apaga de igual forma cuando ya no es requerido.

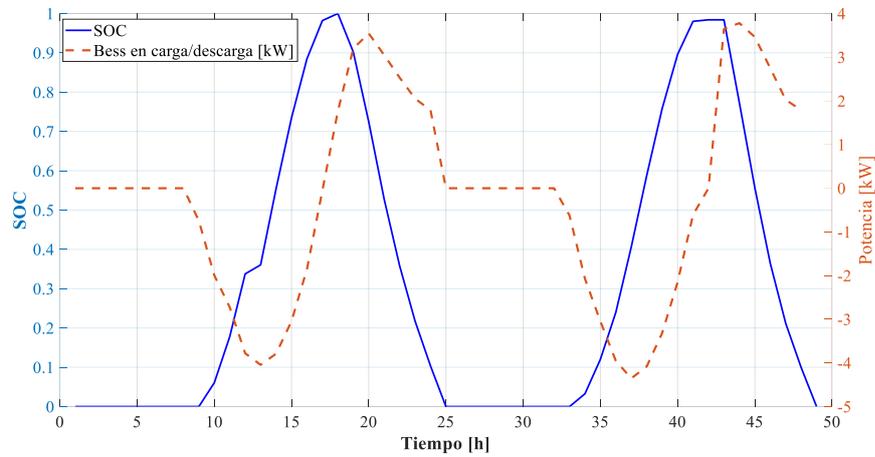


*Figura 25: Despacho económico para 48 horas*

En el segundo día el pack modular de baterías aporta la mayor cantidad de energía al sistema a partir de las 18:00 horas trabajando en conjunto con el generador diésel hasta abastecer la demanda, posteriormente el generador empieza a suministrar potencia hasta el siguiente día. En la Figura 26 se indica lo mencionado en la que el generador actúa de manera mínima en horas de la noche, por esta razón es primordial comprender el papel del pack modular, en relación al caso de despacho de 24 horas, existe una mayor presencia de potencia de baterías, reduciendo el uso de combustibles fósiles.

El pack modular de baterías, como se mencionó actúa como carga cuando empieza a almacenar energía, posteriormente pasa a generarla, sin embargo, se observa que suministra energía en la medida que dispone de potencia para abastecer la demanda.

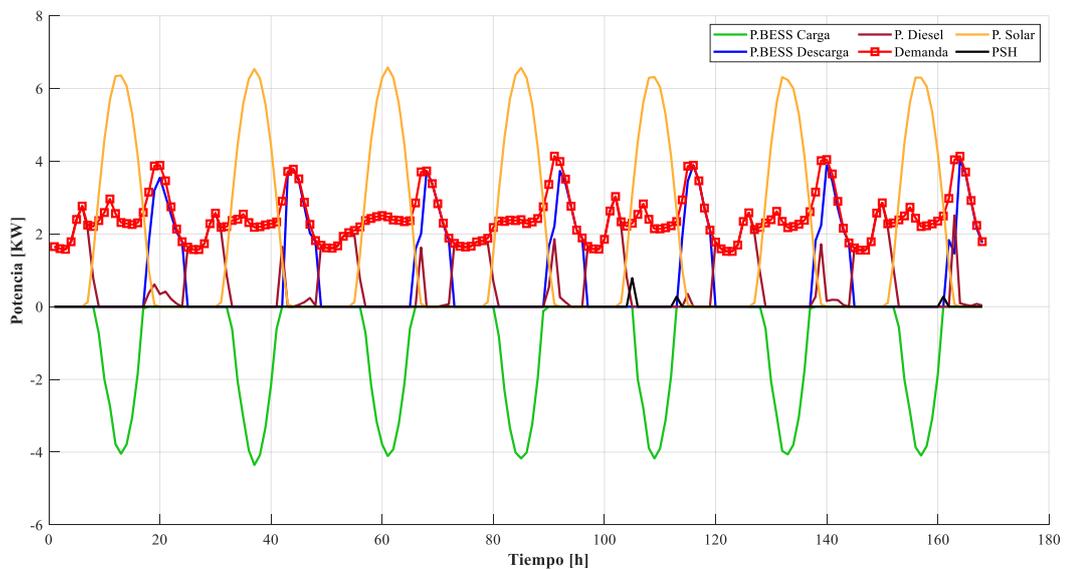
Se debe considerar que debe existir un buen dimensionamiento del pack modular para evitar incurrir en gastos económicos y evitar su degradación a gran escala y en poco tiempo.



