Factores administrativos y su impacto en el rendimiento empresarial

1era Edición

EL FUROR DE LA ENERGÍA

desafíos y soluciones

MAWIL Publicaciones Impresas y Digitales

EMPRESA DE INVESTIGACIÓN SABERES Y CONOCIMIENTOS ECHGACETICIA. LTDA.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI 24 - 01 - 1995 LATACUNGA - ECUADOR

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

Vinicio Orlando Salguero Remache
Diego Leonardo Jiménez Jiménez
Edgar Roberto Salazar Achig
Jimmy Roberto Vaca Gonzalez
Jose Luis Camacho Díaz
Secundino Marrero Ramírez
Rommel Suárez Vinueza
María Fernanda Molina Fernández
Cristhian Lenin Masaquiza Vera
Carlos Ivan Quinatoa Caiza

AUTORES INVESTIGADORES

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

AUTORES
INVESTIGADORES

Vinicio Orlando Salguero Remache
Maestría en Electricidad;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;
vinicio.salguero4840@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0009-2532-5833

Diego Leonardo Jiménez Jiménez
Maestría en ciencias de la Ingeniería Eléctrica;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas;
Latacunga, Ecuador;
diego.jimenez@utc.edu;
http://orcid.org/0000-0003-1683-4520

Edgar Roberto Salazar Achig
Maestría en Electricidad;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas;
Latacunga, Ecuador;
edgar.salazar7619@utc.edu.ec,
https://orcid.org/0000-0003-4770-1181

Jimmy Roberto Vaca Gonzalez
Maestría en Electricidad;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;

jimmy.vaca1539@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0008-6017-3794

Jose Luis Camacho Díaz
Maestría en Electricidad;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;
jose.camacho0529@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0007-5827-3764

Secundino Marrero Ramírez
Doctor en Ciencias Técnicas;
Programa de posgrado de Electricidad;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;
secundino.marrero@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0000-0001-5161-545X

Rommel Suárez Vinueza
Magíster en Electricidad
Mención en Sistemas Eléctricos de Potencia;
Magíster en Gestión de Energías;
Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales;
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;
rommel.suarez@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0000-4319-9476

María Fernanda Molina Fernández
Magíster en Electricidad
Mención en Sistemas Eléctricos de Potencia;
Ingeniera en Electrónica e Instrumentación;
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Latacunga, Ecuador;
maria.molina@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0007-3058-4608

Cristhian Lenin Masaquiza Vera
Ingeniero Eléctrico;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Programa de posgrado en Electricidad;
El Coca, Ecuador;
cristhian.masaquiza1685@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0009-0004-6526-7897

Carlos Ivan Quinatoa Caiza
Magíster en Ingeniería Eléctrica;
Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia;
Universidad Técnica de Cotopaxi;
Programa de posgrado en Electricidad;
Latacunga, Ecuador;
carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec;
https://orcid.org/0000-0001-6369-7480

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

REVISORES
ACADÉMICOS

Fernando Alonso Vaca De La Torre
Magíster en Automatización y control Electrónico Industrial;
Magíster en informática;
ngeniero en Electrónica y Control;
Docente de la Universidad Central del Ecuador;
Quito, Ecuador;
favaca@uce.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-7086-8572

Jorge Enrique Ordoñez García
Máster en Didáctica de las Matemáticas
Magíster en Automatización y Control Industrial;
en Educación Secundaria y Bachiller;
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones;
Universidad de Guayaquil
Guayaquil; Ecuador:
jordonez.garcia@ug.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-0888-7481

CATALOGACIÓN **BIBLIOGRÁFICA**

AUTORES: Vinicio Orlando Salguero Remache
Diego Leonardo Jiménez Jiménez
Edgar Roberto Salazar Achig
Jimmy Roberto Vaca Gonzalez
Jose Luis Camacho Díaz
Secundino Marrero Ramírez
Rommel Suárez Vinueza
María Fernanda Molina Fernández
Cristhian Lenin Masaquiza Vera
Carlos Ivan Quinatoa Caiza

Título: El furor de la energía desafíos y soluciones para una gestión energética eficiente
Descriptores: Ciencias físicas; Electricidad y electrónica; Ingeniería eléctrica; Tecnología electrónica
Código UNESCO: 2202.03 ELECTROMAGNETISMO
Clasificación Decimal Dewey/Cutter: 537/Sa329
Área: Ciencias Físicas
Edición: 1era
ISBN: 978-9942-654-35-9
Editorial: Mawil Publicaciones de Ecuador, 2024
Ciudad, País: Quito, Ecuador
Formato: 148 x 210 mm.
Páginas: 141
DOI: https://doi.org/10.26820/978-9942-654-35-9
URL: https://mawil.us/repositorio/index.php/academico/catalog/book/136

Texto para docentes y estudiantes universitarios

El proyecto didáctico **El furor de la energía desafíos y soluciones para una gestión energética eficiente,** es una obra colectiva escrita por varios autores y publicada por MAWIL; publicación revisada por el equipo profesional y editorial siguiendo los lineamientos y estructuras establecidos por el departamento de publicaciones de MAWIL de New Jersey.

© Reservados todos los derechos. La reproducción parcial o total queda estrictamente prohibida, sin la autorización expresa de los autores, bajo sanciones establecidas en las leyes, por cualquier medio o procedimiento.

Usted es libre de:
Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato.
Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material para cualquier propósito, incluso comercialmente.

Director Académico: Lcdo. Alejandro Plúa Argoti
Dirección Central MAWIL: Office 18 Center Avenue Caldwell; New Jersey # 07006
Gerencia Editorial MAWIL-Ecuador: Mg. Vanessa Pamela Quishpe Morocho
Direción de corrección: Mg. Ayamara Galanton.
Editor de Arte y Diseño: Leslie Letizia Plua Proaño
Corrector de estilo: Lic. Marcelo Acuña Cifuentes

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

Índices

Contenidos

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Prólogo ---------- 15
Introducción ---------- 17

Capítulo I.
Evaluación de un Sistema de Gestión de Energía en una Microrred Aislada Basado en un Problema de Optimización No Lineal ---------- 22

Capítulo II.
Evaluación de Modelos Óptimos de Transmisión Energética para minimizar pérdidas en la generación distribuida ---------- 48

Capítulo III.
Propuesta de técnicas y tecnologías de automatización y control para invernaderos ---------- 80

Capítulo IV.
Proyección de la demanda eléctrica en Cotopaxi para los sectores Residenciales, comerciales e Industriales ---------- 115

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

Índices

Figuras

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Figura 1. Diagrama de la Metodología del Despacho de Económico. ---- 24
Figura 2. Descripción básica del Despacho Económico. ---- 25
Figura 3. Diagrama de bloques del Despacho Económico ---- 26
Figura 4. Generación de Potencia Solar ---- 27
Figura 5. Generación de Potencia eólica. ---- 27
Figura 6. Eficiencia del generador de combustión a diésel ---- 28
Figura 7. Generación de Demanda eléctrica. ---- 29
Figura 8. Diagrama de diseño de la microrred aislada ---- 35
Figura 9. Flujograma de optimización en software ---- 36
Figura 10. Microrred aislada propuesta. ---- 38
Figura 11. Despacho económico no lineal en un tiempo de 24 horas ---- 41
Figura 12. Despacho económico no lineal en un tiempo de 48 horas ---- 42
Figura 13. Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas. ---- 43
Figura 14. Ciclo de la batería en un tiempo de 48 horas ---- 44
Figura 15. Variación anual y diaria de la temperatura registradas en el Ecuador continental. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012) ---- 83
Figura 16. Balance energético en un invernadero. ---- 85
Figura 17. Instalación del extractor de aire. ---- 87
Figura 18. Doble techo en invernadero artesanal. ---- 91
Figura 19. Motor y servo mecanismo para la subida automática de las cortinas laterales. ---- 93
Figura 20. Factor de incremento de ventilación en función de la porosidad. (Lenscak & Iglesias, 2019) ---- 94
Figura 21. Ubicación de extractores y corriente de aire en el interior del invernadero. (Guía: Ventilación en un invernadero, 2024) ---- 95
Figura 22. Esquema de automatización ---- 98
Figura 23. Configuración del Scada para el control del invernadero ---- 99
Figura 24. Estructura del sistema de medición de nivel de agua y control de riego ---- 100
Figura 25. Configuración del sistema de medición de nivel ---- 100
Figura 26. Pantalla HMI del control de humedad por hileras ---- 100

Figura 27. Comportamiento del control de humedad durante un día. ---- 101
Figura 28. Diagrama de bloques del sistema de control de Temperatura ---- 102
Figura 29. Valor de la temperatura externa e interna sin el sistema de control ---- 103
Figura 30. Comportamiento de la temperatura interior durante los casos 1 y 2 de operación del invernadero. ---- 103
Figura 31. Variables presentes en el modelo climático de un invernadero. ---- 104
Figura 32. Comparación de la respuesta del sistema con controlador monofrecuencia y bifrecuencia. ---- 106
Figura 33. Modelo de lógica difusa ---- 107
Figura 34. Comportamiento de la variable humedad a la salida ---- 107
Figura 35. Respuesta del controlador de temperatura ---- 108
Figura 36. Respuesta del controlador de humedad ---- 108
Figura 37. Estructura de manejo de datos de LEAP ---- 120
Figura 38. Modelo LEAP, ramas y sub ramas ---- 124
Figura 39. Demanda energética final de ambos escenarios ---- 126
Figura 40. Subramas del proceso de LEAP para la provincia de Cotopaxi ---- 127
Figura 41. Diagrama de Sankey para el escenario Deman_p con su base 2022 ---- 132
Figura 42. Escenario alternativo donde se encuentra los incrementos a la generación eléctrica y las perdidas. ---- 133

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

Índices

Tablas

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Tabla 1. Datos de fábrica de la batería ---- 28
Tabla 2. Características Generac 5KW Protector ---- 29
Tabla 3. . Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred ---- 30
Tabla 4. Costos de consideración para la optimización ---- 38
Tabla 5. Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred ---- 39
Tabla 6. Características Peimar SG360M ---- 39
Tabla 7. Situación, hipótesis, y resultados ---- 57
Tabla 8. Metodología, técnicas, resultados. ---- 58
Tabla 9. Resultados y metodología ---- 59
Tabla 10. Situación problemática de los desafíos de la RERs, su hipótesis y los métodos utilizados ---- 60
Tabla 11. Modelo preciso de pérdidas de energía, problemática utilizada, métodos e hipótesis ---- 61
Tabla 12. Resultados acerca de minería de datos, aplicada a la planificación ---- 62
Tabla 13. Características de la esquematización del artículo ---- 63
Tabla 14. Características principales del artículo descrito ---- 64
Tabla 15. Proceso de evaluación de pérdidas en el ST ---- 64
Tabla 16. Metodología utilizada y situaciones problemáticas del articulo ---- 65
Tabla 17. Características principales de la optimización en el rendimiento del SEP ---- 66
Tabla 18. Tipos de radiaciones y longitud de onda ---- 84
Tabla 19. Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos. ---- 97
Tabla 20. Datos generales para la proyección de demanda ---- 120
Tabla 21. Proyección del consumo energético por sectores en Petajulios (PJ) para los años 2022 y 2050 ---- 128
Tabla 22. Datos obtenidos de combustibles para ambos escenarios desde 2022 hasta 2050 ---- 130
Tabla 23. Balance energético obtenido a través de LEAP ---- 131

El furor de la energía
desafíos y soluciones

Prólogo

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

La gestión eficiente de la energía eléctrica se ha convertido en un desafío global, impulsado por el crecimiento poblacional, la industrialización y la creciente demanda de servicios energéticos. En este contexto, la optimización de los sistemas eléctricos, tanto a gran escala como en aplicaciones más específicas, se ha vuelto fundamental para garantizar la sostenibilidad y la confiabilidad del suministro energético.

Los trabajos presentados en esta compilación abordan diversos aspectos de la gestión energética, desde la planificación a largo plazo de la demanda eléctrica hasta la optimización de sistemas de distribución a nivel local. En primer lugar, se exploran las técnicas de despacho económico en microrredes autónomas, donde la combinación de fuentes renovables y convencionales plantea desafíos únicos en términos de gestión y optimización. Los resultados obtenidos en estos estudios demuestran la viabilidad de utilizar herramientas de optimización no lineal para lograr una operación eficiente y sostenible de estos sistemas.

En segundo lugar, se analizan los modelos de optimización aplicados a sistemas de generación distribuida. Los algoritmos genéticos, la programación lineal y no lineal, y los modelos híbridos se presentan como herramientas poderosas para minimizar pérdidas, mejorar la estabilidad del sistema y maximizar la penetración de energías renovables. Los casos de estudio presentados evidencian los beneficios de aplicar estas técnicas en sistemas reales.

Por otro lado, se aborda la importancia de la modelación y simulación de sistemas complejos como los invernaderos, donde la optimización de las condiciones climáticas internas es crucial para garantizar la productividad agrícola. Los avances en tecnologías de control y automatización permiten gestionar de manera eficiente estos sistemas, reduciendo costos y mejorando la calidad de los productos.

Finalmente, se presenta un análisis detallado de la proyección de la demanda eléctrica en una región específica, lo cual es fundamental para la planificación energética a largo plazo. Los resultados obtenidos permiten identificar las tendencias de consumo y evaluar el impacto de diferentes políticas energéticas.

En conjunto, los estudios presentados en esta compilación ofrecen una visión integral de los desafíos y oportunidades en el campo de la gestión energética. Los resultados obtenidos son relevantes tanto para investigadores como para tomadores de decisiones en el sector energético, y contribuyen al avance del conocimiento en esta área.

Los Autores

El furor de la energía
desafíos y soluciones

Introducción

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Introducción

En el contexto de la creciente demanda energética, la optimización de sistemas eléctricos y la implementación de tecnologías avanzadas para su control se han convertido en pilares fundamentales para garantizar la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de recursos. Este panorama abarca desde microrredes aisladas, que ofrecen soluciones para regiones remotas, hasta grandes redes de distribución, donde minimizar pérdidas y aumentar la resiliencia de la infraestructura es una prioridad. Asimismo, el impacto de las tecnologías emergentes no se limita al sector energético, sino que también se extiende a otras industrias, como la agricultura, donde los sistemas automatizados están transformando la manera en que se gestionan los cultivos, permitiendo una mayor eficiencia y reducción de costos. Esta introducción proporciona una visión integrada de los desafíos y oportunidades que ofrecen estas áreas de innovación en torno a cinco temáticas clave: la evaluación de sistemas de gestión de energía en microrredes aisladas, la optimización de modelos de transmisión energética, la automatización y control en invernaderos, la proyección de la demanda energética en empresas locales, y el estudio de redundancia en alimentadores rurales.

Evaluación de un Sistema de Gestión de Energía en una Microrred Aislada

Las microrredes aisladas son sistemas de generación, almacenamiento y distribución de energía que operan independientemente de las grandes redes eléctricas. Estos sistemas son de gran importancia en áreas remotas, donde el acceso a la infraestructura eléctrica convencional es limitado o inexistente. Sin embargo, uno de los principales retos en la operación de una microrred aislada es la optimización de su gestión energética. La variabilidad inherente a las fuentes de energía renovable (como la solar o eólica) y la necesidad de garantizar un suministro constante hacen que la gestión eficiente de la energía sea una tarea compleja.

El uso de técnicas de optimización no lineal ha demostrado ser una herramienta eficaz para abordar este reto. Estas técnicas permiten modelar el comportamiento de la microrred considerando múltiples variables y restricciones, como el almacenamiento en baterías, los costos de operación y la estabilidad del sistema. La investigación en esta área se ha enfocado en desarrollar algoritmos avanzados que mejoren la toma de decisiones en tiempo real, lo cual permite reducir costos y aumentar la eficiencia del sistema.

En el futuro, se espera que la integración de inteligencia artificial y técnicas de machine learning potencie aún más los sistemas de gestión de energía en microrredes aisladas, permitiendo una mayor previsión de la demanda y optimización del uso de los recursos energéticos disponibles. Esta evolución no solo mejorará la sostenibilidad de las microrredes, sino que también las hará más resilientes ante fluctuaciones en la generación de energía renovable.

Optimización de Modelos de Transmisión Energética

La creciente adopción de la generación distribuida (GD) plantea nuevos desafíos para las redes de transmisión energética. A diferencia del modelo tradicional centralizado, en el que la energía se genera en grandes plantas y se distribuye a través de largas distancias, la generación distribuida se basa en pequeños generadores ubicados cerca de los centros de consumo. Si bien este enfoque ofrece ventajas en términos de reducción de la dependencia de combustibles fósiles y mejora de la resiliencia del sistema, también introduce complicaciones en la transmisión de energía.

Una de las principales preocupaciones es la minimización de pérdidas energéticas en las líneas de transmisión. Cuanto más lejos tenga que viajar la energía desde su punto de generación, mayores serán las pérdidas por resistencia en las líneas eléctricas. Para abordar este problema, se han desarrollado modelos de optimización que buscan determinar la configuración óptima de la red de transmisión, maximizando la eficiencia y minimizando las pérdidas. Estos modelos consideran factores como la ubicación de los generadores distribuidos, la topología de la red y las características físicas de los cables de transmisión.

En el futuro, se espera que las redes inteligentes o smart grids jueguen un papel crucial en la optimización de la transmisión energética. Estas redes, que permiten una comunicación bidireccional entre los generadores y los consumidores de energía, facilitarán el control en tiempo real de la oferta y la demanda, permitiendo ajustes dinámicos para minimizar las pérdidas y maximizar la eficiencia.

Automatización y Control en Invernaderos

El uso de tecnologías avanzadas en la agricultura ha revolucionado la manera en que se gestionan los cultivos, y los invernaderos automatizados son un claro ejemplo de ello. Los sistemas de control en invernaderos permiten regular de manera precisa las condiciones ambientales necesarias para el crecimiento óptimo de las plantas, como la temperatura, la humedad y la iluminación. Esta automatización no solo mejora la productividad, sino que también reduce el consumo de recursos, como el agua y la energía.

Los sistemas de control más comunes en invernaderos utilizan algoritmos PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que ajustan continuamente las variables climáticas en función de las condiciones reales. Sin embargo, la introducción de inteligencia artificial y machine learning está llevando la automatización de invernaderos a un nuevo nivel. Estas tecnologías permiten anticipar cambios en el clima y ajustar las condiciones del invernadero de manera proactiva, lo que resulta en una mayor eficiencia y una reducción de los desperdicios. Además, la robótica también está comenzando a jugar un papel importante en la agricultura automatizada. Los drones y robots pueden encargarse de tareas como la siembra, el riego y la cosecha, liberando a los agricultores de labores repetitivas y optimizando el uso de los recursos.

Proyección de la Demanda y Actualización del Sistema Eléctrico

La proyección de la demanda energética es una herramienta clave para la planificación y actualización de sistemas eléctricos en empresas y comunidades. En el caso de la empresa Agua Santa del cantón Salcedo, el crecimiento de la población y el desarrollo económico local han incrementado la demanda de electricidad, lo que ha llevado a la necesidad de actualizar el sistema eléctrico para garantizar un suministro estable en el futuro.

Proyectar la demanda implica analizar datos históricos de consumo, junto con factores socioeconómicos y tendencias de crecimiento. A partir de esta información, se pueden planificar inversiones en infraestructura eléctrica, como la expansión de líneas de transmisión, la construcción de nuevas subestaciones y la mejora de la eficiencia de los sistemas existentes.

Las redes inteligentes, junto con los sistemas de medición avanzada (AMR), están transformando la manera en que las empresas eléctricas gestionan la demanda. Estos sistemas permiten un monitoreo en tiempo real del consumo energético y ofrecen la posibilidad de ajustar la oferta de energía de manera más eficiente. A futuro, la integración de energías renovables en la matriz energética de empresas locales como Agua Santa podría reducir la dependencia de combustibles fósiles, mejorar la sostenibilidad y fortalecer la resiliencia del sistema eléctrico.

Estudio de Redundancia en Alimentadores Rurales

En las zonas rurales, donde la infraestructura eléctrica suele ser menos robusta que en las áreas urbanas, garantizar la continuidad del suministro eléctrico es un desafío importante. La empresa Eléctrica Riobamba S.A. ha llevado a cabo estudios sobre sus alimentadores rurales con el objetivo de identificar puntos de redundancia que mejoren la resiliencia de la red.

La redundancia en una red eléctrica implica la creación de rutas alternativas para el flujo de energía en caso de que una línea principal falle. Esto es particularmente importante en áreas rurales, donde la infraestructura suele ser más vulnerable a interrupciones debido a factores como tormentas, caídas de árboles o fallos en los equipos.

El estudio de los alimentadores rurales Nº 2 de las subestaciones 08 y 13 ha permitido identificar puntos críticos donde la instalación de nuevas líneas o la automatización de interruptores puede mejorar significativamente la confiabilidad del sistema. A medida que las tecnologías avanzan, se espera que las redes rurales se beneficien de la implementación de sistemas de monitoreo remoto y control automatizado, lo que permitirá una respuesta más rápida a los fallos y una mayor estabilidad en el suministro eléctrico.

El furor de la energía
desafíos y soluciones

1

Capítulo

Evaluación de un Sistema de Gestión de Energía en una Microrred Aislada Basado en un Problema de Optimización No Lineal

AUTORES: Vinicio Salguero; Diego Jiménez; Roberto Salazar

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Evaluación de un Sistema de Gestión de Energía en una Microrred Aislada Basado en un Problema de Optimización No Lineal

Evaluation of a nonlinear optimization-based energy management system for isolated microgrids

Resumen

El despacho económico es fundamental en la gestión energética, asignando la potencia de cada fuente generadora sin considerar las condiciones del sistema. Este artículo examina técnicas para la operación óptima de una microrred autónoma pequeña, que incluye fuentes renovables no convencionales, un banco de baterías y un generador de combustión, abasteciendo una demanda eléctrica residencial típica. Se utilizó optimización no lineal, dado que la naturaleza cuadrática del generador de combustión lo requiere. Se formuló una función objetivo con restricciones, incluyendo el modelado del consumo de combustible del generador diésel. El análisis se realizó para horizontes de programación de 24 y 48 horas. Se encontró que el despacho económico gestiona eficazmente las fuentes de generación para satisfacer la demanda. Los resultados mostraron que el enfoque no lineal superó al lineal. La energía solar contribuyó con un 42 % y la eólica con un 12 %, dependiendo de la ubicación. El exceso de energía renovable se utilizó para cargar las baterías, que proporcionaron el 30 % de la energía. El generador diésel operó brevemente, aportando el 16 % de la energía necesaria. Este generador es esencial para pruebas, asegurando el cumplimiento de los estándares requeridos.

Palabras clave: Microrred, sistema de gestión de energía, despacho económico, optimización no lineal.

Abstract

Economic dispatch is fundamental in energy management, allocating power from each generating source without regard to system conditions. This paper examines techniques for optimal operation of a small stand-alone microgrid, including non-conventional renewable sources, a battery bank, and a combustion generator, supplying a typical residential electrical demand. Nonlinear optimization was used, since the quadratic nature of the combustion generator requires it. A constrained objective function was formulated, including modeling of the diesel generator's fuel consumption. The analysis was performed for scheduling horizons of 24, and 48 hours. Economic dispatch was found to effectively manage the generating sources to meet demand. Results showed that the nonlinear approach outperformed the linear one. Solar energy contributed 42 % and wind 12 %, depending on location. Excess renewable energy

was used to charge the batteries, which provided 30 % of the power. The diesel generator operated briefly, providing 16 % of the required power. This generator is essential for testing, ensuring compliance with required standard.

Keywords: Microgrid, energy management system, economic dispatch, non-linear optimization.

Introducción

Actualmente, la energía eléctrica es un sector estratégico esencial para aplicaciones residenciales, comerciales e industriales. Se produce en grandes volúmenes en ubicaciones determinadas y se transporta a largas distancias hasta los centros de consumo (Díaz, 2019).

Permitiendo a las microrredes aisladas a explorar sistemas de gestión de energía, utilizando técnicas y metodologías de despacho económico para aprovechar los recursos renovables y minimizar costos operativos.

El control de microrredes tiene como objetivo suministrar energía en términos de factibilidad y confiabilidad a las cargas, tanto en circunstancias normales como cuando ocurren contingencias, sin considerar si las cargas están conectadas a la red principal o no (Fernández & Castaño, 2018).

El control de microrredes tiene como objetivo suministrar energía a las cargas en la medida en que sea factible y confiable, tanto en condiciones normales como en contingencias, incluso si no están conectadas a la red principal (Fernández & Castaño, 2018).

Una microrred está compuesta por fuentes de generación convencionales y no convencionales, así como cargas de respuesta y cargas críticas. Todas ellas están conectadas a la red principal a través de un punto de acoplamiento común. Independientemente del modo de operación, las fuentes de energía siempre están conectadas con una interfaz electrónica de potencia adecuada para control, medición y protección (Muhammad & Mohamed, 2018).

El control de una microrred tiene como objetivo suministrar energía a las cargas de manera factible y segura tanto en condiciones normales como de contingencia, independientemente de si están conectadas a la red principal o no (Fernández & Castaño, 2018).

El control de una microrred debe ser capaz de suministrar energía a las cargas de manera factible y confiable, ya sea que estén conectadas a la red principal o no, y en situaciones normales y de contingencia (Fernández & Castaño, 2018).

La característica distintiva de un sistema de control en una microrred aislada es que no tiene valores de voltaje y frecuencia predefinidos. Estos deben generarse internamente dentro de la microrred. Generalmente, los generadores o baterías desempeñan el papel de fuentes de voltaje, mientras que otros generadores actúan como fuentes de corriente. Suministran los puntos de ajuste que provienen del control central para la microrred (Pérez, 2017).

Este artículo presenta la optimización de una microrred aislada con la integración de fuentes de generación renovables no convencionales, banco de baterías y generador diésel. Su modelo describe el desempeño real del Generador Diésel en forma de ecuación cuadrática, por lo que permite resolver el problema de optimización económica no lineal del despacho para 24 y 48 horas.

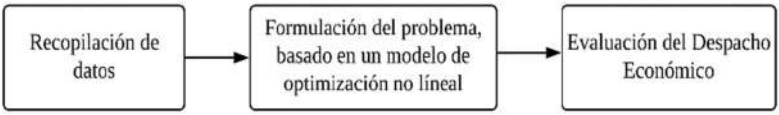
Desarrollo

El despacho económico es la etapa en la que se gestiona eficazmente la generación de fuentes que se han adoptado para satisfacer la demanda eléctrica. Esto se logra a través de un modelo de optimización no lineal que tiene en cuenta si hay un generador diésel presente.

La Figura 1 describe la metodología detallada para estos desafíos. Se obtiene un primer dato necesario para poder satisfacer la demanda de la microrred aislada. En segundo lugar, se formula un problema de gestión de energía en la microrred mediante una técnica de optimización no lineal. En tercer lugar, se examina la eficacia del despacho económico para producir un resultado optimizado diferente.

Figura 1.

Diagrama de la Metodología del Despacho de Económico.



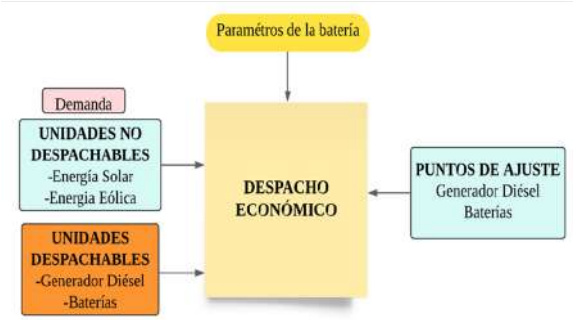
Sin embargo, en la microrred propuesta se incorporan un sistema fotovoltaico y uno eólico. Estas fuentes de energía renovable no conllevan costos económicos, lo que les otorga prioridad en la distribución de energía. De este modo, contribuyen al máximo posible para cubrir la demanda energética. En caso de que la producción supere la demanda, el excedente se almacenará en un banco de baterías. Inicialmente, estas baterías estarán descargadas y luego alcanzarán su capacidad máxima para funcionar como una fuente de energía complementaria completa.

Además, se cuenta con un generador diésel que se aplicaría para activarse en función del requerimiento que las fuentes renovables no pudieran cubrir. Cabe señalar que su operación tiene costos económicos asociados, por lo que se incorporará un sistema de gestión energética con un algoritmo donde se minimice el consumo del recurso. La potencia del generador varía directamente de manera cuadrática con el consumo de diésel. El generador también actúa como reserva en caso de que falte energía adecuada de las fuentes renovables a la microrred.

En la Figura 2 se compone básicamente de fuentes de generación de unidades no despachables (que no pueden ser gestionadas), como la energía eólica y fotovoltaica, las unidades despachables (que pueden ser gestionadas), como el banco de baterías y el generador diésel, junto con los parámetros de las baterías y puntos de ajuste.

Figura 2.

Descripción básica del Despacho Económico.

