

Desarrollo de una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes

Daniel Esteban Ordoñez Ramírez  
Kevin Jesús Santacruz

Universidad CESMAG  
Facultad de Ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica  
San Juan de Pasto  
2024

Desarrollo de una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes

Daniel Esteban Ordoñez Ramírez

Kevin Jesús Santacruz

Asesor

John Evert Barco Jiménez

Informe final de Grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería Electrónica en la modalidad de Estancia en Línea

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2024

**Nota de Aceptación**

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG para optar al título de Ingeniero Electrónico

John Evert Barco Jiménez

---

Asesor

Francisco Javier Eraso Checa

---

Jurado

Marycarmen Rivera Montezuma

---

Jurado

## **Página de nota de exclusión de responsabilidad intelectual**

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de su autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

## Dedicatoria

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza y la sabiduría necesaria en este proceso. Mi sincero agradecimiento va también a mi asesor de tesis, cuyo conocimiento experto, apoyo constante y valiosas sugerencias fueron fundamentales en cada etapa de esta investigación. Su dedicación y compromiso han sido pilares en el éxito de este trabajo.

Asimismo, deseo reconocer la colaboración de mi compañero de investigación, cuya participación activa, intercambio de ideas y motivación constante enriquecieron significativamente este proyecto. Su dedicación y perspectiva fueron esenciales para superar los desafíos y lograr los objetivos establecidos.

No puedo olvidar el apoyo incondicional de mi familia durante todo este recorrido académico. A mis padres, hermanos, amigos y seres queridos, les agradezco de corazón su amor, comprensión y aliento constante. Su confianza en mí y su apoyo inquebrantable fueron mi mayor fuente de inspiración y motivación.

Finalmente, quiero dedicar este logro a mis padres. Su ejemplo de sacrificio, dedicación y perseverancia ha sido mi guía en la búsqueda de la excelencia académica y personal. Este éxito es un reflejo de su amor, valores y sacrificios, y estoy eternamente agradecido por su apoyo incondicional.

A todas estas personas, su contribución ha sido invaluable y su impacto perdurará en este trabajo y en mi vida. Su generosidad y compromiso nunca serán olvidados y siempre serán recordados con profunda gratitud.

¡Gracias!

*Daniel Esteban Ordóñez Ramírez.*

## Dedicatoria

Este trabajo de grado es el resultado de un camino lleno de aprendizajes, desafíos y un profundo crecimiento personal. Su culminación no habría sido posible sin el apoyo incondicional de las personas que han estado a mi lado en esta travesía.

En primer lugar, quiero dedicar este trabajo a mis padres. Su sacrificio constante ha sido la base de mi trayectoria. Su dedicación incansable ha sido el motor que me impulsa a alcanzar nuevas metas y a mantenerme firme ante las adversidades. Cada esfuerzo que han realizado ha sido un faro que ilumina mi camino.

A mi familia, gracias por su comprensión y paciencia. Por celebrar cada uno de mis logros como si fueran propios. Su amor incondicional ha sido mi refugio en los momentos difíciles y mi mayor alegría en los triunfos. No hay palabras suficientes para expresar cuánto significan para mí.

A mis compañeros, su compañía ha sido fundamental. Ustedes han sido mi red de apoyo emocional, y juntos hemos compartido risas y lágrimas en este viaje. Cada conversación, cada momento de apoyo, ha dejado una huella imborrable en mi corazón.

Quiero extender mi sincero agradecimiento a mis profesores y mentores. Su orientación, sabiduría y dedicación a mi crecimiento académico y profesional han sido cruciales. Sus enseñanzas no solo han enriquecido mis conocimientos, sino que también me han inspirado a dar lo mejor de mí.

Finalmente, a todas las personas que, de alguna manera, han contribuido a mi formación y al desarrollo de este proyecto, gracias. Cada consejo y experiencia compartida ha dejado una marca en mi camino y ha sido parte de este logro.

Este trabajo es un homenaje a todo el apoyo y confianza depositados en mí. Espero que esta dedicación refleje mi profunda gratitud hacia todos aquellos que han sido parte de mi viaje universitario y que han hecho posible alcanzar este objetivo.

¡Gracias!

*Kevin Jesús Santacruz Vallejos*

## Resumen

En este trabajo se aborda el desarrollo de una aplicación orientada a la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes, específicamente utilizando el Método de Direcciones Alternadas de los Multiplicadores (ADMM) y la Programación Cuadrática Secuencial (SQP) que ofrece la herramienta fmincon de MATLAB. Se destacan las características de las microrredes, el control terciario de las microrredes y los objetivos de optimización económica y técnica. A través de MATLAB App Designer, se facilita la simulación de los sistemas IEEE de 3, 13 y 33 nodos, permitiendo analizar la eficiencia y efectividad de los algoritmos en función de indicadores como costos de operación y pérdidas de potencia.

## Contenido

Introducción.....	11
1. El Problema de Investigación .....	12
1.1 Objeto de Investigación.....	12
1.2 Línea de investigación.....	12
1.3 Sub Línea de Investigación .....	12
1.4 Descripción del Problema .....	12
1.5 Objetivos .....	13
1.6 Justificación.....	14
1.7 Delimitación .....	14
2. Tópicos del Marco Teórico.....	16
2.1 Antecedentes .....	16
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos.....	37
3. Metodología.....	42
3.1 Secuencia Metodológica .....	42
3.2 Técnicas de Recolección de Información.....	44
3.3 Instrumentos de Recolección de Información .....	44
4. Resultados.....	46
4.1 Definición de los escenarios de simulación .....	46
4.2 Diseño de la aplicación .....	62
4.3 Pruebas y resultados de la aplicación.....	72
4.4 Eficacia y precisión de los algoritmos simulados en la aplicación .....	92
Conclusiones.....	97
Recomendaciones .....	98
Referencias .....	99



## Lista de Figuras

Figura 1. Estudio de caso para un sistema de 3 nodos .....	46
Figura 2. Estudio de caso para un sistema de 13 nodos .....	48
Figura 3. Estudio de caso para un sistema de 33 nodos .....	49
Figura 4. Diseño de la interfaz grafica .....	63
Figura 5. Ventana de presentación .....	64
Figura 6. Ventana de escenario de simulación .....	65
Figura 7. Paleta de colores.....	65
Figura 8. Diseño del código.....	66
Figura 9. Escenario de trabajo .....	70
Figura 10. Red IEEE de 3 nodos .....	70
Figura 11. Red IEEE de 13 nodos .....	71
Figura 12. Red IEEE de 33 nodos .....	72
Figura 13. Escoge un archivo Excel .....	73
Figura 14. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 3 nodos .....	75
Figura 15. Límites de potencia de los generadores del Sistema IEEE de 3 nodos.....	77
Figura 16. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 3 nodos .....	78
Figura 17. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 3 nodos .....	79
Figura 18. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 3 nodos.....	79
Figura 19. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 3 nodos. ....	80
Figura 20. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 13 nodos .....	81
Figura 21. Límites de potencia de los generadores del sistema IEEE de 13 nodos .....	83
Figura 22. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 13 nodos .....	83
Figura 23. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 13 nodos .....	84
Figura 24. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 13 nodos.....	85
Figura 25. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 13 nodos .....	85
Figura 26. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 33 nodos .....	87
Figura 27. Límites de potencia de los generadores del sistema IEEE de 33 nodos .....	89
Figura 28. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 33 nodos .....	89
Figura 29. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 33 nodos .....	90
Figura 30. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 33 nodos.....	91
Figura 31. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 33 nodos .....	91

### Lista de Tablas

Tabla 1. Características de los generadores y del sistema de almacenamiento .....	47
Tabla 2. Datos de las líneas del sistema .....	47
Tabla 3. Características de los generadores y los sistemas de almacenamiento .....	48
Tabla 4. Datos de barras del sistema de prueba de distribución IEEE de 33 barras .....	49
Tabla 5. Datos de las líneas del sistema .....	50
Tabla 6. Perfil de potencia activa del sistema IEEE de 3 nodos .....	74
Tabla 7. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 3 nodos .....	76
Tabla 8. Demanda de potencia activa del sistema IEEE de 13 nodos .....	80
Tabla 9. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 13 nodos .....	82
Tabla 10. Demanda de potencia activa del sistema IEEE de 33 nodos .....	86
Tabla 11. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 33 nodos .....	87
Tabla 12. Indicadores del algoritmo ADMM para los sistemas IEEE de 3,13 y 33 nodos. .....	92
Tabla 13. Indicadores del algoritmo SQP de fmincon .....	93
Tabla 14. Experiencia de usuario .....	95

## Introducción

La creciente demanda de integración de fuentes renovables y recursos energéticos distribuidos (DER) ha promovido el desarrollo de microrredes como una solución eficiente para mejorar la flexibilidad y resiliencia en la operación de sistemas eléctricos (Guerrero et al., 2011). Estas pueden operar de forma autónoma o conectadas a una red principal y se caracterizan por la presencia de generadores renovables y sistemas de almacenamiento, que garantizan el suministro de potencia, manteniendo estándares de calidad y estabilidad. Este proceso requiere un control eficiente para la optimización de los recursos.

En el ámbito del control. El control terciario, está enfocado en la optimización económica y técnica del sistema (D. E. Olivares et al., 2014). El control terciario permite gestionar la operación global, minimizan los costos de generación y maximizan la eficiencia. También habilita servicios auxiliares que mejoren la calidad del servicio y reducen las pérdidas en la red.

Actualmente, el control terciario en microrredes es un campo de investigación activo, donde los esfuerzos se centran en mejorar la eficiencia, incrementar la capacidad de recuperación de la red y optimizar la integración de un mayor número de DERs (Khodaei et al., 2015). los algoritmos de optimización son una herramienta clave para distribuir la potencia generada de manera óptima, considerando limitaciones técnicas y costos asociados (Boyd et al., 2010).

A pesar de los avances, muchas aplicaciones disponibles en el mercado están orientadas a expertos y no permiten una interacción directa con algoritmos de control terciario para el análisis del despacho de potencia. En este proyecto, se desarrolló una aplicación en App Designer para simular y comparar algoritmos de control terciario en microrredes. Se implementaron dos enfoques: el Método de Direcciones Alternadas de los Multiplicadores (ADMM) y la Programación Cuadrática Secuencial (SQP). ADMM un enfoque descentralizado, distribuye el cálculo de las soluciones (Boyd et al., 2010), mientras que SQP, un algoritmo centralizado, se implementa con la herramienta fmincon de MATLAB.

La aplicación permite simular escenarios IEEE con 3, 13 y 33 nodos, comparando el desempeño de ambos algoritmos en términos de tiempo, eficiencia, costos operativos y pérdidas de energía.

## **1. El Problema de Investigación**

### **1.1 Objeto de Investigación**

Aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en micro redes.

### **1.2 Línea de investigación**

Potencia y Energía. La línea de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015, p. 67).

### **1.3 Sub Línea de Investigación**

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor. (Programa de Ingeniería Electrónica, 2015, p. 67).

### **1.4 Descripción del Problema**

La integración de fuentes de energía renovable en microrredes se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad energética y la resiliencia de los sistemas eléctricos. Sin embargo, la operación efectiva de estas microrredes depende en gran medida de la implementación de algoritmos de control eficientes, en especial el control terciario, que se enfoca en la optimización económica y técnica de la operación (D. Olivares et al., 2014).

A pesar de los avances en la investigación sobre microrredes, las herramientas de simulación disponibles en el mercado presentan limitaciones que dificultan su uso. En primer

lugar, estas aplicaciones requieren un conocimiento técnico avanzado y habilidades de programación, lo que representa una barrera para usuarios que no cuentan con formación especializada. Por ejemplo, herramientas como MATLAB/Simulink, exigen que los usuarios tengan un dominio de la programación para implementar y simular los modelos.

Además, las aplicaciones existentes a menudo carecen de interfaces gráficas intuitivas que permitan a los usuarios ingresar fácilmente los parámetros técnicos de las microrredes y de sus componentes.

Otro aspecto importante es la dificultad para evaluar el rendimiento de los generadores ante la demanda de la microrred.

Por tal motivo, la falta de herramientas fáciles de usar que integren algoritmos de control terciario representa un desafío en el desarrollo y la optimización de microrredes.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General.**

Desarrollar una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario de microrredes que permita obtener indicadores como la eficiencia del algoritmo, costos de operación, las pérdidas de energía y la potencia activa y reactiva.

### **1.5.2 Objetivos Específicos.**

- Obtener el modelo matemático de los sistemas IEEE de 33 nodos, 13 nodos y 3 nodos, de los algoritmos de control terciario, del flujo de potencia de microrredes y los indicadores relevantes, como la eficiencia, los costos de operación y las pérdidas de energía.
- Diseñar una aplicación intuitiva en el entorno gráfico de MATLAB que permita la carga de todos los parámetros del modelo de la microrred y los algoritmos de control.
- Implementar los escenarios IEEE de 33 nodos, 13 nodos y 3 nodos y las condiciones operativas para la simulación de los algoritmos de control terciario de microrredes.
- Evaluar eficacia y la precisión del algoritmo por medio de indicadores relevantes, como, los costos de operación, las pérdidas de energía y el despacho de potencia.

## 1.6 Justificación

La necesidad de desarrollar aplicaciones para la simulación de microrredes radica en la creciente demanda de sistemas energéticos sostenibles y eficientes. La simulación no solo proporciona una evaluación de escenarios de diseño y operación, sino que también facilita la identificación y dimensionamiento óptimo de componentes, considerando variables como condiciones climáticas, demanda energética y recursos disponibles. Desarrollar una aplicación que simule y compare algoritmos descentralizados o distribuidos de control terciario basados en métodos de optimización predefinidos como ADMM (Método Alternante de Multiplicadores) y consenso, facilita la operación de las microrredes modernas.

Además, la capacidad de analizar y predecir el comportamiento de la microrred ante diversos eventos, como fluctuaciones de carga y variaciones en la generación de energía. Permite mejorar la confiabilidad y eficiencia, así como para reducir costos asociados a su operación y mantenimiento, asegurando una simulación eficiente y confiable. La inclusión de herramientas especializadas, como HOMER Energy, para el diseño y análisis del desempeño de microrredes, como se destaca en el trabajo de (Restrepo et al., 2018) subraya la importancia de contar con recursos adecuados que faciliten la obtención de buenos resultados.

Por lo tanto, la aplicación permite de manera intuitiva y simple probar la gestión de microrredes, compuesta por cargas, generadores y sistemas de almacenamiento de energía, asegurando una administración confiable de la energía, ofreciendo la posibilidad de simular escenarios con determinado número de nodos, siguiendo la metodología presentada en el proyecto.

## 1.7 Delimitación

Esta investigación se centra en el desarrollo de una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes eléctricas. Los algoritmos seleccionados para su implementación son el ADMM (Método Alternante de Multiplicadores) y el SQP (Programación Cuadrática Secuencial), debido a que han sido utilizados previamente en otras investigaciones. No se consideran otros algoritmos de control terciario ni se explorarán alternativas diferentes a las mencionadas.

El estudio se delimita a la simulación de microrredes en tres escenarios específicos basados en los sistemas de prueba IEEE de 3, 13 y 33 nodos. Porque sus características

técnicas son compatibles con los algoritmos implementados. No se incluyen otros sistemas de potencia ni escenarios adicionales en esta investigación.

El desarrollo de la aplicación se lleva a cabo exclusivamente en MATLAB App Designer, escogido por las ventajas que ofrece en la creación de aplicaciones con interfaces gráficas sencillas y accesibles. No se utilizan otros lenguajes de programación ni plataformas de desarrollo.

El análisis de resultados se centra en indicadores como los costos de operación, las pérdidas de energía, la desviación de voltaje y las pérdidas de potencia. No se consideran otros factores, como el impacto del costo computacional o la evaluación de otros métodos de optimización no implementados en la investigación.

Finalmente, esta investigación se enfoca exclusivamente en la simulación de los escenarios mencionados, por lo que no se realizan pruebas experimentales ni se evalúa la implementación de microrredes en entornos físicos. La evaluación de la interacción entre el usuario y la aplicación se limita a las pruebas de simulación y a la funcionalidad del software desarrollado, sin considerar otros aspectos de usabilidad en sistemas de prueba reales.

## 2. Tópicos del Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Automatización de una microrred con doble banco de baterías.

El trabajo realizado por (Fernández, 2018). desarrolló un sistema de control y supervisión en tiempo real. Se ha diseñado con el objetivo de integrar las baterías de Ion-Litio en una microrred junto con las baterías de plomo ácido ya conectadas a la microrred HYLAB. Para la simulación de la microrred, se ha utilizado Simulink y se ha implementado un Modelo de Control Predictivo (MPC) para predecir las acciones futuras de control. El controlador es capaz de suministrar la potencia demandada por la microrred en diferentes casos de generación y demanda, ya sea mediante el uso de las baterías de plomo ácido, de las baterías de Ion-Litio o de la pila de combustible. Se han realizado simulaciones en distintos escenarios, como día soleado, día nublado y día con viento, y se ha comparado el comportamiento del controlador con los distintos modos de operación. En el escenario de día soleado, se utiliza principalmente las baterías de plomo ácido para suministrar la demanda, mientras que, en el escenario de día nublado, se recurre a las baterías de Ion-Litio como suministro de energía. En el escenario de día con viento, se consigue hacer un menor uso del electrolizador gracias a la integración de las baterías de Ion-Litio, lo que permite activar el electrolizador de manera más eficiente y enviar consignas de potencias menos bruscas. En ambos casos, el electrolizador se desactiva al final de la simulación, ya que utiliza ambas baterías para suplir la energía que no es producida por el viento. Todas simuladas en un intervalo de tiempo igual a 86400s o 24 horas.

#### 2.1.2 Algoritmos de FOP. Para el control terciario de microrredes.

El trabajo realizado por (Polanco, 2016), ha desarrollado un modelo que es capaz de determinar el manejo más adecuado de la energía con el fin de minimizar el costo de abastecimiento de una microrred en un intervalo de tiempo determinado. Dado que en el ámbito del diseño de FOP (Flujo Óptimo de Potencia) es común trabajar en un entorno de cálculo numérico como MATLAB, la sección se centra en las herramientas disponibles en este entorno para abordar problemas de optimización. Los algoritmos para el análisis de FOP en microrredes pueden ser implementados con una estructura similar utilizando los métodos más efectivos. Los datos reales de irradiación solar, velocidad de viento de la ciudad de Almería y la curva de demanda eléctrica, son considerados en el proceso de determinar el manejo óptimo de la energía.



La herramienta informática fue aplicada a dos redes de prueba; microrred 1 y microrred 2, y se derivaron distintos casos de estudio. Los resultados obtenidos demuestran la eficiencia y eficacia de la implementación. En cuanto a la eficiencia, se observa que las herramientas de optimización de MATLAB; método de punto interior, algoritmo genético y búsqueda directa, presentan tiempos de cómputo considerablemente elevados, siendo el método de punto interior el que requiere de mayor tiempo de cómputo. No obstante, en cuanto a la eficacia, dicho método proporciona una solución. Los métodos híbridos son más eficientes y proporcionan la solución con una reducción significativa del tiempo de CPU.

El enfoque propuesto junto con los algoritmos diseñados para el estudio de la FOP en microrredes, posibilitan la obtención de una solución eficiente para la gestión óptima de la energía. A pesar de ello, los tiempos de cómputo de las herramientas de optimización de MATLAB podrían ser optimizados.

En todos los casos de estudio, los análisis FOP. Fueron ejecutados en una computadora personal PC DELL, 8 GB de memoria RAM y procesador i5-4210U CPU@ 2.40 GHz.

En relación al sistema en p.u. se tomó una potencia y voltaje base de 100VA y 100V, respectivamente. Los límites de las magnitudes de voltaje para todos los nodos en CA de la microrred son  $0.95 \leq V \leq 1.05$  pu. Para este caso de estudio, el análisis FOP. Fue realizado utilizando el método de punto interior proporcionado por la función `fmincon`.

### **2.1.3 Despacho distribuido en línea de activos y potencia reactiva basada en ADMM y consenso. considerando la degradación de la batería en microrredes.**

(Barco-Jimenez et al., 2023) Este trabajo presenta una estrategia distribuida en línea para gestionar un microrred aislado mediante la optimización del despacho de potencia activa y reactiva. La función objetivo propuesta busca minimizar los costos de operación y abordar algunos requisitos técnicos, como la disminución de las pérdidas de energía y la desviación de voltaje. Además, la estrategia se ocupa de objetivos multiescala temporales, es decir, la robustez a las perturbaciones de la demanda y la variación de las fuentes renovables (un objetivo a corto plazo), y la preservación de la salud de los sistemas de almacenamiento basados en baterías (un objetivo a largo plazo). La técnica utiliza el método de direcciones alternas de multiplicadores (ADMM), consenso acelerado y un modelo de degradación de baterías novedoso (modelo cuadrático de desgaste por capacidad). Probando la solución propuesta en un estudio de caso que incluye fuentes renovables y baterías de plomo y litio. Para obtener los resultados del estudio de caso, se utilizó un esquema de co-simulación que utiliza MATLAB y DIGSILENT.

Finalmente, se compara el rendimiento del método con una técnica de optimización centralizada. Para incorporar los modelos de degradación en la planificación de acciones de carga, el modelo Ah-Throughput se puede ajustar para baterías de plomo-ácido y iones de litio a partir de curvas de capacidad vs. Ciclos con otros DOD (Deep Of Discharge) o profundidad de descarga, experimentos de envejecimiento o información del fabricante. Además, el método de solución propuesto puede obtener una solución rápida porque es convexo en DOD. El error para predecir los ciclos para un valor específico de DOD es de alrededor del 7%. El error absoluto del modelo de QAh-Throughput es de  $\pm 0.04$ , lo que corresponde a un error porcentual del 1.1%. El algoritmo distribuido basado en ADMM y consenso para obtener un OPF (Optimal Power Flow) de microrredes con recursos distribuidos proporciona servicios auxiliares con baterías y fuentes renovables.

La reducción de la desviación de voltaje y las pérdidas de potencia mediante el despacho reactivo se prueba mediante simulación. Finalmente, el algoritmo incorpora modelos de degradación para dos tecnologías de baterías para extender su vida útil y un esquema en línea para manejar las perturbaciones de entrada. El ADMM-ACP es una estrategia para resolver el OPF de una microrred con un rendimiento comparable al ADMM convencional, pero sin un agregador para compartir información global. ADMM-ACP es un esquema de optimización completamente distribuido que se basa en la convergencia de información local hacia un óptimo global. Estos esquemas de optimización son adecuados en escenarios con múltiples agentes donde es valioso limitar el intercambio de información, gestionar la red de comunicación de ancho de banda de una microrred, reducir el procesamiento centralizado y realizar características plug-and-play, entre otros.

Utilizando datos experimentales o fichas técnicas, puede adaptarse tanto a las tecnologías de plomo-ácido como de iones de litio con un error de estimación corto. La pérdida de capacidad de la batería es una característica sensible al DOD y a las acciones de carga / descarga, y conocer esta condición podría ser significativo para preservar la vida útil de la batería mediante una programación adecuada. Finalmente, la operación en línea reduce la complejidad computacional del problema de despacho de energía activa de las baterías. Al mismo tiempo, esta división temporal permite que el algoritmo maneje las perturbaciones en un horizonte de tiempo corto y programe las baterías a largo plazo.

#### **2.1.4 Operación descentralizada de una microrred aislada con sistemas de almacenamiento. utilizando multiplicadores con direcciones alternas.**

El trabajo realizado por (Barco, Obando, Pantoja, Caicedo, & Aguado, 2022) propone

una estrategia distribuida para la gestión de un sistema aislado, que consiste en utilizar el método de direcciones alternas de multiplicadores (ADMM) para resolver dos problemas de optimización relacionados con el despacho de potencia activa y reactiva. La estrategia tiene en cuenta las restricciones de cobertura de demanda y flujo de potencia, y permite encontrar perfiles de potencia para generadores y sistemas de almacenamiento a lo largo del día. Al utilizar el despacho conjunto, se logra minimizar los costos de generación y ofrecer servicios auxiliares, como regulación de voltaje y reducción de pérdidas. Para cuantificar los efectos de la estrategia propuesta y compararla con una optimización centralizada, se realizó un caso de estudio con baterías y fuentes renovables. La microrred simulada es un sistema de 3 nodos en un nivel de voltaje de 4.16 Kv. Con el fin de analizar la interacción entre las fuentes de energía renovable y los recursos de almacenamiento en un modo aislado, se incluye un generador fotovoltaico, un sistema de baterías y un generador diésel. La unidad diésel es el generador de referencia de voltaje y frecuencia.

En los resultados se reduce las pérdidas de potencia activa en 193.6 W en 24 horas, lo que corresponde al 0.01% del consumo total de energía diario.

### **2.1.5 Diseño de aplicación de monitorización de microrredes renovables domésticas.**

El trabajo realizado por (Puerto Castillo, 2024) está enfocado en simular una microrred de suministro eléctrico de origen fotovoltaico aplicada a viviendas, cada una equipada con una instalación fotovoltaica y una batería de almacenamiento. Se busca implementar una ley de control que permita distribuir los excedentes energéticos entre vecinos de manera proporcional a sus consumos, optimizando el uso de la energía y reduciendo costos de instalación.