**Figura 26:** Ciclo de la batería en un tiempo de 48 horas

### 3.3.3 Despacho Económico con enfoque estocástico para 168 horas.

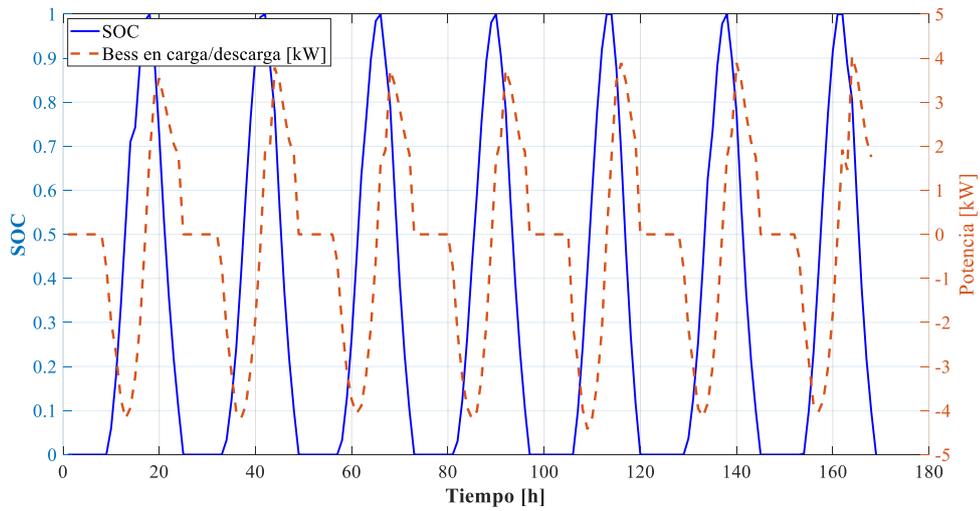
Para el análisis de 168 horas que corresponde a una semana (Figura 27), se observa que el accionar del generador diésel se produce en intervalos pequeños de tiempo en la noche y la gran parte de las horas de la mañana, se debe mencionar también que el generador ayuda al pack modular a cubrir los valores de demanda eléctrica.



**Figura 27:** Despacho económico para 168 horas

En la Figura 28, el ciclo de las baterías, presentan un estado de carga completo en un intervalo de tiempo, reduciendo el uso continuo de las baterías, y por el caso contrario

en el modo descarga inyecta potencia de forma paulatina para obtener una mejor respuesta.



*Figura 28: Ciclo de la batería en un tiempo de 168 horas*

### 3.4 Análisis del despacho económico

En la Tabla 12 se muestran los costos de operación del sistema, para cada uno de los horizontes de tiempo analizados, y se los compara con los resultados obtenidos con el método determinista, ambos analizados en la segunda semana del mes de abril del 2022.

*Tabla 12: Costo total del despacho económico con enfoque estocástico y determinista*

	Costo del despacho (USD) Enfoque estocástico	Costo del despacho (USD) Enfoque determinista
<b>Horizonte 1 (24 horas)</b>	43.73	43.73
<b>Horizonte 2 (48 horas)</b>	87.72	88.14
<b>Horizonte 3 (168 horas)</b>	309.47	309.91

Los costos de funcionamiento para cada horizonte de tiempo ilustran las diferencias entre el enfoque estocástico y el determinista. Las respuestas dadas en el despacho económico de 24 horas no presentan diferencias. En el horizonte 2, se presenta un costo menor en el enfoque determinista con un ahorro de \$0.42. Sin embargo; en la comparación del tercer caso de estudio, el método estocástico presenta un ahorro

de \$0.44, concluyéndose que mientras más amplio es el horizonte de tiempo, el enfoque estocástico va a ser mejor, entendiéndose que los costos de operación son menores, el generador diésel reduce su desgaste, se reduce el uso del combustible diésel y se prioriza el uso de las ERNC.