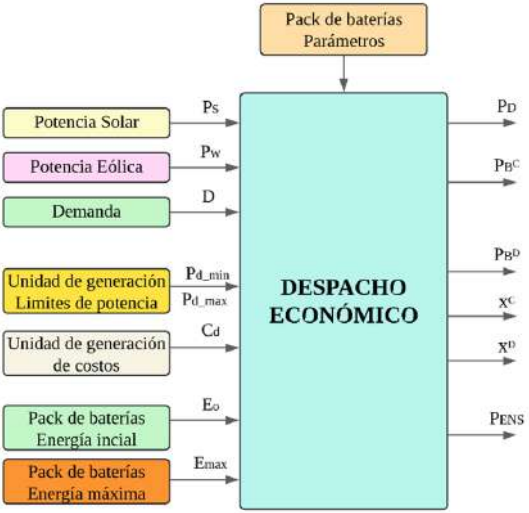


Datos de entrada del Despacho Económico

En el diagrama de bloques de la Figura 3 se presentan los datos de entrada para el despacho económico. Aquí, el sistema de gestión de energía emite instrucciones clave a las unidades generadoras controlables. Esto incluye la potencia del generador diésel (P_D), la carga (P_B^C) y descarga (P_B^D) de las baterías modulares, así como variables binarias que indican el estado del pack (X^C para carga y X^D para descarga), además de la energía no suministrada (P_{ENS}).

Figura 3.

Diagrama de bloques del Despacho Económico.



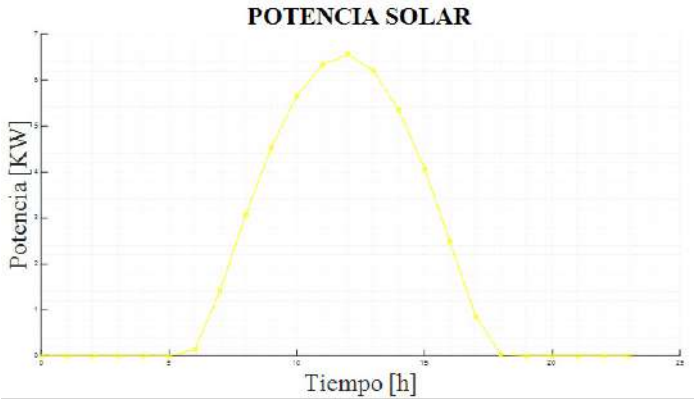
En lo que respecta a las energías renovables (potencia solar, ***PS***, y potencia eólica, ***PW***), la cantidad de energía generada por estos dispositivos está sujeta a la disponibilidad de los recursos naturales correspondientes. En contraste, para los generadores de combustión, el modelo considera como parámetros de entrada los límites de potencia (P_{d_min}, P_{d_max}) y el costo operativo (C_d). Además, el modelo incluye la demanda eléctrica (***D)*** como parte de sus variables fundamentales.

Además, la energía inicial (E_0) del conjunto modular de baterías varía según el estado de carga (SOC) en el momento (***t=0)***, y la capacidad máxima (E_{max}) que el conjunto puede almacenar o suministrar en cualquier momento depende de su estado de salud (SOH).

Por otro lado, se observa que el despacho económico se resuelve como un problema de optimización no lineal considerando un sistema fotovoltaico, un sistema eólico y un generador diésel y observando la capacidad de energía eléctrica con respecto a los requerimientos de investigación. Las 24 horas del día se representan en la Fig. 4 para la energía solar generada, donde la microrred alcanza su pico desde las 7:00 de la mañana hasta las primeras horas de la tarde, generando alrededor de 7 kW para satisfacer la demanda de estudios al mediodía. Hacia la tarde, la energía solar comienza a disminuir drásticamente; por lo tanto, se debe incorporar otra fuente para satisfacer la demanda de energía.

Figura 4.

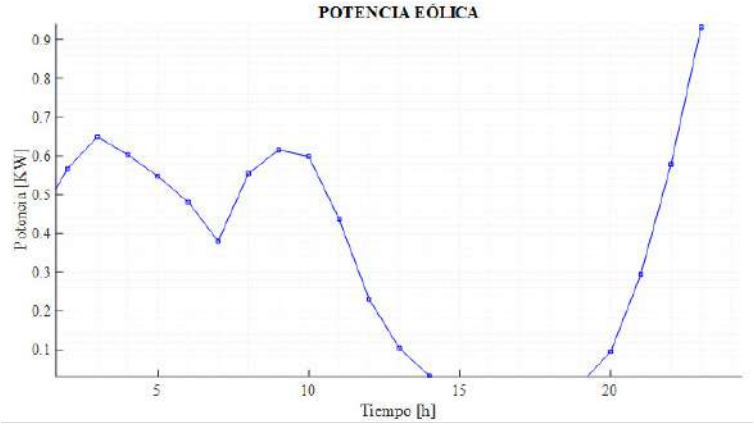
Generación de Potencia Solar.



En la Figura 5 se muestra el transcurso de 24 horas del generador eléctrico que produce una curva de potencia que varía hasta alcanzar 1 KW, con un ligero incremento en las horas matutinas debido a la topografía local. Aunque la potencia eólica es constante, su nivel es relativamente bajo en semejanza con la energía fotovoltaica disponible.

Figura 5.

Generación de Potencia eólica.

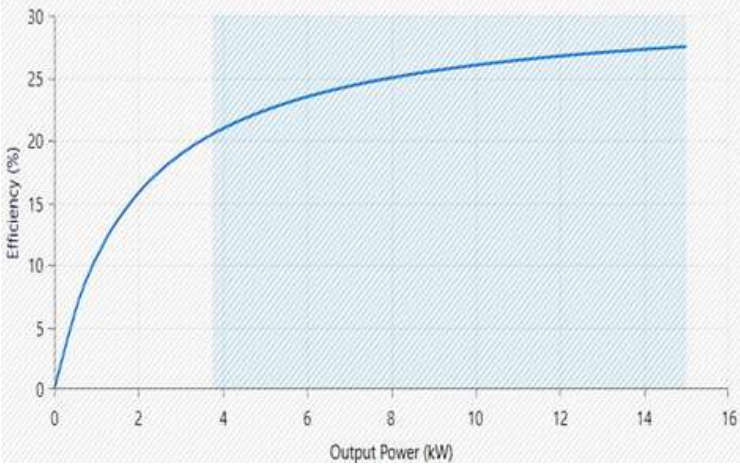


En la Figura 6, la eficiencia se representa como logarítmica, es decir, a medida que la capacidad del generador de combustión diésel se acerca a su

valor nominal, la eficiencia del combustible mejora notablemente.

Figura 6.

Eficiencia del generador de combustión a diésel.



Además, las otras unidades de entrada mencionadas en la Figura 3 deben detallar que el BESS (Sistema de Almacenamiento de Energía en Baterías) se compone de un grupo de baterías, generalmente de ion-litio, que tienen la capacidad de almacenar energía mediante procesos electroquímicos y de suministrarla a la red según sea necesario (Sánchez, 2018). Teniendo en cuenta el diseño y la cantidad de baterías de litio, en este caso se utilizan baterías tipo GEL de Maxpower con una capacidad de 250Ah/12V. En la Tabla 1 se detallan las especificaciones técnicas de las baterías de ion-litio:

Tabla 1.

Datos de fábrica de la batería.

Modelo	Maxpower MP250-12
Voltaje Nominal	12V
Capacidad Nominal	250Ah
Tiempo de Vida	10 años
Capacidad Nominal	250Ah 10 Tarifa horaria 197Ah 3 Tarifa horaria 160Ah 1 Tarifa horaria
Resistencia Interna	Carga completa a 25°C: 2.9Mω
Máxima corriente de descarga	300A (5s)

La principal fuente de generación para abastecer la demanda requerida (5KW), como primera opción se destaca un generador de combustión, el cual debe cubrir la potencia a la que está expuesto el sector. Las características del generador se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Características Generac 5KW Protector.

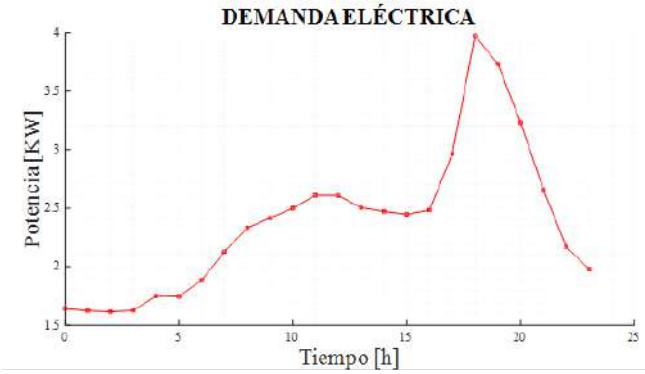
DESCRIPCIÓN	VALORES
Tipo de combustible	Combustible diésel con azufre extremadamente bajo
Voltaje de salida	120/240 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia (En espera)	5 KW
Corriente (En espera)	62 A

Por otra parte, la demanda eléctrica varía con el tiempo, por esta razón, es necesario utilizar diversos métodos matemáticos para obtener estimaciones precisas. Sin embargo, cualquier estudio y periodo de tiempo contendrán inevitablemente un grado de incertidumbre. Es fundamental entender que esta incertidumbre se incrementa al analizar las predicciones, en tales casos, es crucial adherir diferentes métodos pronósticos según sea necesario (González, Borges, & Martínez).

Se determina en la Figura 7 que la mayor demanda ocurre entre las 17h00 y las 20h00 horas, alcanzando una potencia de 4 kW. Esta demanda se considera cubierta gracias a las distintas fuentes de energía integradas en la microrred.

Figura 7.

Generación de Demanda eléctrica.



Luego de la conformación de la microrred, en la Tabla 3 se muestra el resumen de los valores más representativos de cada fuente de generación considerada en el diseño, más la demanda para la ubicación seleccionada.

Tabla 3.

Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred.

Elemento de la microrred	Pmin (KW)	Pmax (KW)
Potencia de demanda	1.5	4
Generador fotovoltaico	0.5	6.5
Generador eólico	0.2	1
Banco de baterías	0	2.4
Generador diésel	0	5

Problema de optimización no lineal del despacho económico

Para enfrentar de manera efectiva un desafío de optimización económica, es fundamental desarrollar modelos precisos que describan las características de operación de las unidades térmicas, las cuales representan los costos más significativos en términos de generación eléctrica.

Estas características exhiben una variabilidad compleja influenciada por condiciones ambientales y factores termodinámicos. La Ecuación (1) representa el costo asociado a estas unidades.

$$C\left(P_{Gi}\right) = a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \qquad (1)$$

Donde (P_{Gi}) representa la potencia generada por el generador (i) en megavatios, mientras que $\left(a_i, b_i, c_i\right)$ son coeficientes constantes asociados.

El análisis del despacho económico se centra en dos enfoques: uno que ignora las pérdidas y otro que las considera. El análisis sin considerar pérdidas es una simplificación que proporciona una primera aproximación para resolver de manera iterativa.

Sin embargo, dado que siempre existen pérdidas en el sistema, esto complica el problema al requerir ajustes precisos. Estos ajustes pueden realizarse de forma exacta o aproximada, como se detalla en la Ecuación (2).

$$\min F = \sum_{i=1}^{n} C_i \left(P_{Gi} \right) \tag{2}$$

$$sujeto\ a \left(P_d + P_L - \sum_{i=1}^{n} \left(P_{Gi} \right) \right) = 0$$

Donde $\left(P_{Gi} \right)$ representa la potencia generada por el generador (i) en megavatios, la potencia demandad $\left(P_D \right)$ y $\left(P_L \right)$ corresponde a las pérdidas en la línea.

Una vez que se establece el problema de despacho económico, es crucial satisfacer las ecuaciones de balance nodal, las cuales se incorporan al modelo como restricciones fundamentales.

Función Objetivo

Desde la formulación del problema de optimización no lineal para el despacho económico, se define la función objetivo representada por la Ecuación (3), cuyo propósito principal es reducir al mínimo tanto el consumo de combustible del generador diésel como los costos operativos de la microrred durante el período evaluado (T).

$$J = \sum_{t=1}^{T} \left[C_d \times q_d \left(t \right) + C_{ENS} \times P_{ENS} \left(t \right) + C_{U_BESS} \times \left(P_B^C \left(t \right) \times \eta^C + \frac{P_B^D \left(t \right)}{\eta^D} \right) \right] \tag{3}$$

Donde, el costo asociado al generador diésel (C_d) se reduce al minimizar el consumo de diésel (q_t), mientras que el costo de la energía no entregada (C_{ENS}) también juega un papel importante. Por otro lado, el costo del uso de las BESS (C_{U_BESS}) también se considera, junto con los coeficientes de eficiencia para los modos de carga y descarga del BESS (η^C, η^D).

Sin embargo, el gasto asociado al uso del banco de baterías se muestra en la Ecuación (4). En esta expresión, el numerador refleja la inversión requerida (C_{I_BESS}) para cada batería y el denominador representa la energía máxima total (E_{max}) disponible durante un intervalo de tiempo (N_{cycles}).

$$C_{U_BESS} = \frac{C_{I_BESS}}{E_{max} \times N_{cycles}} \tag{4}$$

Es fundamental tener en cuenta que la función objetivo está orientada a minimizar los costos relacionados con la operación del sistema, particularmente en lo que respecta al consumo de diésel. Además, también incluye el costo asociado al uso de las baterías, tanto en su fase de carga como de descarga, considerando que esta inversión se deprecia de forma continua.

Restricciones

La función objetivo se encuentra restringida por múltiples condiciones que aseguran el correcto desarrollo del problema de optimización, por ejemplo, la Ecuación (5) de balance de potencia, establece que la energía producida por las unidades de potencia debe ser igual a la demanda eléctrica y se expresa como:

$$P_D(t) + P_S(t) + P_W(t) + P_B^D(t) = D(t) - P_{ENS}(t) + P_B^C(t)$$

Las unidades generadoras controlables están limitadas como en la ecuación (6), que establece los límites de potencia del generador diésel.

La ecuación (7) describe los límites de la energía no suministrada y la ecuación (8) define los límites de la energía renovable que se inyectará.

$$P_{D_min} \le P_D(t) \le P_{D_max} \tag{6}$$

$$0 \le P_{ENS}(t) \le D(t) \tag{7}$$

$$0 \le P_V(t) \le P_S(t) + P_W(t) \tag{8}$$

Sin embargo, la Ecuación (9) se define la función cuadrática encargada del control del generador a diésel, ya que la potencia generada disminuye a medida que aumenta el costo del combustible, dependiendo del porcentaje de consumo de combustible.

$$q_d(t) = \alpha_i + \beta_i P_{di} + \gamma_i P_{di}^2 \quad (9)$$

Cabe señalar que (α, α y α) son constantes que especifican la relación polinómica entre el consumo de combustible y, por lo tanto, su costo, y el orden de la máquina. Además, las variables de estado de BESS que representan la acción de control sobre la potencia de carga y descarga están limitadas por la capacidad máxima de energía que puede almacenar (o suministrar) el banco de baterías.

Cada límite está relacionado con las variables binarias que representan el estado de cada batería, ya sea en modo de carga o descarga ($X^C(t)$ y $X^D(t)$). Las restricciones en las ecuaciones (11) y (12) establecen restricciones en las binarias. Las restricciones en la ecuación (10) implican que solo puede funcionar un modo modular del paquete de baterías a la vez.

$$X^C(t) + X^D(t) \leq 1 \quad (10)$$

$$0 \geq P_B^C(t) \geq -E_{max} \times X^C(t) \quad (11)$$

$$0 \leq P_B^D(t) \leq E_{max} \times X^D(t) \quad (12)$$

La ecuación (13) expresa la condición inicial de almacenamiento del pack modular de baterías, la cual varía en función de: la energía inicial, (E_0), el estado de carga de cada batería, la eficiencia de cada batería y la potencia en el instante de tiempo (*t=1*) ya sea de carga o descarga.

La ecuación (14) por su parte establece la energía sobrante durante el horizonte de evaluación T, en función de cuánto sea la energía sobrante en cada batería del pack en función de la anterior (E_{t-1}) y también la eficiencia más la potencia en cada instante de tiempo (*t*), que le corresponde.

$$E(t) = E_0 + \left[P_B^C(t) \times \eta^C \right] - \left(\frac{P_B^D(t)}{\eta^D} \right) \quad (13)$$

El estado de cada batería establece un límite en su capacidad tanto para almacenar como para suministrar energía, como se expresa en la restricción de la Ecuación (15), donde (E_{max}) indica la máxima cantidad de energía que cada batería puede almacenar o suministrar en cualquier momento (t).

$$0 \le E(t) \le E_{max} \tag{15}$$

Respuesta del despacho económico mediante el diseño de la microrred aislada

El enfoque utilizado para resolver el problema de optimización no lineal en la microrred autónoma se describe en la Figura 8. Presenta la configuración programada de la microrred con un generador controlable (grupo electrógeno), energías renovables solar, eólica y un sistema de almacenamiento en baterías. Cuando estos componentes se configuran según sus especificaciones, se dice que la microrred está lista para satisfacer su demanda eléctrica durante todas las horas del día.

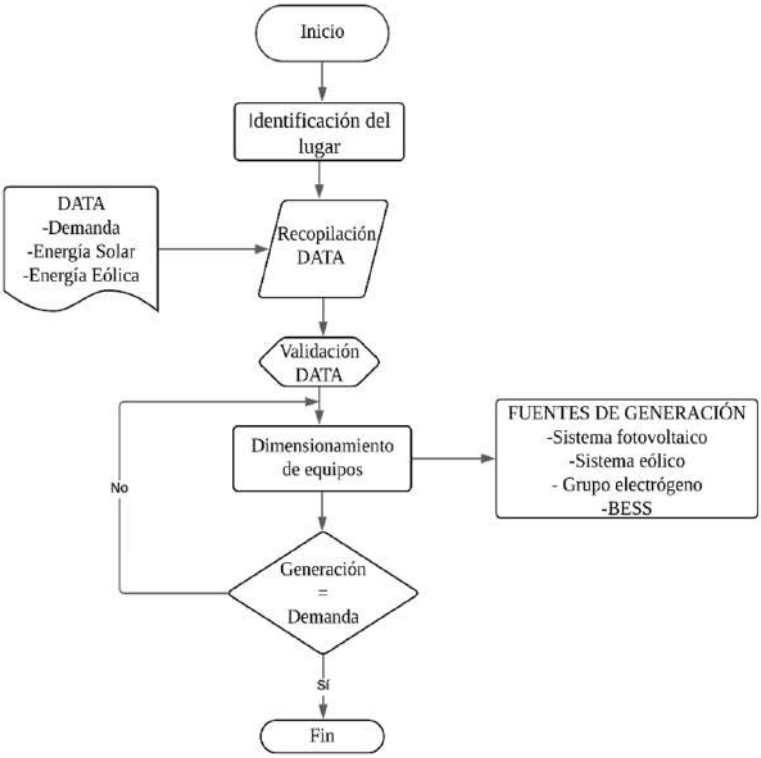
La Figura 8 describe los pasos para la implementación de la microrred desde el sitio seleccionado hasta los datos disponibles en los centros meteorológicos y recopilados mediante trabajo de campo o de bases de datos. Básicamente, cualquier sitio seleccionado para un estudio puede estar bien informado a través de la disponibilidad de datos de ese sitio en particular en los centros meteorológicos. La información sobre estos sitios puede haber sido obtenida por algunas empresas que realizan trabajo de campo y configuran su base de datos.

El diseño de la generación solar permitirá que las horas del sistema de almacenamiento con mayor irradiación solar cubran la demanda durante todo el día. El sistema eólico proporcionará energía directamente al sistema y también puede contribuir al almacenamiento. Las baterías comenzarán su carga inicial con el exceso de energía renovable disponible, mientras que el generador diésel se dimensionará para satisfacer la demanda eléctrica total y actuará como respaldo en caso de emergencia.

Una vez establecido el marco conceptual de la microrred y sus componentes, se recopilan datos meteorológicos. Los datos provienen del centro meteorológico de la NASA y de METEOBLUE. Estos datos son de alta calidad, tienen una resolución temporal de una hora durante dos años y están disponibles en formato SVG. Se realiza una revisión para eliminar los valores nulos o vacíos y tener datos más adecuados.

Figura 8.

Diagrama de diseño de la microrred aislada.



Implementación del modelo de optimización

El código que se debe implementar en cualquier software se basa en un diagrama de flujo (Figura 9), claro y conciso. Comenzar por borrar las ubicaciones de memoria es crucial para asegurarse de que los datos entrantes (datos de demanda, energía solar, energía eólica) sean reales.

De manera similar, la función objetivo y las restricciones deben convertirse en una cadena para que cada dato se procese en cualquier instante de tiempo al unísono.

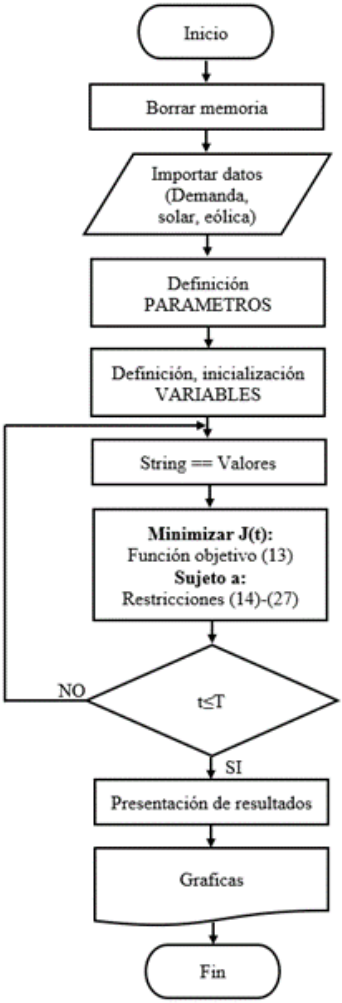
El proceso continúa con la optimización de la tarea utilizando bibliotecas de software integradas, después de lo cual se consideran analizados los resultados. Y si no se cumplen los requisitos necesarios, se realiza otra iteración.

Además, otro punto es que tanto la función objetivo como las restricciones deben asignarse a una cadena. Esto ayuda a evaluar cada elemento de datos en el mismo instante.

Más adelante en la ejecución (Figura 9), la tarea se resuelve utilizando la biblioteca incorporada del software, después de lo cual se consideran los resultados. Si no se cumplen estas condiciones, se realizará otra iteración.

Figura 9.

Flujograma de optimización en software.



La metodología empleada para la obtención de resultados parte de una planificación donde se plantea una microrred aislada, validada mediante una base de datos obtenida a partir de los recursos presentados en el desarrollo de la investigación.

El proyecto se centra en el análisis de optimización para un conjunto específico de datos, utilizando MATLAB para procesar y optimizar los recursos, permitiendo verificar los resultados y evaluar su eficacia en la reducción del costo operativo.

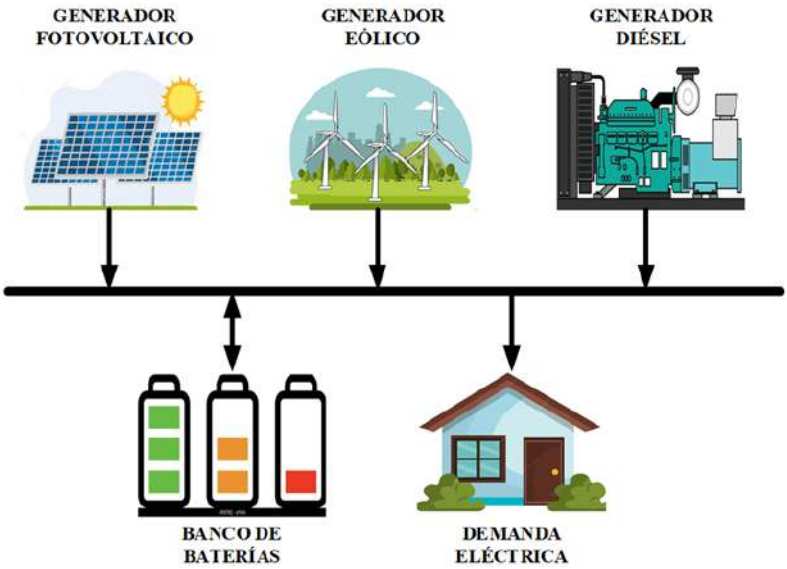
La microrred propuesta (Figura 10) está conformada por un sistema fotovoltaico y eólico, en cuyo caso al ser energía renovable y no incurrir en un gasto económico del recurso energético, son prioritarios en el despacho económico, por lo que aportarán a la demanda la máxima energía producida.

En caso de que se dé el caso de que haya mayor producción de energía a la requerida por la demanda, ésta será aportada al banco de baterías, estas mismas inicialmente descargadas que deberán cargarse completamente para funcionar como fuentes de energía.

Finalmente, se cuenta con un generador diésel, este solo arrancará en caso de ser necesario durante el tiempo que sea necesario para dar energía a la demanda no abastecida por fuentes renovables de energía. Su operación incurre en un coste económico por lo que el sistema de gestión energética deberá, en el algoritmo implementado, minimizar el consumo de recursos energéticos ya que la salida del generador es cuadrática respecto al diésel consumido. Además, en caso de ser necesario, el generador actuará como standby en caso de que las fuentes renovables no aporten energía a la microrred.

Figura 10.

Microrred aislada propuesta.



En la Tabla4 se encuentran especificados los límites de las diversas unidades de generación empleadas en el despacho económico propuesto, junto con los límites de potencia demandada por la microrred aislada.

Tabla 4.

Costos de consideración para la optimización.

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Costo de inversión de Baterías	C_{UBESS}	1500	USD
Costo de uso de Baterías	C_{UBESS}	0.52	USD/ciclo
Costo operación del diésel	C_{D}	1.75	USD/gal
Energía No Suministrada	C_{ENS}	0.92	USD/KW

En la Tabla 5 se presentan los parámetros del caso de uso para modelar el sistema de almacenamiento de batería BESS, que comprende las eficiencias tanto en modo de carga como de descarga y el porcentaje de degradación, junto con los límites del estado de carga.

Tabla 5.

Capacidad instalada y la demanda eléctrica de la microrred.

Elemento de la microrred	Pmin (KW)	Pmax (KW)
Potencia de demanda	1.5	4
Generador fotovoltaico	0.5	6.5
Generador eólico	0.2	1
Banco de baterías	0	2.4
Generador diésel	0	5

En la Tabla 6 se presentan los costos operativos considerados en el problema de optimización: costo de inversión del BESS basado en el costo total del banco de baterías, costo de utilización del BESS calculado utilizando la ecuación (2) y costo operativo del generador diésel.

Tabla 6.

Características Peimar SG360M.

DESCRIPCIÓN	VALORES
Potencia nominal (Pmax)	360 W
Voltaje a Pmax (Vmp)	38 V
Corriente a Pmax (Imp)	9.48 A
Voltaje a circuito abierto (Voc)	46.6 V
Corriente a corto circuito (Isc)	10.09 A
Voltaje máximo del sistema	1500 V
Capacidad máxima de fusible en serie	15 A
Eficiencia del módulo	18.54 %

Descripción del caso de estudio

En el desarrollo de la microrred se utilizan datos reales de la Empresa Eléctrica de Quito y los obtenidos de diversas estaciones meteorológicas en Internet. Sin embargo, para tener una referencia más cercana a la realidad, el lugar se ubica en las coordenadas (Longitud -78.56 Latitud -0.35) de San José de Cutuglahua, Cantón Quito, Provincia de Pichincha.

Se analizarán las respuestas a un despacho económico de cada hora en varios horizontes de software como 24, 48 y 168 horas; lo importante es si se satisface la demanda por parte de las fuentes de generación con prioridad de fuentes renovables.

Respuesta del despacho económico

La investigación se sustenta en una sólida base teórica y metodológica, así como el planteamiento de la propuesta, entre otras cosas, son aquellas oportunidades que permitirán obtener, aplicar y verificar los resultados obtenidos en el transcurso de una forma experimental. Por lo tanto, una microrred aislada, técnicas de optimización específicamente la realización de una programación cuadrática introduce al examen del despacho económico donde el factor principal de análisis es el consumo de combustible con respecto al generador de combustión.

Esencialmente, el proyecto es un análisis óptimo de datos. para un conjunto de datos dado. MATLAB ayudará a procesar y lograr la optimización de los recursos a analizar donde se pueden verificar los resultados y conocer su respuesta en función de la disminución de los costos operativos.

Esencialmente, el proyecto se basa en el análisis óptimo de datos. Resulta que MATLAB es lo que nos ayuda a procesar y lograr la optimización de los recursos a analizar mediante los cuales podemos verificar los resultados y conocer su respuesta en función de la disminución de los costos operativos. El uso de MATLAB ayudará a obtener respuestas reales.

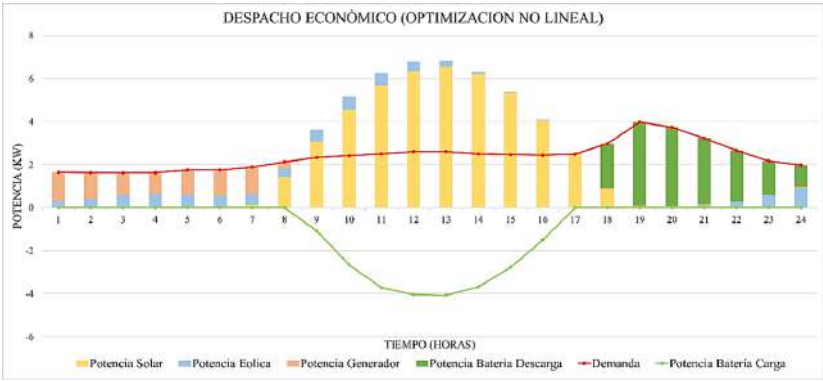
Resultado Caso Base

El análisis del caso base considera el despacho económico de una microrred aislada a lo largo de un día típico (Ver Figura 10), que consiste en interacciones entre fuentes de energía renovables y un paquete de baterías modular. Su objetivo es verificar el comportamiento del generador diésel específicamente en lo que respecta a su consumo de combustible.