El trabajo de grado aborda temas como el uso de software como MATLAB, App Designer y Simulink para simular el comportamiento del sistema, y la creación de un algoritmo de control distribuido que gestiona la energía entre los hogares. App Designer se destaca por su uso en la creación de una interfaz gráfica de usuario intuitiva que facilita la visualización del estado de carga de las baterías y los flujos de energía entre los hogares, mejorando la experiencia del usuario final. Además, se estudia el efecto del sistema en los estados de carga de las baterías y cómo el control eficiente de la energía contribuye a una mejor utilización de los recursos energéticos, permitiendo a los hogares ser más autosuficientes.

Otro componente clave del trabajo es la simulación realista del consumo energético de las viviendas, teniendo en cuenta diferentes patrones de uso de energía a lo largo del día y

cómo estos afectan el sistema general. Se utilizan herramientas como Simscape Electrical para modelar tanto las baterías como la generación de energía solar y el consumo en diferentes escenarios.

El proyecto incluye una aplicación con una interfaz gráfica de usuario intuitiva que permite a los usuarios visualizar de manera sencilla cómo se comparte la energía dentro de la comunidad, facilitando la gestión de la misma. A través de esta visualización, los usuarios pueden entender fácilmente el flujo de energía y cómo se optimizan los recursos.

Los resultados de las simulaciones realizadas muestran que, en un sistema sin control distribuido, las viviendas funcionan de manera aislada, con un comportamiento independiente en el estado de carga de sus baterías. Esto genera desequilibrios significativos, donde algunas viviendas agotan su energía rápidamente mientras otras mantienen niveles de carga elevados. Esta falta de redistribución de la energía conlleva una gestión ineficiente, donde no se aprovechan los excedentes de otros hogares, y puede forzar a algunas viviendas a depender de la red eléctrica.

Sin embargo, al implementar el control distribuido, las viviendas son capaces de compartir sus excedentes de energía. En este escenario, los hogares con más energía almacenada transfieren parte de su carga a aquellos con menos, equilibrando los niveles de carga de las baterías. Esta redistribución permite que todas las viviendas mantengan un estado de carga más homogéneo, optimizando el uso de la energía disponible. Al final de la simulación, los hogares logran mantener un estado de carga en torno al 80%, lo que les permite operar de manera autónoma sin recurrir a la red eléctrica externa. Este enfoque no solo mejora la eficiencia energética, sino que también prolonga la vida útil de las baterías al evitar que se descarguen completamente o se saturen.

### **2.1.6 Desarrollo de una aplicación de adquisición de datos para un sistema de supervisión abierto y escalable en la nube vía OPC UA.**

En el trabajo realizado por (Jiménez Ruiz et al., 2022) se centra en la creación de una aplicación de una aplicación para la adquisición de datos para un sistema de supervisión de un edificio bioclimático utilizando el protocolo OPC UA. Este sistema está diseñado para recopilar y almacenar información de más de 700 sensores distribuidos en diferentes subsistemas del edificio, como la máquina de frío solar, la microrred, y diversas variables climáticas esenciales para la operación de los algoritmos de control que gestionan el confort y la eficiencia energética.

La aplicación fue diseñada con MATLAB App Designer, una herramienta que permitió

el desarrollo de una interfaz gráfica interactiva y amigable para el usuario. Esta decisión se tomó debido a las capacidades avanzadas de MATLAB para el diseño de aplicaciones y la facilidad que ofrece para la integración de algoritmos de comunicación industrial a través de su toolbox especializado. El protocolo OPC UA fue seleccionado por su capacidad para asegurar una comunicación segura y robusta entre los diferentes dispositivos del sistema de supervisión, ofreciendo una solución escalable e independiente de la plataforma.

El desarrollo de la aplicación incluyó la implementación de una interfaz gráfica sencilla, diseñada siguiendo la norma internacional ISO 9241, la cual asegura que el sistema sea intuitivo y fácil de usar. La aplicación permite al usuario conectarse al servidor OPC UA, seleccionar las variables que desea monitorear, definir el tiempo de muestreo (1 segundo o 1 minuto) y optar por almacenar los datos en tiempo real. Estos datos se guardan en archivos de texto plano organizados por días, lo que facilita la generación de históricos detallados. Además, la aplicación permite cargar archivos de datos históricos para visualizar y analizar la evolución de las diferentes variables, proporcionando un entorno flexible para la interpretación de datos.

Una de las principales características de la aplicación es su enfoque en la seguridad. Dado que OPC UA incluye mecanismos de control de usuarios y encriptación, se garantizaron conexiones seguras entre la aplicación y el servidor de datos. Esto implicó la configuración de certificados y políticas de autenticación que protegen la integridad de las comunicaciones.

Los resultados obtenidos, muestran que la aplicación permitió superar las limitaciones del sistema SCADA original, que no estaba diseñado para generar históricos de datos en formatos útiles para la investigación. Ahora, con la nueva aplicación, se pueden almacenar y recuperar datos históricos con facilidad, y los investigadores pueden analizar las variables en tiempo real o a lo largo del tiempo, facilitando así el monitoreo y la gestión de la eficiencia energética y el confort en el edificio.

### **2.1.7 Desarrollo de una aplicación para análisis modal de sistemas eléctricos de potencia.**

En (Corral Vila et al., 2020). tiene como objetivo desarrollar una herramienta para el análisis modal de sistemas eléctricos utilizando MATLAB y Simulink. La aplicación creada permite a los usuarios definir la topología de un sistema eléctrico, analizar su estabilidad mediante el cálculo de autovalores y realizar simulaciones dinámicas. Todo esto se realiza a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI), implementada con App Designer de

MATLAB, que facilita la interacción sin necesidad de recurrir a scripts complejos, haciendo más accesible la configuración y el análisis de sistemas eléctricos.

El modelado de la herramienta se basa en el espacio de estado, capturando las relaciones dinámicas de los componentes del sistema, como nudos, líneas, transformadores y generadores, para representar tanto el comportamiento eléctrico como mecánico. Los bloques de Simulink fueron programados de manera detallada para simular estas interacciones de forma precisa, y la interfaz gráfica permite al usuario definir el sistema, calcular su punto de operación, realizar análisis modal y ejecutar simulaciones de manera intuitiva.

Acerca de los resultados, se realizaron pruebas en dos casos de estudio. El primero involucraba un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) conectado a una red infinita a través de una línea compensada serie. Este sistema mostró inestabilidad debido a la resonancia subsíncrona, identificada correctamente por la aplicación mediante el análisis de los autovalores. Los resultados indicaron la presencia de cuatro autovalores inestables, con frecuencias de 194 Hz y entre 40-50 Hz. Estas inestabilidades estaban asociadas a variables del convertidor de la red y el flujo del estátor, lo que confirmó la aparición de resonancia subsíncrona.

El segundo caso de estudio fue un sistema de cuatro nudos, dos de generación y dos de consumo, utilizado para comparar los resultados con los obtenidos por el software PSS-E. La precisión de la aplicación fue notable, con pequeñas diferencias atribuibles a las variaciones en el modelado de los generadores sincrónicos. Por ejemplo, en el caso de la simulación de un escalón en la potencia del generador, al reducir la consigna de 50 MW a 20 MW, ambos modelos (linealizado y no lineal) mostraron una respuesta coherente. En la simulación de un cambio en la tensión del generador, de 1 p.u. a 1.03 p.u., el modelo linealizado no respondió tan bien como el no lineal, pero las diferencias fueron manejables.

### **2.1.8 Desarrollo de un software didáctico para el análisis del recurso energético solar en pequeña escala.**

En (Sanabria & Pabón, 2023) El objetivo principal del proyecto es proporcionar una herramienta interactiva y fácil de usar para el análisis y dimensionamiento de sistemas solares a pequeña escala. El software no solo ofrece información sobre el recurso solar disponible en una ubicación específica, sino que también guía al usuario en el proceso de selección de equipos como paneles solares, baterías e inversores, con la capacidad de ajustar las variables según las necesidades del proyecto. La idea es que esta herramienta pueda ser utilizada por estudiantes, docentes, ingenieros o cualquier persona interesada en comprender cómo diseñar

un sistema fotovoltaico.

El software fue implementado utilizando App Designer de MATLAB, una herramienta que permitió crear una interfaz gráfica interactiva con funciones avanzadas para la importación de datos, la visualización de gráficos y el cálculo de dimensiones fotovoltaicas. La construcción de esta herramienta implicó la creación de diversas ventanas que guían al usuario a través del proceso de análisis, desde la carga de datos de irradiación solar hasta la selección de equipos y el cálculo de la energía generada por los sistemas solares.

Una de las características clave del software es la posibilidad de importar bases de datos de irradiación solar, como las proporcionadas por el POWER DATA ACCESS VIEWER de la NASA, lo que permite acceder a datos precisos y actualizados sobre la radiación solar en diferentes ubicaciones. Una vez cargados los datos, el usuario puede calcular la cantidad de paneles solares y baterías necesarias para suplir las demandas energéticas del sistema, basándose en métodos de cálculo de irradiación mínima o promedio anual.

En cuanto a los resultados obtenidos, el software fue validado mediante pruebas realizadas con estudiantes y profesores, quienes confirmaron su precisión en el cálculo de la energía generada y las cargas energéticas suplidas. Las pruebas también demostraron que el software es amigable y que su interfaz gráfica facilita la interacción del usuario, permitiendo un aprendizaje intuitivo sobre el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos. Las gráficas generadas por el software muestran de manera clara cómo varía la radiación solar a lo largo del año y cómo esto impacta en la capacidad del sistema para generar energía.

### **2.1.9 Gemelo digital de un electrolizador PEM integrado en una interfaz gráfica de usuario basada en MATLAB.**

En el estudio (F. Folgado et al., 2022), describe el desarrollo de una aplicación diseñada para simular y monitorear el comportamiento de un electrolizador de Membrana de Intercambio de Protones (PEM) en una microrred inteligente alimentada por energía fotovoltaica. Este tipo de electrolizador se utiliza para producir hidrógeno a partir de agua, un proceso que, cuando es alimentado por energías renovables, produce lo que se conoce como "hidrógeno verde", un recurso clave en la transición hacia energías limpias.

La aplicación se desarrolló en MATLAB utilizando App Designer. El objetivo principal era crear una interfaz que permitiera visualizar y controlar en tiempo real tanto los valores experimentales obtenidos del electrolizador físico como los simulados por el gemelo digital. Este gemelo digital, que actúa como una réplica virtual, simula el comportamiento del electrolizador y permite estudiar su rendimiento sin necesidad de interactuar directamente con

el equipo físico.

A través de App Designer, se creó una plataforma que presenta botones de control, gráficos interactivos, y una serie de indicadores que muestran los valores experimentales y simulados del electrolizador en tiempo real. Esta herramienta facilita la interacción entre el usuario y el sistema, proporcionando una visión clara de los datos a través de gráficos y comparaciones visuales entre el modelo simulado y el equipo real.

La aplicación fue capaz de realizar simulaciones en tiempo real del comportamiento del electrolizador PEM. La comunicación entre el controlador lógico programable (PLC) y MATLAB permitió obtener datos experimentales que se compararon con los valores simulados por el gemelo digital. La interfaz gráfica mostró eficazmente esta comparación, lo que permitió a los operadores evaluar el rendimiento del electrolizador y la precisión del modelo utilizado en la simulación.

#### **2.1.10 Herramienta software para dimensionamiento y localización de generación distribuida en una microrred.**

En (García & Molina De la Rosa, 2019). La implementación del software para el dimensionamiento y localización de generación distribuida (GD) en una microrred eléctrica, se realizó con el objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa en el sistema.

El software desarrollado emplea algoritmos de optimización metaheurística, como la optimización por enjambre de partículas (PSO), y métodos de análisis de flujo de carga como el método Ladder para evaluar la integración óptima de GD en los nodos de la red. La herramienta permite a los usuarios ingresar datos de la red y realizar análisis detallados para encontrar la mejor ubicación y tamaño de la GD, ayudando a mejorar los perfiles de tensión y reducir las pérdidas.

La herramienta fue creada utilizando el software MATLAB, que facilitó la programación de los algoritmos y la construcción de la interfaz gráfica de usuario (GUI). MATLAB se eligió debido a su funcionalidad para trabajar con operaciones matemáticas complejas y su capacidad para importar datos de archivos Excel, lo que permitió procesar la información del sistema de distribución y los datos del sistema eléctrico.

En cuanto al análisis de los resultados cuantificados, se realizaron pruebas comparativas utilizando el sistema estándar IEEE 13 Nodos y el software especializado DigSilent para validar la herramienta. El error relativo en las tensiones calculadas por la herramienta comparado con DigSilent fue menor al 5%, mientras que el error en las pérdidas de potencia activa fue alrededor de 4.3%. Además, la herramienta identificó que la mayor reducción de



pérdidas se logró con una fuente de 3 MW ubicada en el nodo 671, con una reducción de pérdidas del 82.3%, lo que indica una optimización efectiva, aunque no siempre factible para todos los sistemas. Validando que el software proporciona soluciones precisas.

#### **2.1.11 Análisis y diseño de un sistema SCADA del sistema de microrred no convencional del edificio Julio Mario Santo Domingo de la Universidad de los Andes.**

La investigación de (Boada Robayo, 2024). tuvo como objetivo principal implementar un sistema SCADA de bajo costo que permitiera monitorizar en tiempo real variables clave como la irradiancia, temperatura, corriente y voltaje de dos paneles solares instalados en paralelo en la azotea del edificio.

El diseño de la interfaz gráfica se realizó utilizando Python, proporcionando una visualización clara y detallada de los datos recolectados. La interfaz se organizó con diferentes pestañas que permitían la supervisión específica de cada parámetro, como la irradiancia, el voltaje, la corriente y la potencia generada por los paneles solares. Los datos eran recolectados mediante un Arduino Uno conectado a la red a través de un Ethernet Shield, lo que permitía la transmisión de los datos censados hacia un servidor. Este servidor procesaba la información y la presentaba en tiempo real mediante la interfaz gráfica.

Se destaca que el costo total de implementación del sistema SCADA fue de 202,439 COP, lo cual representa un ahorro considerable en comparación con los sistemas SCADA comerciales, que pueden superar los 4 millones de COP. El sistema demostró ser efectivo para la monitorización de la irradiancia solar, la cual alcanzó un valor máximo de 1600 W/m<sup>2</sup> en condiciones óptimas. Asimismo, la potencia generada por los paneles fue afectada por la sombra y la regulación de voltaje, lo que impidió alcanzar su capacidad máxima.

Este sistema SCADA permitió optimizar el monitoreo de la microrred fotovoltaica del edificio, brindando una solución económica sin sacrificar la calidad de la información obtenida.

#### **2.1.12 Tecnología de microrred modular con un único entorno de desarrollo por ciclo de vida.**

En (Mî Ndra et al., 2024). Presenta una plataforma desarrollada para la gestión completa de microrredes a lo largo de su ciclo de vida, utilizando MATLAB como entorno de desarrollo. Abordando las distintas etapas del ciclo de vida estos sistemas, que puede extenderse por más de 25 años.

La plataforma está organizada en cuatro módulos que cubren las seis fases principales

del ciclo de vida de una microrred: producción de equipos, identificación de clientes, diseño detallado, implementación, operación y mantenimiento, y el final de su vida útil. Una de las innovaciones es la capacidad de la plataforma para operar todo el ciclo de vida dentro de un único entorno de desarrollo, lo que reduce significativamente la complejidad técnica y los costos operativos.

Se destaca el uso de App Designer para el desarrollo de la interfaz gráfica de la plataforma. La interfaz creada con App Designer ofrece una experiencia visual clara y dinámica para gestionar todas las fases de operación y mantenimiento del sistema. Utilizando controles como manómetros, indicadores, botones, interruptores y gráficos, la herramienta permitió replicar la apariencia y acciones de paneles de control físicos en un entorno digital. Esto incluye funciones para visualizar el rendimiento del sistema, cargar datos históricos, analizar tendencias y pronósticos de consumo y producción, así como planificar intervenciones de mantenimiento.

También presenta un estudio de caso real de una microrred en Rumania, con una potencia instalada de 126 kW y un sistema de almacenamiento de energía de 300 kWh. El análisis del caso incluye la optimización del tamaño del sistema y la evaluación técnica-financiera, lo que demuestra la eficacia de la plataforma en escenarios reales.

### **2.1.13 Diseño de un sistema de energía solar para un hogar sin electricidad en una comunidad rural de la provincia de Limpopo, Sudáfrica.**

En este estudio de (Arend, 2020). Aborda la pobreza energética y explora los aspectos técnicos y socioeconómicos de los sistemas solares para satisfacer las necesidades energéticas de las comunidades de Gwakwani de Limpopo.

Uno de los enfoques de la investigación es la optimización del tamaño de los sistemas solares domésticos, particularmente en lo que respecta al almacenamiento de las baterías y los paneles fotovoltaicos (PV), basándose en los perfiles de carga específicos locales. Proponiendo una metodología más ajustada a las necesidades reales de las comunidades, lo que resulta en una mayor eficiencia y menor costo, haciéndolos más accesibles para los hogares de bajos ingresos.

El investigador también presenta un modelo de simulación para evaluar el rendimiento de estos sistemas solares en función de datos específicos de la zona, como la radiación solar y el perfil de carga de los usuarios.

El uso de App Designer se menciona como una herramienta clave para el desarrollo de simulaciones y modelos de rendimiento de Sistemas Solares Domésticos (SHS), comparando

los resultados obtenidos con otros softwares comerciales como PVsyst. Los resultados destacan las diferencias en términos de energía generada, probabilidades de pérdida de carga y energía desperdiciada debido al sobredimensionamiento del sistema.

La simulación realizada con App Designer reveló que, al ajustar el tamaño de la batería y los paneles solares, es posible reducir significativamente la energía perdida y mantener la probabilidad de pérdida de carga por debajo del 5%. En comparación con los métodos tradicionales de dimensionamiento, este enfoque específico basado en el perfil de carga logró reducir el tamaño de los paneles en un 15% y mejorar la eficiencia de la batería en un 20%.

Este trabajo subraya la importancia de adaptar las tecnologías de energía renovable a las condiciones locales para maximizar su efectividad y accesibilidad.

#### **2.1.14 Plataforma de simulación para la evaluación de modelos de electrolizadores PEM orientados a implementar réplicas digitales.**

En el proyecto de (Folgado, González, & Calderón, 2022). presenta una plataforma de simulación basada en MATLAB/Simulink que evalúa el comportamiento de modelos de electrolizadores de Membrana de Electrolito Polimérico (PEMEL), orientada a desarrollar réplicas digitales de estos dispositivos. El documento destaca cómo, a través de una interfaz gráfica (GUI) diseñada en App Designer, los usuarios pueden modificar parámetros, visualizar resultados de simulación y estudiar diferentes modelos bajo diversas condiciones de operación.

El objetivo principal de esta plataforma es facilitar el análisis de los electrolizadores para su integración en microrredes inteligentes, donde el hidrógeno verde se genera a partir de energías renovables. La herramienta supera las limitaciones de estudios anteriores que no permitían la modificación y comparación de modelos en una única aplicación accesible mediante una interfaz gráfica.

La plataforma incluye una serie de modelos basados en circuitos equivalentes que representan los efectos electroquímicos internos de los electrolizadores. Los modelos se utilizan para generar curvas características de voltaje-corriente (V-I), que permiten comprender el comportamiento del electrolizador y calcular parámetros importantes como la eficiencia, la generación de hidrógeno y el consumo de energía.

Una de las características del proyecto es el uso de App Designer para crear una interfaz de usuario intuitiva. Esta interfaz permite la personalización de los parámetros del modelo y facilita la ejecución de simulaciones, la visualización gráfica de los resultados, y la comparación entre modelos. Cada simulación puede personalizarse en términos de

temperatura, presión, y configuración de celdas del electrolizador.

el estudio muestra diferencias notables en las curvas V-I obtenidas para distintos modelos y condiciones operativas. Por ejemplo, a una corriente de 0,5 A, los voltajes obtenidos fueron de 1,639 V a 20°C y 1,563 V a 60°C, lo que indica una tendencia descendente en el voltaje a medida que la temperatura aumenta. En términos de generación de hidrógeno, se observó que para una corriente de 0,6 A, una celda simple produjo 5 ml/min de hidrógeno, mientras que un electrolizador con tres celdas en serie generó 15 ml/min, triplicando la producción. La eficiencia de los electrolizadores también se calculó, y para una corriente de 1 A, se encontró que la eficiencia de la celda era del 72,7 % a 60°C y 1 atm, mientras que disminuyó al 66,4 % cuando se incrementó la presión a 4 atm.

La herramienta se considera valiosa tanto para la investigación como para la enseñanza sobre el comportamiento de electrolizadores.

### **2.1.15 Control de voltaje y distribución de potencia en microrredes de corriente continua (DCMG).**

El trabajo realizado por (Almajeez, 2022). Presenta un estudio sobre el control de voltaje y la distribución de potencia en microrredes de corriente continua (DCMG). Se enfoca en el uso de controladores jerárquicos, específicamente el control primario y el secundario, para mejorar el desempeño de las microrredes en términos de regulación de voltaje y distribución de carga.

El proyecto describe el uso de droop control, una técnica que permite distribuir la potencia entre múltiples fuentes de manera proporcional a sus capacidades, pero que presenta limitaciones en la regulación precisa del voltaje y en la estabilidad del sistema. Para superar estas limitaciones, realizó una estructura jerárquica de control que incluye un controlador primario, que se ocupa de las operaciones locales en cada convertidor, y un controlador secundario basado en un algoritmo de consenso, que utiliza la comunicación entre nodos para ajustar los voltajes de referencia y mejorar la distribución de carga.

La simulación de la microrred se realizó en MATLAB/Simulink, utilizando un modelo que representa un sistema con baterías de almacenamiento y fuentes de energía renovable. El App Designer facilitó la inyección de diferentes niveles de potencia al sistema, permitiendo monitorear en tiempo real cómo la energía inyectada afectaba tanto la carga como el estado de carga de las baterías (SOC). Al inyectar 72 W, la potencia fue suficiente para cubrir la demanda de las cargas activas, manteniendo el SOC de las baterías constante. En cambio, al inyectar 120 W, las baterías comenzaron a cargarse hasta alcanzar su máxima capacidad. Por

otro lado, al inyectar solo 36 W, las baterías continuaron descargándose, aunque a un ritmo más lento gracias al soporte adicional.

Los resultados de las simulaciones muestran cómo el controlador secundario logra regular el voltaje en los buses y equilibrar el estado de carga (SOC) de las baterías, incluso cuando hay variaciones en la carga o se inyecta energía adicional al sistema. Se examinaron diferentes escenarios, como la operación sin cargas, con todas las cargas activas, y con inyección de potencia de diferentes magnitudes (36W, 72W, 120W).

El estudio concluye que el uso del controlador secundario basado en el algoritmo de consenso mejora significativamente la estabilidad del sistema y la distribución de potencia, en comparación con el uso exclusivo del controlador primario.

#### **2.1.16 Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario dedicada y pruebas experimentales para extraer los parámetros del circuito equivalente de un módulo fotovoltaico comercial.**

El estudio realizado por (Siddiqi, 2021). se enfoca en cómo las condiciones de irradiancia y temperatura de la célula solar afectan la curva característica corriente-voltaje (I-V) de los generadores fotovoltaicos. se implementó un modelo de diodo único, que es el modelo estándar para representar células solares en circuitos equivalentes. Para ello, se diseñó una interfaz en MATLAB utilizando App Designer, que permite gestionar grandes volúmenes de datos experimentales de manera automatizada.

La interfaz consta de varias etapas: preprocesamiento de datos, extracción de parámetros del modelo del circuito, identificación de ecuaciones de correlación para describir la dependencia de los parámetros con respecto a la irradiancia y la temperatura, y finalmente, la validación de los resultados mediante la comparación de datos experimentales con los obtenidos por diferentes métodos.

El sistema de adquisición de datos utilizado para los experimentos estaba compuesto por una serie de instrumentos que medían constantemente las curvas I-V, así como las condiciones atmosféricas como temperatura del módulo, la irradiancia y velocidad del viento. Se empleó un sensor de temperatura Pt100 y un piranómetro Kipp y Zonnen CMP11 para medir la irradiancia. Las curvas I-V se trazaron cargando un capacitor conectado al módulo fotovoltaico, lo que permitió identificar puntos clave como la corriente de cortocircuito, el voltaje de circuito abierto y la potencia máxima.

La interfaz gráfica creada en App Designer facilitó la aplicación de un algoritmo de optimización no lineal (Levenberg-Marquardt) para ajustar los parámetros del modelo del

circuito, lo que permitió obtener correlaciones entre las condiciones de irradiancia, temperatura y los parámetros eléctricos del módulo. Además, la herramienta permitió visualizar las curvas I-V y hacer comparaciones visuales entre los datos experimentales y los modelos teóricos.

Los resultados mostraron que la interfaz fue capaz de procesar grandes cantidades de datos de manera eficiente y de extraer los parámetros del modelo con precisión. Por ejemplo, se observó que la corriente fotogenerada aumentaba con la irradiancia, mientras que la corriente de saturación y la resistencia en serie mostraban una fuerte dependencia de la temperatura. La validación de la energía generada mostró que los resultados obtenidos con el algoritmo optimizado eran muy cercanos a los experimentales, con un bajo error cuadrático medio normalizado, lo que demostró la precisión del modelo.

El proyecto utilizó con éxito la interfaz desarrollada en MATLAB App Designer para predecir y analizar el comportamiento de un módulo fotovoltaico bajo diferentes condiciones ambientales.