### 3.5 Análisis del valor esperado de información perfecta y la solución estocástica

Mediante el uso de la ecuación 28 en la Tabla 13 se realiza el cálculo del valor esperado de la información perfecta.

$$EVPI = |RP - WS| \quad (28)$$

Siendo:

*EVPI* Valor esperado de información perfecta

*RP* Solución aquí y ahora

*WS* Solución espere y vea

**Tabla 13:** Cálculo del EVPI para diferentes horizontes de tiempo

	<b>RP</b>	<b>WS</b>	<b>EVPI</b>
<b>Horizonte 1</b> <b>(24 horas)</b>	43.73	44.33	0.6
<b>Horizonte 2</b> <b>(48 horas)</b>	87.72	88.43	0.71
<b>Horizonte 3</b> <b>(168 horas)</b>	309.47	311.05	1.58

Mediante el uso de la ecuación 29 en la Tabla 14 se realiza el cálculo de la solución estocástica.

$$VSS = |EEV - RP| \quad (29)$$

Siendo:

*VSS* Valor de la solución estocástica

*EEV* Valor esperado de la solución obtenida usando el valor esperado

*RP* Solución aquí y ahora

**Tabla 14:** Cálculo del VSS para diferentes horizontes de tiempo

	<b>EEV</b>	<b>RP</b>	<b>VSS</b>
<b>Horizonte 1</b> <b>(24 horas)</b>	43.73	43.73	0
<b>Horizonte 2</b> <b>(48 horas)</b>	88.14	87.72	0.42
<b>Horizonte 3</b> <b>(168 horas)</b>	309.91	309.47	0.44

Los valores de EVPI y VSS indican el valor de la optimización bajo incertidumbre, con los resultados obtenidos en la tabla 13 y 14, se concluye que el  $EVPI > VSS$ , por lo que el método estocástico permite obtener un despacho económico eficiente con costos de operación menores basados principalmente en la utilización de las ERNC.

### 3.5 Conclusiones Capítulo III

La red neuronal diseñada, fue implementada en el software MATLAB R2018b, y está basado en el modelo único que utiliza una base de datos históricos de cuatro años de irradiación solar. Para el RMSE, se obtuvieron resultados menores o iguales al 5%, de igual forma el R presentó resultados mayores a 0.8, que indica que las variables predichas y reales están fuertemente correlacionadas, el análisis de los dos factores mostrados determina que la red neuronal diseñada es válida.

El software FICO Xpress Optimization Suite, es propiedad de Fair Isaac Corporation ("FICO"), que presenta un IDE, que permite desarrollar, perfilar y corregir de manera sencilla modelos de optimización previstos, en los cuales se puede realizar MIP, QP, MIQP, QCQP, PNL, MINLP y CP.

Para realizar el despacho económico, se consideró la potencia solar predicha, en conjunto con el pack modular de baterías y la generación basada en el uso de combustibles fósiles, con el objetivo de reducir los costos de operación y las emisiones de  $CO_2$ , para abastecer la demanda y disminuir en lo posible el uso del generador diésel.

Se debe realizar un correcto dimensionamiento del pack modular de baterías, para evitar incurrir en gastos económicos innecesarios y evitar su degradación a gran escala y en poco tiempo.

El generador diésel, analizado desde el enfoque estocástico, funciona en determinados momentos del día, por lo que se reduce su desgaste y contribuye a realizar mantenimientos a largo plazo, debido a que la parte mecánica no arranca bruscamente, sino que entra en funcionamiento paulatinamente, y de igual forma se apaga cuando ya no es requerido.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Se determinó que una gran cantidad de investigadores aplican modelos de optimización utilizando algoritmos de punto interior, restricciones lineales, programación lineal, programación no lineal, programación lineal entera mixta, entre otros, para realizar el despacho económico en microrredes aisladas, utilizando ERNC, con el objetivo de reducir los costos de operación y las emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el uso de un pack modular de baterías, que suministra energía en la mayor parte del día.