Los resultados mostraron que la demanda podría satisfacerse mediante fuentes renovables junto con el almacenamiento, lo que reduce la proporción que debe cubrir el generador de combustión y, por lo tanto, el costo operativo.

Figura 11.

Despacho económico no lineal en un tiempo de 24 horas.



De la Figura 11 se observa que, con más energía renovable de la necesaria, la batería inicia su carga, y una vez llena pasa a la etapa de generación devolviendo al sistema, permitiendo así suministrar energía a partir de las 18:00 horas, es decir, en el momento en que la energía solar empieza a disminuir.

El pack modular inicia su ciclo de carga con la ayuda de fuentes de energía renovables que permitirán abastecer la demanda en un tiempo determinado. El encendido del generador debe ser suave para asegurar que no haya choques mecánicos.

Resultado Caso 2

En este caso, se evaluó el desempeño de la microrred aislada para un horizonte de programación de 48 horas como se muestra en la Figura 12. Los resultados evidenciaron una optimización homogénea con el caso base: una eficiente refutación de fuentes renovables y una disminución en el uso de generadores diésel. Esto permitió una optimización no lineal para coordinar de manera más efectiva las fluctuaciones de la demanda, en cuyo caso se maximiza el uso de energía renovable.

Figura 12.

Despacho económico no lineal en un tiempo de 48 horas.

En el segundo día, se observa que la energía eólica aporta una gran cantidad de energía al sistema, incluso reduciendo el uso del generador, permitiendo así solo una carga de las baterías.

El generador que actúa mínimamente hace que sea esencial entender cómo el paquete modular proporciona energía al sistema. A diferencia del caso 1, hay más presencia de energía de la batería, minimizando aún más los costos de consumo de combustible.

Si bien la energía de la batería está disponible, debe tenerse en cuenta que se trata de un costo indirecto, es decir, la energía no suministrada, que, aunque no se pueda evitar, debe considerarse durante el dimensionamiento para la implementación de una microrred.

Se observa que la energía eólica en el segundo día proporciona una gran cantidad de energía al sistema. Incluso minimizó el uso del generador, permitiendo así una carga de las baterías. Mientras el paquete modular proporcione (mínimamente) energía al sistema, no importa tanto si se observa o no la mayor parte. Esto se puede notar a partir de la mayor presencia de energía de la batería en el caso 2 con un costo de consumo de combustible cero

Además, las representaciones gráficas previas indican que el generador diésel opera de manera ininterrumpida debido al enfoque de modelado empleado en el problema de optimización. Mediante la inclusión del grupo electrógeno a través de una formulación cuadrática, se ha logrado mitigar las interrupciones del generador diésel, permitiendo períodos de funcionamiento continuo y sin interrupciones a lo largo del tiempo. Este comportamiento se ha

observado de manera consistente en los tres escenarios de estudio propuestos, que comprenden horizontes temporales de 24, 48.

Discusión

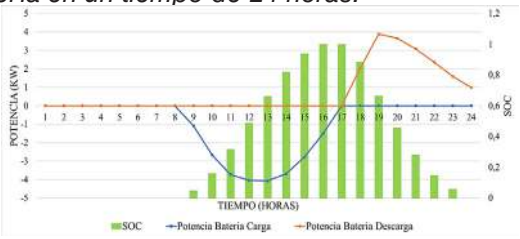
Se analizan los resultados de tres casos de estudio presentados en las Figuras 11 y 12. Por ejemplo, en la simulación del despacho económico durante 24 horas en la Figura 11, se puede observar que al comienzo del día la demanda eléctrica se satisface principalmente con generadores diésel y en menor medida con generadores eólicos. A partir de las 6h00 horas, entra en operación el generador solar, gradualmente cubriendo la demanda hasta superarla, momento en el cual el exceso de energía se almacena en baterías que empiezan a cargarse. A partir de las 16h00 horas, el generador diésel comienza a operar con el respaldo del banco de baterías en modo de descarga, mientras que el generador eólico contribuye mínimamente, asegurando así la cobertura de las horas restantes del día hasta las 24h00 horas.

La Figura 12 exhibe un patrón comparable al primer día, con ligeras variaciones en los intervalos en que entran en juego las diversas fuentes de energía, debido a la naturaleza impredecible de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Es importante señalar que la carga del banco de baterías representa un consumo eléctrico, ya que estas almacenan energía cuando están descargadas y la suministran cuando están completamente cargadas, alcanzando el 100 % de su capacidad (SOC).

En la Figura 13 se representa el ciclo de operación del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS), mostrando las fluctuaciones de potencia durante los modos de carga y descarga, así como el estado de carga del BESS a lo largo de un ciclo de 24 horas. Durante el día, el BESS alcanza su máxima carga alrededor de las 14h00 horas, aprovechando la disponibilidad del recurso solar para satisfacer la demanda eléctrica y almacenar energía en el BESS.

Figura 13.

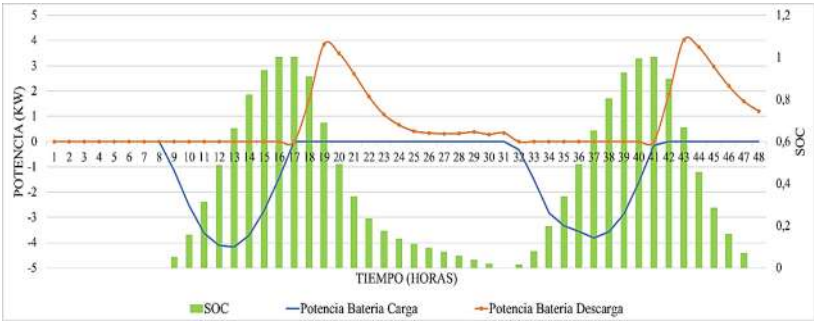
Ciclo de la batería en un tiempo de 24 horas.



La Figura 14 muestra el ciclo de uso del sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) durante un período de 48 horas. Se observa que las curvas son similares entre sí debido a los picos de carga y descarga diarios proporcionados por el generador solar.

Figura 14.

Ciclo de la batería en un tiempo de 48 horas.



Conclusiones

La optimización matemática, al ser una herramienta efectiva para resolver diversos problemas, incluidos los relacionados con despachos económicos, requiere recursos significativos y un procesamiento exhaustivo de datos. Por lo tanto, la habilidad para validar datos es crucial para obtener resultados precisos y aplicables en la práctica.

La validación de datos adquiere relevancia crucial en relación con la demanda presente en un área determinada. Es fundamental destacar que el conocimiento preciso de esta demanda constituye el elemento central para la creación de una microrred, ya que permite diseñar soluciones que satisfagan las necesidades específicas de esa zona.

Según los objetivos de la investigación, se presenta una microrred autónoma que integra elementos clave como fuentes de generación renovables y no renovables. El propósito es satisfacer una demanda específica, empleando un sistema de gestión que prioriza la optimización de los recursos energéticos disponibles.

El costo asociado a la energía no suministrada se evalúa a nivel nacional mediante un análisis exhaustivo, lo cual representa un gasto considerable y conduce a una disminución en la eficiencia del sistema energético, resultando en una pérdida de recursos.

En varios estudios, se recomienda resolver la función objetivo utilizando programación lineal entera mixta, lo cual implica la transformación de la curva de consumo de combustible en una forma lineal. Este método permite abordar el problema de manera más completa y gestionarlo como un problema no lineal.

La investigación se desarrolla en torno a una red aislada, pero se debe considerar una microrred que se interconecte a la red principal, con el objetivo de conocer la respuesta de las energías renovables, que como se mencionó es un recurso donde solo se considera el costo de instalación y mantenimiento.

La función objetivo puede incluir las variables adicionales correspondientes como en la realidad y con holgura a considerar, agregando otras variables de holgura hacia una propuesta de escenario real, pero valores variables con valor fijo es importante diferenciarlos que se puedan manejar y saber cómo la respuesta en la optimización de estas variables.

El abordaje con energías renovables tiene que ser planteado junto con un estudio donde el lugar pueda haber elegido energía solar y/o eólica en cantidades significativas para abastecer la demanda. La proyección de equipos debe ser acorde al crecimiento de la demanda eléctrica.

También es plantear otros temas para estudios futuros donde se pueda plantear un despacho económico por diferentes: para conocer la respuesta y ahorros que presenta el uso de combustible en caso de ser necesario.

Referencias Bibliográficas

Calero Santamaria, M. P. (2023). ***La Motricidad fina en la iniciación de la lectoescritura en los niños del primer año de Educación Básica (Master's thesis, Ecuador.*** Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Obtenido de http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11636

Fazanes, A. C., Fernández, J., Vázquez, N., Núñez, A., & Gómez, C. (2022). Competencia motriz y condición física relacionada con la salud en escolares de Educación Primaria. ***Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación, 46***, 218-226.

Macias, L. E., & Vera, A. (2024). Improvements in goal-oriented learning through game activity and its development in motor skills. ***SPORTTK-Revista EuroAmericana de Ciencias del Deporte, 13***. doi:https://doi.org/10.6018/sportk.602801

Romero Rosero, A. V. (2023). ***Programa de actividades lúdicas para fortalecer la motricidad gruesa de los niños de 5 a 6 años del Colegio Alemán de Quito.*** UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE. Obtenido de https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/13768/2/PG%201385%20TRABAJO%20GRADO.pdf

Rowlandson, T., Gleason, M., Sentelhas, P., Gillespie, T., Thomas, C., & Hornbuckle, B. (2015). Reconsidering leaf wetness duration determination for plant disease management. ***Plant disease, 99***(3), 310-319.

El FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

2

Capítulo

Evaluación de Modelos Óptimos de Transmisión Energética para minimizar pérdidas en la generación distribuida

AUTORES: Carlos Quinatoa; Cristhian Masaquiza; Jimmy Vaca; Luis Camacho

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Evaluación de Modelos Óptimos de Transmisión Energética para minimizar pérdidas en la generación distribuida

Evaluation of Optimal Energy Transmission Models to minimize losses in distributed generation

Resumen

El presente artículo de revisión evalúa los modelos óptimos para minimizar pérdidas en sistemas de generación distribuida (GD) en Ecuador Se analizan enfoques de optimización, incluyendo métodos analíticos como la programación lineal y no lineal, métodos metaheurísticos como algoritmos genéticos (GA), optimización por enjambre de partículas (PSO) y búsqueda tabú (TS), y modelos híbridos como el Algoritmo de Optimización de Ballena (WOA) y el Algoritmo de Optimización de Saltamontes (GOA) con Búsqueda del Cuco (CS). Un caso de estudio en Ecuador utilizó WOA para la ubicación de dispositivos FACTS, logrando una reducción del 15% en pérdidas de potencia y un aumento del 20% en la capacidad de transferencia de potencia real. Otro estudio optimizó la ubicación y tamaño de unidades de (GD) usando (GOA) y (CS), reduciendo pérdidas en un 10% y mejorando la estabilidad del sistema. Se emplearon técnicas avanzadas como Programación Entera Mixta No Lineal (MINLP) y algoritmos genéticos modificados, mostrando que los modelos híbridos y metaheurísticos son más efectivos que los métodos tradicionales en términos de rendimiento y velocidad computacional.

Palabras clave: Sistema de generación, distribución, optimización, modelos, velocidad computacional

Abstract

This review article evaluates optimal models for minimizing losses in distributed generation (DG) systems in Ecuador. Various optimization approaches are analyzed, including analytical methods such as linear and nonlinear programming, metaheuristic methods like genetic algorithms (GA), particle swarm optimization (PSO), and tabu search (TS), as well as hybrid models such as the Whale Optimization Algorithm (WOA) and Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) combined with Cuco Search (CS). A case study in Ecuador employed WOA for the placement of FACTS devices, achieving a 15% reduction in power losses and a 20% increase in real power transfer capability. Another study optimized the location and size of DG units using GOA and CS, reducing losses by 10% and improving system stability. Advanced techniques like Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) and modified genetic algorithms were employed, demonstrating that hybrid and

metaheuristic models are more effective than traditional methods in terms of performance and computational speed

Keywords: Generation system, distribution, optimization, models, computational speed

Introducción

En la actualidad, el desarrollo de tecnología permite transportar la energía a los lugares más alejados del ecuador. Lo cual Almeida (2006), afirma que las centrales de generación por el mismo hecho de que la tecnología va en aumento se encuentras en lugares distantes de las zonas de consumo. Sin embargo, aun en Ecuador existen zonas muy particulares donde la energía no llega por completo, o no existe esta vía tecnología para que llegue a este destino. Para esto se pueden considerar varias ideas donde se pueda llegar esta energía y ahí es donde entra la GD, esto es especialmente porque Ecuador es un país rico en recursos renovables o recursos alternativos. La generación distribuida ofrece una solución prometedora para mejorar la cobertura eléctrica y la calidad del suministro en áreas remotas y de difícil acceso (Ehsan & Yang, 2018).

Al aprovechar fuentes de energía renovable como la solar, eólica, hidráulica y biomasa, es posible desarrollar proyectos de GD que no solo diversifiquen la matriz energética del país, sino que también promuevan la sostenibilidad y reduzcan la dependencia de fuentes de energía convencionales. Además, la integración adecuada de la GD puede contribuir a la reducción de pérdidas de energía en la transmisión y distribución, mejorar la estabilidad del voltaje, y aumentar la resiliencia del sistema eléctrico frente a fallos y fluctuaciones de la demanda, caso contrario si no se ubica y dimensiona correctamente, la GD puede aumentar las pérdidas de energía y reducir la fiabilidad del sistema (Viral & Khatod, 2012).

Algunos de los modelos se mencionan en Atwa et al. (2010), de generación-carga que combina todas las condiciones operativas posibles de las unidades GD renovables y sus probabilidades, integrándolas en un problema de planificación determinista formulado como un programa no lineal de enteros mixtos (MINLP). Las restricciones incluyen límites de voltaje, capacidad de los alimentadores, límite máximo de penetración y el tamaño discreto de las unidades DG disponibles. En cambio Gbadamosi y Nwulu (2021), presenta problemas de optimización multiobjetivo que se resuelven utilizando métodos de modelado DC, modificado DC y AC para calcular con precisión las pérdidas

eléctricas y su impacto en el procedimiento de planificación de expansión, que esto es importante para la GD en Ecuador, con algunos de estos modelos se llega a una compresión mucho mejor del tema.

Es significante un modelo que permita ver las perdidas en el sector de transmisión (Bamigbola et al., 2014), este modelo desarrolla un modelo matemático para determinar las pérdidas de energía a lo largo de las líneas de transmisión, considerando las pérdidas óhmicas y de corona, y emplea técnicas de optimización clásica para formular una estrategia óptima que minimice estas pérdidas. Este modelo de Bamigbola et al. (2014), permite calcular el flujo de corriente y voltaje a lo largo de las líneas de transmisión y proporciona una solución económica al problema de la minimización de pérdidas.

El enfoque actual está en la aplicación de algoritmos de minería de datos a los resultados del plan de expansión de transmisión, con el objetivo de identificar asociaciones entre líneas, priorizarlas y optimizar la eficiencia del sistema de transmisión (Shandilya et al., 2019a). Se priorizan las líneas en función de vectores de soporte y confianza, lo que ayuda a reducir costos de inversión y operativos para los actores del mercado. Se utiliza una función objetivo única y se generan conjuntos de datos variando la carga y el vector de generación para encontrar las líneas más frecuentemente asociadas. El modelo que se asemeja a este artículo se basa en el uso de algoritmos genéticos y factores de ponderación (Ugranli & Karatepe, 2012a).

La efectividad de este enfoque se pone a prueba en la red de malla IEEE-30 bus. La planificación adecuada de las DG es importante para aprovechar al máximo los beneficios potenciales que ofrecen, como la minimización de pérdidas de energía, mejora del perfil de voltaje, alivio de las líneas de transmisión y distribución, entre otros (Ugranli & Karatepe, 2012a).

Metodología

La metodología de esta revisión se centra en identificar y evaluar los modelos óptimos de sistemas de transmisión de energía que se utilizan para minimizar las pérdidas en la GD. Este enfoque es crucial debido al creciente interés en la GD como una solución para mejorar la eficiencia energética y reducir la dependencia de las fuentes de energía centralizadas.

La integración de GD, que incluye fuentes de energía renovable como solar y eólica, presenta desafíos técnicos significativos debido a su naturaleza variable e intermitente. Los sistemas de transmisión actuales a menudo no están diseñados para manejar estas características, lo que conduce a ineficiencias y mayores pérdidas de energía. Además, la falta de modelos de

optimización adecuados que consideren la dispersión y variabilidad de las fuentes renovables resulta en una planificación y operación subóptimas del sistema de transmisión.

Para abordar estos desafíos, es esencial aplicar técnicas avanzadas como la minería de datos y algoritmos de optimización. Estos enfoques innovadores pueden mejorar significativamente la eficiencia de los sistemas de transmisión al minimizar las pérdidas asociadas con la GD. Sin embargo, la adopción y validación de estos modelos aún son limitadas en la práctica, lo que subraya la necesidad de una investigación exhaustiva y de la colaboración entre investigadores, ingenieros y legisladores.

Búsqueda de información

Selección de Bases de Datos y Recursos. - La búsqueda se realizó en bases de datos reconocidas por su relevancia en el campo de la ingeniería y la energía, tales como IEEE Xplore, Scopus, Web of Science y Google Scholar. Estos recursos fueron seleccionados por su amplia cobertura de literatura científica y técnica.

Desarrollo de Estrategia de Búsqueda. - Se formularon términos de búsqueda específicos para capturar la información más relevante. Las palabras clave utilizadas incluyeron “sistemas de transmisión de energía”, “minimización de pérdidas”, “generación distribuida”, “optimización”, “modelos” y “evaluación”. Se utilizaron operadores booleanos para combinar estos términos de manera efectiva y refinar los resultados de búsqueda.

Ejecución de la Búsqueda Inicial.- La búsqueda inicial arrojó un total de 40 documentos que incluían artículos científicos, conferencias y revisiones. Cada documento fue revisado para evaluar su relevancia y calidad en relación con los objetivos de la investigación.

Filtrado y Selección de Estudios.- De los 40 documentos iniciales, se seleccionaron 28 estudios clave basados en criterios de relevancia, calidad metodológica y aporte al tema de la minimización de pérdidas en la GD. Este filtrado se realizó mediante una revisión detallada de los títulos, resúmenes y, cuando fue necesario, del contenido completo de los documentos.

Síntesis Cualitativa de Datos.- Se realizó una síntesis cualitativa de los datos obtenidos, agrupando los estudios según los enfoques de optimización aplicados y los resultados obtenidos. Esta síntesis permitió identificar patrones comunes, enfoques innovadores y lagunas en la literatura existente.

Evaluación Crítica de Modelos y Técnicas.- Cada modelo y técnica de optimización fue evaluado críticamente en términos de su aplicabilidad práctica, beneficios y limitaciones. Esta evaluación incluyó un análisis comparativo de los resultados reportados en los estudios seleccionados, destacando las mejores prácticas y recomendaciones para futuras investigaciones.

Evaluación de Relevancia y Calidad.- La evaluación de relevancia y calidad de los estudios seleccionados se realizó utilizando criterios específicos, tales como la robustez metodológica, la reproducibilidad de los resultados y la contribución al conocimiento existente. Se utilizaron listas de verificación estandarizadas para asegurar una evaluación sistemática y objetiva de cada estudio.

Análisis de datos

Los datos extraídos de los estudios seleccionados se analizaron y sintetizaron para proporcionar una visión integral de los modelos de optimización más efectivos para la minimización de pérdidas en la GD. Este análisis incluyó la identificación de factores clave que influyen en la eficiencia de los sistemas de transmisión y la formulación de recomendaciones basadas en la evidencia.

Metodologías de optimización

- Analíticos: Incluyen técnicas tradicionales como la programación lineal y no lineal, utilizadas en Shandilya et al. (2019b) y Ugranli & Karatepe (2012b)
- Metaheurísticos: Algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, revisados en Ettappan et al., 2020 y Hui Pang et al. (2008).
- Híbridos: Combinación de métodos analíticos y metaheurísticos, como en Aguila-Téllez et al. (2022) y Nadeem et al. (2020) .

Resultados

Caso de estudio

En Nadeem et al. (2020), se enfoca en la optimización de la ubicación y dimensionamiento de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) en una red de transmisión utilizando el WOA. Los dispositivos FACTS desempeñan un papel importante en la minimización de pérdidas de potencia y desviaciones de voltaje, y en el aumento de la capacidad de transferencia de potencia real de las líneas de transmisión.

Aunque Suresh & Edward (2020), relaciona un modelo hibrido GOA y la

técnica de Búsqueda del CS para optimizar la posición y el tamaño de las unidades de GD con el fin de reducir las pérdidas en el sistema de distribución.

En Suresh & Edward (2020), menciona que las pérdidas de línea las podemos poner en la primera ecuación (1).

$$f1 = \min \sum_{(i,j)\in b} C_{ij}(V_j^2 + V_i^2 - 2V_iV_j\cos\theta_{ij}) \quad (1)$$

Como se trata de un modelo híbrido, también se puede observar la minimización de la devolución de voltaje, lo cual se refleja en la ecuación (2).

$$f2 = \min \sum_{i=0}^{N} \left(\frac{V_i - V_i^{sp}}{V_i^{max} - V_i^{Min}} \right)^2 \quad (2)$$

El sistema propuesto mostró una reducción significativa en las pérdidas de potencia y una mejora en el perfil de voltaje comparado con otras técnicas existentes. La técnica híbrida desempeña mejor en términos de estabilidad dinámica y reducción de pérdidas en comparación con métodos como el GA y la Optimización por Enjambre de Partículas PSO. La combinación de GOA y CS resulta en una técnica efectiva para la optimización de la ubicación y tamaño de unidades DG. La técnica híbrida propuesta reduce la complejidad del algoritmo y el tiempo computacional. La implementación en MATLAB/Simulink proporciona una plataforma robusta para la evaluación y validación de los resultados.

Para constatar esto Sánchez de la Cruz et al. (2018) y Theo et al. (2017), aborda el modelo, la evaluación de recursos renovables, con énfasis en la incertidumbre de los recursos solares y eólicos. Destaca la aplicación de modelos de pronóstico basados en sus horizontes de predicción, requisitos de potencia computacional y la intensidad de los datos de entrenamiento. Incluye el análisis de perfiles de demanda de carga para adaptar mejor la generación distribuida a las necesidades energéticas. El modelo se formula teniendo en cuenta diversos generadores de energía (solar, eólica y mareomotriz), almacenamiento de energía y modelos de balance energético. Se discuten los criterios de optimización, tales como costos mínimos, emisiones de carbono y consumo de diésel, entre otros. Para los problemas de ubicación y capaci-

dad de DG que enfatizan el rendimiento operativo, se utilizan enfoques modernos debido a la inclusión de restricciones no lineales y funciones objetivo complejas. Se utilizan modelos de Programación Lineal (LP) y Programación Lineal Entera Mixta (MILP) para macro-planificación sin considerar detalladamente aspectos técnicos. Y enfoques como el Algoritmo Genético Modificado (GA), la Optimización por Enjambre de Partículas jerárquica autoorganizada (SOHBPSO), y nuevos métodos inspirados en la naturaleza como el GWO se emplean para mejorar la calidad de la búsqueda de soluciones y la velocidad computacional. El modelo incluye una variedad de parámetros esenciales que son críticos para la evaluación del rendimiento de los sistemas de almacenamiento y conversión de energía:

- Eficiencia de carga/descarga (fC/fD): Esta medida es crucial para entender cuánta energía se pierde durante los procesos de carga y descarga de los sistemas de almacenamiento.
- Eficiencia del inversor (fI): Indica la eficiencia de los inversores utilizados en el sistema, los cuales son necesarios para convertir la energía almacenada de corriente continua (DC) a corriente alterna (AC).
- Eficiencia del rectificador (fRec): Similar a la eficiencia del inversor, pero en el sentido contrario, convirtiendo AC a DC.
- Acoplamiento de la carga AC-DC: Un parámetro importante para determinar la compatibilidad entre diferentes tipos de cargas y fuentes de energía.
- Eficiencia del electrolizador (fElec) y eficiencia de la celda de combustible (fFC): Específicos para sistemas que incluyen almacenamiento de hidrógeno, estos parámetros ayudan a evaluar la viabilidad de la conversión y almacenamiento de energía en forma de hidrógeno.
- Tasa de autodescarga (fSD): Indica la tasa a la que se pierde energía del sistema de almacenamiento debido a autodescargas naturales.
- Profundidad de descarga (H): Un parámetro que determina hasta qué punto se puede descargar el sistema de almacenamiento sin afectar su vida útil.
- Eficiencia de ciclo completo (fR): Una medida de la eficiencia global del sistema, considerando todas las pérdidas durante el ciclo completo de almacenamiento y recuperación de energía.

Se recalca que esta información se encuentra en las referencias que hemos abordado en el principio (Sánchez de la Cruz et al., 2018; Theo et al., 2017).

No obstante, si se enfoca en modelos óptimos de GD (Borges & Falcão, 2006), tiene un énfasis en lo que ha sido investigado, ya que dicho modelo tiene como objetivo optimizar la ubicación y el dimensionamiento de las unidades de GD para minimizar las pérdidas eléctricas en la red de distribución primaria, garantizar niveles aceptables de fiabilidad y mantener un perfil de tensión adecuado. La optimización se logra mediante la combinación de técnicas de algoritmos genéticos AG con métodos de evaluación de los impactos de la GD en la fiabilidad del sistema, las pérdidas y el perfil de tensión. La función de evaluación de aptitud que guía al AG hacia la solución es la relación entre el beneficio obtenido por la instalación de unidades GD y los costos de inversión y operación incurridos en su instalación. La evaluación se basa en un método de flujo de potencia para redes radiales con la representación de generadores dispersos. Cada unidad de GD se representa como un bus de tipo PV con un módulo de tensión especificado. La representación de buses PV implica la creación de puntos de interrupción en la red, donde las tensiones de los dos buses deben mantenerse en el mismo módulo especificado. En cada iteración, se calcula el desajuste de tensión entre los dos lados del punto de interrupción y se ajusta mediante la inyección de potencia reactiva hasta que la desajuste sea menor que una tolerancia predefinida.

Otro modelo que verifica la evaluación de este artículo es el utilizado por Mancò et al. (2024), el modelo descrito es una formulación matemática descompuesta para la síntesis, diseño y operación de sistemas energéticos multi-energía. La optimización se realiza mediante un problema maestro y un problema esclavo, donde el problema maestro MP utiliza variables de síntesis y diseño. Las variables de síntesis son binarias e indican la selección de una tecnología específica, mientras que las variables de diseño pueden ser continuas o discretas y representan la potencia nominal del componente seleccionado. La formulación matemática incluye funciones objetivo y restricciones. La función objetivo es generalmente económica, minimizando los costos operativos que incluyen costos de combustibles y costos/ingresos por intercambios con redes de energía. Las restricciones se dividen en igualdades y desigualdades para ambos problemas, maestro y esclavo.

Este modelo propone una técnica novedosa de ubicación basada en el algoritmo mejorado de optimización del chacal dorado IGJO para bancos de capacitores múltiples CBs y DGs de múltiples tipos en una red de distribución,

considerando problemas de uno y múltiples objetivos. El algoritmo propuesto incorpora ecuaciones basadas en memoria y una estrategia de caminata aleatoria para mejorar la precisión y la velocidad de convergencia de la reciente optimización del chacal dorado (Elseify et al., 2024). El problema de optimización se formula como un problema multiobjetivo ponderado que busca mejorar los perfiles de voltaje, aumentar la estabilidad y minimizar la pérdida total de potencia activa. También se emplea un índice llamado sensibilidad a la pérdida reactiva QLSI con el IGJO desarrollado para identificar los nodos candidatos para la instalación de DGs y CBs, reduciendo así el espacio de búsqueda del algoritmo de optimización. La robustez del algoritmo IGJO se evalúa a través de las funciones de referencia CEC 2020, y se realiza un estudio comparativo con el GJO original y otros nueve competidores recientes utilizando diversas pruebas estadísticas para confirmar su dominio y superioridad. Los resultados de la simulación demuestran que el IGJO propuesto supera a los demás algoritmos en todas las situaciones analizadas, siendo óptimo para la inclusión de DGs en presencia de incertidumbres de generación y demanda. En particular, la integración de tres unidades de CBs junto con tres DGs Tipo-I y DG Tipo-III reduce la pérdida de potencia activa a 4.2664 kW y 3.4178 kW, respectivamente. La menor pérdida de potencia, aproximadamente 2.7989 kW, se logra con la integración simultánea de tres DGs Tipo-I y DGs Tipo-III utilizando el IGJO desarrollado.

Los sustentos a la GD, se demuestra en ARCERNNR (2023), donde a los consumidores no regulados consumos propios y grandes consumidores instalar sistemas de generación distribuida para su autoabastecimiento. También promueve el uso de tecnologías limpias y energías renovables no contaminantes. Establece que el Estado debe garantizar la provisión de servicios públicos de energía eléctrica bajo principios de eficiencia y sostenibilidad ambiental. Esto da una reducción de pérdidas en la transmisión y distribución de energía, mejora en la estabilidad de la red, promoción del uso de energías renovables, y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que es lo que buscamos en este artículo de revisión. También para poder llegar a este reglamente se deben establecer límites claros sobre la capacidad máxima de los sistemas de generación distribuida que los consumidores no regulados pueden instalar. Deben definirse los requisitos técnicos y procedimientos para la conexión a la red de distribución, asegurando que no se comprometa la estabilidad y seguridad de la red y la implementación de sistemas de medición adecuados para contabilizar la energía generada y consumida, y para gestionar la inyección de excedentes a la red. La implementación de la generación distribuida debe considerar tanto los beneficios como los desafíos técnicos

y económicos, asegurando que se mantengan la estabilidad y seguridad del sistema eléctrico.