### **2.1.17 Caja de herramientas para la optimización de sistemas de distribución de energía basada en métodos heurísticos.**

En (Özgül et al., 2022). Realiza la simulación de integración efectiva de fuentes de energía renovable, como paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas, en sistemas de distribución, con el fin de mejorar su operación. Se utilizaron cuatro métodos de optimización heurística: optimización por enjambre de partículas (PSO), optimización de lobo gris (GWO), optimización de león hormiga (ALO) y el algoritmo de optimización de ballena (WOA).

La caja de herramientas ofrece dos funcionalidades principales: la primera permite seleccionar sistemas de prueba de 33, 69 o 141 buses, ubicaciones de generadores distribuidos (DG) y reguladores de voltaje, junto con los perfiles diarios de salida de potencia activa de los DG. La segunda funcionalidad simula sistemas de almacenamiento de energía (BESS), optimizando la salida diaria de potencia de estos recursos.

Una interfaz gráfica de usuario (GUI), desarrollada con MATLAB App Designer, permite a los usuarios elegir el sistema de prueba, el método de optimización, la cantidad y ubicación de los DG, los sistemas de almacenamiento de baterías (BESS) y los ubicadores de reguladores de voltaje. En la GUI, se muestran resultados en forma de gráficos que permiten visualizar los perfiles de voltaje antes y después de la optimización, así como las configuraciones de los BESS y los reguladores.

Para validar el sistema, se realizaron simulaciones en el sistema de 33 buses utilizando

los cuatro métodos de optimización mencionados. En los resultados se observó una mejora significativa en las magnitudes de voltaje, las cuales fueron optimizadas para acercarse a 1 p.u. Para un escenario de 50 agentes de búsqueda y 1000 iteraciones, se lograron valores cercanos al óptimo en todos los métodos. El método GWO presentó la convergencia más rápida en comparación con PSO, WOA y ALO. Para el segundo modelo, con BESS y reguladores de voltaje, los resultados también mostraron una mejora diaria en el perfil de voltaje. Por ejemplo, se instaló un BESS en los buses 5 y 13, con límites de SOC entre 20 kW y 80 kW, y se observó que los cambios en la posición de los reguladores contribuyeron a la estabilidad del sistema.

El perfil de voltaje mejoró en todos los casos de estudio, logrando reducir la desviación del voltaje a un rango aceptable entre 0.95 p.u. y 1.05 p.u. Además, la convergencia del método GWO se alcanzó en menos iteraciones, destacando por su eficiencia en tiempo de cálculo.

El uso de MATLAB App Designer fue apropiado para desarrollar una interfaz amigable que facilitara la experimentación y visualización de los resultados obtenidos.

### **2.1.18 Investigación hidráulica óptima de acueducto de tuberías mediante el software MATLAB y el método Newton-Raphson.**

En el trabajo realizado por (Ali et al., 2022). Se implementó un enfoque metodológico detallado que involucró el uso del software MATLAB, específicamente la versión R2017b, y el método de Newton-Raphson para resolver iterativamente las ecuaciones que describen el sistema hidráulico. El cálculo de parámetros críticos como la longitud de vano seguro y el diámetro óptimo de la tubería fue central para el análisis. Los resultados numéricos obtenidos demuestran cómo varían estos parámetros con respecto a diferentes valores de entrada, como caudales y longitudes de tubería.

El proyecto incluye el uso de App Designer, que permitió crear una interfaz gráfica de usuario (GUI) para facilitar el análisis y la visualización de los resultados. Esta aplicación ayudó a ajustar los parámetros de entrada y observar sus efectos en tiempo real, lo que aceleró el proceso de optimización. El entorno GUI de MATLAB fue crucial para simplificar las simulaciones complejas, permitiendo una interacción más fluida con el modelo.

Los resultados obtenidos reflejan que el diámetro óptimo de la tubería aumenta con el caudal de diseño, variando desde 0.928 metros para un caudal de 1 m<sup>3</sup>/s hasta 3.075 metros para un caudal de 12 m<sup>3</sup>/s. De manera similar, la longitud de vano seguro también presenta cambios mínimos en función del caudal, con valores que oscilan entre 23.66 y 25.88 metros.

Estos resultados destacan la importancia de adaptar el diseño de la tubería en función del caudal esperado.

Además, el análisis de otros parámetros como la longitud de la tubería, los coeficientes de entrada y salida, y la rugosidad mostró que, aunque algunos de estos parámetros tienen un impacto menor en el diámetro óptimo, otros, como la pérdida de carga y el coeficiente de Manning, afectan de manera significativa tanto al diámetro de la tubería como a la longitud de vano.

### **2.1.19 Caracterización, diseño y optimización de turbinas eólicas de doble propósito y ventiladores de protección contra heladas.**

El autor (Narad, 2022) presenta el desarrollo de una herramienta en MATLAB destinada al diseño de máquinas reversibles que pueden operar tanto como turbinas eólicas como ventiladores para la protección contra heladas en la agricultura. Esta máquina tiene el objetivo de aprovechar el recurso eólico durante todo el año para generar energía, y en situaciones específicas de heladas, actuar como ventilador para proteger cultivos vulnerables. La necesidad de un diseño dual surge porque los ventiladores de protección contra heladas suelen estar en desuso la mayor parte del año, lo que supone una oportunidad para integrarlos con sistemas que generen electricidad cuando no están en funcionamiento.

El diseño se basa en la teoría de Momento de Elemento de Palas (BEM, por sus siglas en inglés), la cual se ha adaptado para optimizar el rendimiento de una turbina eólica con perfiles aerodinámicos simétricos, lo que es necesario para que pueda funcionar en ambos modos, tanto como ventilador como turbina. Esta herramienta permite optimizar el ángulo de paso, el ángulo de inclinación del rotor y la altura de la torre, de acuerdo con los requisitos operativos tanto de la generación de energía como de la protección contra heladas.

Una parte importante del proyecto fue la implementación de una interfaz gráfica mediante App Designer en MATLAB, que permite a los usuarios interactuar de manera sencilla con el software, realizar simulaciones, y observar cómo el diseño de las palas afecta tanto el rendimiento en modo turbina como en modo ventilador. La interfaz también permite visualizar parámetros importantes como el coeficiente de potencia y los cambios de temperatura en los cultivos durante un evento de inversión térmica.

La herramienta permitió realizar simulaciones detalladas para analizar la eficiencia y el rendimiento de la máquina dual. Por ejemplo, se observaron incrementos en la temperatura del suelo de hasta 3°C en un rango de 100-175 metros desde el ventilador en noches de heladas, lo que cubre una superficie de entre 3 y 10 hectáreas, dependiendo de la



configuración de la máquina. Además, en modo turbina eólica, se alcanzaron coeficientes de potencia cercanos a 0.47, con diseños optimizados de las palas que minimizan el uso de materiales sin afectar significativamente la eficiencia.

El análisis de factibilidad demostró que la viabilidad de esta máquina dual depende en gran medida del recurso eólico disponible en el sitio, ya que esto influye directamente en la capacidad de generar energía y equilibrar los costos energéticos con los beneficios de la protección de cultivos.

### **2.1.20 Desarrollo de una aplicación amigable para la simulación y análisis económico de sistemas fuera de la red, así como el cálculo de variantes alternativas del sistema.**

En este trabajo (Fred, 2021). aborda el desarrollo de una aplicación amigable para el usuario que permite simular y analizar económicamente sistemas híbridos autónomos, especialmente diseñados para zonas sin acceso estable a electricidad, como áreas rurales en países en desarrollo. El sistema simulado combina tecnologías de energía fotovoltaica y un generador diésel, junto con un inversor fotovoltaico, un inversor de batería y un sistema de almacenamiento con baterías. La herramienta, desarrollada con MATLAB App Designer, proporciona soporte para parametrizar los componentes del sistema, ejecutar simulaciones y calcular los costos de producción de electricidad, tanto de manera individual para cada fuente de energía como para el sistema completo, usando métodos como el valor presente neto (NPV) y el método de anualidad.

Con respecto a los resultados, la aplicación muestra que los costos de inversión de los componentes varían considerablemente. Por ejemplo, los costos de instalación de la planta fotovoltaica son significativamente menores en comparación con los generadores diésel, mientras que el sistema de almacenamiento con baterías y los inversores representan una parte importante del costo total. En términos de costos de generación eléctrica, el sistema fotovoltaico tiene un costo nivelado de electricidad mucho más bajo en comparación con el generador diésel, lo que hace que la integración de energía renovable sea económicamente viable en el largo plazo.

La aplicación permite a los usuarios ejecutar estudios paramétricos, modificando valores de entrada como la capacidad instalada de energía solar o la capacidad de almacenamiento, para explorar alternativas del sistema y obtener resultados personalizados de manera eficiente. Estos resultados también se pueden exportar en formato Excel para su análisis posterior.

El uso de MATLAB App Designer no solo facilita la creación de la interfaz gráfica,

sino que también integra cálculos complejos, permitiendo una evaluación técnica y económica rápida y eficaz del sistema.

### **2.1.21 Desarrollo de software para la simulación de generador sincrónico y generador asíncrono orientado al uso de prácticas del laboratorio de máquinas eléctricas en MATLAB.**

El proyecto de (Carrillo & Mendoza, 2021). Se basa en modelos matemáticos implementados en Simulink, que permiten simular tanto eventos dinámicos como estacionarios en los generadores sincrónicos y asíncronos. Estos modelos son capaces de representar eventos como cambios en la potencia de salida, desconexiones de carga y variaciones en las condiciones de operación, logrando así replicar situaciones reales que podrían ocurrir en un entorno de laboratorio físico.

Este software está diseñado para suplir la falta de acceso a laboratorios físicos en la Escuela Politécnica Nacional, permitiendo a los estudiantes realizar prácticas de máquinas eléctricas de manera virtual.

Los resultados obtenidos, durante la prueba de circuito abierto realizada en el generador sincrónico, el software permitió medir la relación entre el voltaje terminal y la corriente de campo. A velocidad nominal, se alcanzó un voltaje de 500 V con una corriente de campo de 8 A, observándose una curva característica que muestra cómo el voltaje se estabiliza debido a la saturación magnética cuando la corriente de campo supera este valor. La simulación del cortocircuito permitió evaluar el comportamiento del generador bajo condiciones extremas, midiendo la corriente de armadura para diferentes valores de corriente de campo. Para una corriente de campo de 5 A, obtuvieron una corriente de armadura de 150 A, lo que les permitió calcular una impedancia sincrónica de 3.33 ohmios.

El uso de App Designer permitió que todos estos resultados fueran presentados de manera visual e interactiva. El software incluye gráficos dinámicos que permiten a los usuarios ajustar parámetros como la corriente de campo o la carga y observar de inmediato los efectos sobre variables como el voltaje terminal, la corriente de armadura o la potencia reactiva.

El software desarrollado logra simular con precisión las prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas, proporcionando a los estudiantes una herramienta para estudiar el comportamiento de generadores sincrónicos y asíncronos en condiciones controladas.

### **2.1.22 Análisis del método de puesta a tierra del neutro y estudio del impacto en la operación de sistemas con generación distribuida.**

En el estudio realizado por (Giral, 2016), aborda un análisis sobre los métodos de puesta a tierra del neutro en sistemas de generación distribuida, utilizando tanto análisis teóricos como simulaciones en App Designer. El objetivo es estudiar el impacto de estos métodos en la operación de redes con generación distribuida, considerando factores como la corriente de falla, el Coeficiente de Puesta a Tierra (COG) y la Elevación de Potencial a Tierra (GPR).

Se realizó un análisis de las componentes simétricas para diferentes configuraciones de puesta a tierra, utilizando secuencias positivas, negativas y cero. En sistemas de 4 nodos, las simulaciones incluyeron análisis de fallas monofásicas y bifásicas, comparando los resultados teóricos con los obtenidos mediante el software WinIGS. Las corrientes de falla monofásica para el nodo 2 oscilaron entre 0.5 y 1.5 p.u. en las diferentes simulaciones. El análisis de secuencia demostró una correlación aceptable entre las corrientes calculadas teóricamente y las simuladas, con una desviación menor al 10% para la corriente de falla en el nodo 2.

Además, el sistema de 2 nodos fue evaluado usando App Designer, donde se integraron gráficas interactivas que mostraban en tiempo real las variaciones del GPR y el COG bajo distintas condiciones de falla. Los resultados mostraron un aumento del GPR de 0.2 a 0.5 p.u. al pasar de una resistencia de 5 ohmios a una de 10 ohmios en la puesta a tierra. Esta funcionalidad interactiva permitió visualizar cómo los valores calculados de COG y GPR se alineaban con las expectativas teóricas.

El análisis del sistema de 13 nodos, utilizando simulación en App Designer, reveló que la corriente de falla máxima fue de 1.8 p.u., mientras que la corriente mínima fue de 0.8 p.u. Además, los valores de COG variaron entre 0.3 y 0.7 dependiendo de la ubicación del nodo en el sistema.

El proyecto demostró que el uso de App Designer facilitó la simulación y visualización de datos en tiempo real, permitiendo un análisis detallado de las corrientes de falla, el GPR y el COG en sistemas de generación distribuida con distintos métodos de puesta a tierra.

### **2.1.23 Implementación de un modelo de predicción de la demanda eléctrica mediante redes neuronales artificiales.**

En este proyecto (Hinojosa, 2022) aborda la implementación de un modelo de predicción de la demanda eléctrica mediante redes neuronales artificiales (RNA), utilizando datos reales del alimentador C de la Subestación 37 Santa Rosa en el barrio de San José de

Cutuglahua, Ecuador. El objetivo principal fue diseñar un sistema que permita predecir con precisión el consumo de electricidad, lo que es esencial para gestionar adecuadamente la producción, distribución y transmisión de energía.

El estudio empleó una metodología descriptiva, diagnóstica y aplicada. El desarrollo técnico se realizó utilizando el software MATLAB, específicamente a través de su herramienta de diseño de interfaces, App Designer, que permitió crear un sistema de predicción basado en RNA. El programa se dividió en tres módulos clave: un módulo para el análisis histórico de la demanda eléctrica, un módulo para definir las propiedades de la red neuronal, y un módulo para las predicciones de demanda futura.

La red neuronal seleccionada para este proyecto fue NARNET, diseñada para la predicción de series de tiempo. Esta red se entrenó utilizando el algoritmo de Levenberg-Marquardt, con cinco neuronas en la capa oculta. El conjunto de datos utilizados para entrenar la red fue dividido en tres partes: el 70% de los datos se usaron para el entrenamiento, el 15% para la validación y el 15% para pruebas. El proceso de entrenamiento permitió ajustar los pesos y las funciones de activación para que la red pudiese realizar predicciones precisas.

El algoritmo desarrollado mostró un error porcentual del 4,06% al comparar las predicciones con los valores reales de demanda eléctrica. Este bajo porcentaje de error demuestra que el modelo es preciso y adecuado para su implementación en la predicción del consumo energético, proporcionando así una herramienta confiable para optimizar la gestión del suministro eléctrico. Además, los resultados numéricos presentaron un rango de demanda eléctrica que variaba desde un mínimo de 1527,42 KWh hasta un máximo de 4240,70 KWh, con una media de 2457,62 KWh en los datos históricos utilizados.

El uso de App Designer fue clave para desarrollar la interfaz que permitió visualizar tanto los datos históricos como las predicciones en gráficas interactivas. Estas visualizaciones facilitaron la toma de decisiones basadas en el comportamiento histórico y las proyecciones futuras del consumo eléctrico en la zona de estudio.

#### **2.1.24 Desarrollo de un software para el análisis del recurso energético eólico en pequeña escala.**

El proyecto realizado por (Guerrero, 2022). Se enfoca en el desarrollo de un software formativo para el análisis del recurso energético eólico a pequeña escala, con el propósito de brindar a los usuarios una herramienta de uso libre para la evaluación del potencial eólico de un lugar determinado, facilitando la selección adecuada de aerogeneradores comerciales.

El desarrollo del software siguió una metodología detallada que incluyó la creación de interfaces gráficas mediante el uso de App Designer de MATLAB, permitiendo la integración de funcionalidades como la carga de archivos con datos del viento, la configuración de variables relevantes (velocidad del viento, dirección del viento, presión atmosférica y temperatura promedio), y la generación de resultados basados en modelos matemáticos ajustados a las distribuciones de Weibull y Normal.

El proyecto utiliza el método de máxima verosimilitud para ajustar los datos del viento a una distribución Weibull, lo cual permite evaluar la probabilidad de ocurrencia de diferentes velocidades de viento. Asimismo, el software integra un algoritmo para generar una rosa de los vientos, representando gráficamente las direcciones predominantes del viento en el área de estudio. Con estos datos, el software calcula el potencial energético disponible mediante la densidad del aire y el promedio de la velocidad del viento, aplicando ecuaciones estándar para determinar el recurso eólico.

El software mostró un buen desempeño en el procesamiento de datos, logrando ejecutar las diferentes aplicaciones (distribución del viento, rosa de vientos, análisis de recursos y sugerencia de turbina) en un promedio de 5 a 10 segundos, dependiendo del volumen de datos suministrado. El análisis del viento en zonas con potencial eólico moderado arrojó velocidades promedio de 4.5 a 6.5 m/s, con un potencial energético calculado en torno a 150 W/m<sup>2</sup>, lo que se considera suficiente para alimentar aerogeneradores de pequeña escala.

El proyecto contribuye una herramienta para el análisis del recurso eólico de manera más fácil de utilizar.

## **2.2 Enunciados de los supuestos teóricos**

### **2.2.1 Microrred.**

Una microrred es un sistema eléctrico de baja o media tensión que integra generación distribuida y dispositivos de almacenamiento de energía (González, 2019). Su característica distintiva es la capacidad de operar tanto conectada a la red principal como de manera aislada. En el modo conectado, la red principal define el voltaje y la frecuencia, requiriendo una sincronización simple para cada generador distribuido. En el modo aislado, las referencias de voltaje y frecuencia son gestionadas internamente mediante un control jerárquico (primario, secundario y terciario). Estos sistemas, además de integrar fuentes renovables, utilizan un control global en las distintas etapas para garantizar servicios auxiliares y el balance de potencia (Castro et al., 2021).

**2.2.1.1 Sistema IEEE de 3 nodos.** El sistema IEE de 3 nodos es un modelo de prueba planteado en (Barco-Jimenez et al., 2022). Esta microrred aislada cuenta con generadores y baterías que trabajan en conjunto para minimizar los costos de generación, garantizar el suministro de energía según la demanda y proporciona servicios auxiliares, como la regulación del voltaje y la reducción de pérdidas de energía. involucra una topología de tres nodos, que incluye un generador fotovoltaico, un sistema de baterías y un generador diésel.

**2.2.1.2 Sistema IEEE de 13 nodos.** El nombre completo del sistema es IEEE 13 Node Test Feeder y, como parte de los sistemas de prueba de distribución de IEEE, fue desarrollado para capturar las características comunes y los desafíos específicos de las redes de distribución. El sistema IEEE de 13 nodos es un modelo de prueba utilizado para el análisis y la simulación de sistemas de energía eléctrica, desarrollado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE). Este sistema se utiliza comúnmente para estudios de flujo de carga, análisis de estabilidad y optimización en redes de distribución eléctrica. Está compuesto por 13 nodos, que representan diferentes puntos de conexión dentro de la red eléctrica, incluyendo tanto generadores como cargas.

Este sistema combina generadores diésel, generadores fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento de energía, como baterías de plomo-ácido y de litio, para optimizar el despacho de potencia, reducir costos operativos y garantizar un suministro confiable según la demanda (Barco-Jimenez et al., 2023). La configuración de la red permite experimentar con diferentes condiciones operativas y evaluar la generación y el consumo.

**2.2.1.3 Sistema IEEE de 33 nodos.** El sistema de prueba mejorado de 33 buses IEEE es una versión actualizada del sistema original de Baran & Wu, diseñado para estudios avanzados de distribución eléctrica. Está adaptado para integrar tecnologías modernas como la generación distribuida, recursos renovables, almacenamiento de energía y vehículos eléctricos, permitiendo análisis en configuraciones radiales y malladas. Además, ofrece versiones tanto balanceadas como desbalanceadas, junto con perfiles de carga y generación renovable, facilitando estudios de reconfiguración de redes, control de voltaje, reducción de pérdidas y estabilidad en sistemas de distribución inteligentes (Dolatabadi et al., 2021). Consta de generadores Diesel, un generador fotovoltaico, un generador eólico y una batería.

### **2.2.2 Control jerárquico.**

El control jerárquico de las microrredes en modo isla se basa en un enfoque de múltiples niveles inspirado en el control automático de generadores en sistemas de potencia. Este esquema se organiza en cuatro niveles: control de nivel cero, control primario, control secundario y control terciario, cada uno con un rol específico dentro de la regulación de la microrred (Castro et al., 2021).

**2.2.2.1 Control de nivel cero.** Gestiona el comportamiento interno de los convertidores que transforman la energía en la red. Dos enfoques comunes son el control vectorial y la teoría de potencia instantánea. Ambos destacan por su rápida respuesta dinámica, aunque presentan desafíos para el control a largo plazo al integrarse con otros niveles (Castro et al., 2022).

**2.2.2.2 Control primario.** Es clave para estabilizar la red, ya que se encarga de equilibrar de manera inicial la potencia activa y reactiva. Es un control rápido, sencillo y local, implementado en cada convertidor, que reacciona ante pequeñas variaciones en la señal de potencia (Castro et al., 2022).

**2.2.2.3 Control secundario.** Se enfoca en restaurar los valores nominales de frecuencia y voltaje, ajustando el sistema para garantizar la estabilidad operativa después de las perturbaciones que el control primario no puede corregir completamente (Narvaez, 2020).

**2.2.2.4 Control terciario.** Es el nivel superior en la jerarquía de control y tiene como objetivo optimizar la operación global de la microrred a largo plazo. Utiliza algoritmos como el flujo de potencia óptimo para asegurar una operación eficiente. Su misión principal es gestionar de manera óptima la energía generada, almacenada y consumida, especialmente cuando se integran fuentes de energía renovables. Este control se basa en ecuaciones de balance de potencia eléctrica, y su función objetivo puede orientarse hacia la optimización de aspectos económicos, ambientales o técnicos (Castro et al., 2021).

**2.2.2.5 Despacho de potencia activa y reactiva.** En este enfoque según Barco-Jimenes. J., et. al. (2022). El despacho de potencia activa y reactiva corresponde a un esquema de operación de nivel terciario con el objetivo de establecer referencias de potencia activa, potencia reactiva y la programación de carga/descarga de baterías para cumplir con la demanda energética. La potencia activa es la que realiza trabajo útil en el sistema eléctrico, como

alimentar dispositivos, mientras que la potencia reactiva, no produce trabajo útil, pero es necesaria para regular el voltaje del sistema y asegurar la estabilidad de la red. Además, se establecen criterios de optimización para buscar un punto óptimo de operación. El criterio más utilizado es el costo, pero se pueden integrar otros criterios técnicos para brindar servicios auxiliares a la microrred, entre ellos, regulación de voltaje, reducción de pérdidas de distribución, desplazamiento de la generación por medio de las baterías, y reducción del vertimiento de la energía (Castro et al., 2021).

### **2.2.3 MATLAB.**

MATLAB es una plataforma de programación y cálculo numérico ampliamente utilizada para resolver problemas técnicos y científicos. Ofrece una colección de herramientas para realizar análisis de datos, simulaciones, optimización, y desarrollo de algoritmos (MathWorks, 1997). Dos de sus componentes son el App Designer y el Optimization Toolbox, que permiten a los usuarios desarrollar aplicaciones interactivas y resolver problemas de optimización complejos.

**2.2.3.1 App Designer.** El App Designer en MATLAB es una herramienta visual que facilita el desarrollo de aplicaciones. En lugar de programar la interfaz manualmente, pueden crear aplicaciones arrastrando y soltando un amplio conjunto de elementos interactivos. incluyendo botones, casillas de verificación, árboles y listas desplegadas, así como elementos de control como medidores, luces indicadoras, controles y conmutadores, componentes de contenedor como pestañas y paneles, diseños de rejilla, entre otros (Huamaní, 2021). El código MATLAB subyacente puede ser vinculado fácilmente a estos elementos, lo que permite controlar la lógica y el comportamiento de la aplicación.

Con App Designer, se pueden desarrollar interfaces intuitivas para visualización de datos, control de procesos, y análisis interactivos, todo dentro de la misma plataforma.

**2.2.3.2 Herramienta de optimización.** El Toolbox de optimización de MATLAB es una herramienta importante de MATLAB cuando se trata de resolver problemas de optimización. Este toolbox ofrece una variedad de algoritmos para resolver problemas de minimización o maximización con o sin restricciones, como problemas lineales, no lineales, de programación cuadrática, o de optimización global (Coleman & Branch, 1999).

Una de las funciones del Optimization Toolbox es `fmincon`, que está diseñada para resolver problemas de optimización no lineal con restricciones. `fmincon` se puede utilizar para



encontrar el mínimo de una función sujeta a condiciones como restricciones de igualdad, desigualdad y límites en las variables.

**2.2.3.3 *Fmincon*.** La función *fmincon* es útil para resolver problemas que involucran restricciones complejas. Su modelo es el siguiente:

$$\min_x f(x) \text{ sujeto a } c(x) \leq 0, \quad ceq(x) = 0, \quad lb \leq x \leq ub \quad (1)$$

Aquí, *fmincon* minimiza una función objetivo  $f(x)$ , con restricciones de desigualdad  $c(x)$ , restricciones de igualdad  $ceq(x)$ , y límites superiores e inferiores para las variables  $lb$  y  $ub$ . MATLAB ofrece diferentes algoritmos de optimización para esta función, como el método de "interior-point", "trust-region-reflective", y "SQP" (Programación Cuadrática Secuencial), permitiendo seleccionar el más adecuado para algún tipo de problema (Polanco, 2016).