La ANN desarrollada, está basada en la utilización de datos meteorológicos en un intervalo de cuatro años desde 2018 hasta el 2021, para obtener la predicción del año 2022 con valores de RMSE menores e iguales al 5% y con un R mayor al 0.9, posteriormente estos datos se convirtieron en valores de potencias para ser ingresadas al problema de optimización con MILP, que le proporciona el enfoque estocástico por la variabilidad del recurso solar.

El modelo matemático del ED, basado en MILP, contiene una función objetivo con sus restricciones y balance de potencias, que limitan el uso de combustibles fósiles, el encendido y apagado del generador, la potencia no suministrada, el excedente de potencia solar y la energía del pack modular de baterías (BESS).

Se simuló y evaluó los resultados del modelo matemático utilizando como entrada los parámetros de potencia solar predicha, la demanda, y la energía máxima de pack modular de baterías, en conjunto con el costo del diésel, costos de encendido y apagado del generador, costos de energía no suministrada, costo del uso del pack de baterías en conjunto con los valores de eficiencia de carga y descarga, se debe mencionar que las variables permanecen constantes durante el análisis del ED.

Al realizar la comparación entre el enfoque determinista y estocástico, se obtuvo un mejor rendimiento con el segundo método, en los costos de operación en el horizonte 1 no se determinó diferencias, en el horizonte 2 el determinista fue mejor con un ahorro de \$0.42, sin embargo; en el horizonte de 168h se ahorró \$0.44 utilizando el método estocástico, concluyéndose que mientras más amplio es el horizonte de tiempo, el enfoque estocástico va a ser mejor, entendiéndose que los

costos de operación son menores, el generador diésel reduce su desgaste, se reduce el uso del combustible diésel y se prioriza el uso de las ERNC.

En la comparación de los valores de optimización bajo incertidumbre, se concluye que el  $EVPI > VSS$  en los tres horizontes de tiempo (24h, 48h y 168h), por lo que el método estocástico permite obtener un despacho económico eficiente con costos de operación menores basados principalmente en la utilización de las ERNC.

## **RECOMENDACIONES**

Es necesario proponer otros temas para futuras investigaciones, por ejemplo se puede proponer realizar el despacho económico utilizando diversos métodos para comprender las reacciones del sistema y la forma en que se reduce el uso del combustible diésel.

El estudio se realiza en torno a una red aislada, pero se deben considerar microrredes interconectadas con la red principal, con el objetivo de comprender la respuesta de las energías renovables, que, como se mencionó anteriormente, es sólo uno de los recursos considerados.

El análisis propuesto es una base para aumentar los horizontes de tiempo para verificar que a largo plazo se produce un mejor ahorro en los costos de operación del sistema, utilizando el enfoque estocástico sobre el determinista.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia de Regulación y Control de Energías y Recursos Naturales no Renovables, 2022. [En línea]. Available:  
<https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/balance-nacional-de-energia-electrica/>. [Último acceso: 25 Enero 2023].
- [2] D. L. Jiménez Jiménez , Á. Jaya, D. Lagla, C. Chasi, R. Salazar y P. Zurita, «IEEE,» 2022. [En línea]. Available:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9935730>. [Último acceso: 25 02 2023].
- [3] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, de *Balance Energético Nacional 2020*, Quito, 2021, pp. 18-20.
- [4] D. Carrión, E. Correa y E. García, de *Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo*, RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao, 2019, pp. 253-269.
- [5] D. Carrión, «Modelo de ahorro energético a través de sistemas de gestión de iluminación para residencias,» de *Aplicaciones de calidad de energía y electrónica de potencia, (PEPQA), 2013*, Bogotá, 2013.
- [6] J. Salazar, G. Edwin y C. Diego, «Recarga de Vehículos Eléctricos Mediante una Optimización Entera Mixta con Participación de Respuesta de la Demanda,» vol. 16, n° 16, pp. 1-7, 2020.
- [7] A. Águila Téllez, D. F. Carrión Galarza y L. Ortiz Matos, «Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,» vol. 13, pp. 2190-2194, 2015.
- [8] R. Palma, C. Benavides, F. Lanas, L. Reyes, J. Llanos y D. Sáez, «IEEE,» vol. 2, n° 13517697, pp. 996 - 1006, Junio 2013.
- [9] C. Batle, Enero 2014. [En línea]. Available:  
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/An%C3%A1lisis-del-impacto-del-incremento-de-la-generaci%C3%B3n-de-energ%C3%ADa-renovable-no-convencional-en-los-sistemas-el%C3%A9ctricos-latinoamericanos.pdf>.
- [10] C. Bordóns, F. García y L. Valverde, «ScienceDirect,» vol. 12, pp. 117-132, Junio 2015.
- [11] D. Arango, R. Urrego y S. Rivera, «Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales,» vol. 13, pp. 123-152, 2017.