Discusión Bibliográfica

En esta sección, se analizarán las citas previamente mencionadas, enfocándose en las situaciones, métodos y resultados presentados en cada una. Las citas seleccionadas se eligen por su relevancia y aporte informativo en relación con el título de esta investigación, centrándose exclusivamente en artículos significativos para este campo de estudio. En referencia a Ehsan & Yang (2018) , cuyos parámetros se reflejan en la Tabla 7 a continuación.

Tabla 7.

Situación, hipótesis, y resultados.

Situación Problemática	La creciente integración de generación distribuida (DG) en las redes de distribución eléctrica plantea desafíos significativos en cuanto a la planificación óptima. Estos desafíos incluyen la necesidad de determinar el tamaño, la ubicación y el tipo de DG de manera que se minimicen las pérdidas de energía, se mejore la estabilidad del voltaje, y se maximicen tanto los beneficios económicos como la fiabilidad del sistema. Además, la naturaleza intermitente de las fuentes renovables de DG añade una capa adicional de complejidad debido a la incertidumbre en la generación y en la demanda de electricidad.
Hipótesis	La hipótesis central del estudio es que el uso de técnicas de optimización avanzadas, como los algoritmos metaheurísticos y los enfoques probabilísticos, puede mejorar significativamente la planificación de la generación distribuida. Esto se logra al considerar múltiples objetivos y restricciones simultáneamente, permitiendo una integración más eficaz de las fuentes de energía renovable y mejorando el rendimiento general del sistema de distribución.
Métodos	1. Algoritmos Metaheurísticos: - Algoritmo Genético (GA): Utilizado para la planificación óptima de unidades múltiples de DG, minimizando las pérdidas de línea y la desviación del voltaje, y maximizando la estabilidad del voltaje. - Optimización por Enjambre de Partículas (PSO): Aplicado para determinar la ubicación y el tamaño óptimos de las unidades de DG, así como para mejorar el perfil de voltaje en redes de distribución radial. - Búsqueda Tabú (TS): Empleado en combinación con GA para la asignación de unidades de DG y bancos de capacitores, minimizando las pérdidas de energía en redes de distribución. 2. Programación Mixta Entera No Lineal (MINLP): - Usada para determinar las ubicaciones y tamaños óptimos de las unidades de DG con el objetivo de minimizar las pérdidas de energía y mejorar la estabilidad del voltaje. Este método se divide en fases de ubicación y dimensionamiento para mejorar la eficiencia computacional. 3. Técnicas Probabilísticas: - Modelos de carga probabilística y métodos multiobjetivo probabilísticos que consideran la incertidumbre en el consumo de electricidad y en los precios de la electricidad para lograr un equilibrio entre la minimización de los costos económicos y las emisiones de contaminantes.
Resultados	El estudio encontró que los algoritmos metaheurísticos, especialmente cuando se combinan y ajustan adecuadamente, pueden proporcionar soluciones de alta calidad para la planificación de la DG, abordando efectivamente la complejidad y las múltiples dimensiones del problema. Los métodos probabilísticos demostraron ser efectivos para modelar la incertidumbre en la generación de energía renovable y en la demanda de electricidad, permitiendo una planificación más robusta y fiable. En general, se demostró que el enfoque propuesto mejora la eficiencia operativa del sistema de distribución, reduce las pérdidas de energía y aumenta la estabilidad del voltaje, logrando al mismo tiempo objetivos económicos y ambientales.

En Viral & Khatod (2012), se hace referencia igualmente a los modelos y técnicas utilizados para este procedimiento. En la Tabla 8 se observan estos procedimientos conceptuales:

Tabla 8.

Metodología, técnicas, resultados.

Situación Problemática	La problemática abordada en el artículo se centra en los desafíos asociados con la creciente demanda de energía y la necesidad de integrar fuentes de energía renovable en los sistemas de distribución eléctrica. Estos desafíos incluyen la gestión de las fluctuaciones en la generación de energía renovable, la reducción de las pérdidas de energía en la red, y la mejora de la calidad y la fiabilidad del suministro eléctrico en un contexto de creciente presión por reducir las emisiones de carbono y adoptar prácticas energéticas sostenibles.
Hipótesis	La hipótesis central del artículo es que la implementación de tecnologías de generación distribuida (DG) puede ofrecer significativos beneficios técnicos, económicos y ambientales a los sistemas de distribución de energía, mejorando la eficiencia operativa, reduciendo pérdidas de energía y emisiones de gases de efecto invernadero, y mejorando la fiabilidad y calidad del suministro eléctrico.
Métodos	El estudio emplea una revisión exhaustiva de la literatura existente para evaluar las diferentes tecnologías de generación distribuida y sus aplicaciones. Los métodos específicos incluyen: Revisión de estudios previos: Se recopilan y analizan datos de estudios anteriores sobre la implementación de DG. Evaluación de beneficios técnicos, económicos y ambientales: Se clasifica y analiza el impacto de diferentes tecnologías de DG en términos de eficiencia energética, reducción de costos y beneficios ambientales. Análisis de casos específicos: Se presentan y analizan ejemplos de implementación de DG en diversas regiones y contextos, proporcionando datos empíricos sobre los resultados obtenidos.
Resultados	Los resultados del estudio destacan los siguientes aspectos: Beneficios Técnicos: La DG puede mejorar el perfil de voltaje, reducir las pérdidas del sistema, y mejorar la continuidad y la fiabilidad del suministro. Por ejemplo, las tecnologías de DG como los motores reciprocantes, las microturbinas y las celdas de combustible híbridas presentan eficiencias eléctricas del 30-55% y pueden reducir significativamente los costos de mantenimiento. Beneficios Económicos: La DG puede reducir los costos operativos y de mantenimiento, y proporcionar un retorno de inversión a través de la reducción de la dependencia de la red centralizada y la mitigación de los costos de energía durante los picos de demanda. Beneficios Ambientales: La integración de fuentes de energía renovable, como la energía eólica y solar, puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a un sistema energético más sostenible. La eficiencia total de las tecnologías de DG puede alcanzar hasta el 98%, como en el caso de la pequeña hidroeléctrica

Todos estos procedimientos están basados en la revisión bibliográfica realizada. En Atwa et al. (2010), se detallan las metodologías y los resultados obtenidos en dicho estudio. Los datos se presentan en la tabla 9.

Tabla 9.

Resultados y metodología.

Situación Problemática	La integración de fuentes de energía renovable en sistemas de distribución plantea varios desafíos técnicos y económicos debido a la naturaleza intermitente y variable de estas fuentes. La correcta asignación de unidades de GD es crucial para mejorar el rendimiento del sistema. Sin embargo, muchos métodos disponibles no consideran adecuadamente la naturaleza intermitente de las energías renovables ni el problema de la mezcla óptima de combustibles de las unidades de GD renovables. Este estudio aborda estas deficiencias mediante un enfoque probabilístico y una formulación de programación mixta no lineal entera para lograr una asignación óptima y minimizar las pérdidas de energía anual en el sistema de distribución.
Hipótesis	El artículo "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization" de Y. M. Atwa et al. propone que la integración óptima de diferentes tipos de unidades GD renovables (como eólica, solar y biomasa) en un sistema de distribución puede minimizar las pérdidas de energía anual sin violar las restricciones del sistema.
Métodos	Se generaron modelos probabilísticos para la carga y la generación de unidades de GD renovable, considerando todas las condiciones operativas posibles y sus probabilidades. Formulación de Programación Mixta No Lineal Entera (MINLP): El problema de planificación se formuló como un MINLP, con una función objetivo para minimizar las pérdidas anuales de energía del sistema. Se incluyeron restricciones como los límites de voltaje, la capacidad de los alimentadores, el límite máximo de penetración y el tamaño discreto de las unidades de GD disponibles. Datos Históricos y Modelos de Distribución: Se utilizaron funciones de distribución Beta y Weibull para modelar los datos históricos de irradiancia solar y velocidad del viento, respectivamente. Selección de Estados y Cálculo de la Salida de Generación: Se dividieron las distribuciones continuas de las variables de generación en estados discretos para simplificar el problema. Se calcularon las salidas de potencia promedio de los módulos fotovoltaicos y las turbinas eólicas para cada estado.
Resultados	Los resultados del estudio aplicado a un sistema típico de distribución rural mostraron una reducción significativa en las pérdidas anuales de energía para todos los escenarios propuestos. Las técnicas empleadas permitieron determinar la combinación óptima de tecnologías de GD renovables que maximiza los beneficios al reducir las pérdidas energéticas del sistema.

Para Gbadamosi & Nwulu (2021), expone resultados que van de acuerdo a esta investigación, la tabla 10 se observa las conclusiones llegadas tras el análisis.

Tabla 10.

Situación problemática de los desafíos de la RERs, su hipótesis y los métodos utilizados.

Situación Problemática	El artículo aborda los desafíos de integrar RERs en los sistemas de energía convencionales, que no fueron diseñados originalmente para estas fuentes de energía. La necesidad de planificación simultánea de la expansión de la generación y transmisión de energía se vuelve crucial para acomodar los RERs de manera efectiva en la red eléctrica. Las pérdidas de energía en las líneas de transmisión representan un factor importante que puede obstaculizar el flujo de energía y afectar la eficiencia y los costos del sistema eléctrico. El artículo busca desarrollar modelos de optimización que reflejen adecuadamente los costos, las emisiones y las pérdidas de energía, proporcionando una herramienta efectiva para la planificación de sistemas de energía sostenibles y eficientes.
Hipótesis	El artículo plantea la hipótesis de que el uso de recursos energéticos renovables (RERs) y la planificación simultánea de la expansión de la generación y transmisión de energía (GTEP) puede minimizar las pérdidas de energía en sistemas eléctricos. La evaluación precisa de las pérdidas de energía es esencial para evaluar adecuadamente el impacto de los RERs en los sistemas de energía.
Métodos	Modelo DC (corriente continua): Es un modelo simple y rápido que facilita el cálculo del flujo de energía sin considerar la potencia reactiva. Modelo AC (corriente alterna): Ofrece una representación precisa del sistema eléctrico, considerando la potencia activa y reactiva para calcular las pérdidas eléctricas. Modelo DC Modificado: Introduce una aproximación lineal para calcular las pérdidas en las líneas de transmisión, ofreciendo un balance entre precisión y tiempo de cálculo. Se desarrolla un problema de Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP), resuelto usando los solucionadores CONOPT y CPLEX integrados en el Lenguaje de Modelado Algebraico. Se realizan análisis comparativos y de sensibilidad para evaluar los métodos de modelad
Resultados	El método AC proporciona una evaluación precisa de las pérdidas de energía y una estrategia de planificación óptima en comparación con el método DC modificado. El método DC, aunque rápido, no considera adecuadamente las pérdidas de energía debido a la omisión de la potencia reactiva. Las pérdidas en la línea de transmisión pueden afectar significativamente la planificación de la expansión de la generación y transmisión de energía. El modelo AC resultó ser el más preciso para la evaluación de pérdidas, seguido del modelo DC modificado. La inclusión de RERs en la planificación de expansión es crítica para abordar las incertidumbres y variaciones introducidas por estos recursos. La optimización multiobjetivo que incluye costos de capital, costos operativos y pérdidas de energía es esencial para una planificación eficiente y sostenible.

En Bamigbola et al. (2014), presenta un enfoque matemático detallado para la predicción de pérdidas en sistemas de transmisión. Este modelo permite una estimación precisa de las pérdidas de energía, proporcionando resultados que contribuyen a optimizar la eficiencia y reducir costos operativos, vista en la tabla 5. Los resultados obtenidos destacan la importancia de una metodología rigurosa y bien fundamentada para abordar las complejidades inherentes a la generación distribuida.

Tabla 11.

Modelo preciso de pérdidas de energía, problemática utilizada, métodos e hipótesis.

Situación Problemática	El artículo "Mathematical modeling of electric power flow and the minimization of power losses on transmission lines" aborda la necesidad crítica de reducir las pérdidas de energía en las líneas de transmisión eléctrica. Las pérdidas de energía, que incluyen tanto pérdidas óhmicas como de corona, pueden ser significativas debido a las largas distancias que recorren las líneas de transmisión. Estas pérdidas reducen la cantidad de energía disponible para los consumidores, lo que afecta negativamente la eficiencia del sistema eléctrico.
Hipótesis	El artículo propone que, mediante el uso de modelos matemáticos y técnicas de optimización clásica, es posible minimizar las pérdidas de energía en las líneas de transmisión eléctrica, mejorando así la eficiencia del sistema y reduciendo costos sin necesidad de diseño o construcción de nuevos aparatos eléctricos.
Métodos	Modelado matemático: Se desarrollaron ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas para describir el flujo de corriente y voltaje en líneas de transmisión con pérdidas. Optimización clásica: Se aplicaron técnicas de optimización para formular una estrategia óptima que minimice las pérdidas de energía, considerando tanto las pérdidas óhmicas como las de corona. Solución analítica: Se utilizaron métodos de eigenfunción para resolver las ecuaciones del modelo y determinar las distribuciones de corriente y voltaje a lo largo de las líneas de transmisión.
Resultados	El modelo desarrollado permite determinar la corriente y el voltaje en cualquier punto de la línea de transmisión, demostrando que la técnica propuesta es más económica en términos de costo y esfuerzo. Se encontró que la corriente disponible en una línea de transmisión de 300 km disminuye de 19.17 A 18.33 A y el voltaje de 330 kV a 316.1 kV. La solución analítica proporcionada por el modelo muestra que la técnica puede ser aplicada para minimizar efectivamente las pérdidas de energía sin necesidad de infraestructura adicional costosa.

Examinemos el estudio titulado "Prioritization of Transmission Lines in Expansion Planning Using Data Mining Techniques", el cual discute métodos innovadores para la obtención de sus resultados. Este trabajo destaca técnicas avanzadas de minería de datos aplicadas a la planificación de la expansión

de líneas de transmisión, tabla 12, ofreciendo una perspectiva novedosa sobre la priorización de estas infraestructuras (Shandilya et al., 2019a).

Tabla 12.

Resultados acerca de minería de datos, aplicada a la planificación.

Situación Problemática	En la planificación de la expansión de la transmisión, es esencial comprender en detalle los elementos de los planes propuestos, específicamente las líneas de transmisión, para diseñar un plan de implementación eficaz. La mayoría de las investigaciones se centran en técnicas de refinamiento de los planes de expansión bajo diferentes escenarios, pero no en encontrar la correlación asociativa entre los planes de expansión y las líneas. Además, en un entorno desregulado, donde múltiples jugadores tienen diferentes preferencias y objetivos, es complejo decidir qué líneas de transmisión añadir para mejorar el flujo de energía en el sistema.
Hipótesis	El artículo plantea la hipótesis de que la aplicación de técnicas de minería de datos puede descubrir correlaciones asociativas entre las líneas de transmisión en diferentes planes de expansión propuestos, lo cual es crucial para la ejecución efectiva en la fase de implementación. Se espera que estas técnicas permitan identificar líneas de transmisión que, al ser añadidas conjuntamente, mejoren la confiabilidad y robustez del sistema eléctrico bajo futuros escenarios de planificación de expansión.
Métodos	Minería de Datos: Se aplicaron técnicas de minería de datos, específicamente los algoritmos H-Mine y Eclat, para descubrir patrones frecuentes y reglas de asociación entre las líneas de transmisión propuestas en diferentes planes de expansión. Algoritmos de Minería de Asociación: Se utilizaron algoritmos como Apriori, FP-Growth, ECLAT y H-MINE para identificar conjuntos de elementos frecuentes y reglas de asociación en grandes bases de datos. Modelo Heurístico: Se utilizó un enfoque heurístico simple, con búsqueda hacia adelante y hacia atrás, para resolver el problema de planificación de expansión de transmisión, aplicado al sistema de 6 buses de Garver. Plataforma de Minería de Datos (SPMF): Se utilizó SPMF, una plataforma de minería de datos de código abierto escrita en Java, para experimentar con los algoritmos mencionados.
Resultados	El estudio descubrió que ciertas líneas de transmisión tienen una alta frecuencia de aparición conjunta en los planes de expansión, lo que sugiere una fuerte correlación asociativa. Por ejemplo, las líneas numeradas como 9 y 14 (corredores 3-5 y 2-6) deben añadirse simultáneamente para mejorar la eficiencia del sistema. Los algoritmos H-Mine y Eclat produjeron resultados consistentes, validando así los hallazgos. La aplicación de minería de datos permitió no solo identificar estas asociaciones, sino también priorizar las líneas de transmisión basándose en vectores de soporte y confianza, facilitando una toma de decisiones más informada en la planificación de la expansión de la transmisión.

El artículo titulado “Genetic Algorithm for Weight Assignment in Optimum Planning of Multiple Distributed Generations to Minimize Energy Losses”, Ugranli & Karatepe (2012a) describe diversas características en su esque-

matización, tabla 13. Este trabajo explora el uso de algoritmos genéticos para asignar pesos de manera óptima en la planificación de múltiples generaciones distribuidas, con el objetivo de minimizar las pérdidas de energía.

Tabla 13.

Características de la esquematización del artículo.

Situación Problemática	La integración de Generaciones Distribuidas (DG) en los sistemas eléctricos tiene el potencial de reducir las pérdidas de energía, mejorar la calidad de la energía y satisfacer la creciente demanda de energía sin necesidad de reconstruir la infraestructura existente. Sin embargo, una planificación inadecuada puede resultar en pérdidas excesivas y otros problemas operativos. La planificación óptima de DG se complica por las características variables en el tiempo de la generación y la demanda, especialmente con fuentes de energía renovable como la eólica.
Hipótesis	La hipótesis central es que una metodología basada en algoritmos genéticos y factores de ponderación puede encontrar tamaños y ubicaciones óptimos para las DG que minimicen las pérdidas de energía en sistemas eléctricos, teniendo en cuenta las variaciones temporales de generación y carga.
Métodos	El estudio utiliza un algoritmo genético (GA) combinado con un método de factores de ponderación para abordar el problema de optimización. El GA, que imita los procesos de selección natural, se emplea para generar y evaluar poblaciones de soluciones candidatas, aplicando operadores de reproducción, cruce y mutación para evolucionar hacia soluciones óptimas. La metodología se prueba en la red de prueba de 30 buses de IEEE, utilizando perfiles de velocidad del viento generados aleatoriamente y variaciones de carga para un período de 50 intervalos de tiempo.
Resultados	La aplicación del método propuesto mostró que es capaz de identificar ubicaciones y tamaños óptimos para las DG, resultando en una reducción significativa de las pérdidas de energía. En el caso de estudio, las pérdidas de energía se redujeron de 884.5751 MWh (sin DG) a 539.5948 MWh con la implementación óptima de DG, logrando una reducción de 344.9803 MWh. Los resultados también demostraron que el método propuesto es eficaz en la captura de los efectos de variabilidad tanto de la generación como de la demanda.

Uno de los temas más importantes son las redes neuronales. El artículo titulado “Optimal Reactive Power Dispatch for Real Power Loss Minimization and Voltage Stability Enhancement Using Artificial Bee Colony Algorithm” aborda este tema en detalle, presentando el uso del Algoritmo de la Colonia de Abejas Artificial para la optimización del despacho de potencia reactiva, se puede observar las características principales en la tabla 14, con el fin de minimizar las pérdidas de potencia real y mejorar la estabilidad del voltaje.

Tabla 14 .

Características principales del artículo descrito.

Situación Problemática	El problema de Despacho de Potencia Reactiva Óptima (ORPD) se formula como un problema de optimización con restricciones, donde se consideran varias funciones objetivo para minimizar las pérdidas de potencia, minimizar la desviación de voltaje y mejorar la estabilidad de voltaje. Se abordaron los sistemas de prueba estándar IEEE 30-bus y IEEE 57-bus
Hipótesis	El Algoritmo de Colonia de Abejas Artificial (ABC) puede proporcionar soluciones más efectivas y robustas para el problema del Despacho Óptimo de Potencia Reactiva (ORPD) en comparación con otros métodos existentes.
Métodos	Inicialización: Se posicionaron poblaciones en el espacio de soluciones y se calcularon sus valores de aptitud. - Movimiento de las abejas observadoras: Se calculó la probabilidad de seleccionar una fuente de alimentos y se movieron las abejas observadoras usando la selección por ruleta. - Movimiento de las abejas exploradoras: Se convirtieron abejas empleadas en exploradoras si sus valores de aptitud no mejoraban tras un número predeterminado de iteraciones. - Actualización de la mejor fuente de alimentos: Se memorizaron los mejores valores de aptitud y posición encontrados
Resultados	IEEE 30 Bus System: Reducción de pérdidas de potencia a 4.5804 MW en 160 iteraciones; desviaciones de voltaje minimizadas en 110 iteraciones. - IEEE 57 Bus System: Reducción de pérdidas de potencia a 24.1025 MW; desviación de voltaje minimizada a 0.142 p.u.; índice de estabilidad de voltaje (Lmax) reducido a 0.138 p.u., mejorando la estabilidad de voltaje del sistema. - Comparación con otros algoritmos muestra que ABC ofrece mejores resultados

Es importante destacar que todos los artículos discutidos hasta el momento están estrechamente relacionados con nuestro tema de investigación. En particular, el estudio titulado “Evaluation of Losses in VSC-HVDC Transmission System” (Ettappan et al., 2020; Hui Pang et al., 2008), proporciona una evaluación detallada de las pérdidas en sistemas de transmisión VSC-HVDC que se puede observar en la tabla 15.

Tabla 15.

Proceso de evaluación de pérdidas en el ST.

Situación Problemática	Las pérdidas en sistemas VSC-HVDC son relativamente altas, lo que afecta su eficiencia.
Hipótesis	Las pérdidas en sistemas VSC-HVDC pueden ser evaluadas y minimizadas mediante técnicas específicas de análisis y optimización.
Métodos	Análisis físico, modelado matemático, pruebas prácticas y mediciones, y uso de software de simulación para evaluar las pérdidas. Se describe un enfoque para determinar las pérdidas operativas en cada componente de un sistema de transmisión VSC-HVDC.
Resultados	Las pérdidas en las válvulas del convertidor representan aproximadamente el 70% de las pérdidas totales de la subestación. - Las pérdidas en el transformador del convertidor representan el 13%. - Las pérdidas en los reactores del convertidor representan el 8%. - Las pérdidas en otros dispositivos representan el 9%. - La pérdida total de una subestación VSC-HVDC es aproximadamente el 1.6% de la potencia transferida en plena carga.

El artículo titulado **"**A Linearized Optimization Method for Distributed Generation Planning Studies**"** aborda temas relevantes relacionados con la minimización de pérdidas en sistemas de distribución, lo cual guarda una estrecha relación con nuestra investigación. La metodología empleada en este estudio se detalla en referencia a Ghofrani (2020), y se resume en la tabla 16.

Tabla 16.

Metodología utilizada y situaciones problemáticas del articulo.

Situación Problemática	El problema radica en la complejidad computacional introducida por los métodos de optimización basados en inteligencia artificial para el dimensionamiento óptimo de las DG. Es crucial encontrar una metodología que no solo reduzca la complejidad computacional, sino que también proporcione soluciones precisas y eficientes para la instalación de capacidades de DG en sistemas de distribución
Hipótesis	La hipótesis principal es que la optimización de la capacidad de generación distribuida mediante métodos lineales puede reducir el tiempo de cálculo y proporcionar soluciones continuas y dinámicamente aplicables a sistemas con cualquier condición y limitación sin reducir el rendimiento del método.
Métodos	Análisis de Sensibilidad Linealizado: Utiliza la expansión de Taylor para linearizar las ecuaciones del análisis de flujo de potencia. Programación Lineal (LP): Se utiliza para resolver el problema de optimización desarrollado para la DG. Algoritmo Genético: Comparación con un algoritmo genético basado en MATLAB, utilizando una población de 100 individuos y 200 iteraciones.
Resultados	Los resultados obtenidos mediante el método propuesto y el algoritmo genético se compararon en términos de instalaciones óptimas de capacidad y flujo de potencia real de las líneas: Instalación Óptima de Capacidad de las DGs: Método Propuesto: 3.61 MW en el bus 1, 1.92 MW en el bus 2, y 0 MW en el bus 4. Algoritmo Genético: 3.62 MW en el bus 1, 1.91 MW en el bus 2, y 0 MW en el bus 4. Tiempo de Cálculo: Método Propuesto: 0.016 segundos. Algoritmo Genético: 71.49 segundos. Flujo de Línea Activa: Las diferencias entre los métodos fueron mínimas, con el método propuesto operando dentro de los límites de flujo de las líneas y demostrando una reducción significativa en el tiempo de cálculo.

En el contenido revisado, se destaca el artículo titulado "Power Loss Minimization in a Radial Distribution System with Distributed Generation" (Alam et al., 2018), el cual aborda estrategias para la minimización de pérdidas de potencia en sistemas de distribución radiales mediante la integración de generación distribuida. Este estudio ofrece un análisis detallado de las técni-

cas utilizadas para optimizar el rendimiento del sistema y reducir las pérdidas energéticas, esto descrito se observa en la tabla 17.

Tabla 17.

Características principales de la optimización en el rendimiento del SEP.

Situación Problemática	Las redes de distribución de energía sufren grandes pérdidas de potencia, que deben ser minimizadas para mejorar el perfil de voltaje y reducir los costos operativos. La colocación estratégica de DG puede abordar estos problemas.
Hipótesis	La colocación óptima de unidades de GD en la red de distribución puede minimizar las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de voltaje del sistema
Métodos	Utilización de la técnica de programación no lineal mixta-entera (MINLP) para determinar los tamaños óptimos y ubicaciones correspondientes de las unidades de GD en una red de distribución. Algoritmo de SQP utilizando la función 'fmincon' del toolbox de optimización de MATLAB. -
Resultados	Para el sistema de 33 buses de IEEE, la ubicación óptima de tres DG es en los buses 13, 24 y 30, con tamaños óptimos de 0.8018 MW, 1.0913 MW y 1.0536 MW respectivamente, reduciendo las pérdidas de potencia del sistema de 210.998 kW a 72.951 kW (65.42% de ahorro). - Para el sistema de 69 buses de IEEE, la ubicación óptima de cuatro DG es en los buses 12, 25, 53 y 61, con tamaños óptimos de 0.4584 MW, 0.2543 MW, 0.3302 MW y 1.6866 MW respectivamente, reduciendo las pérdidas de potencia de 224.7 kW a 69.53 kW (69.05% de ahorro).

El artículo titulado "A Novel Algorithm for Loss Estimation and Minimization in Radial Distribution Systems with Distributed Generation" (Krishna et al., 2013), está estrechamente vinculado con nuestra discusión sobre la aplicación de algoritmos evolutivos en la resolución del problema de Despacho Óptimo de Potencia Reactiva (ORPD). En particular, el estudio examina el uso de métodos como Particle Swarm Optimization (PSO), Harmony Search Algorithm (HSA), Clonal Selection Algorithm (CLPSO) y Artificial Bee Colony (ABC) para la estimación y minimización de pérdidas en sistemas de distribución radial. Los métodos son comparados en sistemas de prueba IEEE de 30 y 57 buses. La hipótesis principal es que los algoritmos evolutivos propuestos (PSO, HSA, CLPSO, ABC) pueden reducir efectivamente las pérdidas de potencia y mejorar la estabilidad de voltaje en sistemas de energía eléctrica comparados con métodos tradicionales. El problema se centra en la necesidad de encontrar configuraciones óptimas de variables de control como magnitudes de voltaje de generadores, fuentes VAR conmutables y ajustes de tap de transformadores para minimizar las pérdidas de potencia y mejorar la estabilidad del sistema. Los resultados muestran que el algoritmo ABC reduce la pérdida de potencia a 4.5804 MW en el sistema de 30 buses y a 24.1025 MW en el sistema de 57 buses. Además, se logra minimizar las desviaciones de voltaje y mejorar

la estabilidad del sistema. Comparado con otros algoritmos, ABC ofrece una solución más efectiva y robusta.

La GD presenta desafíos en la red de distribución, especialmente en la reducción de pérdidas de potencia y la mejora del perfil de voltaje. Una colocación y capacidad subóptimas de la GD pueden causar problemas como el parpadeo de voltaje, el desorden de fase a tierra y la magnitud de la corriente de falla. Por lo tanto, es crucial determinar la ubicación y capacidad óptimas de la GD para maximizar sus beneficios (Shaddiq et al., 2016). Este trabajo "Optimal capacity and placement of distributed generation using metaheuristic optimization algorithm to reduce power losses in Bantul distribution system" La implementación de un algoritmo de optimización metaheurístico, específicamente el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO), puede reducir significativamente las pérdidas de potencia en el sistema de distribución y mejorar el perfil de voltaje al determinar la capacidad y colocación óptimas de la GD:

- Utilización del alimentador 7 de Bantul en Yogyakarta como caso de estudio, el cual es un sistema de distribución radial de 20 kV.
- Implementación de la generación distribuida en el modelo del sistema usando Matlab/Simulink.
- Simulación del sistema para evaluar la reducción de pérdidas de potencia.
- Simulación del Sistema: Uso de Matlab/Simulink para modelar el sistema de distribución y simular la operación con y sin GD.
- Optimización por Enjambre de Partículas (PSO): Algoritmo de inteligencia artificial que simula el comportamiento de enjambres para encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización.