*fmincon* ofrece la capacidad de gestionar múltiples restricciones, tanto de igualdad como de desigualdad, lo que es importante en diversos contextos de optimización. Esta flexibilidad permite adaptarse a diferentes tipos de problemas, donde se deben considerar factores dinámicos y limitaciones operativas.

### 3. Metodología

#### 3.1 Secuencia Metodológica

##### 3.1.1 Objetivo 1.

Obtener el modelo matemático de los algoritmos de control terciario, del flujo de potencia de microrredes y los indicadores relevantes, como la eficiencia, los costos de operación y las pérdidas de energía.

##### 3.1.1.1 Actividad 1.

A1.1. Recopilar información de los datos de las microrredes y los algoritmos de control terciario que optimizan su desempeño extrayendo los datos relevantes relacionados estos algoritmos.

En esta etapa, se identificarán los sistemas IEEE de 33, 13 y 3 nodos, concentrándose en parámetros fundamentales como la demanda de potencia activa y reactiva, los voltajes en los nodos (p.u) por unidad y los límites de potencia de los generadores. Este análisis preliminar permitirá comprender las características operativas de cada tipo de microrred y sentará las bases para su posterior optimización.

Posteriormente, se llevará a cabo la recopilación de información sobre los modelos matemáticos de los algoritmos de control terciario que se emplean para determinar los costos de operación, el error de la demanda, las pérdidas de potencia y la desviación de voltaje, identificando sus características y funcionamiento.

Finalmente, los datos recopilados y los modelos obtenidos se utilizarán como base para las simulaciones y validaciones posteriores, donde se evaluará el desempeño de los algoritmos de control terciario.

##### 3.1.2 Objetivo 2.

Diseñar una aplicación gráfica de usuario intuitiva para la aplicación en el entorno gráfico de MATLAB/APP Designer que permita la carga de todos los parámetros del modelo de la microrred y el algoritmo de control.

##### 3.1.2.1 Actividad 2.

A2.1. Identificar los requisitos funcionales y las características esenciales que debe cumplir la aplicación para garantizar una interacción sencilla y eficiente entre el usuario y la interfaz gráfica.

Se definirán las funciones clave, la organización visual y la usabilidad, con el fin de ofrecer una experiencia intuitiva y accesible para el usuario.

En paralelo, se recopilará información sobre las necesidades del usuario, como la accesibilidad y la facilidad de navegación, lo cual permitirá estructurar de manera coherente la interfaz de usuario.

Una vez definidos estos aspectos, se categorizarán las funciones clave de la aplicación según su relevancia, tales como la interacción con el usuario, la gestión y procesamiento de datos, así como la emisión de notificaciones y alertas.

A2.2. Definir y organizar los diferentes objetos de la aplicación tales como gráficas, cuadros de texto, botones, pestañas, menús, ventanas, y cómo se presentarán al usuario.

Se analizarán los distintos componentes que ofrece MATLAB/APP Designer para la creación de aplicaciones, y estos elementos se distribuirán de manera lógica dentro de la aplicación, logrando una interfaz de usuario clara y efectiva. Esto permitirá capturar los parámetros del modelo de la microrred y visualizar los resultados de las simulaciones.

### **3.1.3 Objetivo 3.**

Implementar los escenarios IEEE de 33,13 y 3 nodos y las condiciones operativas para la simulación y comparación de los algoritmos de control terciario de microrredes.

#### **3.1.3.1 Actividad 3.**

A3.1. Implementar los modelos de las 3 microrredes tipo IEEE (3, 13, 33 nodos).

Utilizando la aplicación previamente diseñada se procede a implementar las características técnicas de los escenarios de simulación.

A3.2. Validar la operación de los algoritmos sobre los diferentes escenarios de simulación ante la variación de parámetros.

Ingresados los datos correspondientes a los tres escenarios, se ejecutará el proceso de optimización, generando indicadores clave como el tiempo de ejecución del algoritmo, el error de demanda, los costos operativos, las pérdidas de potencia, la desviación de voltaje y la visualización del despacho de potencia activa y reactiva. Esto permitirá realizar un análisis detallado de los algoritmos de optimización ADMM y SQP de fmincon en cada escenario.

### **3.1.4 Objetivo 4.**

Evaluar eficacia y la precisión del algoritmo por medio de indicadores relevantes, como, el tiempo de ejecución de los algoritmos, los costos de operación, las pérdidas de

energía y el despacho de potencia.

#### **3.1.4.1 Actividad 4.**

A4.1. Comparar los resultados de los algoritmos de control terciario implementados en cada escenario.

Para evaluar la eficacia y precisión del algoritmo según indicadores clave como el tiempo de ejecución, los costos de operación, las pérdidas de energía y el despacho de potencia, se capturan los datos mediante tablas y gráficas obtenidas de las simulaciones de cada escenario. A continuación, se analizan y comparan estos indicadores para cada algoritmo en los distintos escenarios. El objetivo es identificar cuál algoritmo muestra un mejor rendimiento en cada aspecto evaluado.

A4.2. Realizar encuesta de satisfacción para el usuario.

Realizar encuesta a estudiantes universitarios de la universidad Cesmag.

### **3.2 Técnicas de Recolección de Información**

#### **3.2.1 Investigación documental.**

La metodología que se utiliza es la investigación documental, la cual implica examinar diversos materiales y documentos técnicos que están relacionados con el tema de estudio, tales como libros, artículos científicos, normativas y reglamentos. Por medio de esta técnica, se busca obtener información acerca de los algoritmos de control terciario de microrredes que se han desarrollado, incluyendo sus características, ventajas, desventajas y los criterios de evaluación utilizados en investigaciones anteriores.

#### **3.2.2 Experimentación.**

En este caso, se utiliza la propia aplicación desarrollada para la simulación y comparación de los algoritmos de control terciario de microrredes. La experimentación permitiría obtener información detallada sobre el desempeño de cada algoritmo y compararlos entre sí.

### **3.3 Instrumentos de Recolección de Información**

#### **3.3.1 Pruebas de usabilidad.**

Las pruebas de usabilidad posibilitan cualificar la sencillez de uso y el rendimiento de

la aplicación en la simulación y comparación de los algoritmos de control terciario de microrredes. Para llevar a cabo estas pruebas se convoca a un grupo de usuarios que utilizan la aplicación, registrándose los tiempos de respuesta, fallos y otras métricas con el fin de evaluar la calidad de la experiencia de uso.

### **3.3.2 Recopilación y registro de datos.**

El registro de datos generado por la aplicación se emplea para obtener información sobre el rendimiento de los algoritmos de control terciario de microrredes. Es factible observar despacho de la potencia de los generadores y recolectar información referente a los indicadores como son los costos de operación, error de demanda y tiempo de simulación entre otros.

## 4. Resultados

### 4.1 Definición de los escenarios de simulación

Los escenarios de simulación descritos posteriormente se obtienen de los documentos (Barco-Jimenez et al., 2022, 2023; Dolatabadi et al., 2021). En los cuales se describe las características de cada uno de los escenarios de prueba. Además, estos datos técnicos son implementados en las pruebas de simulación para la verificación de los algoritmos. Se asume que las 3 microrredes están desconectadas de la red de distribución y operan de manera autónoma por lo tanto se consideran ideales.

#### 4.1.1 Escenario de 3 nodos.

El escenario de simulación utilizado en esta investigación es un modelo teórico de una microrred aislada de tres nodos, diseñado específicamente para evaluar la estrategia de despacho mediante los algoritmos. Para este escenario se tomaron datos de referencia del sistema IEEE de 13 nodos como son la potencia activa empleada para las pruebas. En esta red incluye un generador fotovoltaico, un sistema de baterías y un generador diésel, cada uno con especificaciones de potencia establecidas.

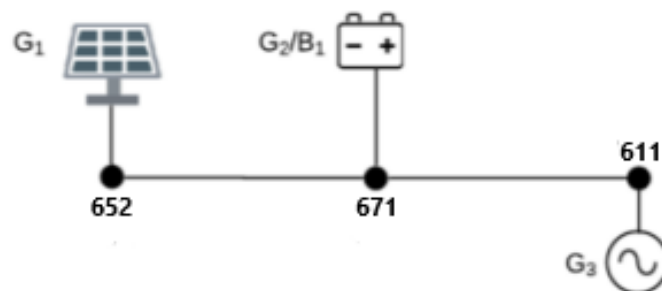
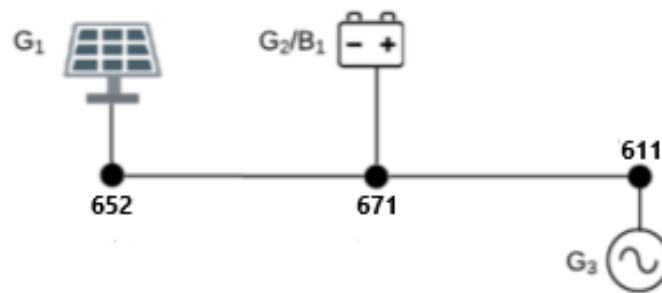


Figura 1. Tomado de (Barco-Jimenez et al., 2022). Estudio de caso para un sistema de 3 nodos



En la

Figura 1 la microrred simulada en MATLAB consiste en un sistema de 3 nodos con un nivel de voltaje de 4.16 kV. Para evaluar la interacción entre fuentes de energía renovable y recursos de almacenamiento en un modo aislado, se incluye un generador fotovoltaico ( $G_1$ ), un sistema de baterías ( $G_2/B_1$ ) y un generador diésel ( $G_3$ ). El generador diésel actúa como la unidad de referencia, proporcionando las referencias de voltaje y frecuencia. En esta propuesta se propone el desarrollo de un esquema de operación distribuido para una microrred eléctrica compuesta por generadores basados en fuentes no convencionales de energía (solar y diésel), con un enfoque particular sobre la gestión de los sistemas de almacenamiento, manteniendo una operación eficiente en términos del costo y con la posibilidad de explorar el potencial de los sistemas de almacenamiento para brindar servicios auxiliares.

Tabla 1. Características de los generadores y del sistema de almacenamiento

<b>GENS</b>	<b>Límites de potencia activa (kW)</b>	<b>Límites de potencia reactiva (kVAr)</b>	<b>Coefficientes de costo (ci; bi; ai)</b>
G1	[0,400]	[0,173]	0.00;0.5;0.5
G3	[40,400]	[-100,100]	0.01;1.5;0.5
G2/B1	[-500,500]	[-193,193]	

La Tabla 1 presenta las capacidades de cada generador y del sistema de almacenamiento, excluyendo el costo de generación para la batería y definir una unidad sin costo. Se infiere que los límites inferior y superior se encuentran separados por una coma.

Tabla 2. Datos de la capacidad nominal de las cargas

<b>Nodo</b>	<b>kW</b>	<b>kVAr</b>
671	225	71
652	128	86
611	170	80

En la Tabla 2 se observa la capacidad nominal de las cargas tomados de el sistema de referencia IEEE de 13 nodos.

#### 4.1.1.1 Escenario de 13 nodos.

El escenario de simulación es un sistema de microred basado en el modelo IEEE de 13 nodos con un nivel de voltaje de 4.16 kV. Este escenario se ha adaptado para incluir recursos energéticos renovables y sistemas de almacenamiento de energía, como un generador diésel, un generador fotovoltaico (PV), un generador eólico y sistemas de almacenamiento con baterías.

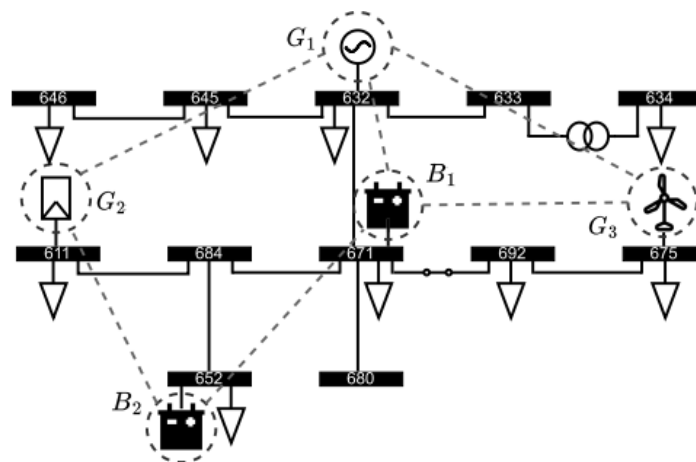


Figura 2. Tomado de (Barco-Jimenez et al., 2023). Estudio de caso para un sistema de 13 nodos

En la Figura 2 se observan las conexiones eléctricas que están representadas con líneas continuas mientras que las líneas punteadas muestran los canales de comunicación entre los agentes.

Para estudiar cómo interactúan la energía renovable y los recursos de almacenamiento en un sistema aislado, como se observa en la figura 2 se han incluido un generador diésel ( $G_1$ ), un generador fotovoltaico ( $G_2$ ), una turbina eólica ( $G_3$ ), un sistema de baterías de plomo-ácido ( $B_1$ ) y otro de baterías de ion-litio ( $B_2$ ). El generador diésel actúa como la unidad de referencia, proporcionando las señales de voltaje y frecuencia. Es importante destacar que la ubicación y el tamaño de estos generadores se han determinado con el fin de reducir los costos de generación, las pérdidas de energía y las variaciones de voltaje.

Tabla 3. Características de los generadores y los sistemas de almacenamiento

Unidades de	Límites de potencia	Límites de potencia	Coefficientes de costo
-------------	---------------------	---------------------	------------------------



generación	activa (kW)	reactiva (kVAr)	(ci;bi;ai)
G1	[200,2000]	[0,2000]	0.01;1.50;0.5
G2	[0,1200]	[0,968]	0.00;0.50;0.5
G3	[0,1000]	[0,484]	0.00;0.80;0.5
B1	[0,800]	[0,387]	0.00;0.25;0.0
B2	[0,1200]	[0,581]	0.00;0.35;0.0

En la Tabla 3, se detallan las capacidades y los costos de los generadores y sistemas de almacenamiento. Los límites máximos de la potencia reactiva se calculan según el factor de potencia de cada generador y dependen de cuánta potencia activa esté disponible en un momento específico. Al igual que en la tabla 1 los límites están separados por una coma en el interior de los corchetes.

#### 4.1.1.2 Escenario de 33 nodos.

El escenario de simulación es un sistema de prueba mejorado por la IEEE, modelado a partir del sistema original de 33 nodos propuesto por Baran & Wu. Este sistema de prueba ha sido desarrollado para reflejar las características de una red moderna de distribución. No se trata de un escenario real específico, sino de un modelo diseñado para representar una microrred de distribución (Dolatabadi et al., 2021), los datos son tomados a partir del modelo de Baran & Wu.

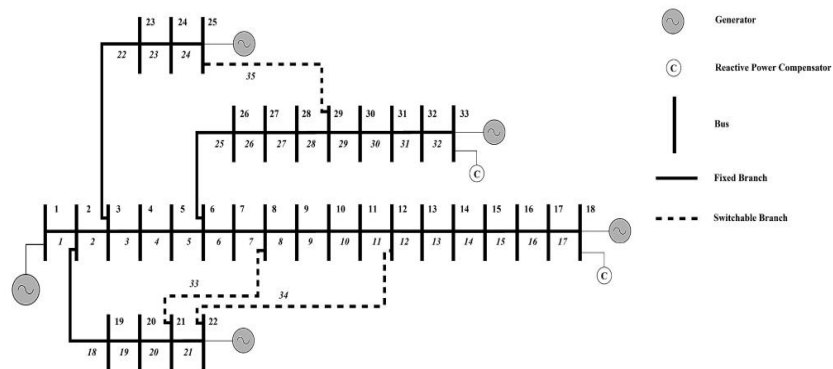


Figura 3. Tomado de (Dolatabadi et al., 2021). Estudio de caso para un sistema de 33 nodos

La

Figura 3 muestra cómo está estructurado el sistema de prueba de 33 nodos propuesto. Este sistema opera a 12.66 kV y está conformado por 2 generadores Diesel, 1 sistema de almacenamiento de energía, un generador fotovoltaico y un generador eólico. Cuenta con 33 barras y 3 ramas en lazo que no se tendrán en cuenta para el despacho de potencia reactiva.

Tabla 4. Datos de barras del sistema de prueba de distribución IEEE de 33 barras

Sistema de prueba					
Bus no	Tipo	Demanda activa (MW)	Demanda reactiva (MV AR)	Voltaje máximo (p.u.)	Voltaje mínimo (p.u.)
1	Referencia	0	0	1	1
2	PQ	0,1	0,06	1,05	0,95
3	PQ	0,09	0,04	1,05	0,95
4	PQ	0,12	0,08	1,05	0,95
5	PQ	0,06	0,03	1,05	0,95
6	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
7	PQ	0,2	0,1	1,05	0,95
8	PQ	0,2	0,1	1,05	0,95
9	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
10	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
11	PQ	0,045	0,03	1,05	0,95
12	PQ	0,06	0,035	1,05	0,95
13	PQ	0,06	0,035	1,05	0,95
14	PQ	0,12	0,08	1,05	0,95
15	PQ	0,06	0,01	1,05	0,95
16	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
17	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
18	PV	0,09	0,04	1,05	0,95
19	PQ	0,09	0,04	1,05	0,95
20	PQ	0,09	0,04	1,05	0,95
21	PQ	0,09	0,04	1,05	0,95
22	PV	0,09	0,04	1,05	0,95
23	PQ	0,09	0,05	1,05	0,95
24	PQ	0,42	0,2	1,05	0,95
25	PV	0,42	0,2	1,05	0,95
26	PQ	0,06	0,025	1,05	0,95
27	PQ	0,06	0,025	1,05	0,95
28	PQ	0,06	0,02	1,05	0,95
29	PQ	0,12	0,07	1,05	0,95
30	PQ	0,2	0,6	1,05	0,95
31	PQ	0,15	0,07	1,05	0,95
32	PQ	0,21	0,1	1,05	0,95
33	PV	0,06	0,04	1,05	0,95

La Tabla 4 muestra los datos de la demanda de potencia de cada uno de los buses. Las barras que tienen unidades de generación distribuida, como las barras 1, 18, 22, 25 y 33, fueron modificadas de tal forma que las barras 1 y 18 contienen los generadores Diesel, la barra 22 el generador fotovoltaico, la barra 25 el sistema de almacenamiento y la barra 33 el generador eólico. Los niveles de voltaje permitidos durante la operación deben mantenerse

entre 0.95 y 1.05 (*p. u.*). La demanda de potencia activa es de 3.715MW y 2.3MVAR para potencia reactiva.

*Tabla 5. Datos de las líneas del sistema*

Línea no	De bus	A bus	R (ohm)	X (ohm)
1	1	2	0,0922	0,047
2	2	3	0,493	0,2511
3	3	4	0,366	0,1864
4	4	5	0,3811	0,1941
5	5	6	0,819	0,707
6	6	7	0,1872	0,6188
7	7	8	0,7114	0,2351
8	8	9	1,03	0,74
9	9	10	1,044	0,74
10	10	11	0,1966	0,065
11	11	12	0,3744	0,1238
12	12	13	1,468	1,155
13	13	14	0,5416	0,7129
14	14	15	0,591	0,526
15	15	16	0,7463	0,545
16	16	17	1,289	1,721
17	17	18	0,732	0,574
18	2	19	0,164	0,1565
19	19	20	1,5042	1,3554
20	20	21	0,4095	0,4784
21	21	22	0,7089	0,9373
22	3	23	0,4512	0,3083
23	23	24	0,898	0,7091
24	24	25	0,896	0,7011
25	6	26	0,203	0,1034
26	26	27	0,2842	0,1447
27	27	28	1,059	0,9337
28	28	29	0,8042	0,7006
29	29	30	0,5075	0,2585
30	30	31	0,9744	0,963
31	31	32	0,3105	0,3619
32	32	33	0,341	0,5302

En la Tabla 5. Se observa la reactancia X y la resistencia R que sirven para realizar el cálculo de las pérdidas de potencia del sistema.

#### **4.1.2 Modelo matemático de los algoritmos de control terciario.**

El despacho de potencia activa y reactiva es un proceso complejo que involucra diversos componentes, como generadores, sistemas de almacenamiento y características de la

red eléctrica local, entre otros. Es fundamental describir estos componentes con un alto nivel de detalle, utilizando sus parámetros de configuración y variables correspondientes. Esto facilita que el despacho económico se aproxime a una situación real, mejorando la corrección de los controladores secundarios y primarios (Barco-Jimenez et al., 2022).

A continuación, se presenta la notación utilizada para los componentes de la microrred, junto con sus modelos tomados de las investigaciones realizadas por (Barco-Jimenez et al., 2022) y (Barco-Jimenez et al., 2023), como parte de los modelos matemáticos de los problemas de optimización que gobiernan la operación del control terciario y secundario de la microrred.

**4.1.2.1 Modelado de la microrred.** El objetivo principal de un sistema eléctrico es transportar la energía desde los puntos de generación hasta las cargas, las cuales pueden estar ubicadas en cualquier bus de la red. En una microrred, los buses son los puntos de conexión física para generadores, cargas y transformadores, que están enlazados mediante líneas de distribución que permiten el flujo de corriente o potencia eléctrica.

Por lo tanto, una microrred se puede representar como un grafo no dirigido  $G = (N, L)$ , formado por un conjunto de buses y líneas. En este modelo,  $N = \{1, \dots, N\}$  es el conjunto de nodos y  $L \in N \times N$  representa el conjunto de arcos. Cada nodo del grafo corresponde a un bus, mientras que las líneas de distribución se modelan como arcos; si los buses  $i$  y  $j$  están conectados por una línea de distribución, entonces  $(i, j) \in L$ .

Cada nodo tiene variables asociadas. Por ejemplo, todos los nodos poseen una magnitud de voltaje  $V_i$  (donde  $i$  es el índice del nodo) y un ángulo  $\theta_i$ . Además, si un nodo cuenta con un generador, se le asignan variables adicionales como la generación de potencia activa  $P_{Gi}$  y la generación de potencia reactiva  $Q_{Gi}$ . Finalmente, si una carga está conectada al nodo, se asocian variables de consumo de potencia activa  $P_{Li}$  y consumo de potencia reactiva  $Q_{Li}$  (Barco-Jimenez et al., 2022).

**4.1.2.2 Flujo de potencia.** El flujo de potencia proporciona una solución para satisfacer las demandas energéticas de las cargas, empleando la generación del sistema y transfiriendo la potencia a través de la red eléctrica. El modelo de flujo de potencia en su representación polar se expresa de la siguiente manera:

$$P_i(V, \theta) = P_{G_i} - P_{L_i}, \forall i \in N, \quad (2)$$

$$Q_i(V, \theta) = Q_{G_i} - Q_{L_i}, \forall i \in N. \quad (3)$$

$P_i(V, \theta)$  y  $Q_i(V, \theta)$  representan las inyecciones de potencia activa y reactiva; cuando estos valores son positivos, indican que se está inyectando potencia, mientras que, si son negativos, señalan que se está consumiendo o absorbiendo. Estas variables pueden ser calculadas en función de los voltajes en los nodos  $(V, \theta)$  y mediante el uso de funciones trigonométricas, como se muestra a continuación:

$$P_i(V, \theta) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \forall i \in N, \quad (4)$$

$$Q_i(V, \theta) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \forall i \in N. \quad (5)$$

Donde  $G_{ij}$  y  $B_{ij}$  son la conductancia y la susceptancia del elemento  $(i, j)$  de la matriz de admitancias  $\mathbf{Y}$ . La variable  $\theta_{ij}$  representa la diferencia de ángulos entre los nodos  $i$  y  $j$  ( $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ ) y la notación  $j \in i$  indica el conjunto de nodos conectados al nodo  $i$ , incluyendo al propio nodo  $i$  (Barco-Jiménez et al., 2022).

**4.1.2.3 Matriz de admitancias.** La matriz de admitancias ( $\mathbf{Y}$ ) se compone de las admitancias de las líneas que conectan los buses de la red eléctrica. Si se denota  $y_{ij}$  la admitancia de la línea  $(i, j)$  entre los nodos, los elementos de la matriz de admitancias se calculan de la siguiente forma.

$$Y_{ij} = \begin{cases} \sum_{j \in i} y_{ij} & i = j. \\ -y_{ij} & i \neq j. \end{cases} \quad (6)$$

Así, los elementos diagonales de la matriz representan la suma de todas las admitancias individuales de las líneas conectadas al nodo  $i$ -ésimo, mientras que los elementos fuera de la diagonal reflejan las admitancias individuales de cada línea entre los nodos  $i$  y  $j$ , multiplicadas por un factor de -1. La matriz  $\mathbf{Y}$  tiene dimensiones de  $N \times N$ , es simétrica

( $Y_{ij} = Y_{ji}$ ) y cada uno de sus elementos se compone de una parte real (conductancia) y una parte imaginaria (susceptancia):  $Y_{ij} = G_{ij} + \mathbf{j}B_{ij}$  (Barco-Jiménez et al., 2022).