- [12] D. Jiménez, D. Ortíz Villalba, A. Perez y O. Marcos E., «Lithium-ion Battery Degradation Assessment in Microgrids,» Noviembre 2018.
- [13] A. R. Faghih, A. A. Dehghan y F. Besharat, «Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study,» pp. 798-821, 1 Marzo 2013.
- [14] P. Neelamegam y V. A. Amirtham, vol. 14, n° 3, pp. 206-214, 16 Junio 2016.
- [15] D. F. Orbea León, «Despacho económico en sistemas eléctricos de potencia considerando el comportamiento estocástico de centrales de generación a base de energías renovables no convencionales,» Febrero 2021.
- [16] A. Cuesta, J. Constante y D. Jijón , «Modelos de predicción de radiación solar y temperatura ambiente mediante redes neuronales recurrentes».
- [17] F. Rodríguez, A. Fleetwood, . A. Galarza y L. Fontan, «Predicting solar energy generation through artificial neural networks,» *Renewable Energy*, pp. 855-864, 2018.
- [18] H. Sharadga, S. Hajimirza y R. S. Balog, «Time series forecasting of solar power generation for large-scale,» *Renewable Energy*, pp. 797-807, Mayo 2020.
- [19] K. Ubilla, G. A. Jiménez-Estévez, R. Hernández, L. Reyes Chamorro, B. Severino y R. Palma Behnke, «Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models,» vol. 5, n° 4, p. 1310-1318, Junio 2014.
- [20] OECD, «OECD,» 2012. [En línea]. Available:  
[https://www.oecd.org/berlin/Linking%20Renewable%20Energy%20to%20Rural%20Development\\_es.pdf](https://www.oecd.org/berlin/Linking%20Renewable%20Energy%20to%20Rural%20Development_es.pdf). [Último acceso: 2023].
- [21] S. P. Cusi Quishpe, «Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana,» Agosto 2021. [En línea]. Available:  
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20726>.
- [22] J. Llanos Proaño, D. Ortiz, D. Saez y D. Olivares Quero, «Microgrids, Economic Dispatch for Optimal Management of Isolated,» Junio 2017.
- [23] Cummins, «Cummins,» Septiembre 2021. [En línea]. Available:  
<https://www.cummins.com/es/news/2021/09/23/examples-where-microgrids-used>.
- [24] M. F. Zia, E. Elbouchikhi y M. Benbouzid, «Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects,» *Applied Energy*, pp. 1033-1055, 2018.

- [25] J. Schönberger, R. Duke y S. D. Round, «DC-Bus Signaling: A Distributed Control Strategy for a Hybrid Renewable Nanogrid,» *TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 53, nº 5, pp. 1453-1460, 2006.
- [26] V. O. Salguero, «Repositorio Universidad Técnica de Cotopaxi,» 14 Noviembre 2022. [En línea]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/9799/1/MUTC-001340.pdf>. [Último acceso: 27 Julio 2023].
- [27] CASASSOLARES, «CASASSOLARES,» 27 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://casassolares.org/sistema-fotovoltaico/>.
- [28] T. I. Tolón, «Universidad Politécnica de Cataluña BARCELONATECH,» 6 2013. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/19411?locale-attribute=es>. [Último acceso: 28 7 2023].
- [29] S. Acosta, «El periódico de la energía,» 27 3 2023. [En línea]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/espana-uno-de-los-paraisos-del-almacenamiento-energetico-en-europa/>. [Último acceso: 28 7 2023].
- [30] D. L. Jiménez Jiménez, «Repositorio Univerisdad de Chile,» 10 12 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169961>. [Último acceso: 27 7 2023].
- [31] M. I. Benavides Flores, «Repositorio Académico de la Universidad de Chile,» 1 1 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/153342>. [Último acceso: 7 28 2023].
- [32] V. Pop, H. J. Bergveld, P. H. Notten y P. P. Regtien, «State-of-the-art of battery state-of-charge determination,» *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, pp. 93-110, 31 10 2005.
- [33] A. Varela Souto, *Optimization & Energy Management of a Microgrid Based on Frequency Communications*, TUDelft, 2016.
- [34] L. Lanzarini y G. Leguizamon, *Optimización Multi-Objetivo. Aplicaciones a problemas del mundo real*, FACULTAD DE INFORMATICA, 2013.
- [35] Y. E. García Vera, *Gestión de microrredes eléctricas basadas en fuentes renovables en Colombia*, Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2021.
- [36] E. Castillo, A. Conejo, P. Pedregal, R. García y N. Alguacil, *Formulacion y Resolución de Modelos de de Programacion Matemática en Ingeniería y Ciencia.*, 2002.