El PSO redujo las pérdidas de potencia al determinar una capacidad de 56.03 VA para la GD.

El gráfico de convergencia del PSO mostró que el mejor valor de fitness se encontró en la quinta iteración, manteniéndose constante en las siguientes iteraciones (Shaddiq et al., 2016).

La GD presenta retos como problemas de relés de potencia, aumento de voltaje y calidad de energía debido a su integración en redes de distribución existentes. Para este título "Optimization techniques applied for optimal planning and integration of renewable energy sources based on distributed

generation: Recent tren" (Shuaibu Hassan et al., 2020) La integración óptima de unidades de GD puede mejorar la eficiencia del sistema de distribución, reducir pérdidas de energía y mejorar la estabilidad y calidad del voltaje. La utilización de algoritmos Genéticos (GA).
2. Optimización Multi-objetivo (MOO).
3. Técnicas de Inteligencia Artificial (IA).
4. Modelos Analíticos y Aproximaciones Heurísticas. Los algoritmos híbridos muestran una convergencia más rápida que las técnicas de optimización convencionales.
2. La ubicación y el dimensionamiento óptimos de GD minimizan las pérdidas de energía y mejoran el perfil de voltaje. La integración de GD debe ser cuidadosamente planificada utilizando técnicas de optimización avanzadas para maximizar beneficios económicos, ambientales y de rendimiento del sistema.

El título "Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems" Taher & Karimi (2014), utiliza un GA para optimizar la reconfiguración de sistemas de distribución y la asignación de GD en redes balanceadas y desbalanceadas. El algoritmo de flujo de carga aplicado es preciso y robusto, y se formula una función multiobjetivo compuesta que incluye:

- Reducción de pérdidas de energía.
- Perfil de voltaje.
- Desbalance de voltaje.
- Desbalance de corriente del sistema.

Las simulaciones se realizan utilizando MATLAB en sistemas de prueba IEEE de 33 y 69 buses para redes balanceadas, y de 25 buses para redes desbalanceadas.

La hipótesis del estudio es que la reconfiguración simultánea y la asignación de DG pueden optimizar significativamente la operación de los sistemas de distribución, reduciendo las pérdidas de energía y mejorando los perfiles de voltaje y el balance de carga en las fases del sistema. La reconfiguración de sistemas de distribución es una técnica económica para la reducción de pérdidas. Los sistemas de distribución están diseñados en forma de malla, pero operan de manera radial por razones de protección.

Las operaciones de conmutación son comunes para transferir la carga entre alimentadores manteniendo una estructura radial. La problemática principal es optimizar estas operaciones de conmutación y la asignación de DG para minimizar las pérdidas y mejorar otros parámetros operacionales como el perfil de voltaje y el balance de carga.

Los resultados técnicos muestran una reducción significativa en las pérdidas de energía y en el número de violaciones de voltaje. En los casos desbalanceados, se demuestra la capacidad del método propuesto para balancear las tres fases del sistema. Por ejemplo, para el sistema de prueba IEEE de 33 buses, la configuración óptima obtenida por el método propuesto es una de las mejores soluciones comparadas con estudios previos. Similarmente, en el sistema de 69 buses, la reconfiguración con y sin la asignación de DG muestra resultados óptimos en comparación con otros métodos existentes.

"Optimal Reconfiguration and DG Allocation in Balanced and Unbalanced Distribution Systems" presenta una metodología basada en GA para la reconfiguración óptima de sistemas de distribución y la asignación de GD (Mahesh et al., 2015). La hipótesis principal del estudio es que la reconfiguración de la red de distribución y la asignación estratégica de generación distribuida pueden minimizar las pérdidas de potencia, mejorar el perfil de voltaje y equilibrar las corrientes y voltajes en sistemas de distribución balanceados y desbalanceados. El artículo aborda la problemática de las altas pérdidas de potencia y la ineficiencia operativa en redes de distribución eléctrica. Estas redes suelen enfrentar desafíos como el desequilibrio de carga, caídas de voltaje y sobrecargas en ciertos segmentos, lo que resulta en un servicio menos confiable y mayores costos operativos.

Los resultados del estudio indican que la metodología propuesta logra una reducción significativa en las pérdidas de potencia, mejorando al mismo tiempo los perfiles de voltaje y el equilibrio de corriente en la red. Específicamente, la reconfiguración óptima y la asignación de DG llevaron a:

- Se observaron disminuciones sustanciales en las pérdidas de potencia en comparación con la configuración base.
- Se lograron aumentos en los voltajes mínimos de los nodos y una mayor uniformidad en el perfil de voltaje de la red.
- Las desviaciones de corriente y voltaje se redujeron significativamente, contribuyendo a un funcionamiento más equilibrado y eficiente de la red.

Recomendaciones para Políticas Públicas Basadas en la Normativa Actual de Ecuador

Para promover un desarrollo efectivo de la GD en Ecuador, es fundamental que las políticas públicas se alineen con las necesidades y oportunidades específicas del país. Las normativas actuales deben ser actualizadas y mejo-

radas para fomentar la integración de energías renovables y la descentralización del sistema energético. La implementación de incentivos fiscales y financieros es crucial para atraer inversiones en proyectos de GD que utilicen fuentes renovables como la solar, eólica, hidráulica y biomasa. Estos incentivos pueden incluir exenciones impositivas, subsidios directos y facilidades crediticias que hagan más atractiva la inversión en estas tecnologías.

La modernización de la infraestructura eléctrica es otro aspecto esencial. Invertir en la expansión y actualización de la red eléctrica permitirá una integración más eficiente de la generación distribuida, minimizando las pérdidas de energía y mejorando la estabilidad del sistema. Es vital promover la investigación y el desarrollo de tecnologías avanzadas que optimicen la transmisión y distribución de energía, así como establecer estándares y guías técnicas claras para la conexión y operación de instalaciones de GD en la red nacional (ARCERNNR, 2021).

Además, es importante contar con una regulación clara y efectiva que facilite la implementación de sistemas de GD. Las normativas deben garantizar la seguridad y fiabilidad del suministro eléctrico, protegiendo tanto a los consumidores como a los proveedores de energía. Estas regulaciones deben ser acompañadas de programas de educación y capacitación para profesionales del sector energético, lo que permitirá una mejor comprensión de los beneficios y desafíos de la GD, así como la adopción de mejores prácticas para su implementación.

Para abordar los retos y barreras en la implementación de la generación distribuida en Ecuador, es fundamental considerar tanto el contexto regulatorio actual como las características inherentes del sistema energético del país. La normativa vigente, como se destaca en la Resolución ARCERNNR-013/2021, establece un marco regulatorio claro para la generación distribuida para el autoabastecimiento, lo cual es un avance significativo hacia un sistema energético más sostenible. Sin embargo, varios desafíos deben ser superados para maximizar su impacto (ARCERNNR, 2021) .

Uno de los principales retos es la integración efectiva de la generación distribuida en la red eléctrica existente. La infraestructura actual no siempre está preparada para manejar la intermitencia y variabilidad de fuentes renovables como la solar y eólica, lo que puede generar problemas de estabilidad y calidad de suministro. Además, la normativa establece la necesidad de un procedimiento claro para la obtención de la factibilidad de conexión y la habilitación de estos sistemas, pero en la práctica, estos procesos pueden ser burocráticos y lentos, desincentivando la inversión en tecnologías renovables.

Otro obstáculo significativo es la falta de incentivos económicos suficientes para los consumidores y empresas que deseen invertir en generación distribuida. Aunque la ley promueve el uso de energías renovables y tecnologías limpias, se requieren políticas públicas más agresivas, como exenciones fiscales, subsidios o tarifas preferenciales, para hacer más atractiva esta inversión. La financiación de proyectos de generación distribuida sigue siendo un desafío, especialmente para pequeños consumidores y comunidades rurales, que podrían beneficiarse enormemente de estas tecnologías.

Además, la falta de conocimiento y capacitación técnica entre los consumidores y las empresas distribuidoras es una barrera importante (ARCERNNR, 2021). La implementación de tecnologías de generación distribuida requiere habilidades especializadas y un entendimiento profundo de los sistemas energéticos, algo que actualmente no está ampliamente disponible. Es esencial desarrollar programas de capacitación y educación para formar una fuerza laboral capaz de gestionar y mantener estos sistemas.

En el contexto específico de Ecuador, la transición hacia una matriz energética diversificada también se enfrenta a desafíos políticos y administrativos. La consolidación de diferentes agencias reguladoras en una sola entidad (ARCERNNR) es un paso positivo hacia una mayor coherencia regulatoria, pero es necesario asegurar que esta nueva entidad tenga los recursos y la autonomía necesarios para implementar y hacer cumplir las políticas de manera efectiva.

La normativa ecuatoriana para la generación distribuida (GD) y la diversificación de la matriz energética establece un marco regulatorio que impulsa la adopción de energías renovables no convencionales. Esta regulación es crucial para la transformación del sector energético del país, permitiendo la integración de tecnologías emergentes y la reducción de la dependencia de combustibles fósiles. En Ecuador, la generación distribuida se ha definido y promovido con el objetivo de mejorar la seguridad energética, fomentar la diversificación y reducir las pérdidas en el sistema de transmisión y distribución.

El análisis de la normativa muestra que la GD debe ser parte integral del modelo de negocio energético, coincidiendo con la implementación de redes inteligentes. Esto requiere una revisión detallada de las normas de concesión, el impacto en la red, y las medidas de mitigación de riesgos. Además, la normativa actual en Ecuador contempla incentivos para el uso de biocombustibles y promueve la eficiencia energética como una política de Estado. A pesar de los avances, el país aún enfrenta desafíos regulatorios y económicos para la plena integración de la GD (Fernando Durán, n.d.).

Entre los aspectos más importantes de la normativa ecuatoriana se destaca la necesidad de diversificar la matriz energética mediante la incorporación de energías renovables como la eólica, la biomasa, el biogás, la fotovoltaica, la geotérmica y las microcentrales hidroeléctricas. Estas fuentes de energía no solo contribuyen a la sostenibilidad ambiental, sino que también potencian la resiliencia del sistema eléctrico. La normativa también subraya la importancia de desarrollar un marco jurídico que facilite la incursión de proyectos de GD en las redes de distribución, incentivando tanto a empresas privadas como públicas a participar en alianzas estratégicas.

El reglamento Nro. ARCONEL 013/2021 establece las condiciones técnicas y económicas para la interconexión de generación distribuida, permitiendo a los pequeños productores de energía inyectar su producción en la red eléctrica nacional. Esta regulación es vital para fomentar la inversión en proyectos de energía renovable y asegurar que las pequeñas y medianas instalaciones puedan contribuir de manera eficiente y segura al sistema energético nacional(Fernando Durán, n.d.).

Propuesta para la mejoría de los modelos

La primera propuesta se centra en la integración de algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (AA) en la optimización de sistemas de transmisión de energía para la minimización de pérdidas en la GD. Esta propuesta innovadora sugiere el uso de redes neuronales profundas (DNN) entrenadas con datos históricos de demanda, generación y pérdidas para predecir patrones futuros y optimizar la distribución de GD en tiempo real. Al implementar IA y AA, se puede aprovechar la capacidad de estos algoritmos para manejar grandes volúmenes de datos y detectar patrones complejos, que los métodos tradicionales podrían no ser capaces de resolver con la misma eficiencia. Esto permite una adaptación dinámica del modelo a variaciones en la demanda o fluctuaciones en la generación de energías renovables, garantizando una respuesta óptima y en tiempo real del sistema de transmisión. Además, al automatizar y mejorar la precisión de las predicciones, se facilita la toma de decisiones más informadas y se optimiza la eficiencia operativa del sistema energético, reduciendo pérdidas y mejorando la sostenibilidad.

Específicamente, se propone la utilización de redes neuronales profundas (DNN) que, entrenadas con datos históricos de consumo, generación y pérdidas energéticas, permitirán predecir con alta precisión la demanda futura y los patrones de generación. Estos modelos predictivos no solo identificarán las

áreas críticas de pérdida de energía, sino que también optimizarán en tiempo real la asignación de recursos y la distribución de la generación, adaptándose dinámicamente a las condiciones cambiantes de la red.

La mejora en la eficiencia se logrará mediante la capacidad de los algoritmos de IA para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, ajustando automáticamente los parámetros operativos del sistema para minimizar las pérdidas y mejorar la estabilidad del suministro energético. Además, la implementación de estos modelos se puede realizar a través de plataformas de computación distribuida, que permiten un procesamiento rápido y escalable de datos, integrándose con sistemas SCADA y otras infraestructuras de monitoreo de red.

La implementación de esta propuesta requerirá la instalación de sensores avanzados y dispositivos IoT en puntos clave de la red, para proporcionar datos en tiempo real que alimenten los modelos de IA. Asimismo, se necesitarán sistemas de computación de alto rendimiento para el procesamiento y análisis de estos datos, así como la infraestructura necesaria para la integración con los sistemas de gestión de energía existentes.

Conclusiones

Los estudios revisados demuestran que la aplicación de algoritmos metaheurísticos, como los Algoritmos GA, PSO y la Búsqueda Tabú (TS), proporciona soluciones robustas para la planificación de la GD. Estos algoritmos son capaces de minimizar las pérdidas de energía y mejorar la estabilidad del voltaje, lo que evidencia su eficacia en la integración de fuentes de energía renovable en las redes de distribución.

La aplicación de técnicas probabilísticas y la formulación de Programación Mixta Entera No Lineal (MINLP) permiten una planificación robusta y fiable de la generación distribuida. Estas metodologías consideran la incertidumbre en la generación y demanda de electricidad, mejorando la estabilidad del voltaje y reduciendo las pérdidas energéticas al optimizar la ubicación y el tamaño de las unidades de GD. Esto es crucial para abordar la variabilidad inherente de las fuentes renovables

La GD no solo ofrece beneficios técnicos al mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas del sistema, sino que también proporciona ventajas económicas y ambientales significativas. La reducción de costos operativos y de mantenimiento, junto con la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuye a un sistema energético más eficiente y sostenible. Estos beneficios destacan la importancia de integrar tecnologías de GD en la planificación de sistemas de distribución.

El desarrollo y aplicación de modelos matemáticos avanzados, como las ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas y técnicas de optimización clásica, permiten una evaluación precisa y efectiva de las pérdidas de energía en líneas de transmisión. Estos modelos facilitan la determinación de estrategias óptimas para minimizar las pérdidas, mejorando así la eficiencia del sistema sin necesidad de inversiones significativas en infraestructura adicional.

Referencias Bibliográficas

Aguila-Téllez, A., González, D., Gutiérrez, G., & Ortiz, L. (2022). Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de distribución usando PSO. ***I+D Tecnológico***, ***18***(1), 50–68. https://doi.org/10.33412/idt.v18.1.3219

Alam, A., Gupta, A., Bindal, P., Siddiqui, A., & Zaid, M. (2018). Power Loss Minimization in a Radial Distribution System with Distributed Generation. ***2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)***, 21–25. https://doi.org/10.1109/ICPECTS.2018.8521619

Almeida, W. (2006). GENERACIÓN DISTRIBUIDA Y SU POTENCIAL APLICACIÓN EN ECUADOR. ***Revista Técnica "Energía," 2***(1). https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v2.n1.2006.306

ARCERNNR. (2021). ***REGULACIÓN Nro. ARCERNNR-001/2021***. https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2021/06/res_nro__arcernnr-013-2021.pdf

ARCERNNR. (2023). ***DIRECCIÓN DE REGULACIÓN TÉCNICA DEL SECTOR ELÉCTRICO INFORME DE SUSTENTO: Marco Regulatorio de la generación distribuida para autoabastecimiento de consumidores no regulados de energía eléctrica ARCERNNR Informe de Sustento CONTENIDO***.

Atwa, Y. M., El-Saadany, E. F., Salama, M. M. A., & Seethapathy, R. (2010). Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization. ***IEEE Transactions on Power Systems***, ***25***(1), 360–370. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030276

Bamigbola, O. M., Ali, M. M., & Oke, M. O. (2014). Mathematical modeling of electric power flow and the minimization of power losses on transmission lines. ***Applied Mathematics and Computation***, ***241***, 214–221. https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.05.039

Borges, C. L. T., & Falcão, D. M. (2006). Optimal distributed generation allocation for reliability, losses, and voltage improvement. ***International Journal of Electrical Power & Energy Systems***, ***28***(6), 413–420. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.003

Ehsan, A., & Yang, Q. (2018). Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. ***Applied Energy***, ***210***, 44–59. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.106

Elseify, M. A., Hashim, F. A., Hussien, A. G., & Kamel, S. (2024). Single and multi-objectives based on an improved golden jackal optimization algorithm for simultaneous integration of multiple capacitors and multi-type DGs in distribution systems. ***Applied Energy***, ***353***, 122054. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122054

Ettappan, M., Vimala, V., Ramesh, S., & Kesavan, V. T. (2020). Optimal reactive power dispatch for real power loss minimization and voltage stability enhancement using Artificial Bee Colony Algorithm. ***Microprocessors and Microsystems***, ***76***, 103085. https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103085

Fernando Durán, E. (n.d.). ***La Generación Distribuida: Retos frente al Marco Legal del Mercado Eléctrico Ecuatoriano***.

Gbadamosi, S. L., & Nwulu, N. I. (2021). A comparative analysis of generation and transmission expansion planning models for power loss minimization. ***Sustainable Energy, Grids and Networks***, ***26***, 100456. https://doi.org/10.1016/j.segan.2021.100456

Ghofrani, M. (2020). A Linearized Optimization Method for Distributed Generation Planning Studies. ***2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)***, 1–5. https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160736

Hui Pang, Guangfu Tang, & Zhiyuan He. (2008). Evaluation of losses in VSC-HVDC transmission system. ***2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century***, 1–6. https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596740

Krishna, T. M., Ramana, N. V., & Kamakshaiah, S. (2013). A novel algorithm for the loss estimation and minimization of radial distribution system with distributed generation. ***2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability***, 1289–1293. https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533573

Mahesh, K., Nallagownden, P. AL, & Elamvazuthi, I. AL. (2015). Optimal placement and sizing of DG in distribution system using accelerated PSO for

power loss minimization. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, 193–198. https://doi.org/10.1109/CENCON.2015.7409538

Mancò, G., Tesio, U., Guelpa, E., & Verda, V. (2024). A review on multi energy systems modelling and optimization. *Applied Thermal Engineering*, *236*, 121871. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121871

Nadeem, M., Imran, K., Khattak, A., Ulasyar, A., Pal, A., Zeb, M. Z., Khan, A. N., & Padhee, M. (2020). Optimal Placement, Sizing and Coordination of FACTS Devices in Transmission Network Using Whale Optimization Algorithm. *Energies*, *13*(3), 753. https://doi.org/10.3390/en13030753

Sánchez de la Cruz, J. D., Balderramo Vélez, N. R., Llosas Albuerne, Y., & Pico Mera, G. E. (2018). Trascendencia de la generación distribuida (GD) y el uso de las redes inteligentes. *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, *3*(2), 13. https://doi.org/10.33936/riemat.v3i2.1625

Shaddiq, S., Santoso, D. B., Alfarobi, F. F., Sarjiya, & Hadi, S. P. (2016). Optimal capacity and placement of distributed generation using metaheuristic optimization algorithm to reduce power losses in Bantul distribution system, Yogyakarta. *2016 8th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 1–5. https://doi.org/10.1109/ICITEED.2016.7863279

Shandilya, S., Shandilya, S. K., & Thakur, T. (2019a). *Prioritization of Transmission Lines in Expansion Planning Using Data Mining Techniques* (pp. 403–412). https://doi.org/10.1007/978-981-13-6772-4_35

Shandilya, S., Shandilya, S. K., & Thakur, T. (2019b). *Prioritization of Transmission Lines in Expansion Planning Using Data Mining Techniques* (pp. 403–412). https://doi.org/10.1007/978-981-13-6772-4_35

Shuaibu Hassan, A., Sun, Y., & Wang, Z. (2020). Optimization techniques applied for optimal planning and integration of renewable energy sources based on distributed generation: Recent trends. *Cogent Engineering*, *7*(1), 1766394. https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1766394

Suresh, M. C. V., & Edward, J. B. (2020). A hybrid algorithm based optimal placement of DG units for loss reduction in the distribution system. *Applied Soft Computing*, *91*, 106191. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106191

Taher, S. A., & Karimi, M. H. (2014). Optimal reconfiguration and DG allocation in balanced and unbalanced distribution systems. ***Ain Shams Engineering Journal***, ***5***(3), 735–749. https://doi.org/10.1016/j.asej.2014.03.009

Theo, W. L., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2017). Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, ***67***, 531–573. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.063

Ugranli, F., & Karatepe, E. (2012a). Genetic algorithm for weight assignment in optimum planning of multiple distributed generations to minimize energy losses. ***2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications***, 1–5. https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6246995

Ugranli, F., & Karatepe, E. (2012b). Genetic algorithm for weight assignment in optimum planning of multiple distributed generations to minimize energy losses. ***2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications***, 1–5. https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6246995

Viral, R., & Khatod, D. K. (2012). Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, ***16***(7), 5146–5165. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020

EI FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

3

Capítulo

Propuesta de técnicas y tecnologías de automatización y control para invernaderos

AUTORES: Secundino Marrero Ramírez; Rommel Suárez Vinueza; María Fernanda Molina Fernández

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Propuesta de técnicas y tecnologías de automatización y control para invernaderos

Proposal of automation and control technologies for optimizing greenhouse operations.

Resumen

El presente capitulo recoge un conjunto de experiencias relacionadas con la modelación y simulación de invernaderos, así como el uso de diferentes técnicas avanzadas de control que permiten garantizar estabilidad en las diferentes variables climáticas del sistema, con vista a lograr las condiciones requeridas por los diferentes cultivos. La introducción de nuevas tecnologías de cultivo a nivel de la mediana y pequeña empresa familiar, representa un reto para poder reducir costos de producción y alcanzar producciones de calidad que sean competitivas en el mercado agropecuario, con vista a reducir pérdidas y lograr costos asequibles del equipamiento tecnológico. De la misma manera el incremento de la eficiencia en el uso de recursos no solo influye en los costos, sino que permite desarrollar una agricultura más sostenible y amigable con el medio ambiente. Es por ello que surge la necesidad de tener que socializar estos resultados y los avances tecnológicos en la explotación de invernaderos con los diferentes productores de la zona, para de esta forma impulsar la transformación digital en la agricultura y su modernización, acorde a los actuales estándares internacionales para lograr una mayor competitividad y productividad en este sector.

Palabras claves: Automatización, Invernaderos, Control, Técnicas.

Abstract

This chapter presents a set of experiences related to the modeling and simulation of greenhouses, as well as the use of different advanced control techniques that allow ensuring stability in the different climatic variables of the system, with a view to achieving the conditions required by the different crops. The introduction of new cultivation technologies at the level of medium and small family businesses represents a challenge to reduce production costs and achieve quality productions that are competitive in the agricultural market, with a view to reducing losses and achieving affordable costs of technological equipment. In the same way, the increase in the efficiency of resource use not only influences costs but also allows for the development of a more sustainable and environmentally friendly agriculture. It is for this reason that the need arises to socialize these results and technological advances in the exploitation of greenhouses with the different producers in the area, in order to promote digital

transformation in agriculture and its modernization, in accordance with current international standards to achieve greater competitiveness and productivity in this sector.

Keywords: Automation, Greenhouses, Control, Techniques.

Introducción

En el Ecuador la producción de hortalizas como el chile, tomate, pepino, las flores y otros cultivos, han tenido que enfrentarse a problemas del cambio climático y a la presión de plagas y enfermedades, lo que ha influido en que el sector agrícola no pueda en ocasiones alcanzar el potencial de producción que se requiere para cubrir los gastos de producción. Para dar solución a estas dificultades se han introducido nuevas tecnologías, que en los países más desarrollados y con un clima templado, funcionan adecuadamente para producir alimentos en esas condiciones. En algunas zonas del país y en la provincia de Cotopaxi se ha popularizado el uso de invernaderos, pero estos se han construido en algunos casos sin ningún tipo de tecnología que les permita a los agricultores mejorar las condiciones de control del clima interno, hacer uso eficiente del agua, el uso racional de fertilizantes y acceder a las energías limpias. Es así como la automatización de un invernadero en las condiciones de clima del país e incorporar las fuentes renovables de energía es de gran importancia para los productores, debido a que esta tecnología de cultivo permite mantenerse un ambiente estable y favorable a la planta.

En algunos invernaderos artesanales que no cuentan con tecnología de control, se obtienen rendimientos similares a los que se logran a campo abierto, no se logran cosechas de buena calidad para la comercialización y los cultivos presentan estrés debido a las variaciones frecuentes en los niveles de radiación solar, las temperaturas altas, la humedad relativa inadecuada y los cambios bruscos de temperaturas que en ocasiones ocurren durante el día. Esto puede traer consigo el cierre de estomas y problemas nutricionales que dificultan los procesos metabólicos requeridos por las plantas.

De aquí la importancia de la automatización que le permite al productor incidir sobre el clima que se genera dentro del invernadero, y hacer un uso eficiente de los diferentes recursos. El monitoreo con sensores de las variables temperatura, humedad relativa y radiación solar, permite accionar las cortinas laterales, ventilar el exceso de calor o guardarlo según sea la necesidad, dependiendo de la época el año en la que nos encontremos, también los sistemas de humidificación o riego permiten mejorar la humedad relativa que

favorece al cultivo, creando un ambiente que permite una mayor productividad y ayuda a dosificar la cantidad de agua-fertilizante que la planta requiere para realizar los procesos metabólicos durante el riego (Koukounaras, 2021).

La Agricultura Familiar (AF) que hoy ya comienza a incursionar en los cultivos de invernadero requiere de un apoyo importante no solo del gobierno, sino de las instituciones de investigación para fortalecer este sector de la pequeña y mediana empresa, por ello la introducción de tecnologías apropiadas puede contribuir al empoderamiento de las comunidades rurales y facilitar los procesos que aportan a la gestión de su desarrollo integral (Amaya & Ramírez, 2016; Achour, Ouammi, & Zejli, 2021) .

Dentro de los dispositivos y accesorios más utilizados en la automatización de invernaderos se destacan los controladores lógicos programables o PLC (Programmable Logic Controller) que manejan señales analógicas y digitales para realizar estrategias de control, estos trabajan en red y por otra parte permiten el manejo de interfaz Hombre - Máquina o HMI ("Human Machine Interface") para visualizar datos del monitoreo y control del sistema. Es así como desde la combinación de tecnologías de automatización y la selección adecuada del tipo de invernadero, esquema de riego y el control de nutrientes, es posible mejorar la calidad de la producción y la rentabilidad de la cosecha (Barroso García, 2015).

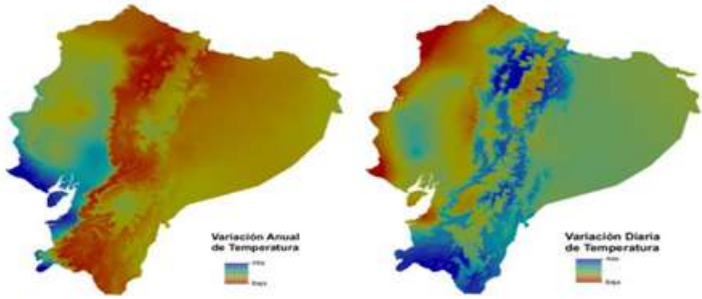
Características del ambiente

Ecuador está ubicado al noroeste de América del Sur con una extensión aproximadamente 252,000 km^2. A vez de país pasa la línea equinoccial o ecuatorial y se extiende entre las latitudes 1º30' N y 5º S y las longitudes 75º 20' W y 91º W. De norte a sur es atravesado por la Cordillera de los Andes y esto provoca que presente un clima variable, incluso durante el mismo día. Debido a su localización geográfica, los días son bastante similares durante todo el año, presentando 12 horas de luz y una radiación solar que se puede considerar constante, ello reduce la variación de temperatura media anual en la zona, que puede tener una variación máxima de 3 ºC entre meses. Lo contrario ocurre en las zonas bajas de la Costa y Oriente donde se presenta una fluctuación diaria de temperatura con cambios de 10 ºC y zonas medias a altas de la Cordillera de los Andes que pueden tener días con valores hasta los 20 ºC como se puede observar en los mapas de la figura 15 (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012). También se debe señalar que los valores máximos y mínimos de temperatura durante el año, tienen relación con las estaciones del año durante la temporada de seca y húmeda. También, la presencia

de precipitaciones que dependen de otros factores van a influir en una mayor variación en el año en la región Costa y Sierra.

Figura 15.

Variación anual y diaria de la temperatura registradas en el Ecuador continental. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012).