**4.1.2.4 Despacho económico de generadores.** El despacho económico de potencia (ED, por sus siglas en inglés) implica establecer la cantidad de generación de cada unidad que minimiza los costos de operación, asegurando al mismo tiempo que se satisfaga la demanda total del sistema y que se cumplan las restricciones de los límites mínimos y máximos de cada unidad generadora. El modelo se presenta de la siguiente manera:

$$\min_{P_{G_i}} F = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{G_i}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2), \quad (7)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N P_{G_i} = P_L, \quad (8)$$

$$P_{G_{imin}} \leq P_{G_i} \leq P_{G_{imax}}, \forall i = 1, \dots, N_G. \quad (9)$$

Donde  $P_{G_i}$  es la potencia de cada unidad de generación,  $P_L$  es la demanda total de potencia, y  $F_i(P_{G_i})$  indica el costo de generación de cada unidad, el cual se define mediante una ecuación cuadrática con los coeficientes de costo  $a_i, b_i, c_i$ . El costo total de generación se expresa como una suma de  $F$ , considerando un total de  $N_G$  unidades de generación (Barco-Jimenez et al., 2023).

**4.1.2.5 Pérdidas de distribución de potencia.** Las pérdidas de distribución están relacionadas con el flujo de potencia que circula a través de la línea y se determinan en función de los parámetros de las líneas de distribución, como la resistencia, la reactancia, la conductancia y la susceptancia, tal como se indica en la siguiente ecuación.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N G_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

donde  $G_{ij}$  es la conductancia del par  $(i, j)$  en la matriz de admitancias,  $N$  es el número

de buses, y  $\theta_{ij}$  es la diferencia entre los ángulos de fase de los voltajes  $V_i$  y  $V_j$  (Barco-Jiménez et al., 2022).

**4.1.2.6 Reducción de las pérdidas de distribución y la desviación de voltaje.** Esto se logra ajustando la potencia reactiva y los perfiles de voltaje para minimizar las pérdidas en las líneas de distribución y mantener los voltajes próximos a 1 p.u. A continuación, se presenta el modelo de programación cuadrática diseñado para reducir las pérdidas de distribución y minimizar la desviación de los voltajes (Barco-Jiménez et al., 2022).

$$\min_{V, Q} H = P_{loss} + \sum_{i=1}^N (1 - V_i)^2 \quad (11)$$

Sujeto a:

$$P_i(V, \theta) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \forall i \in N,$$

$$Q_i(V, \theta) = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \forall i \in N,$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax}, \forall i = 1, \dots, N_G, \quad (12)$$

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax}, \forall i = 1, \dots, N, \quad (13)$$

$$\theta_{imin} \leq \theta_i \leq \theta_{imax}, \forall i = 1, \dots, N. \quad (14)$$

La función objetivo ( $H$ ) se integra por dos términos: el primero se refiere a las pérdidas de potencia en la distribución, mientras que el segundo término es una suma de penalizaciones por las desviaciones de voltajes en los nodos. Para facilitar la interpretación de los resultados, la desviación de voltaje en el nodo o bus se puede cuantificar de la siguiente manera:

$$VD_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |V_i(k) - 1|, \forall i = 1, \dots, N. \quad (15)$$

En esta ecuación, las variables de decisión son los voltajes y las potencias reactivas de los generadores. Los voltajes establecen un punto óptimo de operación para minimizar la función objetivo, mientras que los generadores permiten alcanzar estos voltajes mediante la variación de la potencia reactiva. Las ecuaciones de flujo de potencia establecen la relación entre la potencia reactiva y la magnitud y el ángulo de los voltajes en los nodos. Las restricciones están vinculadas a los límites de potencia reactiva de los generadores, así como a las magnitudes y ángulos de voltaje. Estos límites se definen según las características específicas de cada red. La relación entre la potencia reactiva y la potencia activa se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\psi = \cos^{-1}(\text{FP}) \quad (16)$$

$$|Q(t)| = P(t) \cdot \tan(\psi) \quad (17)$$

Donde, FP es el factor de potencia de la interfaz de potencia,  $\psi$  es el ángulo entre la horizontal y la potencia aparente, y  $P(t)$ ,  $Q(t)$  representan las potencias activas y reactiva para un instante  $t$ .

**4.1.2.7 Problema general de optimización.** Las técnicas de optimización se emplean para encontrar los valores óptimos de las variables, los cuales pueden representarse como un conjunto. Un ejemplo simple sería la maximización o minimización de una función que depende de estas variables. En formulaciones más complejas, la función objetivo a maximizar o minimizar puede estar sujeta a restricciones, que pueden ser de igualdad, desigualdad o límites en los valores (Coleman & Branch, 1999). De esta manera, el problema general se puede expresar de la siguiente forma:

$$\min_x f(x) \quad (18)$$

Sujeto a:



$$G_i(x) = 0 \quad i = 1 \dots m_e \quad (19)$$

$$G_i(x) \leq 0 \quad i = m_e + 1 \dots m. \quad (20)$$

En este contexto,  $x$  denota el vector de variables de decisión,  $f(x)$  es la función objetivo que genera un valor escalar, y el vector  $G(x)$  proporciona un vector que contiene los valores de las restricciones de igualdad y desigualdad evaluadas en  $x$ .

**4.1.2.8 Algoritmo de programación cuadrática secuencial (SQP) de fmincon.** El Algoritmo de Programación Cuadrática Secuencial (SQP) se utiliza para resolver problemas de optimización no lineal con restricciones, abordando la complejidad del problema mediante una secuencia de subproblemas de programación cuadrática (QP) (Coleman & Branch, 1999). Este enfoque es particularmente eficaz ya que, en cada iteración, transforma el problema original en un problema cuadrático más simple, donde las restricciones no lineales se linealizan localmente, y la función objetivo se aproxima cuadráticamente. (Mathworks, 2024) Para abordar el problema general descrito en la sección anterior, el SQP trabaja con la función de Lagrange:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x). \quad (21)$$

Donde  $f(x)$  es la función objetivo,  $g_i(x)$  son las restricciones, y  $\lambda_i$  son los multiplicadores de Lagrange. El método optimiza la matriz hessiana de esta función de Lagrange mediante una actualización quasi-Newton, y resuelve iterativamente subproblemas QP que permiten determinar la dirección de búsqueda.

El subproblema QP que se resuelve en cada iteración está formulado de la siguiente manera:

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d \quad (22)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e, \quad (23)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m. \quad (24)$$

Aquí la matriz  $H_k$  es una aproximación positiva definida de la matriz Hessiana de la función Lagrange, mientras que  $d$  es la dirección de búsqueda. El gradiente  $\nabla$  indica la variación local de la función objetivo y las restricciones. La solución de este subproblema cuadrático proporciona la dirección que se empleará para actualizar la solución en cada iteración (Borda & Rodríguez, 2010).

Una vez determinada la dirección de búsqueda, la nueva iteración se calcula usando la fórmula:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (25)$$

Donde  $\alpha_k$  es el tamaño de paso, determinado mediante una búsqueda lineal que garantiza una reducción suficiente en una función de mérito.

La matriz Hessiana  $H_k$  se actualiza utilizando un método quasi-Newton, como el esquema BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), lo que asegura que la matriz mantenga su positividad definida:

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k^T s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (26)$$

$$s_k = x_{k+1} - x_k, \quad (27)$$

$$q_k = \left[ \nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_{k+1}) \right] - \left[ \nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \nabla g_i(x_k) \right] \quad (28)$$

Es recomendable mantener el Hessiano definido positivo, aunque puede ser indefinido positivo en el punto de solución. Esto se logra asegurando que  $q_k^T s_k$  sea positivo en cada actualización y que  $H$  se inicialice con una matriz definida positiva. Si  $q_k^T s_k$  no es positivo, se modifica  $q_k$  elemento por elemento para garantizar que  $q_k^T s_k > 0$ . El objetivo es ajustar los elementos de  $q_k$  lo mínimo posible para mantener la actualización definida positiva. Inicialmente, el elemento más negativo de  $q_k^T s_k$  se reduce a la mitad hasta que  $q_k^T s_k$  alcanza una tolerancia negativa pequeña. Si sigue siendo negativo, se modifica  $q_k$  añadiendo un vector  $v$  multiplicado por un escalar constante  $w$ .

$$q_k = q_k + wv, \quad (29)$$

Donde:

$$v_i = \nabla g_i(x_{k+1}) \cdot g_i(x_{k+1}) - \nabla g_i(x_k) \cdot g_i(x_k) \quad (30)$$

$$\text{si } (q_k)_i \cdot w < 0 \text{ y } (q_k)_i \cdot (s_k)_i < 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$v_i = 0 \text{ en otro caso.}$$

Incrementando  $w$  sistemáticamente hasta que  $q_k^T s_k$  llega a ser positivo.

**4.1.2.8.1 Solución de la programación cuadrática.** En cada iteración del método SQP, se resuelve un problema de programación cuadrática (QP) de la siguiente forma, donde  $A_i$  corresponde a la fila de  $i$  de la matriz  $A$ , la cual tiene dimensiones  $m \times n$ .

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} q(d) = \frac{1}{2} d^T H d + c^T d \quad (31)$$

Sujeto a:

$$A_i d = b_i, \quad i = 1, \dots, m_e, \quad (31)$$

$$A_i \leq db_i, \quad i = m_e + 1, \dots, m. \quad (32)$$

Este subproblema se resuelve en dos fases. En la primera fase, se busca un punto factible, y en la segunda fase se genera una secuencia iterativa que converge hacia la solución óptima. A lo largo del proceso, se mantiene un conjunto activo que estima las restricciones que son estrictamente activas en el punto de solución.

**4.1.2.8.2 Búsqueda lineal y función de mérito.** Una vez resuelto el subproblema QP, se utiliza el vector de dirección  $d_k$  para actualizar la solución mediante la fórmula:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (33)$$

El parámetro de tamaño de paso  $\alpha_k$  se establece para asegurar un decremento adecuado en la función de mérito, que incorpora la función objetivo como las restricciones penalizadas

$$\psi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^{m_e} r_i \cdot g_i(x) + \sum_{i=m_e+1}^{m_e} r_i \cdot \max[0, g_i(x)] \quad (34)$$

El parámetro de actualización  $r_i$  se ajusta en cada iteración para garantizar que las restricciones que están inactivas en la solución QP, pero que se han vuelto recientemente activas, contribuyan de manera positiva en la función de mérito.

$$r_i = (r_{k+1})_i = \max_i \left\{ \lambda_i, \frac{(r_k)_i + \lambda_i}{2} \right\} \quad (35)$$

En esta implementación, el parámetro de penalización  $r_i$  se establece inicialmente de la siguiente manera:

$$r_i = \frac{\|\nabla f(x)\|}{\|\nabla g_i(x)\|} \quad (36)$$

Donde se utiliza la norma euclidiana. Esto garantiza que haya contribuciones significativas al parámetro de penalización de las restricciones con gradientes pequeños, lo cual debe ser aplicable a las restricciones activas en el punto de solución.

**4.1.2.9 Método de los multiplicadores con direcciones alternantes (ADMM).** Este método se puede ajustar como un proceso desagregado, donde las soluciones individuales colaboran de manera coordinada para alcanzar una solución global del problema. Técnicamente, se considera una combinación que aprovecha los beneficios tanto de la descomposición dual como del método del lagrangiana aumentado para mejorar la convergencia (Ghadimi et al., 2014). Si la función objetivo es separable, el problema se presenta de la siguiente manera:

$$\min f(x) + g(z), \quad (37)$$

$$\text{Sujeto a: } Ax + Bz = c \quad (38)$$

Con variables de decisión  $x \in R^n$  y  $z \in R^m$  donde  $A \in R^{p \times n}$ ,  $B \in R^{p \times m}$  y  $c \in R^p$ . Además, se considera que  $f(\cdot)$  y  $g(\cdot)$  son convexas.

Además, se define el lagrangiano aumentado de la siguiente manera:

$$L_\rho(x, z, y) = f(x) + g(z) + y^T(Ax + Bz - c) + \left(\frac{\rho}{2}\right) \|Ax + Bz - c\|_2^2 \quad (39)$$

En este caso,  $\rho > 0$  es el parámetro de penalización, y representa las variables duales o multiplicadores de Lagrange. Si existe dualidad fuerte entre el problema primal y el dual, las soluciones óptimas  $(x^*, z^*)$  serán iguales en ambos problemas y se alcanzarán con los mismos multiplicadores  $(y^*)$ . El lagrangiano aumentado incorpora un término cuadrático que refuerza el método, mejorando la convergencia incluso sin requerir convexidad estricta en la función objetivo. Además, este término cuadrático facilita la diferenciabilidad del lagrangiano siempre que el problema original lo permita, aunque no es indispensable para encontrar una solución. Teniendo en cuenta lo anterior, el algoritmo ADMM para resolver el problema de dos variables se define de la siguiente manera:

$$x^{k+1} := \underset{x}{\operatorname{argmin}} L_\rho(x, z^k, y^k) \quad (40)$$

$$z^{k+1} := \underset{z}{\operatorname{argmin}} L_\rho(x^{k+1}, z, y^k), \quad (41)$$

$$y^{k+1} := y^k + \rho(Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c). \quad (42)$$

El algoritmo ADMM se compone de tres etapas: minimización de  $x$ , minimización de  $z$  y la actualización de los multiplicadores de Lagrange o variables duales. Al igual que en el método de multiplicadores, el tamaño del paso está relacionado con el término de penalización del lagrangiano aumentado. Este algoritmo altera la minimización del lagrangiano aumentado respecto a las dos variables primales, lo que facilita la búsqueda de soluciones. Además, la separación de  $x$  y  $z$  permite desacoplar las funciones  $f(\cdot)$  y  $g(\cdot)$ .

**4.1.2.9.1 Restricciones de desigualdad.** El método ADMM estándar no contempla restricciones de desigualdad, las cuales son comunes en numerosos modelos de programación lineal y no lineal. A continuación, se presenta una modificación de este método que permite

tratar dichas restricciones mediante la inclusión de variables de holgura y una función de penalización adicional. Considere el problema con la siguiente restricción de desigualdad:

$$\min f(x) \quad (43)$$

$$\text{sujeto a: } Ax \leq c. \quad (44)$$

El problema se expresa en su forma estándar incorporando variables de holgura  $w$  y una función de penalización para los valores negativos de  $w$ , de la siguiente manera:

$$\min f(x) + f_+(w), \quad (45)$$

$$\text{sujeto a: } Ax + w = c. \quad (46)$$

Donde

$$f_+(w) = \begin{cases} C_+ & w < 0 \\ 0 & w \geq 0 \end{cases} \quad (47)$$

La función de penalización  $f_+(w)$  aumenta considerablemente el valor de la función objetivo  $C_+$ , cuando  $w$  asume los valores negativos, ya que esto podría comprometer la factibilidad de la solución. Considerando lo anterior, el nuevo lagrangiano y el algoritmo ADMM se definen de la siguiente manera:

$$\mathcal{L}_{\rho+}(x, y, w) = f(x) + f_+(w) + y^T(Ax + w - c) + \left(\frac{\rho}{2}\right) \|Ax + w - c\|_2^2 \quad (48)$$

Y las iteraciones del algoritmo ADMM

$$x^{k+1} \quad (49)$$

$$x^{k+1} := \underset{x}{\operatorname{argmin}} L_p(x, y^k, w^k), \quad (50)$$

$$w^{k+1} := \max\{0, -Ax^{k+1} + c\}, \quad (51)$$

$$y^{k+1} := y^k + \rho(Ax^{k+1} + w^{k+1} + c) \quad (52)$$

## 4.2 Diseño de la aplicación

### 4.2.1 Identificación de los parámetros a cargar.

La identificación de los parámetros a cargar se incluye:

**4.2.1.1 Perfiles de carga activa.** Se refieren a los patrones de consumo de energía eléctrica a lo largo del tiempo, en términos de potencia activa (kW). Estos perfiles representan la demanda de energía de los distintos nodos de la microrred durante un período de tiempo determinado.

**4.2.1.2 Límites de potencia de los generadores.** Son las restricciones impuestas sobre la potencia máxima que pueden generar los diferentes tipos de generadores presentes en la microrred. Estos límites garantizan que la generación de energía no exceda las capacidades técnicas y operativas de los generadores.

**4.2.1.3 Límites de potencia de las baterías.** Establecen los rangos de potencia máxima que pueden proporcionar las baterías al sistema. Estos límites determinan la capacidad de las baterías para cargar o descargar energía en función de las necesidades de la microrred.

**4.2.1.4 Irradiación solar.** Representa la radiación solar incidente en los generadores fotovoltaicos a lo largo del tiempo.

**4.2.1.5 Velocidad del viento.** Representa la velocidad del viento incidente en los generadores eólicos a lo largo del tiempo.

**4.2.1.6 Voltaje base y potencia base.**

Es el punto de referencia de operación de voltaje y potencia de la microrred.

### 4.2.2 Diseño de la interfaz.

El diseño fue realizado con la herramienta Figma. (Weisheim, 2023) una plataforma eficaz para crear interfaces de usuario. Su facilidad de uso la convierten en una opción

popular entre los equipos de desarrollo.

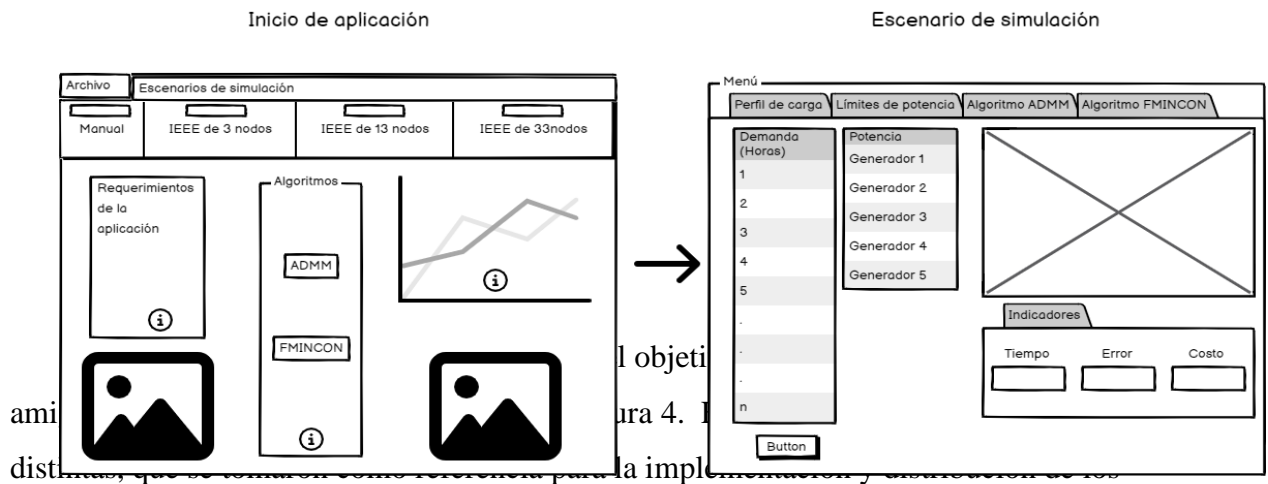


Figura 4. Diseño de la interfaz gráfica

#### 4.2.2.1 Ventana de presentación.

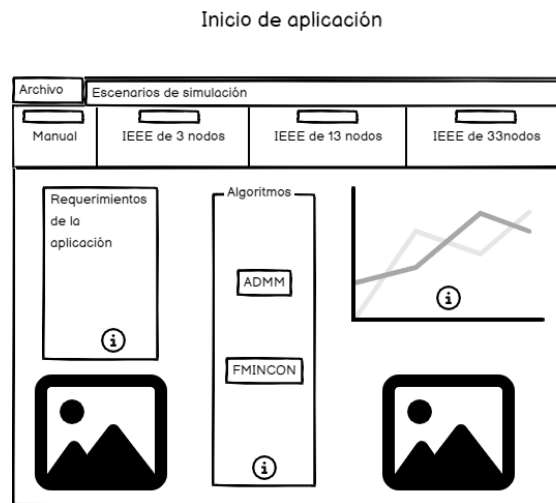


Figura 5. Ventana de presentación

En la Figura 5, se representa la ventana de presentación. Se propuso que el usuario encuentre información relevante sobre la aplicación, como el tipo de algoritmo (ADMM o SQP de fmincon), el nombre de la aplicación y una gráfica que ilustre lo que proporciona la ejecución de los algoritmos, facilitando así la familiarización con su funcionamiento y propósito. La ventana incluye botones organizados estratégicamente para facilitar la interacción con la interfaz, destacando las opciones para elegir entre los escenarios de simulación disponibles. Además, se ha diseñado un botón para acceder al manual de usuario.



#### 4.2.2.2 Ventana del escenario de simulación.

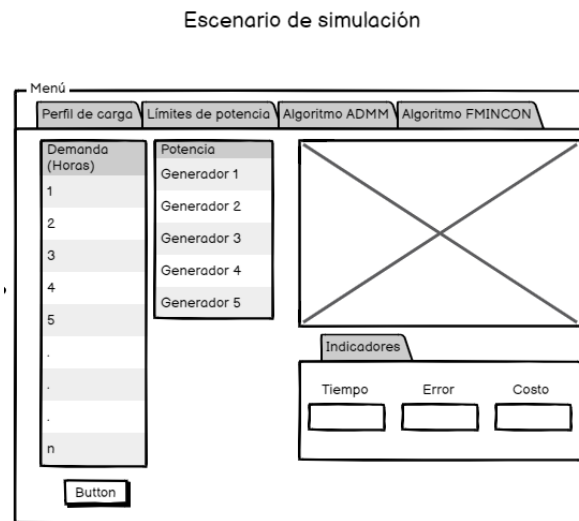


Figura 6. Ventana de escenario de simulación

En la Figura 6, se propuso que el usuario encuentre en la ventana de cada escenario todos los espacios necesarios para simular los algoritmos de control terciario, evitando la navegación entre secciones. En esta ventana, se incluyen la sección de demanda de potencia, los límites de potencia de los generadores y los espacios para la ejecución de los algoritmos. El diseño se adapta a todos los sistemas, ya sean de 3, 13 o 33 nodos. Además, el usuario podrá visualizar gráficos relacionados con la optimización.

#### 4.2.2.3 Definición de paleta de colores.



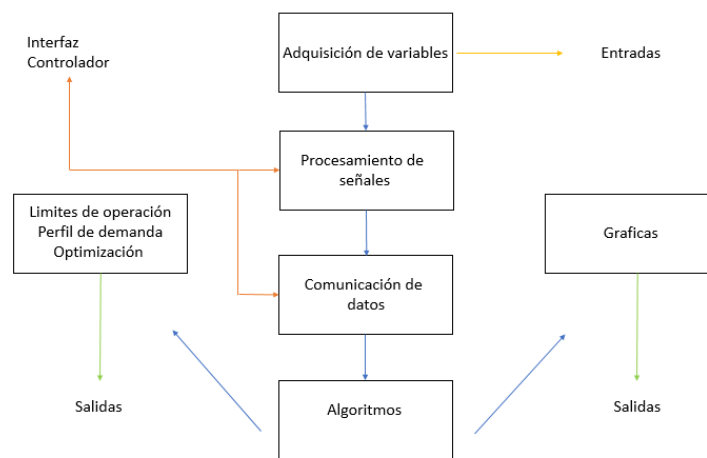
Figura 7. Paleta de colores

En la Figura 7, se observa la paleta de colores elegidos para la aplicación, donde se seleccionó el azul oscuro como color de fondo. Esta elección se fundamenta en la naturaleza

crítica de la información que maneja el sistema; el azul oscuro transmite sensaciones de calma y responsabilidad (Narvaez, 2020) y, en tonalidades más profundas, refuerza la percepción de fuerza y confiabilidad, características esenciales en un entorno donde la precisión y la estabilidad son prioritarias.

Además, se utilizó el gris claro como color secundario para generar un contraste adecuado con el azul, permitiendo que los textos y las gráficas se destaquen claramente.

#### 4.2.3 Diseño del código de la interfaz.



*Figura 8. Diseño del código*

El diseño del código presentado en la Figura 8 se fundamenta en los algoritmos de control terciario, previamente definidos con los parámetros correspondientes. Una vez establecidos estos parámetros, el código se organiza en diferentes fases: primero se obtienen los datos y se procesan; luego, los datos se comunican y almacenan de manera correcta en las variables definidas en el programa para la aplicación de los algoritmos. El proceso interno del programa se representa con líneas azules y rojas. Finalmente, los resultados, el perfil de demanda y la optimización, se despliegan en gráficas e indicadores, marcadas con líneas verdes que representan las salidas. Este diseño asegura una interacción eficiente entre los datos procesados y su visualización.

#### 4.2.4 Implementación en MATLAB/APP Designer.

A continuación, se implementan los algoritmos expuestos en el capítulo 4.1. Cada elemento de la aplicación, desde los cuadros de texto hasta las entradas de datos, se distribuye

utilizando las herramientas proporcionadas por App Designer, lo que facilita la creación y disposición de los componentes necesarios para la interfaz de usuario.

**4.2.4.1 Implementación del algoritmo ADMM.** El código se enfoca en resolver el problema de optimización iterativamente para cualquiera de los sistemas, para cada iteración, se ejecuta la función `fmincon` en seis subproblemas secuenciales, optimizando las variables correspondientes a cada generador y cada batería. A continuación, se detallan los aspectos de la implementación:

**4.2.4.1.1 Variables de decisión.** Las variables de decisión incluyen la potencia activa generada por los generadores y las potencias de carga y descarga de las baterías. Estas variables se optimizan utilizando la herramienta `fmincon` y se almacenan en un vector  $x$ , que contiene los valores óptimos.