- [37] S. N. Garza, Programación No Lineal, México DF: Universidad Autónoma de Nueva León, 1996.
- [38] Á. Jaya y D. Lagla, «Repositorio Digital de la Universidad Técnica de Cotopaxi,» 8 2021. [En línea]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7949>. [Último acceso: 1 8 2023].
- [39] P. Isasi y I. Galván, Redes de Neuronas Artificiales Un Enfoque Práctico, Madrid: Pearson, 2004.
- [40] J. Treguerres , Fisiología Humana, Madrid: McGraw Hill, 2005.
- [41] X. Basogain olabe, Redes Neuronales Artificiales y sus Aplicaciones, Escuela Superior de Ingeniería de Bilbao, EHU.
- [42] Universidad de Murcia, «Programa de Actualización y Especialización "ON LINE" en Nuevas Tecnologías y Contaminación de Atmósferas, para PYMEs,» Universidad de Murcia. [En línea].
- [43] A. Serrano, E. Soria y J. Martín, Redes Neuronales Artificiales, Valencia: Universidad de Valencia, 2009.
- [44] B. Unapucha, «Repositorio Digital Universidad Técnica de Cotopaxi,» 2023. [En línea]. Available: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10365>. [Último acceso: 2 8 2023].
- [45] S. Sharma, S. Sharma y A. Athaiya, «ACTIVATION FUNCTIONS IN NEURAL NETWORKS,» *Engineering Applied Sciences and Technology*, vol. 4, n° 12, pp. 310-316, 2020.
- [46] Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones., Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica, 2018.
- [47] BIBDIGITAL EPN, «Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional,» 13 08 2018. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19622/1/CD-9012.pdf>.
- [48] GlobalPetrolProces, «GlobalPetrolProces,» 25 9 2023. [En línea]. Available: [https://es.globalpetrolprices.com/diesel\\_prices/#:~:text=Precios%20del%20diesel%2C%2025%2Dsept,precios%20entre%20los%20diferentes%20pa%C3%ADses..](https://es.globalpetrolprices.com/diesel_prices/#:~:text=Precios%20del%20diesel%2C%2025%2Dsept,precios%20entre%20los%20diferentes%20pa%C3%ADses..) [Último acceso: 9 25 2023].
- [49] Fair Isaac Corporation ("FICO"), FICO Xpress Optimization "Guide for evaluators", FICO Xpress, 2021.

- [50] Fair Isaac Corporation ("FICO"), FICO Xpress MATLAB Interface "Reference Manual", FICO, 2021.
- [51] MathWorks, Inc. , «MathWorks,» [En línea]. Available: [https://la.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html). [Último acceso: 30 08 2023].
- [52] MathWorks, Inc., «MathWorks,» 12 05 2023. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/xlsread.html>. [Último acceso: 31 08 2023].
- [53] MathWorks, Inc., «Mathworks,» 07 01 2023. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ref/trainingoptions.html>. [Último acceso: 31 08 2023].
- [54] D. Arango, R. Urrego y S. Rivera, «Despacho económico en microrredes con penetración de energía renovable usando algoritmo de punto interior y restricciones lineales,» vol. 13, pp. 123-152, 2017.
- [55] Universidad de Chile, «Repositorio Univerisdad de Chile,» 10 12 2018. [En línea]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/169961>. [Último acceso: 27 7 2023].
- [56] Consejo Nacional de Electricidad, «Organización Lationoamericana de Energía,» 8 2008. [En línea]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00041.pdf>. [Último acceso: 27 7 2023].