Ambiente en el interior del invernadero

Variables climatológicas del invernadero

En los invernaderos se puede generar condiciones artificiales favorables debido al aislamiento térmico y el aislamiento de agentes contaminantes. Sin embargo, resulta necesaria la presencia de un sistema que permita controlar y modificar las variables ambientales en el interior del mismo. Donde, la fotosíntesis representa el proceso fisiológico más importante en la planta y este proceso se expresa mediante la ecuación (1)

$$CO_2 + H_2O + \text{Radiación} \rightarrow \text{Azúcares} + \text{Oxígeno} \qquad (1)$$

El CO_2 es asimilado a través de las estomas y esto está relacionado con una pérdida de agua (transpiración), donde la eficiencia de este proceso permite maximizar la asimilación de CO_2 con la menor pérdida de agua posible. En este proceso la radiación influye y contribuye a la precocidad, productividad y calidad del cultivo que, al recibir un exceso de luz y una saturación luminosa, se pueden alterar los procesos químicos de la planta y ocasionar daños en las células no reversibles. Mientras que, por otra parte, la deficiencia de luz origina pérdida de flores, baja calidad del fruto debido al efecto negativo que esto tiene en la fotosíntesis. Además, la luz juega un papel significativo en el desarrollo de la planta en función de su periodicidad diaria y el fototropismo que orienta la planta hacia el lugar de donde provienen la luz. De esta manera podemos afirmar que la radiación influye en el proceso de la fotosíntesis de

las plantas y por consiguiente en la productividad, precocidad y calidad de la cosecha. La energía proveniente de la radiación solar que llega a la tierra en forma de ondas electromagnéticas, presenta diferentes longitudes de onda como se puede observar en la tabla No.18 y ello se debe considerar para la producción agrícola

Tabla 18.

Tipos de radiaciones y longitud de onda.

Tipo de Radiación	Efecto que provoca	Longitud de onda, nm
Visible	Luminoso	390 a 760
Ultravioleta	Químico	100 a 390
Infrarroja	Térmico	760 a 2000

La duración del período de iluminación presenta gran incidencia sobre la floración y en función de esto las plantas se pueden dividir en plantas de día corto (florecen a medida que se reduce la iluminación), de días largo (que florecen a medida que se incrementa la iluminación) e indiferentes que son las que no presentan afectación con la duración de la iluminación como es el caso de la mayoría de las hortalizas.

En trabajos como Mamani, Villalobos, & Herrera (2017); Tangarife, Toro, & Carmona (2020) y Ossa Duque (2017), se definen las variables a controlar para un invernadero como la temperatura del aire, humedad relativa, concentración de CO_2 y la radiación solar. Para el control son utilizadas diferentes técnicas que están asociadas con la instalación de calefacción, ventilación, sistema de humidificación, inyección de CO_2, manejo de pantallas térmicas e iluminación artificial. También la ventilación puede ser utilizada para prevenir los niveles altos de humedad, debido a la transpiración del cultivo. Este control resulta necesario ya que evita enfermedades por excesos de humedad en los periodos fríos, efecto que se refleja durante los cambios de la noche al día. También la humedad es necesaria para la fotosíntesis, ya que una pérdida excesiva de agua cierra las estomas y ello afecta la fotosíntesis. Cuando esto ocurre, entonces la planta no podrá absorber más CO_2, y ello resulta necesario para la fotosíntesis, entonces para tener las estomas abiertas se requiere reducir la evaporación de la planta durante el tiempo de mayor radiación.

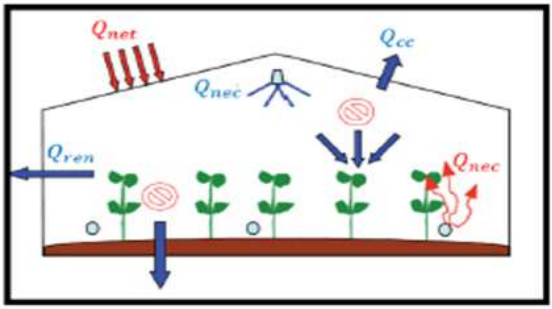
Balance térmico

En la modelación del invernadero el autor Fitz, y otros (2010), para el estudio del balance térmico considera una amplia gama de factores que puede generar complejidades y esto se relaciona con la precisión que se pretende

estudiar el sistema. Es así como el balance de energía térmica puede ser representado por las ecuaciones (2-5) según Marrero, Gonzalez, León, & Suarez (2021) y Martínez y Roca (2011), atendiendo a los flujos de calor mostrados en la figura 2 que muestra el balance térmico dentro del invernadero en función de los flujos de calor de la ecuación principal (2).

Figura 16.

Balance energético en un invernadero.



$$Q_{net}+Q_{nec}=Q_{cc}+Q_{ren} \quad (2)$$

El flujo de calor por evapotranspiración, así como la pérdida de calor a través del suelo son considerados despreciables en este modelo y el flujo de calor neto por radiación global absorbida se describe de acuerdo a la ecuación (3).

$$Q_{net}=\tau c(1-r_s)\, Q_{rad} \quad (3)$$

Las pérdidas de calor por renovación del aire interior del invernadero (ventilación e infiltración) se hallan mediante la ecuación (4).

$$Q_{ren}=qv\cdot cp\cdot\rho(Tint-Text) \quad (4)$$

El cálculo del flujo de calor que se pierde a través de la cubierta se determina con la ecuación (5).

$$Q_{cc}=h\cdot w(T_{int}-T_{ext}) \quad (5)$$

Para el flujo de calor suministrado por el sistema de calefacción se utiliza la ecuación (6)

$$Q_{nec}=Q_{cc}+Q_{ren}-Q_{net} \quad (6)$$

Donde:

qv - Velocidad de ventilación (m^3/m^2-s)

$(Tint-Text)$ - Define la diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior del invernadero, respectivamente.

C_p - Calor específico del aire húmedo, $J/kg{\cdot}K$

ρ - Masa específica del aire, $kg_{aire\ seco}/m^3$

r_s - Reflectancia de la radiación solar en la superficie del suelo

τ_c - Transmitancia de radiación solar del material de la cubierta del invernadero

T_{ext} - Temperatura del aire fuera del invernadero, °C

T_{int} Temperatura del aire dentro del invernadero, °C

El techo y su pendiente también influyen en el régimen térmico, debido a la relación entre Área cobertura y Área de suelo que crece con la pendiente, producto a la transmisión de luz y el aprovechamiento de energía que se incrementa con la pendiente. Por ello se recomienda que el techo para invernaderos tenga 25° de inclinación

La ventilación forzada permite mejorar el régimen térmico (Martínez & Roca, 2011), pero no siempre es empleada por el alto consumo de energía eléctrica que puede representar, en los casos donde es necesario aplicarla, se debe determinar la capacidad del ventilador y su ubicación como se observa en la figura 17, donde este debe garantizar de 1 a 3/4 de renovaciones del volumen interno de aire del invernadero como minuto, a unos 3 mm de columna de agua de presión estática. Para estos casos con frecuencia los ventiladores funcionan como extractores, aunque también pueden operar para impulsar el aire al interior.

Figura 17.

Instalación del extractor de aire.

Para determinar la potencia del ventilador se parte de las pérdidas de carga totales en el ducto, el caudal y la eficiencia, esta se puede calcular con la ecuación (7):

$$P = \frac{QH}{1000n\ DEME} \tag{7}$$

El caudal del ventilador se determina con la expresión (8):

$$Q = VAS\ ,\ m^3h^{-1} \tag{8}$$

Donde:

Q - Caudal de aire, m^3/seg.

H - Depresión del circuito en Pa (presión estática en Pascales)

P - Potencia del motor en Kw.

η - Eficiencia del ventilador, que puede variar entre 70 a 85% en dependencia del fabricante, tamaño y punto de operación.

DE - Eficiencia de la transmisión, la cual varía entre 90% para transmisión por poleas y correas,y 100% para transmisión directa.

ME - Eficiencia del motor, la que puede variar entre 85% y 95%

Humedad

La humedad relativa HR (%) se define como la relación entre tensión actual de vapor y la tensión a saturación de la misma masa de aire expresada en %, donde la programación del riego para garantizar la humedad requerida resulta de vital importancia **(Martin & Muñoz, 2017) .**Esta se puede determinar mediante la expresión (9)

$$\mathrm{HR} = \frac{\mathrm{ea}}{\mathrm{es}} 100 \tag{9}$$

Donde e_a es la presión parcial de vapor de agua y e_s la presión de vapor del líquido a saturación y temperatura constante. Cuando no se tienen los valores máximos y mínimos de temperatura, la presión parcial de vapor de agua se puede determinar a partir de la humedad relativa diaria y la presión de vapor a saturación a partir de la ecuación (10)

$$ea = (es)\frac{HR}{100} \tag{10}$$

La humedad del aire está relacionada con el estrés del cultivo, donde el aire seco tiene mayor capacidad para transportar el vapor de agua que el aire húmedo a la misma temperatura. Los modelos propuestos por Salazar Moreno, Mauricio Pérez, López Cruz, & Rojano Aguilar, 2016; Bontsema, y otros, 2007) para representar el comportamiento de la humedad en un invernadero semicerrado pueden ser utilizados para considerar las condiciones climáticas de la región. Cuando el invernadero es completamente cerrado, la humedad absoluta del aire Xa ($g \cdot m^{-3}$) en el interior se puede expresar por la ecuación (11), que considera los procesos de transpiración y condensación.

$$\frac{dXa}{dt} = \frac{1}{h}[E - C] \tag{11}$$

Donde:

E - Representa la transpiración de la planta, $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

C - Condensación en los intercambiadores de calor y h (m) es la altura del invernadero, $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

Para determinar el flujo El flujo de vapor de agua (E) producto a la transpiración en la planta se determina por la ecuación (12).

$$E = g_E(X_{crop} - Xa) \tag{12}$$

Donde g_E ($m \cdot s^{-1}$) es la conductancia de transpiración, Xcrop ($g \cdot m^{-3}$) la concentración de vapor de agua del aire en el cultivo.

Mientras que la conductancia de la transpiración g_E se calcula con la expresión (13)

$$g_E = \frac{2LAI}{(1+n)rb + rs} \quad (13)$$

Donde:

ε - Relación entre el calor latente y contenido de calor sensible del aire saturado, adimensional

rb - Resistencia de la capa límite de la hoja, $s \cdot m^{-1}$

rs - Resistencia estomática, $s \cdot m^{-1}$

LAI - Índice del área foliar (adimensional)

Existen otros dos procesos que también influyen en el clima interior del invernadero, que están asociados con la respiración durante el día y la noche que permite quemar los azúcares obtenidos de la fotosíntesis y ello junto con el oxígeno del aire puede aportar energía química y generar el dióxido de carbono. A su vez la transpiración le va permitir a la planta desprender agua en forma de vapor a través de las estomas de las hojas.

Conjuntamente con los factores climatológicos se deben tener en cuenta otros factores como el edafológico (relacionado con los nutrientes que aporta el suelo) y elementos adversos relacionados con la alcalinidad, acidez, salinidad y textura entre otros. También los factores biológicos tienen relevancia ya que la presencia de otros seres vivos como plagas, hongos, virus y parásitos pueden generar afectaciones al cultivo.

Control de las condiciones climáticas

El invernadero protege a los cultivos de factores adversos del clima, como son las intensas precipitaciones, las bajas y altas temperaturas para propiciar un ambiente óptimo de crecimiento y crear un microclima que permita un buen rendimiento. Ello exige el conocimiento de los factores ambientales para poder determinar las oportunidades en el manejo dentro de ciertos límites, donde se debe tener en cuenta la zona, infraestructura y el valor de la producción con vista a poder definir la inversión, los gastos a realizar y así poder definir los niveles de temperatura requerido durante el día y la noche para asegurar condiciones óptimas de crecimiento acorde al clima externo existente.

Establecer el régimen térmico puede constituir un incremento substancial en los costos de calefacción que deben ser incorporados al costo del producto final

y ello incide en que sean utilizados medios pasivos o activos de control, donde estos últimos requieren de una mayor inversión (Martínez, Farias, & Ruiz, 2020).

Sistemas pasivos de control

Las técnicas de sistemas pasivos de control son simples y pueden ser más o menos costosas atendiendo a los materiales utilizados, que pueden requerir menor cantidad de energía durante su instalación y funcionamiento **Fuente especificada no válida.**. Dentro de estas técnicas podemos citar:

Doble techo y/o paredes: Se utiliza doble cobertura en techo y/o paredes, donde la capa interior es de polietileno con poco espesor, a muy corta distancia entre ambas. Esto provoca que el aire encerrado entre ellas actúe como barrera aislante y evite el escape de calor al exterior. Con ello se aumenta la eficiencia del sistema debido al aire existente entre las capas y ello es posible en estructuras estancas como se puede observar en la figura 18.

Pantalla térmica: Esta es una cobertura de polietileno o de materiales aluminizados que impiden el escape de la radiación infrarroja que es emitida por las noches desde el suelo y las plantas, al mismo tiempo que reduce el volumen de aire en el interior del invernadero. Se requiere que estas pantallas tengan un sistema de montaje que permita su corrimiento en el horario del día, para no afectar la luminosidad a los cultivos.

El uso de energía solar o geotérmica pueden requerir de instalaciones costosa, pero reducen el consumo de energía durante su funcionamiento y ello resulta factible en zonas donde el recurso solar o geotérmico está disponible. Las aplicaciones con paneles solares y termodinámicos no se han generalizado mucho por sus costos iniciales y el espacio requerido para su ubicación.

Riego de agua en la cubierta: Este consiste en rociar agua en la cubierta del invernadero durante las heladas para forma una capa de hielo de bajo espesor que actúa como aislante y no deja escapar el calor del interior. Esta técnica resulta económica y efectiva, pero presenta el inconveniente de requerir un volumen no despreciable de agua, que debe ser canalizada para poder recuperarla y evitar encharcamientos en los alrededores del invernadero. Para esta aplicación se debe considerar que el agua utilizada contenga un bajo nivel de sales, para evitar que estas se depositen en la cubierta.

Figura 18.

Doble techo en invernadero artesanal.

Nota. Extraido de Lenscak & Iglesias (2019)

Un sistema activo de control va a requerir consumos de energía que pueden ser significativos durante el funcionamiento, ya que los sistemas de calefacción necesitan aportar una potencia térmica considerable para lograr los saltos térmicos requeridos, distribución adecuada de la temperatura, seguridad de funcionamiento y buena regulación. Estos sistemas de calefacción activos se dividen en dos grupos, los que utilizan agua caliente y los de aire caliente.

Los sistemas por agua caliente utilizan tuberías distribuidas a lo largo de las paredes laterales del invernadero para la calefacción aérea y a nivel de la cubierta vegetal. El agua caliente que circula por las tuberías se debe calentar en una caldera y ello puede requerir el uso de combustible como el fuel oíl, gasoil o gas natural. La temperatura requerida para el agua en estos sistemas es de es de 60 °C y esto hace costoso al sistema, por ello se aplica en casos de producciones que son muy rentables. La calefacción puede ser desde el suelo a través de tuberías radiantes que están compuesta por tubos de plásticos que pueden ser lizos, corrugados o anillados para la circulación del agua caliente, estos deben ser manipulados con cuidado, debido a que el calor puede modificar las propiedades físico-químicas del suelo. También son utilizadas mangas de plástico flexibles que deben estar dispuestas entre las líneas de cultivo por donde se hace circular el agua que es calentada a partir de una fuente de energía que puede ser solar, geotérmica, centrales térmicas, entre otras. Esta agua debe ser calentada entre 20 °C y 40 °C.

Para la calefacción también son utilizados paneles evaporadores, donde **s**e coloca una pantalla o panel de material poroso en el lateral que debe ser saturado con agua del sistema de riego, mientras que en el extremo opuesto se colocan ventiladores para extraer el aire externo que debe pasa a través de los paneles porosos en una distancia de 20 m a 25 m, producto de esto el aire se enfría y se incrementa la humedad del invernadero. Los paneles evaporadores poder ser de dos tipos: de sobrepresión o por depresión y en su elección se considera el nivel de hermeticidad deseado. Por otra parte, los sistemas por aire caliente utilizan ventiladores para hacer circular el aire externo al interior del invernadero, utilizan quemadores de calentamiento e intercambiadores de calor con deflectores direccionales o mangas de polietileno para guiar al aire caliente a los puntos deseados. Esta calefacción resulta menos costosa por no utilizar agua caliente, también presenta la ventaja de no tener condensaciones en la cobertura y a su vez el ventilador puede ser utilizado en la estación de verano para reducir las altas temperaturas

El inconveniente que presenta esta técnica es que la distribución de temperatura resulta menos eficiente, tiene poca inercia térmica y cuando ocurren averías, se origina un rápido enfriamiento del invernadero. En este sistema la penetración del aire depende de la distancia entre el ventilador y las plantas del invernadero. Aquí el flujo de aire presenta una dirección ascendente con el incremento de temperatura del aire en las capas de aire cercanas al techo.

Para determinar la demanda térmica en las aplicaciones del sistema de calefacción se puede utilizar la ecuación (14).

$$Q = \frac{Sc}{Ss}\Delta T \text{ , w/m}^2 \qquad (14)$$

Donde Q representa la cantidad de calor Q por metros cuadrados de suelo cubierto en el invernadero, μ el coeficiente de pérdidas de calor a través de la cubierta, Sc es la superficie de la cubierta en m^2, Ss la superficie de suelo del invernadero y ΔT la diferencia de temperatura que se debe cubrir entre las necesidades del cultivo y la temperatura mínima estimada del exterior

El aire exterior presenta una temperatura y humedad absoluta determinada, mientras que en el interior del invernadero existe una temperatura y humedad que es mayor debido a la radiación, transpiración y la evaporación del agua del suelo. Estos dos tipos de aire se van a intercambiar y mezclar de forma homogénea en el interior, produciendo un intercambio de energía y masa entre las plantas y el aire interior.

La ventilación puede ser natural o pasiva, si se utiliza el intercambio de aire desde las ventanas donde existe una diferencia de presión que se origina

por el viento exterior y la diferencia de temperatura (Lenscak & Iglesias, 2019). A su vez las ventanas brindan ventilación lateral si están en los laterales y cenital si se encuentran en el techo. Resulta complejo poder decir con exactitud la cantidad de ventanas requeridas, pero si se estima que el área de ventilación se puede incrementar del 6 % a 16 %, entonces la ventilación puede incrementarse en el 25 %. También se recomienda que las ventanas estén orientadas barlovento para lograr una mayor circulación del aire entre 35 % y 60 % (Martínez & Roca, 2011).

Para la ventilación lateral se debe sujetar el plástico en la cumbrera lateral y dejando caer el mismo por debajo de la línea del zócalo. La manipulación de este se puede realizar de forma manual para ventilar el invernadero sin altos costos de montaje, pero ello requiere tiempo de operación y debido a esto se han implementado sistemas automáticos como los propuestos en Marrero y otros (2020), que utilizan un motor reductor como se muestra en la figura 5, aquí se manipular la parte mecánica mediante acoples eje-motor y eje-tubo de contrapeso de la cortina y de esta forma se logra se logra estabilidad en la operación por medio de chumaceras ubicadas en cada extremo de la estructura del invernadero.

Figura 19.

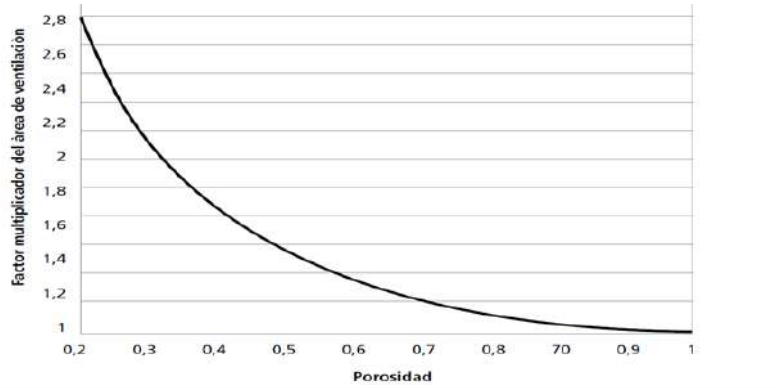
Motor y servo mecanismo para la subida automática de las cortinas laterales.

En la mayoría de los invernaderos son utilizadas redes o cortinas ant-insectos que resultan útiles cuando se incrementa la temperatura en el invernadero producto de la reducción en la ventilación, esto se hace para evitar enfermedades y parásitos en las plantas. Si se quiere determinar el factor por el cual se debe multiplicarse el área de aberturas de un invernadero durante el cálculo de la tasa de ventilación, en el trabajo Lenscak & Iglesias (2019), se propone la relación As/Av en función de la porosidad. Donde As es el área de la ventana con malla y Av representa el área de la ventana original. Como

resultado se puede obtener la figura 20, donde se aprecia el factor por el cual el área de ventilación filtrada debe aumentarse para compensar la reducción de la ventilación.

Figura 20.

Factor de incremento de ventilación en función de la porosidad. Fuente especificada no válida.



Para determinar el porcentaje de ventilación se considera la suma de las áreas de aberturas de ventilación en las paredes y techo, y al ser dividida por la superficie total del invernadero y multiplicarlo por 100, permite obtener este valor. La forma más fácil para abrir las ventanas de forma manual o automáticamente es la de desenrollar la película hacia arriba con un tubo que también sirve de contrapeso a la cortina o desenrollar esta para bajar la ventana y para ello existen una serie de mecanismos automáticos disponibles en el mercado.

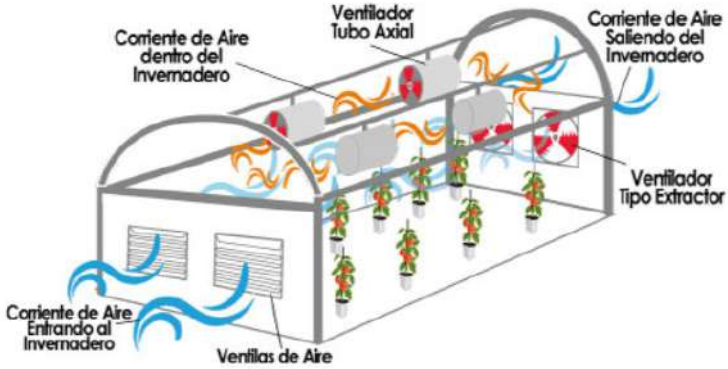
Cuando se utiliza la ventilación forzada se obtiene un control más preciso de la temperatura y una mayor homogeneidad vertical de la humedad y temperatura del aire. En la zona donde están ubicados los ventiladores debe estar libre de obstáculos a una distancia mínima de 1.5 veces el diámetro del ventilador, mientras que la superficie de la ventana en el lado opuesto al ventilador debe ser 1.25 veces mayor que las existente en el lado del ventilador. Para determinar la potencia y la cantidad de ventiladores se necesita conocer la cantidad de aire a renovar (es recomendado que sean de 40 a 60 renovaciones por hora), la planimetría del invernadero, los vientos de la zona y la distancia entre ventiladores

Cuando se utilizan extractores, estos deben renovar el aire en el interior del invernadero con vista a garantizar una buena distribución de temperatura producto de las corrientes de aire que se originan y se muestran en la figura

7, lo que impide daños en el cultivo. Este volumen de aire que es suministrado por el ventilador tiene que garantizar las necesidades del cultivo. También el extractor puede ser utilizado durante las épocas frías para evitar humedades excesivas y en período más caluroso para reducir elevadas temperaturas. Ello no significa que no se pueda utilizar la ventilación pasiva cenital y lateral ya que al no utilizar la combinación de ambas ventilaciones se puede producir un vacío en el interior del invernadero.

Figura 21.

Ubicación de extractores y corriente de aire en el interior del invernadero. Fuente especificada no válida.



Es necesario instalar los extractores considerando los siguientes criterios:

- Favorecer las corrientes de aire que predominan en el lugar,
- Controlando preferiblemente el volumen de aire renovado en varias fases, para ello se recomienda instalar ventiladores de dos velocidades o conectarlos de forma intercalada
- Establecer una distancia entre los extractores de 8 a 10 metros para garantizar uniformidad del flujo de aire,
- El volumen de aire impulsado por el ventilador debe satisfacer las necesidades del cultivo a una presión de 3 mm ca (milímetros de columna de agua).

- Mantener una distancia a cualquier obstáculo mayor a 1,5 veces el diámetro del equipo
- Las ventanas ubicadas en el lado opuesto deben tener una superficie de entrada de aire de 1,25 veces mayor que la de los extractores

Para el determinar el número de ventiladores requeridos durante el diseño del sistema forzado de ventilación es necesario definir la cantidad de aire del interior del invernadero que se pretende renovar, la planimetría del invernadero, velocidad del viento local y distancia requerida entre extractores. También es necesario considerar que se genere una circulación constante del aire en la medida que se renueva y para ello en los invernaderos de gran dimensión se recomienda el uso de extractores de menor potencia para facilitar la circulación del aire en el interior. Es recomendable utilizar el número de renovaciones por horas recomendadas anteriormente, entonces el volumen de aire a renovar se puede determinar mediante la siguiente expresión

$Qa = V_{inv} N$, m^3/h

Donde Qa es el volumen de aire a extraer del interior del invernadero y N el número de renovaciones de aire en una hora

Ejemplo. 1. Determinar el volumen de aire total que se requiere renovar y la cantidad de extractores en un invernadero que presenta las dimensiones de 20 m de largo, 10 m de ancho y 3.5 m de alto. Considerar N= 50 renovaciones en una hora.

$Q_t = (30 \times 20 \times 4.5) N$

$= (20 \times 10 \times 3.5) 50$

$= 35000\ m^3/h$

Para determinar la cantidad n de extractores se debe dividir el volumen total de aire a extraer por el caudal del extractor a utilizar (q), para este caso utilizaremos los datos de un extractor de 0.5 m de diámetro, caudal q = 5800 m^3/h y 1600 RPM

$$n = \frac{Qt}{q} = \frac{35000}{5800} = 6$$

Las necesidades calóricas del cultivo se determinan en función de las temperaturas óptimas requeridas para los diferentes cultivos en horarios nocturnos (de10 °C a14 °C y durante el día (de 18 °C a 25 °C), las dimensiones del invernadero y su temperatura. Como estas temperaturas pueden variar en

función del tipo de cultivo, en la tabla 19 a modo de ejemplo se representan los rangos de temperaturas óptimas durante la noche y el día para diferentes cultivos, los valores expuestos podrían variar también dependiendo de las diferentes variedades y especies según Lenscak & Iglesias (2019) y Guía: Ventilación en un invernadero (2024)

Tabla 19.

Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos.

Especie	Temperatura óptima, °C	
	Nocturna	Diurna
Tomate	13-16	22-26
Pepino	18-20	24-28
Melón	18-21	24-30
Calabaza	15-18	24-30
Chaucha	16-18	21-28
Pimiento	16-18	22-28
Berenjena	15-18	22-26
Lechuga	10-15	15-20

También en a la aplicación de estas técnicas es necesario calcular la demanda térmica por cada m^2, para lo cual se utiliza la ecuación (15) propuesta por Villagrán y otros (2012) para la ventilación que incide en los costos explotación por concepto del uso de energía.

$$Q = \frac{Scub}{Ssue} n\, T,\ w / m^2 \qquad (15)$$

Donde:

Q- Cantidad de calor requerido por metros cuadrados del invernadero

μ- Coeficiente de pérdidas de calor a través de la cubierta por convección, conducción y radiación.

Scub- Superficie de la cubierta de polietileno en metros cuadrados.

Ssue. Superficie del suelo en metros cuadrados que está cubierta por el invernadero.

ΔT: es la diferencia de temperatura a cubrir, entre las necesidades del cultivo y la mínima estimada en el exterior.

Control automatizado de clima interior del invernadero

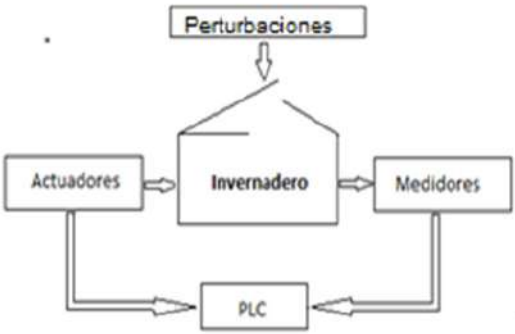
Sistema Scada

El desarrollo de las nuevas tecnologías agrícolas y la agricultura de precisión ha requerido el uso de técnicas de automatización que incluyen los sistemas Scada, tecnologías de información, y para el monitoreo y control de un grupo de variables presentes en objetos de control como los invernaderos (Alfonso y otros, 2021; Muñoz y otros, 2011; Laktionov, Vovna, & Kabanets, 2023).

Con el uso del sistema Scada para el control de invernaderos es posible la retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo para controlar las variables seleccionadas, como es el caso de la temperatura, humedad y consumo de agua, (Burgueño Camacho et al., 2012; Marrero y otros, 2021; Salazar Moreno y otros, 2016). Como ejemplo esto en la figura 22 se muestra el esquema del sistema de control realimentado, que se compone de cuatro partes fundamentales, el invernadero como objeto de control, el sistema de medición con los sensores y actuadores, así como el controlador lógico programable (PLC) que permite corregir las variaciones de los parámetros internos del invernadero que se presentan debido a las perturbaciones externas, originadas por los cambios de la radiación, humedad externa, velocidad del viento, la ocurrencia de lluvias entre otros.

Figura 22.

Esquema de automatización.