**4.2.4.1.2 Ejecución de `fmincon`.** Cada subproblema se resuelve utilizando `fmincon`, que se configura con una función objetivo específica creada en la herramienta `Function Private` de App Designer. Además, se definen las condiciones iniciales  $x_0$ , así como los límites inferiores  $lb$  y superiores  $ub$ , que representan las restricciones de las variables de decisión.

**4.2.4.1.3 Multiplicadores de Lagrange.** Al final de cada iteración, los multiplicadores de Lagrange se actualizan para reflejar el desbalance entre la suma de las potencias de los generadores, las baterías y la demanda. Esta actualización se implementa para cumplir con la restricción de la potencia demandada. El proceso sigue la regla de actualización típica del método ADMM, lo que asegura la convergencia del algoritmo.

**4.2.4.1.4 Configuración de opciones.** La función `fmincon` es configurada con opciones específicas mediante la función `optimoptions`, se define la tolerancia para la función de  $1e-10$  para ajustar la precisión del algoritmo.

**4.2.4.1.5 Medición del tiempo.** Se emplea la función `tic` que inicia un temporizador en segundos y `toc` para leer el tiempo transcurrido, lo que permite medir la duración del proceso de optimización y evaluar la eficiencia del algoritmo.

4.2.4.1.6 *Error de demanda.* Mide la diferencia entre la demanda total de potencia y la suma de la potencia proporcionada por los generadores y las baterías. Este indicador evalúa la capacidad del sistema de satisfacer la demanda en cada instante de tiempo.

Un menor error de demanda significa una mejor correspondencia entre la oferta y la demanda de potencia, indicando que el sistema está operando eficientemente.

4.2.4.1.7 *Costo de generación.* El código calcula el costo total de generación en cada iteración utilizando la función cuadrática u objetivo para cada generador, basada en los coeficientes  $cc$ ,  $bc$ , y  $ac$ , que corresponden a los parámetros de costos asociados a cada generador.

**4.2.4.2 Implementación del algoritmo SQP.** El código implementado se enfoca en resolver el problema de optimización como un único problema de optimización global. Todas las variables de decisión se agrupan en un solo vector  $x_0$ , y se optimizan simultáneamente utilizando la función `fmincon`. Esto implica que se busca una solución óptima considerando todas las variables al mismo tiempo, en lugar de permitir que cada recuso optimice sus propias decisiones de manera independiente.

4.2.4.2.1 *Variables de decisión.* Las variables de decisión incluyen la potencia activa generada por los generadores y las potencias de carga y descarga de las baterías. Estas variables se optimizan utilizando la herramienta `fmincon` y se almacenan en un vector  $x$ , que contiene los valores óptimos.

4.2.4.2.2 *Ejecución de `fmincon`.* La herramienta `fmincon` está configurada para resolver el problema de optimización global utilizando el algoritmo de Programación Cuadrática Suplementaria. Tanto la función objetivo como las restricciones se definen para todo el sistema en su conjunto, garantizando una visión integral de la microrred. Estas variables se inicializan en  $x_0$ , que actúa como una solución inicial desde la cual el algoritmo comenzará su búsqueda para encontrar la opción óptima.

La matriz  $Aeq$  y el vector  $beq$  se configuran para que la suma de las potencias generadas y las potencias de las baterías en cada intervalo de tiempo satisfaga la demanda de potencia. Además, la matriz  $Aeq$  y el vector  $beq$  representan las restricciones de desigualdad que imponen los límites operativos de las baterías, como la capacidad máxima de carga y

descarga. Los límites se definen como inferiores  $lb$  y superiores  $ub$  para cada variable de decisión, asegurando que las potencias generadas y las potencias de las baterías no excedan las capacidades físicas ni los valores permitidos del sistema.

**4.2.4.2.3 Configuración de opciones.** Las opciones implementadas incluyen la selección del algoritmo SQP y un número máximo de 5000 iteraciones, lo que garantiza que el algoritmo tenga suficientes oportunidades para encontrar una solución sin prolongar excesivamente el tiempo de ejecución.

**4.2.4.2.4 Medición del tiempo.** Se emplea la función  $tic$  que inicia un temporizador en segundos y  $toc$  para leer el tiempo transcurrido, lo que permite medir la duración del proceso de optimización y evaluar la eficiencia del algoritmo.

**4.2.4.2.5 Error de demanda.** Mide la diferencia entre la demanda total de potencia y la suma de la potencia proporcionada por los generadores y las baterías. Este indicador evalúa la capacidad del sistema de satisfacer la demanda en cada instante de tiempo.

Un menor error de demanda significa una mejor correspondencia entre la oferta y la demanda de potencia, indicando que el sistema está operando eficientemente.

**4.2.4.2.6 Costo total de generación.** El código calcula el costo total de generación utilizando la función cuadrática u objetivo, basada en los coeficientes  $cc$ ,  $bc$ , y  $ac$ , que corresponden a los parámetros de costos asociados a cada generador.

**4.2.4.2.7 Potencia perdida.** La potencia perdida se calcula utilizando la matriz de conductancia y las tensiones y ángulos de fase de los nodos en el sistema. Las pérdidas se acumulan para cada iteración en el vector  $Plosses$ .

**4.2.4.2.8 Desviación de voltaje.** se calcula como la suma de las desviaciones de las tensiones de cada nodo con respecto a un valor de referencia 1 p.u.

**4.2.4.3 Implementación de la ventana de presentación.** Para la implementación de la ventana de presentación, se utilizó el elemento Panel para organizar la información de la aplicación por secciones. A cada panel se le ingreso su respectivo título y se le aplico el diseño de

cuadrícula (Grid Layout) para ajustar el tamaño de los componentes y la ubicación de los componentes.

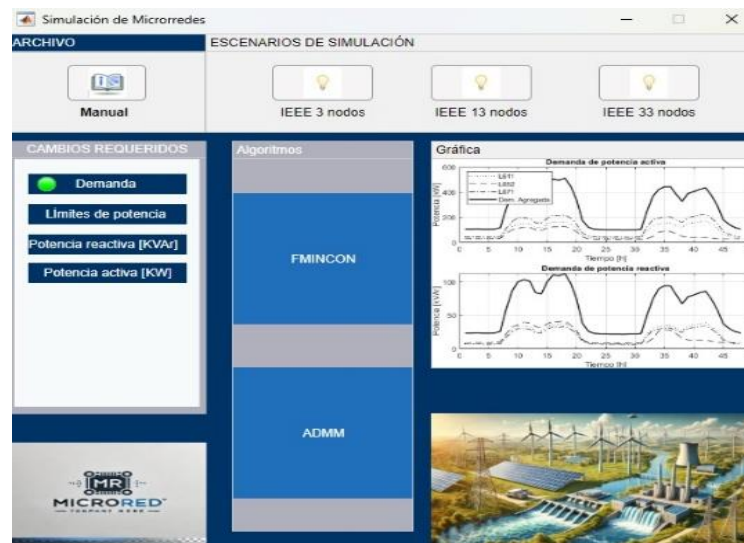


Figura 9. Escenario de trabajo

La primera ventana de la interfaz como se observa en la Figura 9, proporciona una breve introducción de la aplicación, presenta los cambios necesarios para la ejecución de los algoritmos y los algoritmos que se simularan, así como los tres escenarios disponibles para la selección del usuario. Al seleccionar un escenario, el usuario accederá a su respectiva configuración y/o aplicación para interactuar.

**4.2.4.4 Implementación de las ventanas de los escenarios de simulación.** A continuación, se presentan las ventanas correspondientes a cada escenario de simulación, las cuales se ejecutan al seleccionar los botones correspondientes en la ventana de presentación.

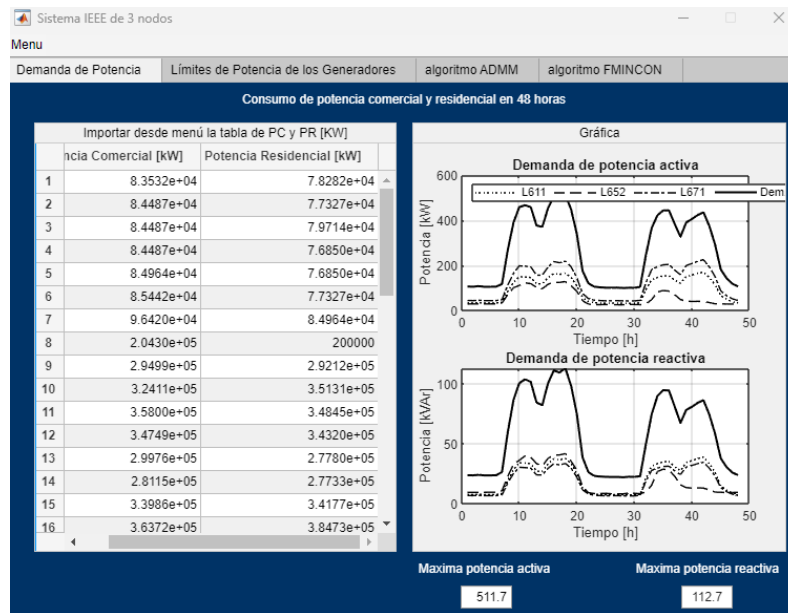


Figura 10. Red IEEE de 3 nodos

Como se observa en la Figura 10, el escenario implementado se creó utilizando la herramienta Tab Group, la cual organiza de izquierda a derecha las pestañas correspondientes a: demanda de potencia, límites de potencia de los generadores, algoritmo ADMM y algoritmo SQP de fmincon. En la primera pestaña, se solicitan los datos del perfil de potencia activa a través de la opción de menú; en la segunda, se ingresan manualmente los límites de potencia de los generadores en tablas diseñadas específicamente para cada variable, utilizando el elemento Table del Diseñador de Aplicaciones. la tercera pestaña ejecuta el algoritmo ADMM, y la cuarta, el algoritmo SQP de fmincon.

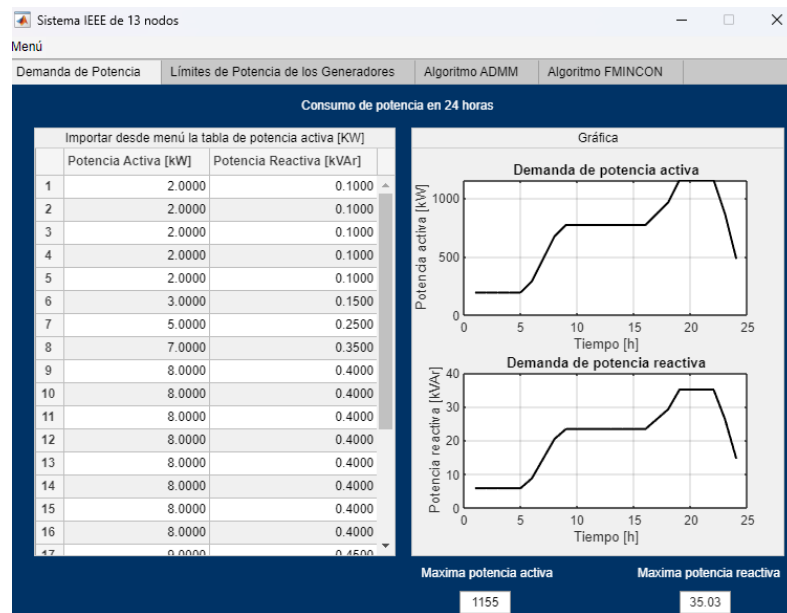


Figura 11. Red IEEE de 13 nodos

La Figura 11 muestra el escenario implementado mediante la herramienta Tab Group, que organiza las pestañas de forma secuencial, de izquierda a derecha. Estas pestañas corresponden a diferentes funciones: la primera recoge los datos del perfil de potencia activa desde la opción menú, la segunda define los límites de potencia de los generadores, la tercera está destinada a la ejecución del algoritmo ADMM, y la cuarta a la del algoritmo SQP de fmicon.



Figura 12. Red IEEE de 33 nodos



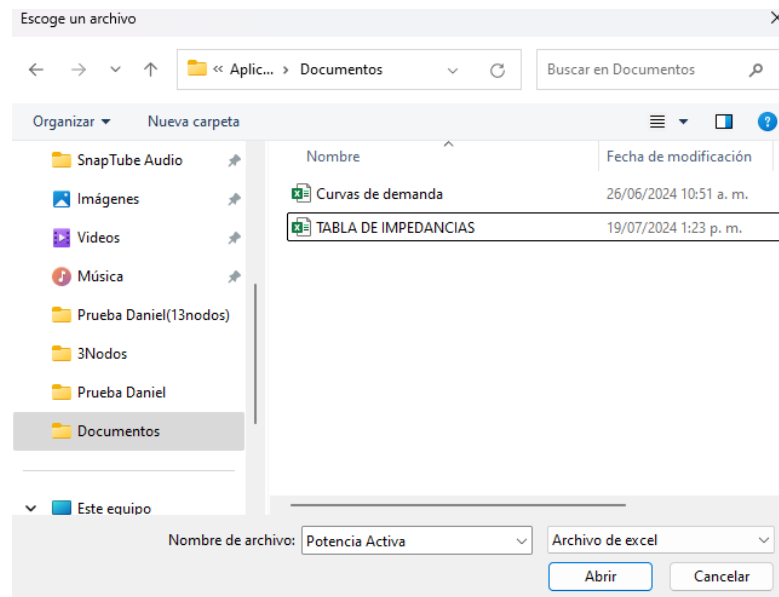
En la Figura 12 se ilustra el escenario implementado utilizando la herramienta Tab Group, la cual organiza las pestañas de izquierda a derecha en un orden lógico. Cada pestaña tiene una función específica: la primera se enfoca en la recolección de datos del perfil de potencia activa desde la opción menú, la segunda establece los límites de potencia para los generadores, la tercera permite ejecutar el algoritmo ADMM, y la cuarta está destinada a la ejecución del algoritmo SQP de fmincon.

### **4.3 Pruebas y resultados de la aplicación.**

En esta sección se demuestra el funcionamiento de la aplicación implementada en la sección anterior, presentando los resultados obtenidos de los algoritmos de optimización para cada uno de los escenarios de simulación. Estos resultados incluirán el tiempo que demora el algoritmo en realizar la optimización, el error de demanda, los costos operativos derivados de la función objetivo al realizar el despacho de potencia activa, así como la desviación de voltaje y las pérdidas de potencia que resultan del despacho de potencia reactiva. Los datos utilizados para las pruebas provienen de los estudios realizados por (Barco-Jimenez et al., 2022) para el escenario de 3 nodos, (Barco-Jimenez et al., 2023) para el escenario de 13 nodos y (Dolatabadi et al., 2021) para el escenario de 33 nodos. Estos estudios incluyen perfiles de potencia de referencia, utilizados para que la generación distribuida pueda compensar la demanda del sistema, y los límites máximos de potencia de cada generador, los cuales se almacenan en la aplicación como restricciones de los algoritmos, junto con los valores base de potencia y voltaje de las microrredes.

#### **4.3.1 Solicitud de datos del perfil de potencia activa.**

Como primera instancia en cada uno de los escenarios de simulación se le pide que ingrese el perfil de demanda a través de un archivo Excel como se muestra en la Figura 13.



*Figura 13. Escoge un archivo Excel*

Como se observa en la Figura 13 se despliega una ventana que permite al usuario navegar por las carpetas del sistema para seleccionar el archivo correspondiente al perfil de demanda. Esta ventana está configurada para mostrar solo archivos de tipo Excel y se activa cuando el usuario pulsa el botón "Archivo" en la barra de menú. A continuación, se presentan las pruebas realizadas a cada uno de los escenarios con sus respectivos datos técnicos.

#### **4.3.2 Prueba 1 - Escenario de 3 nodos.**

Para la prueba 1, se adoptó el escenario de 3 nodos que se detalla en la sección 4.1. Los perfiles de carga, de generación solar y velocidad del viento utilizados en la simulación corresponden a patrones estándar observados en microrredes. (Barco-Jiménez et al., 2022) Los datos son tomados de la universidad de Nariño y del software HOMER no se especifica el tipo de cargas porque el modelo de optimización no necesita el consumo de potencia activa independientemente del tipo de carga.

**4.3.2.1 Perfil de potencia activa.** El perfil de potencia comercial, representa el comportamiento agregado de 3 cargas. A partir de los datos de potencia activa y un factor de potencia, se calcula la potencia reactiva. Cada carga se asocia con un perfil de consumo y se ajusta según su potencia nominal. cómo se observa en la Figura 14.

*Tabla 6. Perfil de potencia activa del sistema IEEE de 3 nodos*

---

**Potencia Activa (kW)**

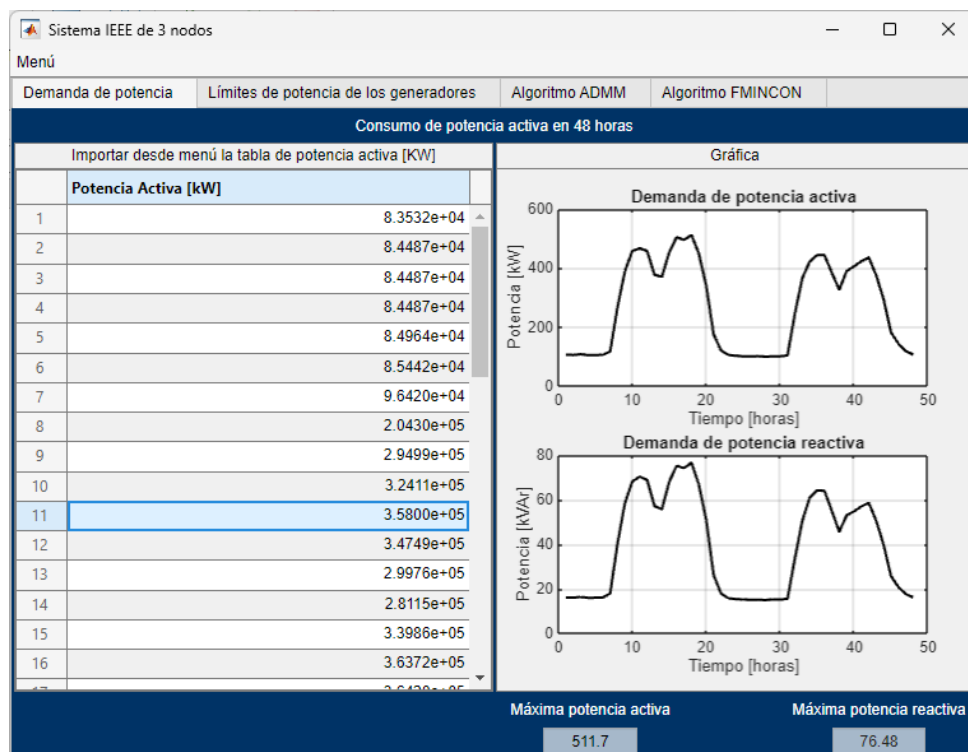
---

83532,21957  
84486,87351  
84486,87351  
84486,87351  
84964,20048  
85441,52745  
96420,04773  
204295,9427  
294988,0668  
324105,0119  
357995,2267  
347494,0334  
299761,3365  
281145,5847  
339856,8019  
363723,1504  
364200,4773  
375178,9976  
318377,0883  
250119,3317  
126014,3198  
82100,23866  
74940,33413  
74940,33413  
76849,642  
73508,35322  
73508,35322  
73031,02625  
78758,94988  
76849,642  
74463,00716  
86873,50835  
138902,148  
240572,7924  
258233,8902  
251073,9857  
205250,5967  
141288,7828  
119809,0692  
116467,7804  
117899,7613  
116467,7804  
102625,2983  
85918,85442  
84964,20048

82577,56563  
83054,8926  
84486,87351

---

En la Tabla 6 se presenta la demanda de potencia comercial del sistema IEEE de 3 nodos. Los datos reflejan las variaciones en la demanda de potencia activa, con registros en intervalos de 48 horas. La tabla muestra cómo la demanda de potencia activa varía a lo largo del tiempo, proporcionando una visión del consumo de potencia del sistema.



*Figura 14. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 3 nodos*

En la Figura 14 se observa cómo los datos solicitados se presentan en la tabla ubicada en el lado izquierdo. Una vez cargados estos datos, la aplicación los procesa y muestra los resultados de la potencia consumida por las cargas en el lado derecho de figura. Esta representación gráfica permite comparar la demanda activa y reactiva para el escenario de 3 nodos.

**4.3.2.2 Límites de potencia.** Los datos de los límites de potencia se almacenan en vectores asociados a las unidades de generación para su posterior uso en la ejecución de los algoritmos.

Tabla 7. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 3 nodos

<b>Límites de potencia</b>	
<b>Potencia activa (kW)</b>	<b>Irradiancia (kW/m<sup>2</sup>)</b>
300	0
700	0
800	0
	0
	0
	0
	0,01403007
	0,04964557
	0,1162287
	0,270656
	0,5732508
	0,8195853
	0,8669851
	0,7021853
	0,7714431
	0,4332146
	0,07083873
	0,08500517
	0,00214631
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0
	0,04082882
	0,2504399
	0,3994499
	0,5471753
	0,8727671
	1,059506
	1,104893
	1,042072
	0,8511454
	0,5576516
	0,3322738
	0,1109278
	0,002693589
	0

0  
0  
0  
0

La Tabla 7 representa los datos que se ingresan en las tablas creadas en la aplicación para el sistema IEEE de 3 nodos. Esta tabla, incluye dos columnas: la primera muestra los valores de potencia activa en kW de los generadores, mientras que la segunda columna detalla los valores de irradiancia en kW/m<sup>2</sup> correspondientes a un intervalo de 48 horas.

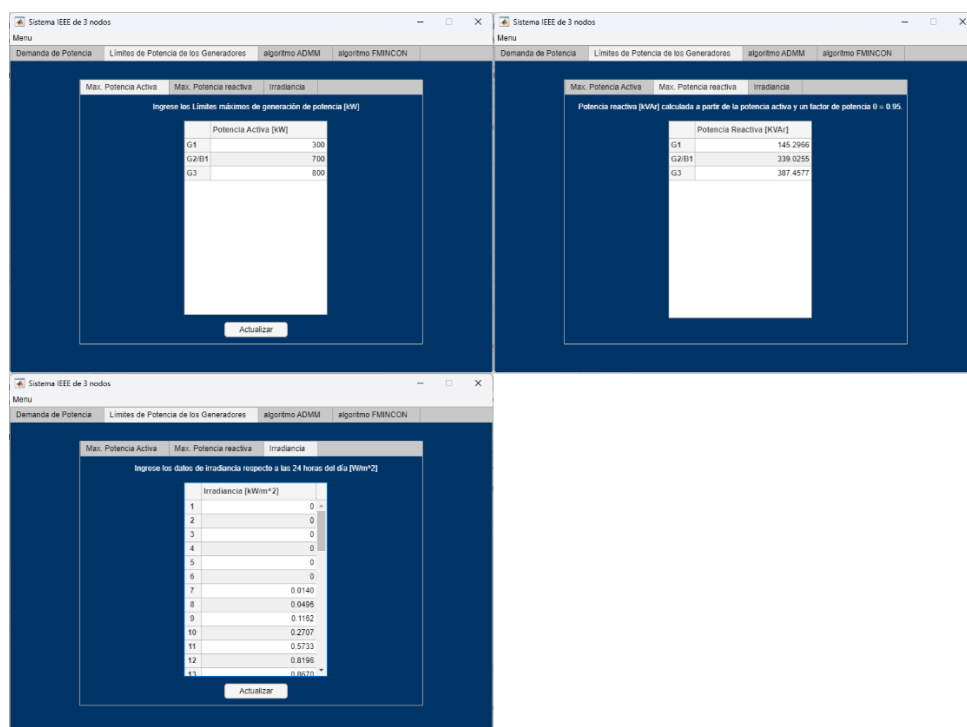


Figura 15. Límites de potencia de los generadores del Sistema IEEE de 3 nodos

En la Figura 15 se presenta el proceso de ingreso de datos para el sistema IEEE de 3 nodos. Esta figura ilustra cómo se introducen estos datos en las variables del sistema, que son la potencia activa y la irradiancia. Es importante destacar que la potencia reactiva se calcula a partir de la potencia activa, utilizando un factor de potencia de 0.95.

**4.3.2.3 Simulación del algoritmo ADMM.** La ejecución del algoritmo ADMM proporciona el despacho de la potencia activa, como se observa a continuación.