# ANEXOS

## Anexo 1: Hoja de especificaciones técnicas de la Batería

### LiFePO4 Technology Brief Introduce

LiFePO4 technology surpasses lead acid technology in all areas: reliability, performance, security, cleanliness...

- Weight/power ratio = 70% lighter than lead acid batteries
- Battery life = lasts 4 to 5 times longer than conventional lead acid batteries
- Very low self-discharge rate
- Wide range of operating temperatures = from 20° C to 60° C
- Unlike lead acid batteries, incomplete charges have no impact on battery life
- Extra security = leak-proof, as the battery does not contain acid. LiFePO4 batteries can therefore be installed in any position without risk of leakage.

LiFePO4 technology eliminates the risk of explosion or combustion. LiFePO4 batteries are equipped with protection against short circuit currents (BMS), which protects the battery from short circuits, overloads and deep discharge. The BMS also balances cells in order to guarantee longer battery life.

Long Life

Lithium Iron Phosphate

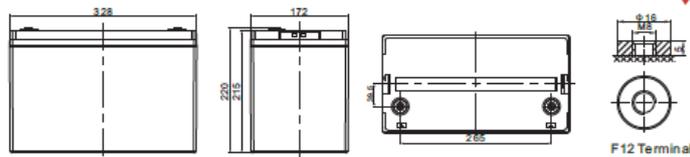
Deep Cycle



### Applications

- Electric Vehicles, Electric Mobility
- Solar/Wind Energy Storage System
- UPS, Backup Power
- Telecommunication
- Medical Equipment
- Lighting

### Dimensions & Weight

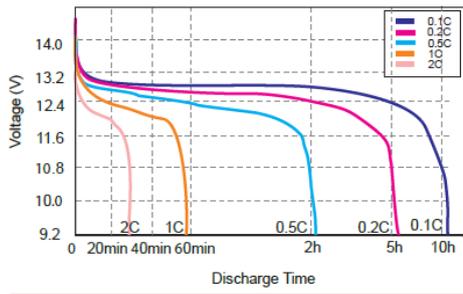


### Technical Specifications

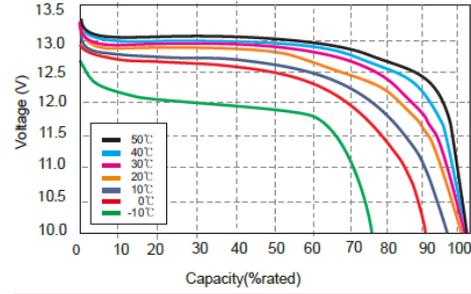
- Length: 330±1mm Width: 172±1mm Height:215±1mm Total Height: 220±1mm
- Weight: 11.5±0.1kgs

Electrical Characteristics	Nominal Voltage	12.8V
	Nominal Capacity	100Ah
	Energy	1280Wh
	Terminal	M6
	Cycle Life	>2000cycles @1C
	Months Self Discharge	<3%
	Efficiency of Charge	100% @0.2C
Standard Charge	Efficiency of Discharge	96~99% @0.5C
	Charge Voltage	14.6-15.2V
	Charge Mode	0.2C to 13.6V, then 13.6V, charge current to 0.02C(CC/CV)
	Charge Current	30A
	Max. Charge Current	100A
Standard Discharge	Charge Cut-off Voltage	14.6V±0.2
	Continuous Current	50A
	Max continuous discharge current	100A
Environmental	Discharge Cut-off Voltage	10V
	Charge Temperature	0 °C to 45 °C (32 F to 113 F) @60±25% Relative Humidity
	Discharge Temperature	-20 °C to 60 °C (-4F to 140 F) @60±25% Relative Humidity
	Storage Temperature	0 °C to 40 °C (32 F to 104 F) @60±25% Relative Humidity
Mechanical	Water Dust Resistance	IP21
	Cell & Method	32650, 4S16P
	Plastic Case	ABS
	Dimensions (in./mm.)	330*172*215mm (Customized)
	Weight (lbs./kg.)	Approx:11.5Kg (25.3lbs)
	Gravimetric specific energy	111WH/KG
	Bluetooth (optional)	/
LCD display (optional)	/	