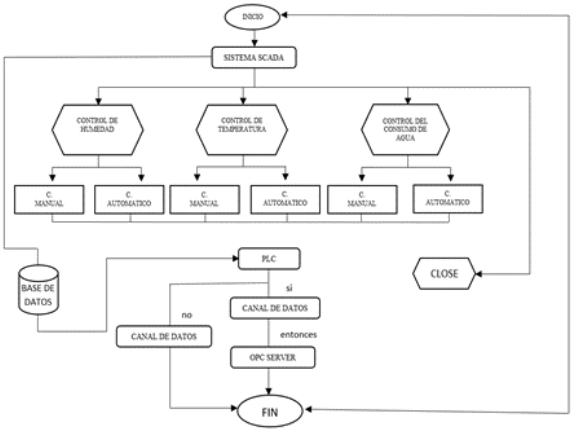


En Marrero y otros (2020), se propone la automatización de un invernadero a partir de un sistema –Scada que opera en ambiente MS Windows, que es compatible con contenedores OLE y utiliza el software WinCC para atender los requerimientos. Esta aplicación también permite el sistema cliente – servidor (Bárzaga Martell y otros, 2016; Mena, Sánchez Molina, Rodríguez, Guzmán, & Berenguel, 2015). El control se desarrolla con un PLC S7 1200 para el control de temperatura y el consumo de energía, donde la comunicación se realiza desde un canal de datos de 5Mbps de velocidad para poder configurar los equipos del tablero de control.

La configuración general del sistema Scada propuesto se muestra en la figura 23, donde se indican los equipos monitoreados, datos de las variables temperatura, humedad y el consumo de agua que son medidos con los instrumentos de campo.

Figura 23.

Configuración del Scada para el control del invernadero.



Control de humedad del invernadero

Conjuntamente con el control de humedad es necesario saber el consumo de agua y para ello se utilizar la configuración del sistema mostrado en las figuras 24 y 25, con una electroválvula del tipo diafragma, para garantizar el llenado del tanque, en este caso el nivel es medido a través de un sensor ultrasónico. El control del riego siempre debe realizarse acorde a las características de cada cultivo y por ello existe la posibilidad de programar diferentes requerimientos de cultivos (Cea & Alonso, 2015; Quesada Roldán, 2015).

Figura 24.

Estructura del sistema de medición de nivel de agua y control de riego.

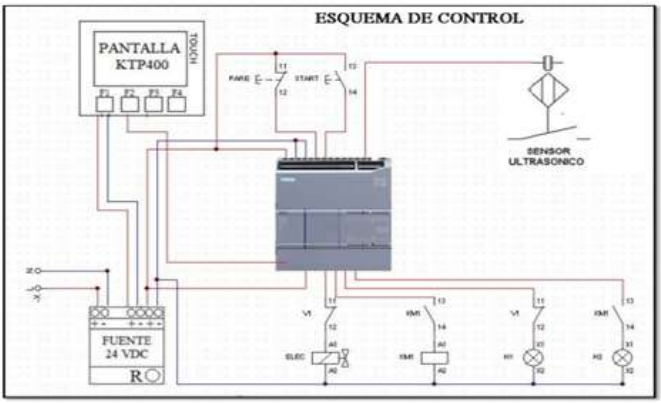
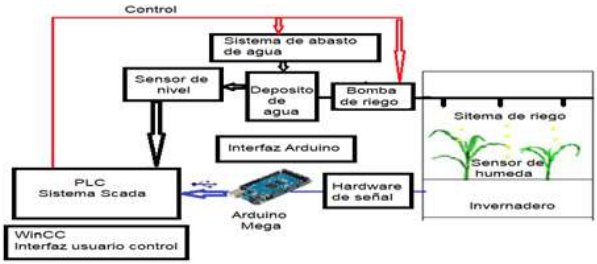


Figura 25.

Configuración del sistema de medición de nivel.



Para poder definir los valores de humedad relativa en el interior del invernadero que presenta tres hileras de cultivos, se utiliza el HMI que se muestra en la figura 26, donde se define la tarea del nivel de humedad requerido en cada una de las hileras.

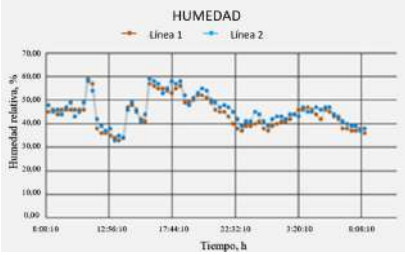
Figura 26.

Pantalla HMI del control de humedad por hileras.

Como resultado del control se puede ver el comportamiento de la humedad en dos de las líneas de riego (ver en la figura 27) y esto refleja cómo es posible estabilizarla la humedad en el rango de 35 % a 55 %, valores pueden ser establecidos en dependencia de las características de cada cultivo

Figura 27.

Comportamiento del control de humedad durante un día.



Control de temperatura

Un ejemplo de algoritmo para el control de temperatura lo podemos ver en la figura 28, el mismo fue propuesto por Marrero, y otros (2020), aquí se ha considerado el control manual y automático para poder abrir o cerrar las ventanas del invernadero y además realizar el registro del valor de temperatura interior. En el control automático de temperatura se pueden establecer los rangos de la misma para definir el accionar de las ventanas y la operación del extractor de aire en función del valor de temperatura deseada. También como última opción el sistema considera la nebulización para el caso de que las dos primeras acciones no permiten llevar la temperatura al valor deseado, ya que la temperatura del invernadero también se puede reducirse introduciendo humedad y esto permite que la planta pueda enfriarse.

Para analizar la respuesta del sistema de control de temperatura se evalúa el comportamiento del régimen térmico del invernadero con las cortinas cerradas y sin el sistema de control activado durante un día para temperatura exterior máxima de 25 ^{o}C, estos resultados se pueden observar en la figura 15, donde se obtuvo temperaturas interiores máximas por un valor de 41 ^{o}C durante el mediodía.

Para poder observar la efectividad del control durante el horario del día con máximas temperaturas se realizó una comparación entre la temperatura interior con las ventanas cerradas (Caso 1) y la temperatura interior controlada por el sistema implementado (Caso 2) donde se encuentran las ventanas

abiertas y el extractor de aire en operación, como resultado se obtiene la gráfica de la figura 16 que muestra la variación de los rangos de temperatura en el invernadero, donde se observan variaciones de temperatura máximas en el interior de 30 °C con el control, mientras que sin este en día similar se alcanzaron valores que superaron los 34 °C. Como regla general en los ensayos realizados se aprecia una diferencia entre las temperaturas registras en el orden de los 5° C, de esta forma se verifica que es posible garantizar un ambiente adecuado para el cultivo con respecto a los valores necesarios para su buen desarrollo.

Figura 28.

Diagrama de bloques del sistema de control de Temperatura.

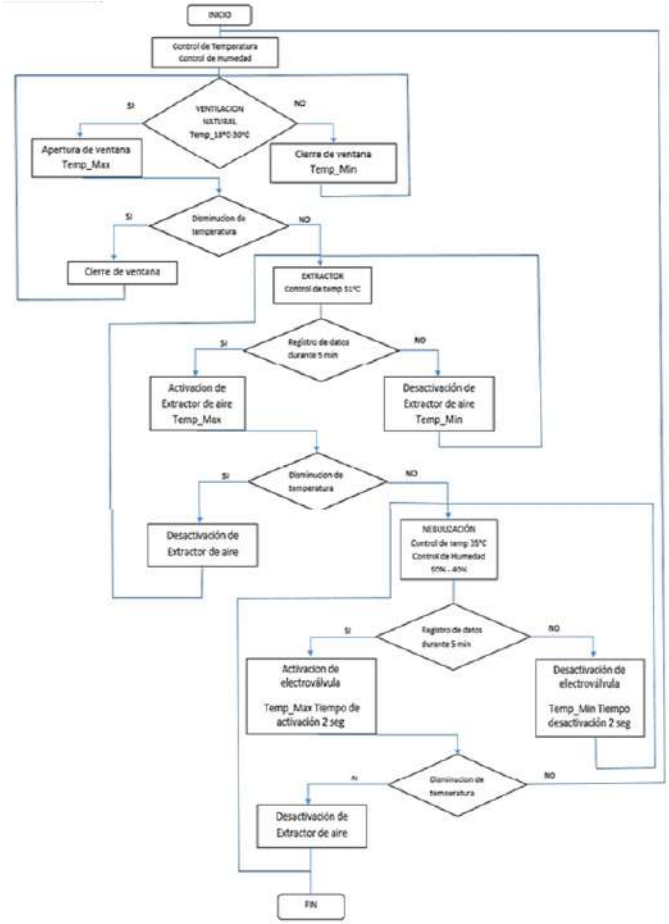


Figura 29.

Valor de la temperatura externa e interna sin el sistema de control.

Figura 30.

Comportamiento de la temperatura interior durante los casos 1 y 2 de operación del invernadero.

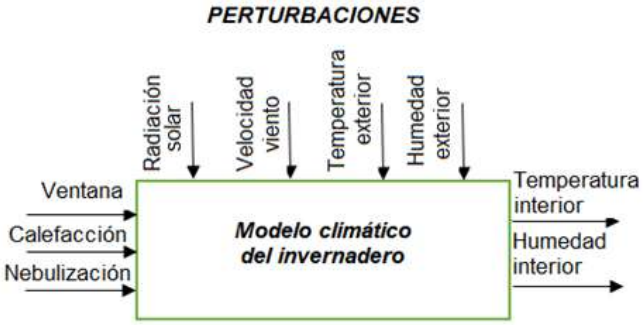
Uso de otras técnicas de control avanzado

Los casos analizados hasta el momento se relacionan con la aplicación de controladores on – off, sin embargo, el uso de otras técnicas como la inteligencia artificial (Bolandnazar, Sadrnia, Rohani, Marinello, & Taki, 2023) podría

lograr resultados de mayor precisión como es el caso del manejo del sistema con el controlador multifrecuencia (Marrero, Guzman, Gonzalez, León, & León, 2021). Para evaluar este controlador se requiere el modelo dinámico del invernadero a partir de los balances de energía, masa e incluir los aportes de la biología de las plantas con las variables presentes en la figura 31, donde se consideran los parámetros a controlar de temperatura y humedad, así como las variables a manipular como el volumen de aire que entra por las ventas, la ventilación y la nebulización.

Figura 31.

Variables presentes en el modelo climático de un invernadero.



Para el controlador multifrecuencia (MF) los autores Marrero, Guzman, Gonzalez, León, & León (2021), evalúa el retardo en un sistema SISO continuo, utilizando una función de transferencia de cuarto orden y el diagrama de Bode con vista a definir el tiempo de las tareas del controlador, que se determina como la inversa del retardo máximo admisible que muestra a su vez, el máximo retardo que puede tener el lazo de control, sin que aparezca la inestabilidad. También al incrementar la ganancia del controlador a valores cercanos a 0.7, el esfuerzo del control (EC= 1.1) con un máximo de retardo admisible que se reduce hasta 0.9 s. Esto demuestra la necesidad de utilizar el sistema MF que resulta viable en los casos donde los períodos de las señales presentes en el sistema con múltiples entradas y salidas (MIMO), son diferentes. Una salida para estos casos es utilizar el controlador MF ($G_{RN}T$) con la estructura de las ecuaciones 16 - 19:

$$G_{RN}{}^{T} = G_{2}{}^{T} H_{N}{}^{T} G_{1}{}^{NT} \quad (16)$$

$G_{2}{}^{T}$. - Componente del PID rápido

$$G_2^T = \frac{M^T}{G_p^T} \tag{17}$$

donde:

M^T - modelo de referencia.

G_1^{NT}. - Componente del PID lento.

$$G_1^{NT} = \frac{1}{1 - M^{NT}} \tag{18}$$

H_N^T. - Convertidor de frecuencia.

$$H_N^T = \frac{1 - Z^{-N}}{1 - Z^{-1}} \tag{19}$$

Durante la síntesis de controlador se deben determinar las funciones de transferencia del lazo cerrado MT y MNT con la función de transferencia del objeto de control Gp y la función del regulador G_R para los períodos de muestro T y NT. Ello permite obtener los reguladores discretos GRT y GRNT, que serán utilizados para hallar a partir de los períodos de muestreo y utilizando la ecuación (20):

$$M^T = \frac{G_p^T G_R^T}{1 + G_p^T G_R^T} \tag{20}$$

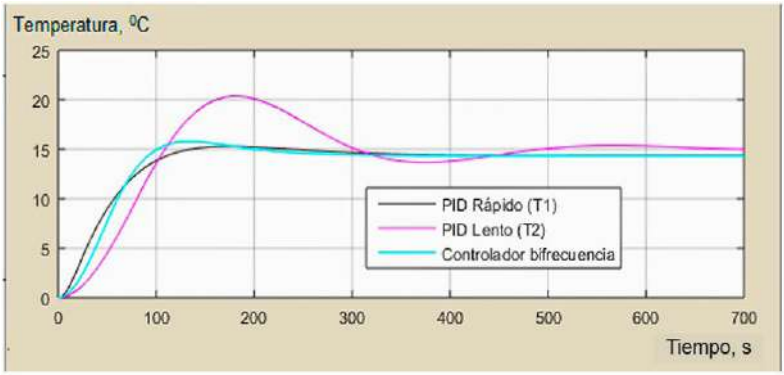
El sistema MF debe permitir que durante la actuación de la entrada con frecuencia 1/T, se aplique un controlador bifrecuencia de tipo PID que logre alcanzar rendimientos similares a los obtenidos cuando la salida es medida con un tiempo de muestreo igual a NT. Para la simulación se utilizó el procedimiento propuesto por Martinez (2008), considerando los parámetros previos de ajuste del controlador obtenidos (Kp = 0.2, D = 20 y I = 0.001). Con las expresiones (5-8) se procede a determinar el PID bifrecuencia y en la gráfica de la figura 18, se muestra la respuesta del controlador bifrecuencia con un comportamiento cercano al controlador rápido (T= 10s y N=4)

El uso del modelo de PIDMF con dos frecuencias permite el tratamiento de sistemas multifrecuencia cuando estos presentan períodos de muestreos diferentes. En el estudio con los tiempos de muestreo de 40 s y 10 s, se com-

pró como el tipo de muestreo incide negativamente y provoca el deterioro de la variable controlada. En la figura 32 se compara la señal de salida en presencia de controladores rápido, lento y bifrecuencia, donde se observa que al utilizar el regulador MF, se puede alcanzar durante el muestreo de salida lento, los mismos rendimientos que el sistema de control con muestreo rápido.

Figura 32.

Comparación de la respuesta del sistema con controlador monofrecuencia y bifrecuencia.



Nota. Tomado de Marrero, Guzman, Gonzalez, León, & León (2021)

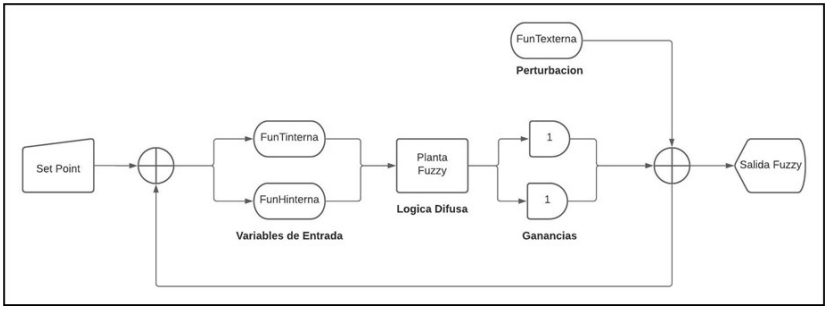
Es necesario mencionar que la carga computacional del controlador se homogeniza en las iteraciones, lo que permite reducir su utilización y mejora su desempeño, al presentar un modo lento durante las iteraciones que no realiza cálculo. El poder realizar control más eficaz de la temperatura repercute significativamente en uso de la energía y ello le permite al productor ser más competitivo y amigable con el medio ambiente a través de la optimización energética del invernadero.

El autor Suárez (2021); establece el comportamiento de las variables climatológicas en el interior y exterior del invernadero a partir de los datos de la estación climatológica instalada en la zona del invernadero y los registros del sistema Scada de monitorio y control. Con esta información se precede a determinar las funciones de transferencia que caracteriza la planta Fuzzy que en este caso es el invernadero con las variables de entrada (Temperatura interna y Humedad interna), considerando las restricciones de salida del sistema y las variaciones en las distintas estaciones al año.

Para establecer las condiciones de funcionamiento en el diseño e incorporación de la Lógica difusa, es necesario haber considerado aspectos cuantitativos y cualitativos obtenidos de la experticia y saber ancestral de los agricultores e instrumentos de medición. En la Figura 33, se identifica que el sistema cuenta con un set point el cual será configurado por el usuario y en el proceso de identificación se consideran las funciones de transferencia de temperatura y humedad interna, la lógica difusa de la planta y las ganancias para obtener la salida, considerando las perturbaciones

Figura 33.

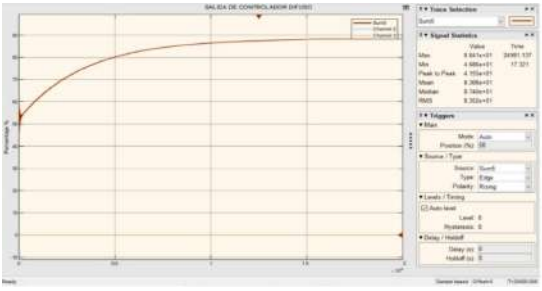
Modelo de lógica difusa.



Durante la simulación realizada por Suárez (2021), con la aplicación del controlador difuso, se van a considerar diferentes condiciones de funcionamiento y se comprueba que el bloque de Fuzzy Logic entrega señales pertinentes para las diferentes órdenes de activar el sistema de riego y la apertura o cierre de cortinas, atendiendo a perturbaciones, muestra de este desempeño para la variable humedad lo podemos apreciar en la figura 34 que refleja un comportamiento estable y un nivel de efectividad del 88.4%

Figura 34.

Comportamiento de la variable humedad a la salida.



Con vista a lograr una mayor eficiencia productiva con la ayuda de la automatización, autores como Molina & Marrero (2024), consideran el carácter multivariable del invernadero con la interrelación entre un grupo de variables y su comportamiento no lineal. Para ello se utilizan las funciones de transferencia identificadas con los datos obtenidos en mediciones de temperatura y humedad que son normalizados y permiten obtener una aproximación del modelo del sistema con un ajuste del 72,43 %.

El control es realizado con redes neuronales del tipo NARMA-L2 multicapa, que logra una respuesta para el control de humedad y temperatura que se muestra en las figuras 35 y 36 respectivamente. Estas gráficas nos señalan como es posible controlar el sistema de manera adecuada con un desempeño aceptable en diferentes escenarios de temperatura y humedad al presentar sobreimpulsos pocos significativos y errores inferiores al 5 %.

Figura 35.

Respuesta del controlador de temperatura.

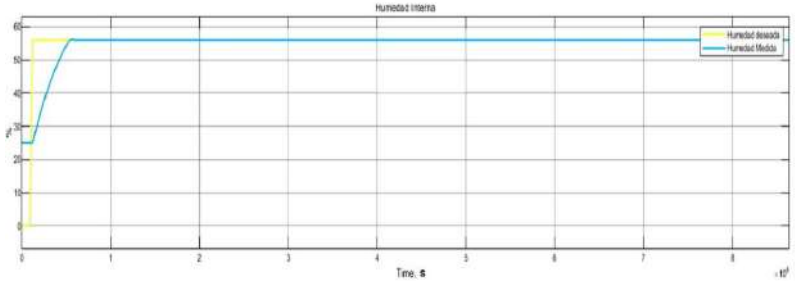
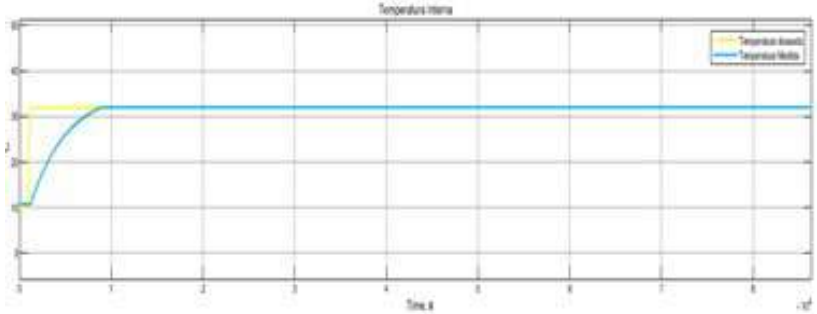


Figura 36.

Respuesta del controlador de humedad.



Conclusiones

- El control de humedad y temperatura con el uso de tecnologías de control permite garantizar una explotación óptima de invernadero al lograr una estabilidad en las condiciones climatológicas programadas por el operador acordó a las características de cada cultivo y para ello se han desarrollo un conjunto de técnicas y tecnologías que facilitan la producción con mayor calidad y eficiencia.
- Con el uso de sistemas Scadas y HMI para el control de invernaderos, se humaniza el trabajo del operador con un sistema amigable que garantiza precisión en los valores requeridos de las diferentes variables controladas como la humedad que al poderse fijar en valores superiores al 30 % atendiendo al tipo de cultivo, permiten una fotosíntesis satisfactoria, mayor eficiencia en el riego y el uso de energía
- El diseño de reguladores multifrecuencia contribuye a lograr rendimientos del controlador similares al sistema con muestreo rápido a partir del diseño del PID que utiliza diferentes períodos de muestro para los casos donde el comportamiento del proceso controlado se realiza combinando la forma rápida y lenta. Es así como el regulador bifrecuencia puede operar el lazo de control con dos frecuencias de muestreo, una lenta para evaluar la salida del proceso controlado y otra que resulta un número entero de N veces más rápido para producir la señal del actuador.
- Los indicadores obtenidos con los sensores y equipos de medición permiten obtener una base de datos y eficiencia del sistema de control difuso de un 88,4%, confirmando que la lógica difusa permite un control efectivo ante la relación de temperatura y humedad en los diferentes escenarios posibles durante la automatización de invernaderos.
- El controlador con redes neuronales del tipo NARMA-L2 multicapa, presenta un desempeño aceptable para las diferentes condiciones de temperatura y humedad evaluados en la aplicación desarrollada con sobreimpulsos pocos significativos y errores de estado estacionario inferiores al 5 %.

Referencias Bibliográficas

Achour, Y., Ouammi, A., & Zejli, D. (2021). Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews, 147***. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111251

Alfonso, O., Perez, G., Berdejal, P., Carcia, M., & Desiderio, J. (2021). Implementar un sistema Scada para controlar el riego en la producción de fresas en invernadero. ***Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas. COMEII.*** Hermosillo. Retrieved from https://www.riego.mx/congresos/comeii2021/files/ponencias/extenso/COMEII-21008.pdf

Amaya, E., & Ramírez, W. (2016). ***Diseño de automatización de sistema de riego de invernadero para el desarrollo de la agricultura familiar en el marco de la segurifad alimentaria.*** ITCA.

Barroso García, A. (2015). ***Control y monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil.*** España: MSc. Tesis. Universidad Politécnica de Madrid.

Bárzaga Martell, L., Mompie Paneque, R. C., & Valdés Cuesta, B. (2016). Sistemas SCADA para la automatización de los procesos productivos del CIGB. ***RIELAC, 37***(1), 20-37.

Bolandnazar, E., Sadrnia, H., Rohani, A., Marinello, F., & Taki, M. (2023). Application of Artificial Intelligence for Modeling the Internal. ***Agriculture, 13***(1583). doi:https://doi.org/10.3390/agriculture13081583

Bontsema, J., Henten, E., Kornet, J., Budding, J., Rieswijk, T., & Nieboer, S. (2007). On-line estimation of the transpiration in greenhouse horticulture. ***Proceedings Agricontrol. 2nd IFAC International Conference on Modeling and Design of Control Systems in agriculture***, (pp. 29-34). Croatia.

Burgueño Camacho, H., Reyes Rosas, A., Rodríguez García, R., Zermeño-González, A., Jasso Cantú, D., & Cadena Zapata, M. (2012). Evaluación de un modelo para estimar la temperatura y humedad relativa en el interior de invernadero con ventilación natural. ***Chapingo Ser.Hortic, 18***(1), 125-140.

Cea, M., & Alonso, S. (2015). Sistema de Ayuda a la Decisión para la Programación del Riego Basado en Aspectos Agronómicos. ***IV Jornadas de Ingeniería del Agua.*** Córdoba, España.

Fitz, E., Kubota, C., Giacomelli, G., Tignor, M., Wilson, S., & Macmaho, M.

(2010). Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. ***Computers and Electronics in Agriculture***, 105-116. doi:https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.010

Koukounaras, A. (2021). Advanced Greenhouse Horticulture: New Technologies and Cultivation Practices. ***Horticulture, 7***(1). doi: https://doi.org/10.3390/horticulturae7010001

Laktionov, I., Vovna, O., & Kabanets, M. (2023). Computer-Oriented Method of Adaptive Monitoring and Control of Temperature and Humidity Mode of Greenhouse Production. ***Baltic J. Modern Computing, Vol. 11 (2023), No. 1, 202-225, 11***(1), 202-225. doi:https://doi.org/10.22364/bjmc.2023.11.1.12

Lenscak, M., & Iglesias, N. (2019). ***Invernaderos: tecnología apropiada en las regiones productivas del territorio nacional argentino.*** (I. Ediciones, Ed.) Argentina. Retrieved from https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/136656/mod_resource/content/1/inta_-_invernaderos.pdf

Mamani, M., Villalobos, M., & Herrera, R. (2017). Sistema web de bajo costo para monitorear y controlar un invernadero agrícola. ***Ingeniare Revista Chilena de Ingenieria, 25***(4), 519-618.

Marrero, S., Gonzalez, I., León, M., & Suárez, R. (2021). Control de humedad y consumo de agua en un invernadero. ***Universidad, ciencia y tecnología, 25***(109), 60-70.

Marrero, S., Guzman, D., Gonzalez, I., León, M., & León, A. (2021). Eficiencia energética de un invernadero: Un estudio práctico de aplicación de un controlador multifrecuencia en un entorno multivariable. ***Brazilian Journal of Development, 7***(6), 58234-58249. doi:https://orcid.org/10.34117/bjdv7n6-293

Marrero, S., Suárez, R., Nata, E., Silva, J., Álvarez, J., & Ramírez, G. (2020). Automatización y control de un invernadero. ***Ciencias de la ingeniería y aplicadas***, 12-23.

Martin, E. C., & Muñoz, C. (2017). ***Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿Cuándo?*** University of Arizona, College of Agriculture. Tucson: University of Arizona.

Martinez, J. (2008). ***Control adaptivo.*** MITIT.

Martínez, J. P., Farias, K., & Ruiz, R. (2020). Importancia del control de variables ambientales en invernaderos para la producción de hortalizas. , año 2020. *Informativo N° 36. INIA.*

Martínez, P., & Roca, D. (2011). *El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad N.*

Martínez, P., & Roca, D. (2011). El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad N.

Mena, R., Sánchez Molina, J. A., Rodríguez, F., Guzmán, L. L., & Berenguel, M. (2015). Diseño de un Sistema SCADA Modulable y Escalable para el Control de Clima y Riego en Invernaderos. *VIII Congreso Ibérico de agroingeniería.* España.

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2012). *Sistema de Clasificación de los ecosistemas del Ecuador continental.* Retrieved from https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEYENDA-ECOSISTEMAS_ECUADOR_2.pdf

Molina, M., & Marrero, S. (2024). Climate Optimization in Greenhouses Using the NARMA-L2 Model:. *Practice and Applications (FPA), 16*(01), 253-263. doi:https://doi.org/10.54216/FPA.160118

Muñoz, P., Buitrago, J., Arboleda, A., Cortes, O., Sánchez, A., & Zapata, C. (2011). Sistema de instrumentación y monitoreo para el invernadero la Aldana de la universidad del Quindío. *Scientia et Technica, 16*(49), 219-225.

Ossa Duque, S. I. (2017). Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión de invernaderos. *Vector 12*, 51-60.

Quesada Roldán, G. (2015). Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía Costarricense, 39*(1), 25-36.

Salazar Moreno, R., Mauricio Pérez, A. M., López Cruz, I. L., & Rojano Aguilar, A. (2016). Un modelo de humedad dentro de un invernadero semicerrado. *22*(1), 27-43.

Suárez, R. (2021). Automatización y Control de un invernadero experimental. ***Tesis Maestría Electricidad. Universidad Técnica de Cotopaxi***. Latacunga. Retrieved from https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/7819/1/MUTC-001012.pdf

Tangarife, H. T., Toro, S. X., & Carmona, C. V. (2020). Sistemas automatizados para el control del recurso hídrico y variables ambientales bajo invernadero: aplicaciones y tendencias. ***Entre Ciencia e Ingeniería, 14***(27), 91-98.

Villagrán, E. A., Gill, R., Acuña, J. F., & Bojacá, C. R. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispan greenhouse. ***Agronomía Colombiana, 30***(2), 282-288.

EI FUROR DE LA ENERGÍA
desafíos y soluciones

4

Capítulo

Proyección de la demanda eléctrica en Cotopaxi para los sectores Residenciales, comerciales e Industriales

AUTORES: Cristhian Lenin Masaquiza Vera; Carlos Ivan Quinatoa Caiza; Ramírez Secundino Marrero

MAWIL
Publicaciones Impresas y Digitales

Proyección de la demanda eléctrica en Cotopaxi para los sectores Residenciales, comerciales e Industriales

Projected electricity demand in Cotopaxi for residential, commercial, and industrial sectors.

Resumen

El artículo presenta un análisis de la demanda eléctrica proyectada en la provincia de Cotopaxi, utiliza el modelo LEAP para realizar una predicción detallada de la demanda energética durante el período 2022-2050. La investigación responde a la necesidad de anticipar los c y evaluar el impacto de políticas de eficiencia energética. Se ha proyectado que la demanda eléctrica aumentará de 381,842 PJ en 2022 a 693,691 PJ en 2050, reflejando una tasa de crecimiento anual del 2%. Aunque la demanda rural actualmente predomina, se anticipa un incremento significativo en la demanda urbana, que pasará del 23.1% en 2022 al 26.8% en 2050. Estos hallazgos son fundamentales para la planificación energética sostenible, subrayando la necesidad de mejorar la infraestructura existente y adoptar medidas de eficiencia energética para gestionar el crecimiento de la demanda y reducir el impacto ambiental. Los resultados proporcionan una base sólida para la formulación de políticas energéticas estratégicas en la región, asegurando un suministro energético eficiente y sostenible a largo plazo.