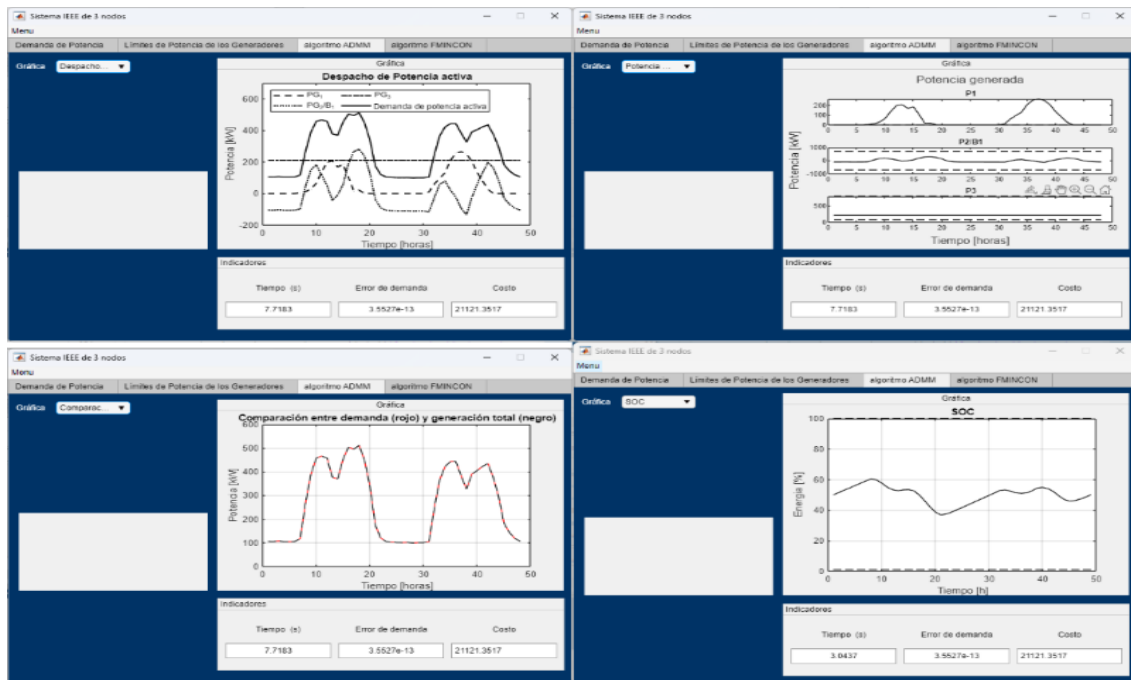


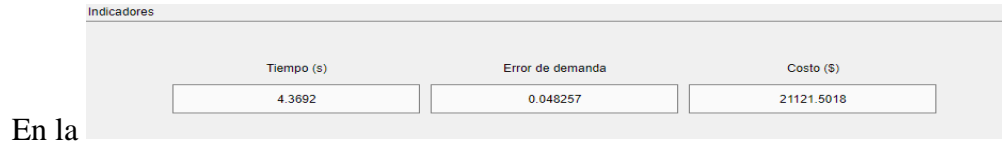
Figura 16. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 3 nodos

En la pestaña del algoritmo ADMM, como se observa en la Figura 16 el usuario inicia la optimización del sistema después de ingresar los datos solicitados. Como resultado, se generan gráficas que muestran el despacho de potencia de los generadores para suplir la demanda del sistema. Estas gráficas incluyen el despacho de potencia activa (esquina superior izquierda), la potencia generada por cada generador manteniéndose entre los límites (esquina superior derecha), y la comparación entre la demanda y la generación (esquina inferior izquierda), donde la suma de las potencias generadas se ajusta a la demanda requerida por el sistema. Además, se visualiza el porcentaje de carga y descarga de las baterías (esquina inferior derecha).

**4.3.2.4 Indicadores del algoritmo ADMM.** Tras la simulación, se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda y costo, como se muestra a continuación.

Indicadores		
Tiempo (s)	Error de demanda	Costo (\$)
4.3692	0.048257	21121.5018

Figura 17. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 3 nodos



En la

Figura 17, se observa el valor de cada uno de los indicadores, los cuales se muestran en el componente EditField del diseñador de aplicaciones.

**4.3.2.5 Simulación del algoritmo SQP de fmincon.** La ejecución del algoritmo SQP proporciona el despacho de potencia reactiva como se muestra a continuación.

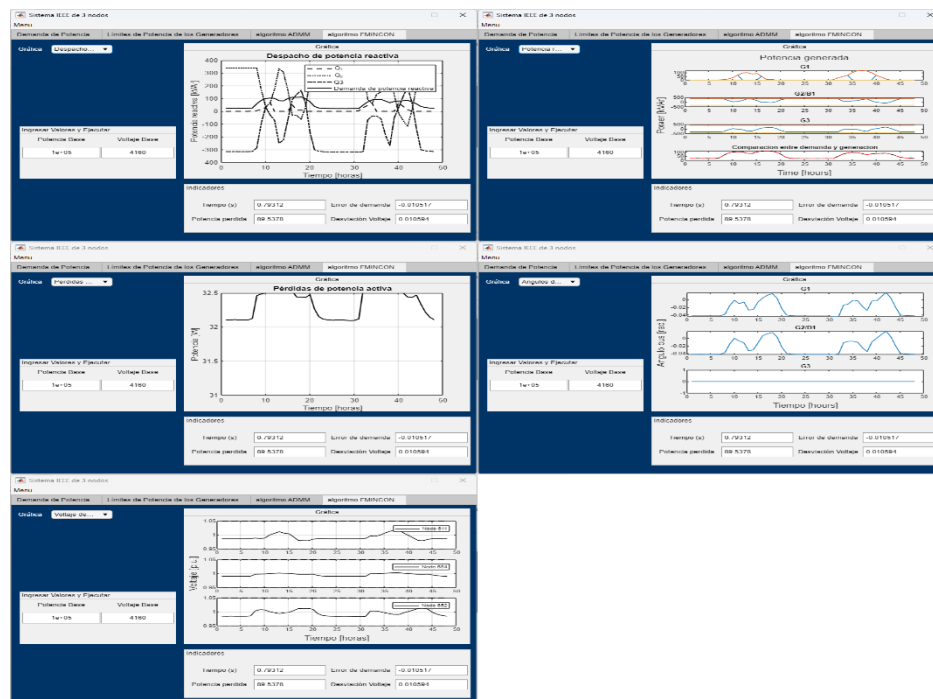


Figura 18. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 3 nodos

Como se puede notar en la Figura 18, se obtiene las gráficas del despacho de potencia reactiva (esquina superior derecha), la generación de potencia de los generadores con sus respectivos límites (esquina superior derecha), la desviación de voltaje en los nodos donde se encuentran los generadores (esquina inferior izquierda), el ángulo de los buses (en el centro de la columna derecha) y las pérdidas de potencia (en el centro de la columna izquierda).

**4.3.2.6 Indicadores del algoritmo SQP de fmincon.** Tras la ejecución del algoritmo SQP se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda, potencia perdida y desviación de voltaje como se observa a continuación.



Costo de operación		Indicadores	
Costo	21121	Tiempo (s)	0.37447
		Potencia perdida	89.4465
		Error de demanda	4.2633e-13
		Desviación de voltaje	0.012196

Figura 19. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 3 nodos.

En la Figura 19, se observan los valores de los indicadores obtenidos en la simulación del algoritmo SQP, los cuales se muestran en el componente EditField del diseñador de aplicaciones.

#### 4.3.3 Prueba 2 – Escenario de 13 nodos.

Para la prueba 2, se adoptó el escenario de simulación de 13 nodos descrito en la sección 4.1. Los perfiles de potencia son datos reales del consumo eléctrico que se hizo en una semana en un campus universitario de la universidad de Nariño. En cuanto a la localización geográfica, los perfiles de irradiancia solar y velocidad del viento corresponden a datos medidos en junio de 2021 en una estación meteorológica ubicada en Pasto, Colombia, indicando que el escenario se basa en condiciones reales de la región (Barco-Jimenez et al., 2023).

**4.3.3.1 Perfil de potencia.** El perfil de potencia se utiliza para representar la demanda de energía activa y reactiva de las cargas a lo largo del tiempo. Este perfil permite a la aplicación calcular y analizar cómo varía la energía requerida por los dispositivos conectados, facilitando la planificación y gestión del suministro eléctrico.

Tabla 8. Demanda de potencia activa del sistema IEEE de 13 nodos

Potencia activa (kW)
2
2
2
2
2
2
3
5
7
8
8
8
8

---

8  
8  
8  
8  
9  
10  
12  
12  
12  
12  
9  
5

---

En la Tabla 8 se muestra la demanda de potencia activa del sistema IEEE de 13 nodos. Los datos, registrados en intervalos de 24 horas, muestran una demanda de potencia que varía entre 2kW y 12kW. La tabla ilustra cómo la demanda fluctúa a lo largo del tiempo, con valores que van desde niveles bajos de 2kW hasta picos de 12kW.

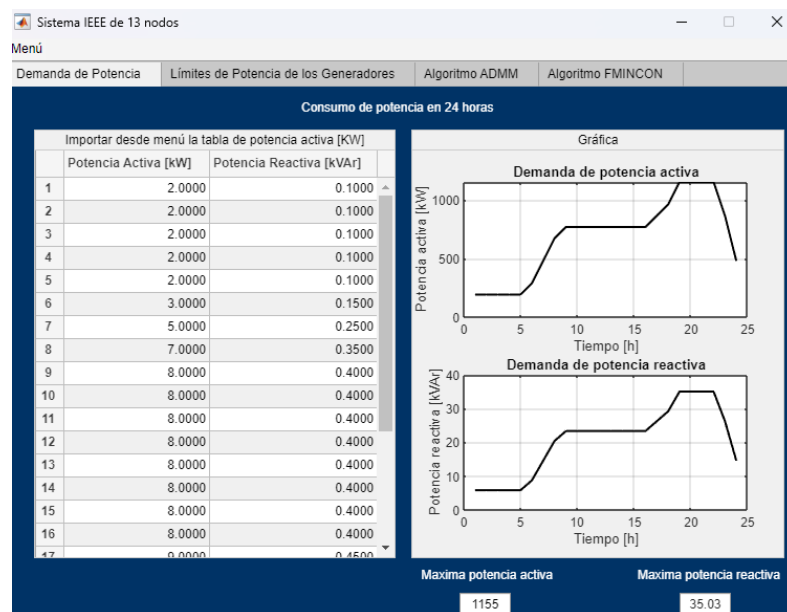


Figura 20. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 13 nodos

La Figura 20 ilustra la presentación de los datos cargados en la tabla del lado izquierdo. Tras el procesamiento de estos datos por parte de la aplicación, los resultados se visualizan gráficamente en el lado derecho de la figura. Esta visualización permite analizar y comparar la demanda activa y reactiva en una red compuesta por 13 nodos.

**4.3.3.2 Límites de potencia.** Los datos de los límites de potencia se almacenan en vectores asociados a las unidades de generación para su posterior uso en la ejecución de los algoritmos.

*Tabla 9. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 13 nodos*

<b>Límites de potencia del sistema IEEE de 13 nodos</b>			
<b>Potencia activa (kW)</b>	<b>Potencia reactiva (kVAr)</b>	<b>Irradiancia (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad del viento (km/s)</b>
1200	1200	0,00003	0,01219289
456	456	0,00003	0,01238444
843	0	0,00003	0,01112483
385	385	0,00003	0,01368581
306	306	0,00003	0,01518123
		0,00003	0,01721022
		0,03171638	0,01268889
		0,2409234	0,01391604
		0,409018	0,0181489
		0,5708895	0,02364566
		0,8906811	0,01936009
		1,076012	0,01524475
		1,120292	0,01820654
		1,065116	0,01489081
		0,8877476	0,01773609
		0,6009433	0,01775042
		0,3664663	0,01560482
		0,1322664	0,01964967
		0,005935645	0,02579841
		0,00003	0,02978521
		0,00003	0,02226133
		0,00003	0,02296821
		0,00003	0,0216592
		0,00003	0,01435372

La Tabla 9 presenta los datos correspondientes al sistema IEEE de 13 nodos durante un intervalo de 24 horas. La tabla está organizada en cuatro columnas: la primera muestra los valores de potencia activa en kW de los generadores mencionados en la sección 4.1.2, la segunda columna presenta los valores de potencia reactiva en kVAr, la tercera columna detalla los valores de irradiancia en kW/m<sup>2</sup> y la cuarta columna muestra la velocidad del viento en un intervalo de 24 horas.

Figura 21. Límites de potencia de los generadores del sistema IEEE de 13 nodos

En la Figura 21 se presenta el proceso de ingreso de datos para el sistema IEEE de 13 nodos, cuyos detalles se encuentran en la Tabla 8. Esta figura ilustra cómo se introducen los datos en las variables del sistema, que son la potencia activa, la potencia reactiva, la irradiancia y la velocidad del viento. A diferencia del caso anterior, en esta figura también se ingresa la potencia reactiva directamente.

**4.3.3 Simulación del algoritmo ADMM.** La ejecución del algoritmo ADMM proporciona el despacho de la potencia activa, como se observa a continuación.

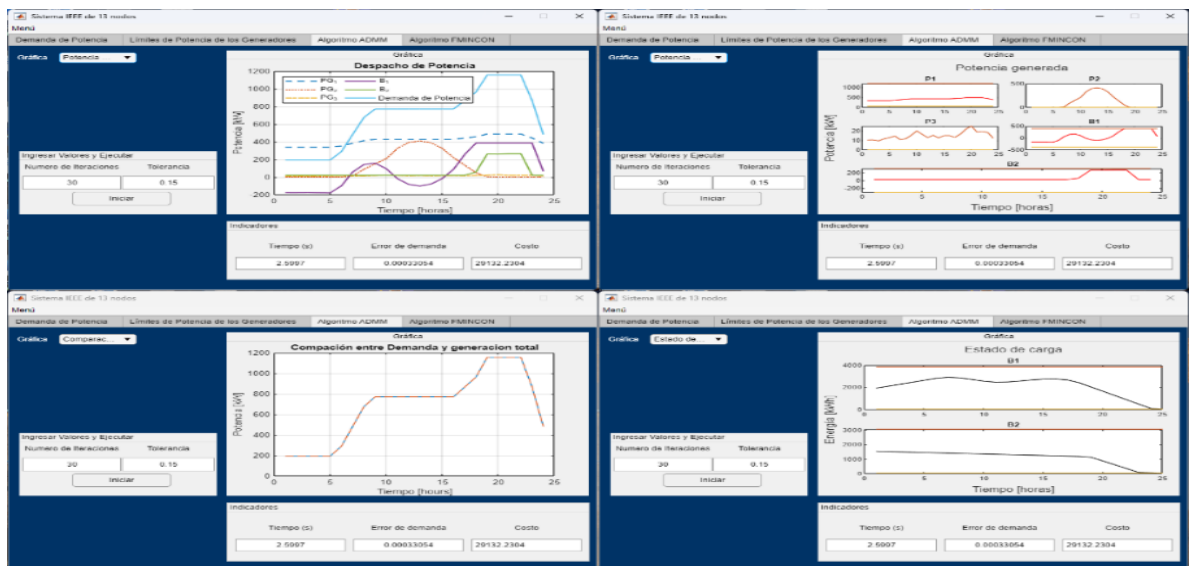


Figura 22. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 13 nodos

La Figura 22 presenta las gráficas relacionadas con la red IEEE de 13 nodos. Estas gráficas muestran el despacho de potencia, que ilustra cómo se distribuye la generación de la

potencia a lo largo del día; también se observa la comparación entre la demanda total y la generación total de la potencia, permitiendo identificar desequilibrios entre oferta y demanda; y el estado de carga, que refleja el nivel de carga y descarga en cada batería. Juntas, estas gráficas proporcionan una visión del desempeño del algoritmo, permitiendo evaluar la eficiencia en la distribución de energía y el equilibrio entre la demanda y la generación.

**4.3.3.4 Indicadores del algoritmo ADMM.** Tras la simulación, se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda y costo, como se muestra a continuación.

Tiempo t(s)	Error de demanda	Costo
1.9668	7.9581e-13	28852.135

Figura 23. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 13 nodos

En la Figura 23, se observa el valor de cada uno de los indicadores, los cuales se muestran en el componente EditField del diseñador de aplicaciones.

**4.3.3.5 Simulación del algoritmo SQP de fmincon.** La ejecución del algoritmo SQP en este escenario también proporciona el despacho de potencia activa como se muestra a continuación.



Figura 24. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 13 nodos

En la Figura 24 el usuario inicializa la optimización utilizando el método SQP, el cual facilita la cuantificación de factores como el tiempo transcurrido, el error en la demanda y el costo de operación en dólares para el sistema de 13 nodos. Para este sistema no se disponía de la información necesaria para realizar el despacho de potencia reactiva, lo que resultó en la ausencia de ciertos datos. Por lo tanto, se realizó el despacho de potencia activa obteniendo los resultados vistos.

**4.3.3.6 Indicadores del algoritmo SQP de fmincon.** Tras la ejecución del algoritmo SQP se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda, potencia perdida y desviación de voltaje como se observa a continuación.

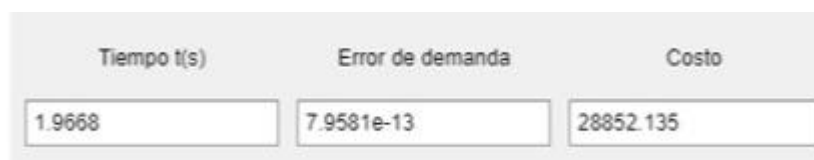


Figura 25. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 13 nodos

En la Figura 25, se observa el valor de cada uno de los indicadores, los cuales se

muestran en el componente EditField del diseñador de aplicaciones.

#### 4.3.4 Prueba 3 – escenario de 33 nodos.

Para la prueba 3, se adoptó el escenario de simulación de 33 nodos descrito en la Sección 4.1. El perfil de potencia y carga horaria se basa en datos de referencia del sistema IEEE de 33 nodos mejorado. Al igual que en el sistema IEEE de 13 nodos, se utilizan datos obtenidos de la estación meteorológica de la ciudad de Pasto para los generadores fotovoltaicos y eólicos. Los tipos de cargas son AC ya que se obtiene el perfil de potencia reactiva. (Dolatabadi et al., 2021).

**4.3.4.1 Perfil de potencia.** El perfil de potencia se utiliza para reflejar cómo cambia la demanda de energía activa y reactiva de las cargas a lo largo del tiempo. A través de este perfil, la aplicación puede calcular y analizar las fluctuaciones de la potencia requerida por los dispositivos conectados.

*Tabla 10. Demanda de potencia activa del sistema IEEE de 33 nodos*

<b>Potencia activa (kW)</b>
2909
2741
2686
2630
2596
2518
2462
2630
2976
2976
3133
3245
3301
3402
3301
3301
3267
3133
3211
3625
3715
3625
3581

La El perfil de potencia se utiliza para reflejar cómo cambia la demanda de energía activa y reactiva de las cargas a lo largo del tiempo. A través de este perfil, la aplicación puede calcular y analizar las fluctuaciones de la potencia requerida por los dispositivos conectados.

Tabla 10 presenta la demanda de potencia activa del sistema IEEE de 33 nodos. Los datos, registrados cada 24 horas, varían entre 2462 kW y 3645 kW. La tabla muestra cómo la demanda fluctúa a lo largo del tiempo, con picos que alcanzan hasta 3715 kW y valores mínimos de 2518 kW.



Figura 26. Perfil de demanda de potencia red IEEE de 33 nodos

La Figura 26 muestra cómo los datos cargados se presentan en la tabla ubicada a la izquierda. Una vez que la aplicación procesa estos datos, los resultados se exhiben de manera gráfica en el lado derecho de la figura. Esta visualización gráfica no solo facilita la comparación de la demanda activa y reactiva, sino que también resalta las fluctuaciones y patrones en una red de 33 nodos, permitiendo un análisis detallado de la eficiencia y comportamiento del sistema.

#### 4.3.4.2 Límites de potencia.

Tabla 11. Límites de potencia de los generadores de la red IEEE de 33 nodos



<b>Límites de potencia del sistema IEEE de 33 nodos</b>		
<b>Potencia activa (kW)</b>	<b>Irradiancia (kW/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Velocidad del viento (km/s)</b>
4000	0,00003	0,01219289
200	0,00003	0,01238444
200	0,00003	0,01112483
200	0,00003	0,01368581
200	0,00003	0,01518123
	0,00003	0,01721022
	0,03171638	0,01268889
	0,2409234	0,01391604
	0,409018	0,0181489
	0,5708895	0,02364566
	0,8906811	0,01936009
	1,076012	0,01524475
	1,120292	0,01820654
	1,065116	0,01489081
	0,8877476	0,01773609
	0,6009433	0,01775042
	0,3664663	0,01560482
	0,1322664	0,01964967
	0,005935645	0,02579841
	0,00003	0,02978521
	0,00003	0,02226133
	0,00003	0,02296821
	0,00003	0,0216592
	0,00003	0,01435372

La

Tabla 11 muestra los datos correspondientes al sistema IEEE de 33 nodos. Los límites de potencia para los generadores de las tres microrredes son esenciales para asegurar que no se excedan durante la simulación, manteniéndose dentro del rango. La tabla se organiza en tres columnas: la primera columna presenta los valores de potencia activa en kW de los generadores descritos en la sección 4.1.3, la segunda columna indica los valores de irradiancia en kW/m<sup>2</sup>, y la tercera columna muestra la velocidad del viento en km/s. Cabe destacar que los datos de irradiancia y velocidad del viento se registran solo para intervalos específicos dentro del período total de 24 horas.

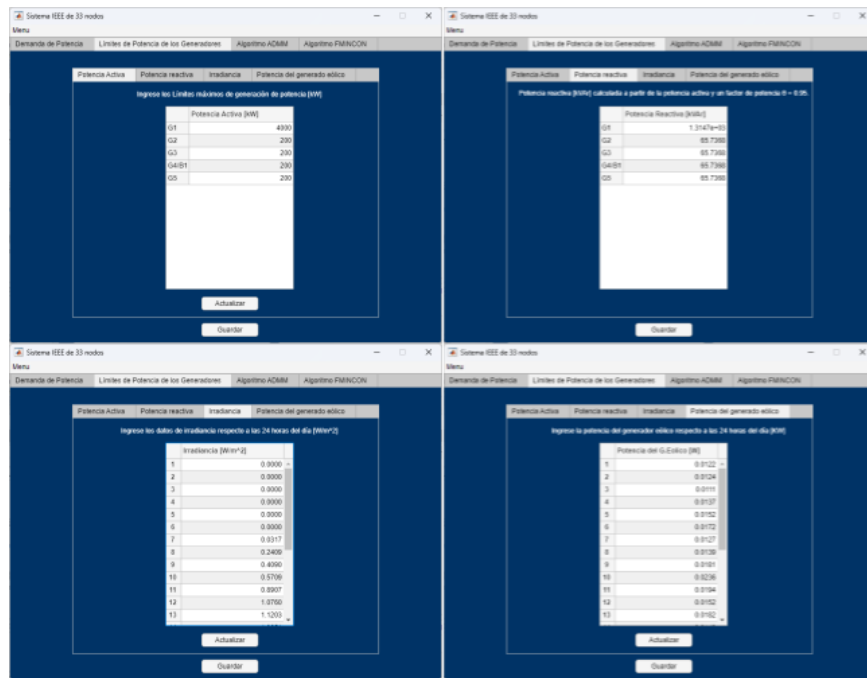


Figura 27. Límites de potencia de los generadores del sistema IEEE de 33 nodos

En la Figura 27 se presenta el proceso de ingreso de datos para el sistema IEEE de 33 nodos, cuyos detalles se encuentran en la Tabla 9. Esta figura ilustra cómo se introducen los datos en las variables del sistema, que son la potencia activa, la irradiancia y la velocidad del viento. En este caso, la potencia reactiva también es calculada a partir de la potencia activa de los generadores.

**4.3.4.3 Simulación algoritmo ADMM.** La ejecución del algoritmo ADMM proporciona el despacho de la potencia activa, como se observa a continuación.

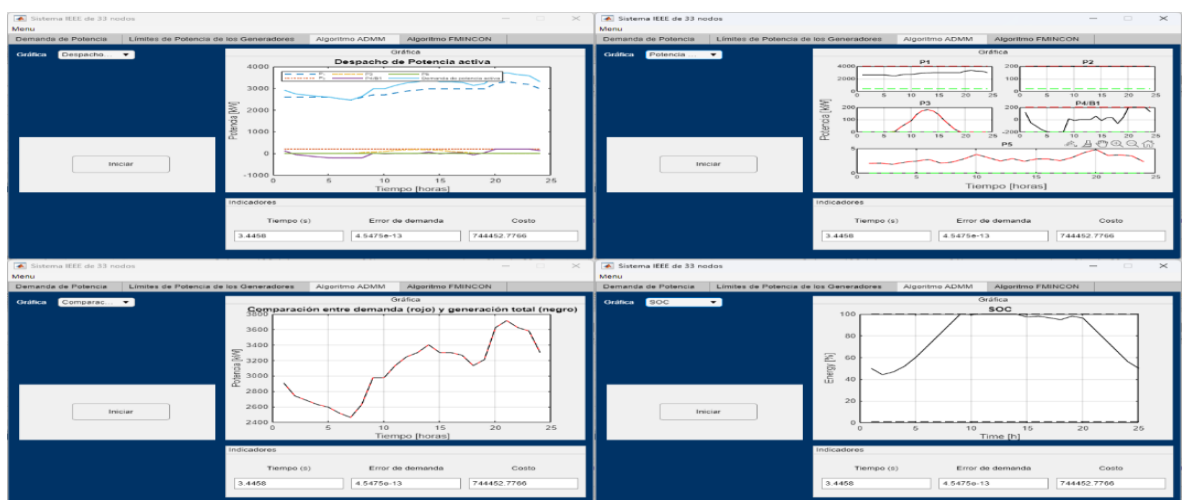


Figura 28. Algoritmo ADMM del sistema IEEE de 33 nodos

La Figura 28 muestra gráficas que describen el comportamiento de la red IEEE de 33 nodos a lo largo de 24 horas. En ellas se puede observar cómo se distribuye la energía generada por cada generador, y cómo estos contribuyen a satisfacer la demanda de energía. Además, se comparan la demanda y la generación de energía, lo que permite identificar posibles desequilibrios entre oferta y demanda. También se presenta el estado de las baterías, detallando su ciclo de carga y descarga a lo largo del día. Estas gráficas brindan una visión clara de cómo los generadores gestionan el despacho de potencia para mantener el equilibrio en la red, permitiendo evaluar tanto la eficiencia en la distribución de energía como la capacidad de respuesta ante la demanda.