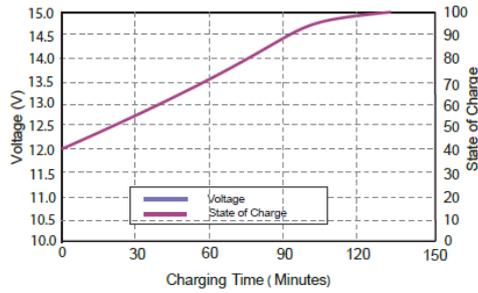
**Different Rate Discharge Curve (25°C)**



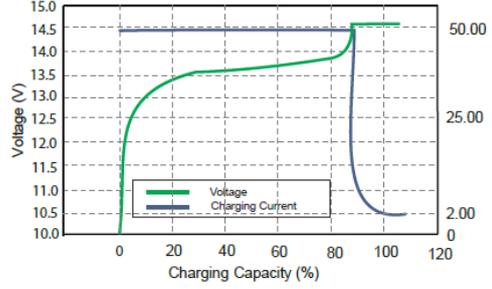
**Different Temperature Discharge Curve At 0.5c**



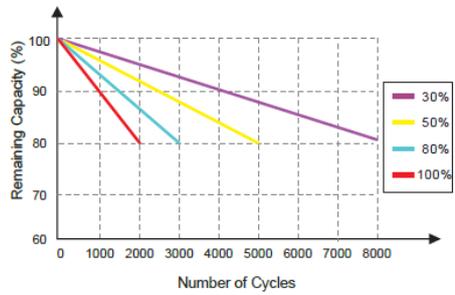
**State Of Charge Curve At 0.5c (25°C)**



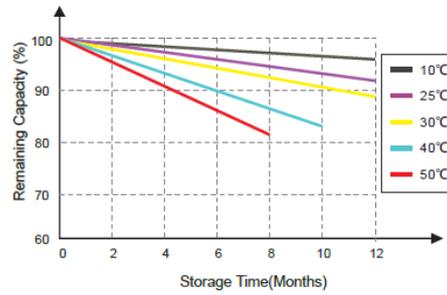
**Charging Characteristics At 0.5c (25°C)**



**Cycle Life Curve At 1c According Dod**



**Self Discharge Characteristics Curve**



## Anexo 2: Hoja de especificaciones técnicas del generador diésel



### DG6000LE GENERADOR ELÉCTRICO DIÉSEL 5,5 KW ABIERTO

**Potencia Máxima:** 5,5 kW  
**Potencia Nominal:** 5 kW  
**Voltaje:** 230 V – 50 Hz – Monofásico.  
**Corriente:** 23,9  
**Depósito de combustible:** 14 L.  
**Conexión ATS** (arranque automático por señal)  
**AVR** (regulador de voltaje automático).  
**Acabado:** Abierto.

Referencia: DG6000LE

Estado: Producto nuevo

#### DATOS TÉCNICOS

- **Modelo:** D400E
- **Potencia (HP):** 10
- **Modo de arranque:** Manual/eléctrico
- **Cilindrada (cc):** 418
- **Capacidad de aceite (L):** 1,65
- **Frecuencia (Hz):** 50
- **Potencia Nominal:** 5 kW
- **Potencia Máxima:** 5,5 kW
- **Voltaje (V):** 230
- **Corriente (A):** 23,9
- **Enchufes:** 2×16 A
- **Pantalla digital:** LED5
- **Capacidad de depósito (L):** 14
- **Funcionamiento a 50% carga (hr.)** 13
- **Nivel de ruido a 7 mts: 50% carga (dBA):** 77,5
- **Salida corriente continua 12 (V/A):** 12/8,3
- **Batería (Ah):** 30

#### LOGÍSTICA:

- **Dimensiones:** 720x480x600 mm
- **Peso:** 108 kg