**4.3.4.4 Indicadores del algoritmo ADMM.** Tras la simulación, se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda y costo, como se muestra a continuación.

Indicadores		
Tiempo (s)	Error de demanda	Costo (\$)
20.7064	0.0021535	744484.4721

*Figura 29. Indicadores del algoritmo ADMM para el escenario de 33 nodos*

En la Figura 29, se observa el valor de cada uno de los indicadores, los cuales se muestran en el componente EditField del diseñador de aplicaciones.

**4.3.4.5 Simulación del algoritmo SQP de fmincon.** La ejecución del algoritmo SQP proporciona el despacho de potencia reactiva como se muestra a continuación.



Figura 30. Algoritmo SQP de fmincon del sistema IEEE de 33 nodos

En la Figura 30 se observa que el usuario eligió el algoritmo SQP de fmincon, lo que permitió una representación precisa de los datos, como la desviación de voltaje, el ángulo de los buses y las pérdidas de potencia. Esta sección facilita un análisis detallado del comportamiento de los generadores, especialmente en su respuesta a la compensación de la demanda de potencia reactiva. Además, se puede visualizar las variaciones de voltaje, pérdida de potencia y los ángulos en radianes de los buses donde están ubicados los generadores, lo que permite un estudio más completo del sistema.

**4.3.4.6 Indicadores algoritmo SQP de fmincon.** Tras la ejecución del algoritmo SQP se obtienen los indicadores de tiempo, error de demanda, potencia perdida y desviación de voltaje como se observa a continuación.

Costo de operación		Indicadores	
Costo (\$)	744453	Tiempo (s)	0.87458
		Potencia perdida	1982.7862
		Error de demanda	1.9688e-06
		Desviación de voltaje	8.4097e-07

Figura 31. Indicadores del algoritmo SQP para el escenario de 33 nodos

En la Figura 31 se observa los indicadores arrojados en la simulación del algoritmo SQP los cuales se muestran en el componente del diseñador de aplicaciones EditField.

#### 4.4 Eficacia y precisión de los algoritmos simulados en la aplicación

En esta sección se compararán los algoritmos ADMM y SQP de fmincon con sus respectivos indicadores obtenidos en las simulaciones de los sistemas IEEE de 3,13 y 33 nodos, evaluando su desempeño, eficacia y precisión.

##### 4.4.1 Resultados del algoritmo ADMM.

Como se observó en el capítulo anterior, se obtuvieron diferentes resultados en los sistemas de simulación, los cuales influyeron en el funcionamiento de la aplicación.

*Tabla 12. Indicadores del algoritmo ADMM para los sistemas IEEE de 3,13 y 33 nodos.*

Escenario	ADMM		
	Tiempo (s)	Error de demanda	costo (\$)
Sistema IEEE de 3 nodos	4.3692	0.048257	21121,5018
Sistema IEEE de 13 nodos	2,5997	0,00033054	29132,2304
Sistema IEEE de 33 nodos	20.7064	0,0021535	744484,4721

La Tabla 12 muestra los resultados obtenidos para los 3 escenarios de simulación utilizando El algoritmo ADMM. El primero es el tiempo en segundos que tomó el algoritmo para llegar a la solución óptima. El segundo indicador, el error de demanda y el tercer indicador es el costo total de la generación de potencia activa para satisfacer la demanda. Este costo se expresa en dólares.

ADMM presenta un tiempo de cálculo creciente con el tamaño del sistema, desde 4.37 segundos en el sistema de 3 nodos hasta 20.71 segundos en el de 33 nodos. Esta tendencia se debe a la naturaleza distribuida de ADMM, que actualiza las variables de forma secuencial en cada iteración, lo que resulta en tiempos más largos para redes más grandes.

ADMM mantiene errores de demanda bajos en todos los sistemas, aunque estos son notablemente superiores a los obtenidos con SQP (Tabla 13).

Los costos aumentan con el tamaño del sistema, pasando de \$21,121 en el sistema de 3 nodos a \$744,484 en el de 33 nodos. Este incremento es predecible dado el mayor requerimiento de generación en sistemas más grandes.

#### 4.4.2 Resultados del algoritmo SQP de fmincon.

A diferencia del algoritmo ADMM, este algoritmo se implementó para el despacho de potencia reactiva en los escenarios de 3 y 33 nodos, y para el despacho de potencia activa en el escenario de 3 nodos debido a la falta de información de la red.

Los resultados obtenidos para el algoritmo SQP son los siguientes y serán analizados a continuación:

Tabla 13. Indicadores del algoritmo SQP de fmincon

Escenarios	SQP				
	Tiempo (s)	Error de demanda	Costo (\$)	Perdida de Potencia	Desviación de voltaje
Sistema IEEE de 3 nodos	0,37447	4,2633E-13	21121	89,4465	0,0105594
Sistema IEEE de 13 nodos	1,9668	7,96E-13	29132,2304	-	-
Sistema IEEE de 33 nodos	0.87458	1,9688E-6	744453	1982,7862	8,41E-07

La Tabla 13 se basa en los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo SQP de fmincon en el capítulo anterior, centrándose en indicadores como el tiempo de ejecución, el error de demanda, el costo, las pérdidas de potencia y la desviación de voltaje. Para los sistemas de 3 y 33 nodos, se incluyen variables adicionales, ya que, utilizando los datos de las admitancias de las redes, es posible calcular tanto las desviaciones de voltaje como la potencia perdida en las líneas.

SQP muestra tiempos de cálculo significativamente más bajos en comparación con ADMM. En el sistema de 3 nodos, SQP tarda solo 0.37 segundos, y en el sistema de 33 nodos, 0.87 segundos, lo cual se atribuye a su enfoque centralizado que optimiza todas las variables simultáneamente.

SQP obtiene errores de demanda notablemente más bajos que ADMM en todos los sistemas, siendo especialmente preciso en los sistemas de 3 y 13 nodos. Este bajo error indica una excelente capacidad de SQP para satisfacer la demanda.

Al igual que en ADMM, el costo aumenta con el tamaño del sistema, aunque los valores son similares para ambos algoritmos, sugiriendo una eficiencia económica comparable.

SQP muestra una pérdida de potencia considerable en el sistema de 33 nodos. La

desviación de voltaje es baja en todos los casos, con  $8.41E-07$  en el sistema de 33 nodos, reflejando una buena estabilidad de voltaje en el sistema.

#### **4.4.3 Análisis de los indicadores proporcionados por los algoritmos SQP y ADMM para el escenario de 3 nodos.**

En el sistema de 3 nodos, el algoritmo SQP es significativamente más rápido que ADMM, con un tiempo de ejecución de 0.37 segundos frente a 4.37 segundos de ADMM, siendo casi 10 veces más rápido. Esta eficiencia se debe al enfoque centralizado de SQP, que le permite optimizar todas las variables simultáneamente.

En cuanto al error de demanda, SQP obtiene un valor casi nulo ( $4.26E-13$ ) en comparación con el 0.0483 de ADMM, indicando una precisión significativamente mayor en el ajuste de la demanda.

SQP muestra una pérdida de potencia de 89.45, considerablemente baja frente a la demanda total del sistema.

Finalmente, La desviación de voltaje en SQP es baja 0.0106 obteniendo un buen resultado.

Para el sistema de 3 nodos, SQP se destaca por ser más rápido y preciso en términos de error de demanda, mientras que ADMM, aunque más lento, ofrece una precisión aceptable sin presentar pérdidas de potencia tan significativas.

#### **4.4.4 Análisis de los indicadores proporcionados por los algoritmos SQP y ADMM para el escenario de 13 nodos.**

El algoritmo SQP es más rápido que ADMM en este escenario, con un tiempo de ejecución de 1.9668 segundos frente a los 2.5997 de ADMM. Aunque SQP muestra una mejora en términos de tiempo, esta ventaja no es tan significativa dado el tamaño de un sistema de tamaño de 13 nodos.

En cuanto al error de demanda, SQP es más preciso que ADMM, con un valor de  $7.96E-13$  frente a 0.00033054 en ADMM. Esta precisión refleja la capacidad de SQP para satisfacer mejor la demanda de potencia activa, lo que resalta su superioridad en este aspecto.

El costo de operación es idéntico para ambos algoritmos, con un valor de \$29,132.2304. Esto demuestra que, a pesar de sus diferencias en tiempo de ejecución y precisión, ambos algoritmos logran optimizar el sistema con el mismo costo, lo cual es un indicador importante de su eficiencia económica.

En definitiva, para el sistema de 13 nodos, SQP es más rápido y preciso que ADMM,

logrando el mismo costo operativo. Esta combinación de rapidez y exactitud hace que SQP sea una opción más adecuada en este escenario.

#### 4.4.5 Análisis de los indicadores proporcionados por los algoritmos SQP y ADMM para el escenario de 33 nodos.

En términos de tiempo de ejecución, el tiempo de ejecución de **SQP** es de 0.87 segundos, considerablemente menor que los 20.71 segundos de ADMM, lo que resalta su ventaja en eficiencia temporal.

Respecto al error de demanda, ADMM muestra un valor de 0.00215. Aunque este error no es tan preciso como el de SQP con un valor de  $1.97E-6$ , sigue siendo bajo. Esto indica que SQP mantiene una buena precisión en el ajuste de la demanda.

La pérdida de potencia reportada por SQP es de 1982.7862, lo que representa una cantidad considerable de energía perdida en el sistema.

Finalmente, la desviación de voltaje en SQP es de  $8.41E-07$ , una cifra baja que refleja un excelente control del voltaje dentro del sistema. Esta baja desviación indica que el sistema mantiene un voltaje estable.

##### 4.4.5.1 Análisis de la experiencia del usuario.

La encuesta se realizó a 5 estudiantes de la universidad Cesmag pertenecientes a la carrera de ingeniería electrónica, los cuales estuvieron dispuestos a experimentar el manejo de la aplicación. La encuesta se basa en 7 preguntas de las cuales tienen un calificativo de, deficiente, malo, regular, bueno y excelente. Las preguntas de la encuesta son facilidad de uso, tiempo de respuesta de la aplicación, intuición del diseño, información legible, funcionalidad, estabilidad de la aplicación, valoración general. La encuesta realizada se presenta a continuación:

Tabla 14. Experiencia de usuario

Pregunta	Leidy Marisol Gómez	Jairo Guzmán	Andrés Tello	Jaime Cabrera	Juan Portilla
Facilidad de uso	Excelente	Bueno	Bueno	Excelente	Excelente
Tiempo de respuesta de la aplicación	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno	Bueno
Intuición del diseño	Bueno	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno
Información legible	Excelente	Excelente	Bueno	Bueno	Excelente
Funcionalidad	Bueno	Bueno	Excelente	Bueno	Bueno



<b>Estabilidad de la aplicación</b>	Bueno	Bueno	Bueno	Excelente	Bueno
<b>Valoración general</b>	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno

En la Tabla 14, se observa que la experiencia de los estudiantes con la aplicación fue calificada como positiva. Los usuarios resaltaron que la aplicación es fácil de usar, mencionando que el tiempo de respuesta es bueno. Además, el diseño de la interfaz fue bien recibido, con comentarios favorables sobre su estructura. La mayoría de los estudiantes expresó que la aplicación cumple con sus expectativas, percibiendo una buena estabilidad en su funcionamiento.

SQP se caracteriza por un enfoque centralizado, donde todas las variables son optimizadas simultáneamente en cada iteración, lo cual permite que la convergencia sea rápida en sistemas pequeños y medianos (como los sistemas de 3 y 13 nodos). Sin embargo, en sistemas más grandes, la convergencia de SQP puede resultar en un mayor error de demanda en comparación con ADMM.

presenta un error de demanda significativamente mayor en el sistema de 3 nodos en comparación con ADMM, con una desviación de  $1.05E-02$ . En el sistema de 33 nodos, aunque el error de demanda es bajo, no es tan preciso como el obtenido con ADMM. Esto sugiere que, en términos de precisión en el ajuste de la demanda, ADMM sigue siendo superior en sistemas distribuidos y grandes.

SQP es más rápido que ADMM en todos los escenarios, destacándose especialmente en el sistema de 3 nodos. Esto se debe a su capacidad para realizar optimizaciones globales en cada iteración, logrando tiempos de cálculo menores que los de ADMM en sistemas de cualquier tamaño.

## Conclusiones

La aplicación desarrollada para la simulación y comparación de los algoritmos ADMM y SQP en microrredes cumple con la tarea de analizar los sistemas implementados y comparar en cada uno de los escenarios la eficiencia de los algoritmos respecto a los indicadores de costo.

La aplicación se desarrolló en 4 ventanas por las cuales se pueden navegar e ingresar los datos correspondientes a los escenarios de simulación de 3,13 y 33 nodos. La visualización de las pestañas organizadas en una misma ventana facilita la navegación y el acceso rápido a los parámetros de entrada y resultados.

En términos de desempeño de los algoritmos, la aplicación permiten visualizar los indicadores de manera fácil y comprensible.

Las simulaciones en los sistemas de 3, 13 y 33 nodos demostraron que ambos algoritmos ofrecen soluciones confiables con bajos errores de demanda en general. Logrando, una representación de la optimización de los algoritmos ADMM y SQP.

## Recomendaciones

Incorporar más modelos de sistemas de potencia permite evaluar el rendimiento de ADMM y SQP en diferentes configuraciones, identificando limitaciones en la escalabilidad y eficiencia de cada algoritmo en escenarios fuera de los IEEE de 3, 13 y 33 nodos.

fmincon en MATLAB se ha utilizado debido a su flexibilidad en restricciones no lineales. Sin embargo, herramientas alternativas podrían ofrecer optimización distribuida y escalabilidad, como los métodos evolutivos

Evaluar el desempeño en los algoritmos ADMM y SQP bajo condiciones cambiantes de demanda o generación renovable fortalecería la aplicación al revelar su capacidad de respuesta en tiempo real y adaptabilidad

Mejorar la aplicación para permitir su integración y validación en microrredes físicas, de manera que se pueda verificar la efectividad de los algoritmos en condiciones operativas reales.

### Referencias

- Ali, H., Abd-Elmahdee, T., & Jabbar, A. (2022). Optimum hydraulic investigation of pipe aqueduct by MATLAB software and Newton-Raphson method. *Open Engineering*, 12(1), 808-816. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0369>
- Almajeez, R. (2022). *Voltage control and power sharing in DC microgrids (DCMG)*.
- Arend, S. (2020). *Design of a solar home system for an unelectrified household in a rural community in the province of Limpopo, South Africa*.
- Barco-Jimenez, J., Obando, G., Chamorro, H., Pantoja, A., Caicedo, E., & Aguado, J. (2023). In-line distributed dispatch of active and reactive power based on ADMM and consensus considering battery degradation in microgrids. *IEEE Access*, 11, 31479-31495. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3248958>
- Barco-Jimenez, J., Obando, G., Pantoja, A., Caicedo, E., & Aguado, J. (2022). Decentralized operation of an isolated microgrid with storage systems using multipliers with alternating directions. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 330-335. <https://doi.org/10.24084/repqj20.302>
- Barco-Jiménez, J., Obando, G., Pantoja, A., Caicedo, E., & Aguado, J. (2022). Decentralized Operation of an Isolated Microgrid with Storage Systems Using Multipliers with Alternating Directions. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, 20, 330-335. <https://doi.org/10.24084/repqj20.302>
- Boada Robayo, E. (2024). *Análisis y diseño de un sistema SCADA del sistema de microrred no convencional del edificio Julio Mario Santo Domingo de la Universidad de los Andes*. Universidad de los Andes.
- Borda, J., & Rodríguez, G. (2010). *Optimización de secciones transversales de pórticos de hormigón armado mediante uso de la técnica de programación cuadrática secuencial SQP*.
- Boyd, S., Parikh, N., Chu, E., Peleato, B., & Eckstein, J. (2010). Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. En *Foundations and Trends in Machine Learning* (Vol. 3, Número 1). <https://doi.org/10.1561/22000000016>
- Carrillo, O., & Mendoza, K. (2021). *Desarrollo de software para la simulación de generador sincrónico y generador asincrónico orientado al uso de prácticas del laboratorio de*

*máquinas eléctricas en MATLAB*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

- Castro, L., Bravo, M., Ríos, M., García, C., Ramírez, D., Pérez, S., Garcés, A., Bueno, M., & Mora, J. (2021). Control jerárquico en micro-redes AC. En *Control jerárquico en micro-redes AC*. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://doi.org/10.22517/9789587225532>
- Castro, L., Bueno-López, M., & Mora-Flórez, J. (2022). Estrategia para la implementación del control jerárquico en microrredes. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial*, 19(3), 254-264. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2022.15741>
- Coleman, T., & Branch, M. A. (1999). *Optimization Toolbox*. <http://www.mathworks.com>
- Corral Vila, P., Luis, J., Macho, Z., García, J., & Madrid, A. (2020). *Desarrollo de una aplicación para análisis modal de sistemas eléctricos de potencia*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/40639>
- Dolatabadi, S. H., Ghorbanian, M., Siano, P., & Hatziargyriou, N. D. (2021). An enhanced IEEE 33 bus benchmark test system for distribution system studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(3). <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3038030>
- Fernández, P. (2018). *Automatización de una microrred con doble banco de baterías*. Universidad de Sevilla.
- Folgado, F., González, I., & Calderón, A. (2022). *PEM electrolyzer digital twin embedded within matlab-based graphical user interface*. 69. <https://doi.org/10.3390/xxxxx>
- Folgado, F. J., González, I., & Calderón, A. J. (2022). Simulation platform for the assessment of PEM electrolyzer models oriented to implement digital Replicas. *Energy Conversion and Management*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115917>
- Fred, S. (2021). *Entwicklung einer nutzerfreundlichen applikation zur simulation und wirtschaftlichen analyse von off-grid-systemen sowie der berechnung von alternativen systemvarianten*.
- García, J. E., & Molina De la Rosa, D. (2019). *Herramienta software para dimensionamiento y localización de generación distribuida en una microrred*. <http://hdl.handle.net/10584/8471>
- Ghadimi, E., Teixeira, A., Shames, I., & Johansson, M. (2014). *Optimal parameter selection for the alternating direction method of multipliers (ADMM): quadratic problems*. <https://doi.org/10.1109/TAC.2014.2354892>
- Giral, D. (2016). *Análisis del método de puesta a tierra del neutro y estudio del impacto en la operación de sistemas con generación distribuida*. Universidad de los Andes.
- González, Y. (2019). *Definición de criterios de diseño para una microrred eléctrica a través de criterios de confiabilidad*. Universidad Nacional de Colombia.

- Guerrero, J. (2022). *Desarrollo de un software para el análisis del recurso energético eólico en pequeña escala*.
- Guerrero, J., Vasquez, J., Matas, J., De Vicuña, L., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - a general approach toward standardization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1).  
<https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- Hinojosa, John. (2022). *Implementación de un modelo de predicción de la demanda eléctrica mediante redes neuronales artificiales*.
- Huamaní, P. (2021). Programación de interfaz gráfica en app designer del matlab para representar la serie de fourier en curso introductorio de telecomunicaciones. *Scientia*.  
<https://doi.org/10.31381/scientia.v23i23.2714>
- Jiménez Ruiz, J. A., Castilla Nieto, M. del M., & Álvarez Hervás, J. D. (2022). Desarrollo de una aplicación de adquisición de datos para un sistema de supervisión abierto y escalable en la nube vía OPC UA. En *XLIII Jornadas de Automática: libro de actas: 7, 8 y 9 de septiembre de 2022, Logroño (La Rioja)* (pp. 900-907). Servicio de Publicaciones da UDC. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0900>
- Khodaei, A., Bahramirad, S., & Shahidehpour, M. (2015). Microgrid planning under uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(5).  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2361094>
- MathWorks. (1997). *MATLAB*. <http://www.mathworks.comWeb>
- Mathworks. (2024). *Algoritmos de optimización no lineal con restricciones*.  
<https://la.mathworks.com/help/optim/ug/constrained-nonlinear-optimization-algorithms.html>
- Mî Ndra, T., Chenaru, O., Dobrescu, R., & Toma, L. (2024). *Modular microgrid technology with a single development environment per life cycle*.  
<https://doi.org/10.20944/preprints202407.1999.v1>
- Narad, E. (2022). *Characterization, design, and optimization of dual-purpose wind turbines and frost protection fans*.
- Narvaez, J. (2020). *Sistema de visualización interactivo para emuladores de procesos de generación de energía eléctrica basados en fuentes convencionales y no convencionales de energía*. Universidad autónoma de occidente.
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saeedifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G. A., & Hatziargyriou, N. D. (2014). Trends in microgrid control. *IEEE*

- Transactions on Smart Grid*, 5(4). <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Olivares, D., Mehrizi, A., Etemadi, A., Cañizares, C., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A., Gomis, O., Saeedifard, M., Palma, R., Jiménez, G., & Hatziargyriou, N. (2014). *Trends in microgrid control*. 5(4). <https://doi.org/10.1109/TSG.2013.2295514>
- Özlü, İ. A., Baimakhanov, O., Saukhimov, A., & Ceylan, O. (2022). A heuristic methods-based power distribution system optimization toolbox. *Algorithms*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/a15010014>
- Polanco, L. (2016). *Algoritmos de FOP. para el control terciario de micro-redes*.
- Puerto Castillo, A. (2024). *Diseño de aplicación de monitorización de microrredes renovables domésticas*.
- Restrepo, D., Restrepo, B., & Trejos, A. (2018). Microgrid analysis using HOMER: A case study. *DYNA (Colombia)*, 85(207), 129-134. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.69375>
- Sanabria, E., & Pabón, J. (2023). *Desarrollo de un software didáctico para el análisis del recurso energético solar en pequeña escala*. <http://hdl.handle.net/11349/39411>
- Siddiqi, H. (2021). «*Development of a dedicated graphical user Interface and experimental tests to extract the parameters of equivalent circuit for a commercial photovoltaic module*».
- Weisheim, R. (2023, diciembre 20). *15 herramientas para hacer un boceto de página web en 2024*. [https://www.hostinger.co/tutoriales/boceto-pagina-web#2\\_Figma](https://www.hostinger.co/tutoriales/boceto-pagina-web#2_Figma)

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	<b>CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-032
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 18/11/2024

Biblioteca  
**REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.**  
Universidad CESMAG  
Pasto

Saludo de paz y bien.


Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Desarrollo de una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes, presentado por los autores Daniel Esteban Ordoñez Ramírez, y Kevin Jesús Santacruz Vallejos del Programa Académico Ingeniería electrónica al correo electrónico [biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co](mailto:biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co). Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



-----  
**John Evert Barco Jiménez**  
87067512  
Ingeniería Electrónica  
3158222096  
[jebarco@unicesmag.edu.co](mailto:jebarco@unicesmag.edu.co)




 <b>UNIVERSIDAD CESMAG</b> <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

<b>INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)</b>	
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> Daniel Esteban Ordóñez Ramírez	<b>Documento de identidad:</b> 1233190029
<b>Correo electrónico:</b> <a href="mailto:Ordonezdaniel92@gmail.com">Ordonezdaniel92@gmail.com</a>	<b>Número de contacto:</b> 3218813570
<b>Nombres y apellidos del autor:</b> Kevin Jesús Santacruz Vallejos	<b>Documento de identidad:</b> 1085332862
<b>Correo electrónico:</b> <a href="mailto:likeviniii37@gmail.com">likeviniii37@gmail.com</a>	<b>Número de contacto:</b> 3161699275
<b>Nombres y apellidos del autor:</b>	<b>Documento de identidad:</b>
<b>Correo electrónico:</b>	<b>Número de contacto:</b>
<b>Nombres y apellidos del autor:</b>	<b>Documento de identidad:</b>
<b>Correo electrónico:</b>	<b>Número de contacto:</b>
<b>Nombres y apellidos del asesor:</b> John Evert Barco Jiménez	<b>Documento de identidad:</b> 87067512
<b>Correo electrónico:</b> <a href="mailto:jebarco@unicesmag.edu.co">jebarco@unicesmag.edu.co</a>	<b>Número de contacto:</b> 3158222096
<b>Título del trabajo de grado:</b> Desarrollo de una aplicación para la simulación y comparación de algoritmos de control terciario en microrredes.	
<b>Facultad y Programa Académico:</b> Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería electrónica.	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la

 <p>UNIVERSIDAD <b>CESMAG</b> NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	<b>AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	<b>CÓDIGO:</b> AAC-BL-FR-031
		<b>VERSIÓN:</b> 1
		<b>FECHA:</b> 09/JUN/2022

petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.



- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

**NOTA:** En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 18 días del mes de 11 del año 2024

	
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor: Daniel Esteban Ordóñez Ramírez	Nombre del autor: Kevin Jesús Santacruz Vallejos
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:



UNIVERSIDAD  
**CESMAG**  
NIT: 800.109.387-7  
VIGILADA MINEDUCACIÓN

**AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

**CÓDIGO:** AAC-BL-FR-031

**VERSIÓN:** 1

**FECHA:** 09/JUN/2022

Firma del asesor

Nombre del asesor: John Evert Barco Jiménez