Palabras clave: demanda eléctrica proyectada, demanda eléctrica proyectada, eficiencia energética, demanda rural, planificación energética sostenible

Abstract

The article presents an analysis of the projected electricity demand in the province of Cotopaxi, utilizing the LEAP model to conduct a detailed projection of energy demand for the period 2022-2050. The research addresses the need to anticipate infrastructure requirements and assess the impact of energy efficiency policies. It is projected that electricity demand will increase from 381,842 PJ in 2022 to 693,691 PJ in 2050, reflecting an annual growth rate of 2%. Although rural demand currently predominates, a significant increase in urban demand is anticipated, rising from 23.1% in 2022 to 26.8% in 2050. These findings are crucial for sustainable energy planning, emphasizing the need to improve existing infrastructure and adopt energy efficiency measures to manage demand growth and reduce environmental impact. The results provide a solid foundation for the formulation of strategic energy policies in the region, ensuring an efficient and sustainable energy supply in the long term.

Keywords: projected electricity demand, projected electricity demand, energy efficiency, rural demand, sustainable energy planning.

Introducción

La energía es un pilar esencial en el mundo moderno, impulsando las economías nacionales, afectando las condiciones medioambientales y contribuyendo directamente al bienestar de la población. En Ecuador, asegurar un suministro energético accesible y seguro es crucial para mantener un país próspero y beneficioso para sus ciudadanos y sectores productivos. La proyección de la demanda energética es un componente clave para la planificación de la expansión de los sistemas eléctricos de distribución, permitiendo la formulación de soluciones óptimas y la orientación táctica y estratégica de futuras inversiones. Además, un análisis riguroso de las tendencias de consumo energético puede identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir costos. Por lo tanto, una gestión eficaz del suministro energético es fundamental para el desarrollo sostenible del país. La energía es fundamental en el mundo moderno, ya que impulsa las economías nacionales, influye en las condiciones medioambientales y contribuye directamente al bienestar de la población. En Ecuador, asegurar un suministro energético accesible y seguro es esencial para mantener un país próspero y beneficioso para sus ciudadanos y sectores productivos (Meza Segura & Luyo-Kuong, 2020).

La proyección de la demanda energética es clave para la planificación de la expansión de los sistemas eléctricos de distribución, permitiendo la formulación de soluciones óptimas y la orientación táctica y estratégica de futuras inversiones (Meza Segura & Luyo-Kuong, 2020). Además, un análisis riguroso de las tendencias de consumo energético puede identificar oportunidades para mejorar la eficiencia y reducir costos, lo cual es fundamental para el desarrollo sostenible del país. En 2021, a nivel cantonal, se notó que la mayoría de la población se encontraba en zonas rurales, con la excepción del cantón La Maná. Los cantones Pangua y Sigchos mostraron un alto porcentaje de población rural, con un 92% y 91% respectivamente. A estos les siguieron los cantones Pujilí, Salcedo, Saquisilí y Latacunga, con un 85,43%, 78,55%, 71,54% y 62,55% respectivamente. Esto refleja que la provincia de Cotopaxi es predominantemente agropecuaria, donde la principal fuente de ingresos proviene de actividades económicas como la agricultura y la ganadería (Guaman & Bravo, 2021). El censo, realizado decenalmente, revela que la provincia de Cotopaxi tenía una población de 424,663 habitantes en el año 2010, cifra

que aumentó a 488,716 en 2020, representando aproximadamente el 2,79% de la población total del país (Guaman & Bravo, 2021).

Según las proyecciones demográficas, la población de la provincia pasó de aproximadamente 457,404 habitantes en 2015 a 488,716 en 2020. A diez años después sigue habiendo una gran afluencia en que la parte rural es la más importante en la provincia, de Cotopaxi (David et al., n.d.). En el ámbito de la energía, la electricidad desempeña un rol crucial en la sociedad contemporánea, al ser el vector energético más versátil debido a su amplia gama de aplicaciones y su impacto significativo en la vida cotidiana (Labein Tecnalia, 2007). A diferencia de otros portadores de energía, la electricidad ofrece ventajas notables al permitir la transmisión eficiente de energía proveniente de fuentes renovables. Además, los dispositivos y sistemas diseñados para operar con electricidad tienden a ser más eficientes en comparación con aquellos que utilizan otros tipos de energía (Pazmiño Ordóñez et al., 2019). Estos desafíos requieren un enfoque multidisciplinario, herramientas analíticas avanzadas y una planificación estratégica rigurosa para proporcionar estimaciones precisas y confiables de la demanda eléctrica futura (Fontalvo et al., 2018). Se captura la relación entre el comportamiento del consumo y las opciones tecnológicas. También se consideran las energías tradicionales y las diferencias en la demanda según la clase de ingresos (Cai et al., 2013). El enfoque de uso final refleja la transición en el uso de energía en el sector residencial, influenciada por los efectos de los ingresos y las políticas. Este enfoque es especialmente adecuado para los países en vías de desarrollo, donde la evolución del consumo energético y las políticas gubernamentales pueden tener un impacto significativo en la demanda energética futura (Benito & Arena, 2020).

La finalidad de este trabajo es para proyectar con precisión la demanda energética futura, garantizando un suministro adecuado y eficiente que satisfaga las crecientes y cambiantes necesidades del país (Benito & Arena, 2020). Mediante una simulación detallada, se proporcionará una base robusta para la formulación de políticas y estrategias que optimicen el suministro energético y minimicen los impactos ambientales adversos (Edgar M. Zapata & Alvaro S. Mullo Q, n.d.).

Medir la actividad energética en los hogares presenta un desafío considerable debido a la diversidad de actividades que consumen energía. Por ello, se utiliza la cantidad de hogares como un indicador representativo de la actividad residencial, se recalca en este trabajo que no es un método de generación distribuida (Sreekanth, 2016). Para las unidades de los datos ob-

tenidos optaremos por ocupar los Petajoules que es una unidad de energía en el sistema internacional (SI) y es más común en contextos donde se discuten grandes cantidades de energía, como en la evaluación de la demanda energética de un país, el consumo energético de grandes sectores industriales, o la producción de energía a nivel nacional o global, como lo evalua (Jha & Puppala, 2017).

Este estudio se basa en datos de 2022 debido a la fiabilidad y accesibilidad de la información en fuentes de acceso abierto. Aunque el 2023 ya es un año transcurrido, la limitada disponibilidad de datos públicos para dicho año nos llevó a seleccionar el 2022 como punto de partida para las proyecciones energéticas. El artículo tiene como objetivo desarrollar la proyección de la demanda eléctrica en la provincia de Cotopaxi para el periodo 2022-2050, utilizando el software LEAP. Este enfoque busca mejorar la eficiencia energética de la región.

Metodología

Metodología datos y construcción de escenarios energético

LEAP (Plataforma de Análisis de Bajas Emisiones) es una herramienta reconocida mundialmente, creada por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, para analizar políticas energéticas y estrategias de mitigación del cambio climático. Adoptada en más de 190 países por gobiernos, universidades, ONGs y empresas energéticas, LEAP se utiliza en escalas que van desde ciudades hasta aplicaciones globales (Heaps, 2022). El modelo LEAP se destaca por su estructura de datos adaptable, que combina facilidad de uso con un alto nivel de detalle técnico para los usuarios finales. Ha sido extensamente implementado por diversas organizaciones a nivel local, nacional e internacional para proyectar tanto la oferta como la demanda de energía, prever el impacto ambiental de las políticas energéticas e identificar posibles retos futuros. Es utilizado a nivel mundial para evaluar el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero en diversos sectores clave: áreas urbanas, rurares e industriales (Heaps, 2022). Esta herramienta ha demostrado ser valiosa para analizar el impacto ambiental y la eficiencia energética en estos ámbitos fundamentales de la actividad humana (S E I, 2005). Estudios anteriores, como el de Cai et al. (2013), han centrado su análisis en la simulación y evaluación de diferentes escenarios de políticas de planificación eléctrica en China para el período de 2010 a 2050, algunos de estos modelos se caracterizan con los modelos como el de Sepulveda et al. (2024). En este estudio, se desarrollaron tres escenarios: uno de referencia, otro que prioriza

la captura y almacenamiento de carbono (CCS), y un tercero enfocado en la energía nuclear. De manera similar Mirjat et al. (2018), analizaron y proyectaron la demanda y oferta de electricidad en Pakistán entre 2015 y 2050, formulando cuatro escenarios de suministro energético: Escenario de Referencia (REF), Tecnologías de Energía Renovable (RET), Máxima Utilización del Carbón Limpio (CCM), y Eficiencia Energética y Conservación (EEC).

El método utilizado en este estudio es de carácter cuantitativo y descriptivo, basado en la recopilación y análisis de datos secundarios provenientes de fuentes oficiales. La principal fuente de información fue el Sistema de Información y Estadística Energética (SISDAT) de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) (2022). Este sistema proporciona un repositorio exhaustivo de datos relacionados con la generación, distribución y consumo de electricidad en Ecuador, incluyendo estadísticas históricas de las centrales eléctricas desagregadas por provincia. El desarrollo de modelos de previsión también viene determinado por la disponibilidad de datos pertinentes (Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables, 2022). El cambio económico estructural y el aumento de la proporción de hogares rurales tienen efectos indirectos en la futura demanda de energía (Chen et al., 2019). Para lograr un enfoque más técnico y preciso, se utilizó el Sistema de Información y Estadística Energética (SISDAT) de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) (2022) (Salazar & Panchi, 2014).

La recolección de datos incluyó información poblacional y económica, fundamentales para establecer proyecciones confiables. Posteriormente, se examinó el uso de energía en distintos sectores (residencial, industrial, transporte), previendo futuras necesidades en función de las tendencias demográficas y económicas (Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables, 2022). El uso de LEAP facilita la integración de datos complejos y la generación de proyecciones precisas de la demanda energética, cruciales para el desarrollo de políticas energéticas y la planificación de la infraestructura eléctrica. Tabla 1 presenta los datos específicos utilizados para la proyección, los cuales fueron procesados a través de LEAP, proporcionando un sustento sólido para las conclusiones del estudio.

Tabla 20

Datos generales para la proyección de demanda.

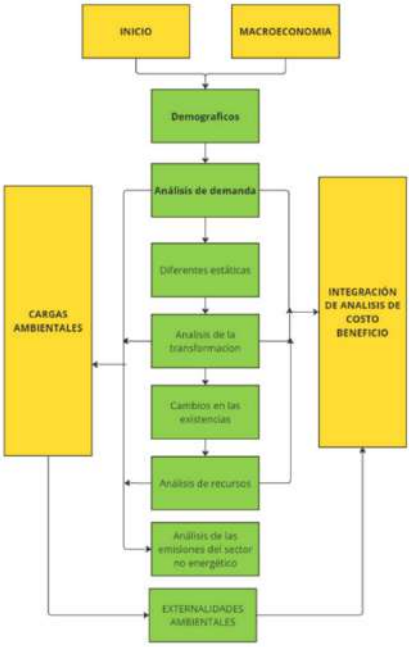
Nombre	Descripción
Producción energética	Producción de energía por tipo planta (Hidroeléctrica, solar, térmica, etc
Demanda	Consumo de energía en diferentes sectores (residencial, industrial, comercial)
Pérdidas eléctricas	Perdidas en el sistema de transmisión y distribución
Datos históricos de centrales	Datos históricos de generación y consumo para el análisis de tendencias.

Manejo de datos en LEAP

Este software se utilizó para modelar el consumo energético en la región de Cotopaxi. En un nivel, los cálculos integrados de LEAP gestionan todos los cálculos de contabilidad de energía, emisiones y análisis costo-beneficio "no controversiales" (Heaps, 2022). La Figura 37 ilustra la estructura de cálculo de LEAP, proporcionando un entorno comprensivo para el simulado

Figura 37.

Estructura de manejo de datos de LEAP.



Metodología de cálculo

Los cálculos de demanda energética en LEAP difieren dependiendo de si está realizando un Análisis de Actividad, un Análisis de Existencias o un Análisis de Transporte (Mirjat et al., 2018). Aquí en esta investigación para el procesamiento y análisis de los datos, se utilizó el software LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning System), el cual permite realizar cálculos detallados de la demanda energética a través de un análisis de actividad final.

Análisis de la demanda final

En este contexto, la demanda de energía se calcula como el producto del nivel de actividad total y la intensidad energética en cada rama tecnológica. La demanda de energía se calcula como el producto entre el nivel total de actividad (TA) y la intensidad energética (EI). La intensidad energética, que es una métrica de eficiencia en el uso de la energía, se deriva directamente del software en función de los datos ingresados, y su cálculo automático asegura la consistencia y precisión en las proyecciones energéticas. La Ecuación 1 se denota por lo siguiente.

$$Db,s,t = TAb,s,t \times EIb,s,t$$ Ecuación 1

Para el año base (t=0), se observa un cambio en la Ecuación 2.

$$Db,0 = TAb,0 \times EIb,0$$ Ecuación 2

La demanda energética para cada rama tecnológica se asocia con un combustible específico. LEAP calcula la demanda total de energía final para cada combustible sumando las demandas de todas las ramas tecnológicas.

El nivel de actividad total de una tecnología se calcula multiplicando los niveles de actividad de todas las ramas desde la tecnología hasta la demanda original, se observa en la Ecuación 3.

$$TAb,s,t = Abs,t' \times Abs,t'' \times Abs,t''' \times \ldots$$ Ecuación 3

Las ramas sin datos y la rama “Demanda” tienen un nivel de actividad de 1. Los valores porcentuales se convierten a fracciones (0-1) para los cálculos.

Energía consumida

La energía consumida se calcula mediante la Ecuación 9

Ecuación 4

$$EC_n = \sum_i \sum_j AL_{n,j,i} x\ EL_{n,j,i}$$

Donde EC es el consumo energético total de un sector dado, y AL es el nivel de actividad, una medida de la actividad social o económica para la cual se consume energía. AL se mide anualmente como una escala de unidades por hogar o toneladas para la industria.

Demanda de energía útil

En las Cuentas Corrientes se especifican las intensidades energéticas finales para la categoría con tipo de rama de intensidad energética agregada, y las cuotas de combustible y eficiencias para cada rama tecnológica a continuación.

Ecuación 5

$$UE_{b,0} = EI_{AG,0} \text{ x } FS_{b,0} \text{ x } EFF_{b,0}$$

Donde b = 1...B

La intensidad útil de la rama de intensidad energética agregada es la suma de las intensidades útiles de cada rama tecnológica, esto es la **Ecuación 9**.

Ecuación 6

$$UE_{AGG,0} = Sum_b = 1.. B_{UEb,0}$$

La cuota de actividad (es decir, la cuota del número de tecnologías, en lugar de la cuota de combustible) es el producto de la cuota de combustible y la eficiencia de cada tecnología b, **Ecuación 9**.

Ecuación 7

$$AS_{b,0} = \frac{UE_{b,0}}{UE_{AGG,0}}$$

Donde AS es la cuota de actividad.

Donde EI_(AG,0) es la intensidad energética final en la rama de intensidad energética agregada, UE es la intensidad energética útil en una rama tecnológica b, FS es su cuota de combustible, EFF es su eficiencia y b es una de las ramas tecnológicas B. Por ejemplo, si se considera una rama de energía agregada con una intensidad final de 100 GJ por actividad y dos tecnologías

con una proporción de combustible del 50% cada una, una tecnología con una eficiencia del 100% (electricidad) y otra con una eficiencia del 70% (gas natural), las intensidades útiles de estas tecnologías serían 50 GJ/actividad y 35 GJ/actividad, respectivamente. Las participaciones en la actividad serían del 59% para la electricidad y del 41% para el gas natural. Este análisis de la demanda de energía útil proporciona una visión más precisa del consumo energético real y la eficiencia de las tecnologías, lo que es fundamental para la planificación energética y la optimización de recursos en el contexto del estudio.

Energía total

La Energía Total corresponde al consumo final de energía en una rama o variable específica. A diferencia de la intensidad energética, los datos de energía total se ingresan directamente, sin depender de la multiplicación entre el nivel de actividad y la intensidad energética. Esta información se desglosa en las ramas tecnológicas más específicas. En este caso, el análisis se aplicó al sector comercial, utilizando datos fiables del Sisdat que reflejan el consumo anual de este sector, a pesar de las limitaciones en la claridad de la información general.

Transformación

Los requerimientos domésticos totales son entonces disminuidos por las salidas del módulo e incrementados por las entradas al módulo (S E I, 2005) esto se refleja en la Ecuación 9.

$$\mathrm{INPUT_P} = \frac{OUTPUT}{EFFICIENCY_P} \qquad \text{Ecuación 8}$$

La Ecuación 9 nos ayuda para la parte de la transmisión y distribución del modelo.

$$\mathrm{EFFICIENCY_P} = 1 - LOSSES_P \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde INPUT es el combustible o materia prima, OUTPUT es la electricidad generada o el producto de la refinería/producción, y EFFICIENCY es la eficiencia de las plantas de energía o de las refinerías.

Escenarios e hipótesis

Los escenarios planteados se basan en los datos del Sisdat (Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables, 2022), que proporcionan estadísticas sobre la capacidad eléctrica de las empresas distribuidoras. Además, se incorporan los servicios energéticos, construyendo así la propuesta de referencia, denominada REF. Cabe destacar que en el escenario de referencia hemos añadido un incremento de acuerdo con el PDYOT de la provincia de Cotopaxi (Guaman & Bravo, 2021). El escenario REF representa la situación base sin intervención de políticas energéticas. No obstante, la diferencia en esta investigación radica en el cálculo de la demanda futura en PetaJoules, considerando tanto las áreas urbanas y rurales como la iluminación utilizada. Esta investigación se enfoca exclusivamente en la demanda futura hasta el año 2050.

En la Figura 38 está la rama de demanda, formada por los hogares de Cotopaxi, las industrias que mayor consumo de energía tienen. Los hogares se dividen en su vez en hogares urbanos y rurales, que representan la situación actual de los hogares de la provincia de Cotopaxi. Los hogares rurales y urbanos se clasificaron en electrificados y no electrificados, según los datos por el INEN.

Figura 38.

Modelo LEAP, ramas y sub ramas.

Resultados

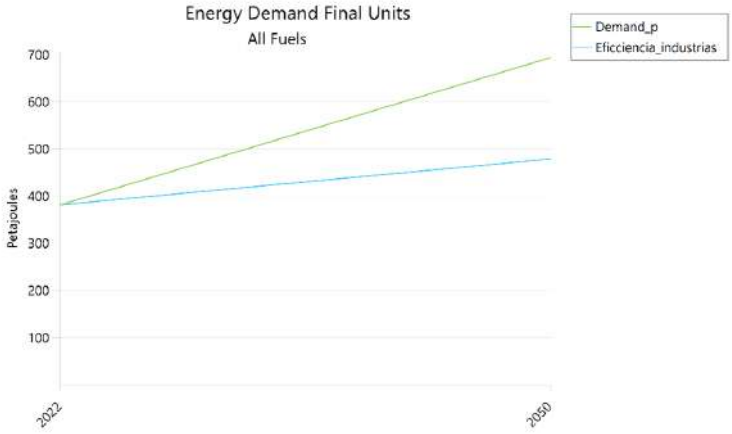
En general, se proyecta que el consumo de energía aumentará de manera constante hasta 2050 en cada escenario, aunque con diferentes tasas de crecimiento. Los valores de consumo total de energía en el modelo LEAP para la provincia de Cotopaxi. Esta figura representa la demanda energética final bajo el escenario "Demand_p" (en verde) y el escenario "Eficiencia_industrias" (en azul). En el escenario " Eficiencia_industrias ", la demanda es significativamente menor en comparación con el escenario de referencia, debido a la integración de sistemas fotovoltaicos en el sector industrial, lo que reduce la carga energética. Esta intervención no solo disminuye la demanda futura, sino que también fomenta un uso más eficiente y sostenible de los recursos energéticos, alineándose con las estrategias de mitigación de emisiones y eficiencia energética.

En el escenario de referencia Demand_p, se proyecta que el consumo energético alcanzará los 693.691 Petajoules (PJ) en 2050, partiendo de 381.842 PJ en 2022, con una tasa de crecimiento anual del 2%. Esta tasa ha sido determinada tras un análisis exhaustivo de estudios previos y proyecciones robustas realizadas en el marco de esta investigación, basadas en datos históricos y tendencias observadas. Por otro lado, en el escenario " Eficiencia_ industrias ", orientado hacia la eficiencia energética en el sector industrial, se proyecta una disminución anual del 2% en la demanda de energía, iniciando también en 381.842 PJ en 2022, pero alcanzando 478.765 PJ en 2050. Esta reducción es atribuida a la implementación de tecnologías y medidas de eficiencia que optimizan el consumo energético. En cuanto al sector comercial, aunque se observa un crecimiento en la demanda, su impacto sigue siendo marginal en comparación con el sector industrial. El consumo en este sector pasa de 0.184 PJ en 2022 a 0.723 PJ en 2050.

Aunque el incremento es notable, no representa un cambio significativo en el panorama general de la demanda energética. Cabe señalar que este estudio se centra en el análisis del sector industrial, comercial y residencial que representan la mayor porción del consumo energético en la provincia. Si bien el sector de transporte también es relevante en la región, ha sido excluido del análisis para mantener el enfoque en la evaluación del impacto y las mejoras en la eficiencia energética industrial. Este enfoque sectorial permite una evaluación más clara y detallada de las oportunidades de optimización en un sector crítico para el desarrollo económico de Cotopaxi.

Figura 39.

Demanda energética final de ambos escenarios.



Ahora nos centramos en el escenario de referencia “Demand_p”. En 2022, el porcentaje de demanda energética en la zona rural era del 76.9%, mientras que en la zona urbana era apenas del 23.1%. Sin embargo, para el año 2050, esta tendencia cambia: la demanda en la zona rural se reduce al 73.2%, mientras que la demanda en la zona urbana aumenta al 26.8%. A pesar de esta variación, el escenario no es muy factible, ya que la demanda energética en la parte rural de Cotopaxi sigue siendo significativamente mayor que en la zona urbana. Al profundizar en el escenario “Demand_p”, observamos las divisiones entre las áreas urbanas y rurales. Estas divisiones incluyen subcategorías de áreas electrificadas, cocinas para el área urbana y cocinas para el área rural. En el caso del área rural, también se consideran las zonas no electrificadas. Los elementos más utilizados por las personas en la provincia de Cotopaxi incluyen: duchas eléctricas, cocinas eléctricas, cocinas a gas, cocinas que utilizan carbón vegetal y cocinas con madera, entre otros.

Figura 40.

Subramas del proceso de LEAP para la provincia de Cotopaxi.

Al analizar los resultados del escenario "Demand_p" para el consumo energético en la provincia de Cotopaxi, se observan varias tendencias significativas que destacan la diferencia en la demanda energética entre las zonas urbanas y rurales. En 2022, la demanda energética total en áreas urbanas es de 0.10941 Petajoules (PJ), mientras que en las áreas rurales es significativamente mayor, alcanzando los 0.36503 PJ. Esta disparidad se mantiene en las proyecciones para 2050, donde las áreas urbanas alcanzan un consumo de 0.30700 PJ, en contraste con los 0.83817 PJ en las áreas rurales. Estas cifras indican un crecimiento continuo en la demanda energética en ambas zonas, aunque la tasa de crecimiento es más pronunciada en las áreas rurales.

El análisis del consumo energético presentado en la tabla siguiente, revela una clara tendencia de crecimiento significativo en todos los sectores para los años 2022 y 2050, medido en petajulios (PJ). En el sector Hogares de Cotopaxi, se observa un incremento notable, con un consumo que pasa de 0.47444 PJ en 2022 a 1.14516 PJ en 2050, proyectando una demanda que prácticamente se triplica. Este crecimiento puede estar vinculado al aumento poblacional, la mejora en la calidad de vida y la mayor electrificación en la región. El área Urbana electrificada, con 0.10940 PJ en 2022 y 0.30699 PJ en

2050, sigue una tendencia similar, reflejando la concentración demográfica y la intensificación de la demanda de servicios eléctricos. De manera destacable, las áreas rurales, particularmente las zonas electrificadas, experimentan un crecimiento significativo, con un aumento de 0.36502 PJ a 0.83186 PJ, lo que evidencia un esfuerzo continuo para llevar electricidad a comunidades previamente desatendidas. El consumo de alumbrado público también sigue esta tendencia al alza, aunque en menor magnitud, pasando de 0.00359 PJ en 2022 a 0.02558 PJ en 2050. En este sector, destaca la adopción de tecnologías más eficientes como las luminarias LED, cuyo consumo crece de 0.00039 PJ a 0.02245 PJ. Esta evolución refleja la transición hacia soluciones de iluminación más eficientes y sostenibles, lo que tendrá un impacto positivo tanto en la reducción del consumo energético como en la disminución de emisiones.

Tabla 21.

Proyección del consumo energético por sectores en Petajulios (PJ) para los años 2022 y 2050.

Branch	2022	2050 Total	
Hogares_Cotopaxi	.47443405114	1.14516727937	1.61960133051
Urbano	.10940770900	.30699881690	.41640652590
Area_electrificada	.10940770900	.30699881690	.41640652590
Rural	.36502634214	.83816846246	1.20319480461
Zona electrificada	.34809671536	.81625376098	1.16435047634
Zona non electrificada	.01692962678	.02191470149	.03884432827
Alumbrado publico	.00359662849	.02558277633	.02917940482
Tecnologia LED	.00039057342	.02245093000	.02284150342
Tecnologia Hg	.00050578085	.00086529593	.00137107678
Tecnologia Na	.00237360507	.00199650169	.00437010676
Otros	.00032666914	.00027004871	.00059671785
Industria	381.17956278674	691.79720686902	1072.97676965575
Cemento_Holcim	75.59438720000	131.61165796609	207.20604516609
Calor de proceso	13.13292320000	22.86473718902	35.99766038902
Fuerza_Motriz	62.46146400000	108.74692077706	171.20838477706
H_Familia	106.28750335700	212.20247100839	318.48997436539
Calor_proceso	.80536495700	1.60790712493	2.41327208193
Fuerza motriz	105.48213840000	210.59456388346	316.07670228346
Aglomerad	.96552000000	2.68200000000	3.64752000000
Calor_Proceso	.79704000000	2.21400000000	3.01104000000
FuerzaMotriz	.16848000000	.46800000000	.63648000000
Novacero	198.33215222974	345.30107789454	543.63323012428
Calor_Proceso	.58980562452	1.02686586923	1.61667149375
Fuerza_motriz	197.74234660522	344.27421202532	542.01655863053
Comercial	.18456915600	.72353492650	.90810408250
Electricity	.18456915600	.72353492650	.90810408250
Total	381.84216262237	693.69149185121	1075.53365447358

El sector industrial es, sin duda, el principal consumidor de energía, con un crecimiento impresionante que pasa de 381.18 PJ en 2022 a 691.79 PJ en 2050. Dentro de este sector, el subsector de Cemento Holcim lidera el consumo con un aumento de 75.59 PJ a 131.61 PJ, subrayando la creciente demanda en el ámbito de la construcción y la infraestructura. El consumo relacionado

con calor de proceso, fundamental en la manufactura y otras industrias intensivas en energía, también muestra un crecimiento notable, de 13.13 PJ a 35.99 PJ, reflejando el papel cada vez más relevante de este tipo de procesos en la industria. En paralelo, la fuerza motriz en las fábricas aumenta de 62.46 PJ a 108.75 PJ, impulsada por la creciente mecanización y automatización en las operaciones industriales.

El subsector H_Familia, que abarca la producción a menor escala, también ve un crecimiento significativo, de 106.28 PJ a 212.20 PJ, reflejando la creciente importancia de las empresas familiares y pequeñas industrias en la economía. Los sectores de Aglomerado y Novacero, dedicados a la producción de materiales y acero, respectivamente, muestran una tendencia similar al alza, con aumentos sostenidos tanto en el uso de calor de proceso como en la fuerza motriz, lo que resalta la expansión de estas industrias en la economía.

Por otro lado, el sector comercial presenta un crecimiento moderado pero continuo, con el consumo subiendo de 0.18457 PJ en 2022 a 0.72354 PJ en 2050. Este aumento, aunque relativamente menor en comparación con la industria, sugiere una expansión en la infraestructura comercial, probablemente vinculada al crecimiento económico y la adopción de tecnologías más intensivas en energía, como sistemas de climatización, iluminación y equipos eléctricos. En términos generales, el consumo total de electricidad aumenta de 381.84 PJ en 2022 a 693.69 PJ en 2050, alcanzando un total acumulado de 1075.53 PJ. Este crecimiento del consumo energético pone de manifiesto la necesidad de una planificación robusta y una gestión eficiente de los recursos energéticos para asegurar la sostenibilidad a largo plazo. La expansión de la electrificación, la evolución de las tecnologías industriales y comerciales, y el desarrollo de infraestructuras eficientes jugarán un papel clave en responder a esta creciente demanda energética.

Consumo de energía por combustible

La tabla 22 que muestra el consumo energético proyectado por tipo de combustible para los años 2022 y 2050 revela una tendencia clara de incremento en el uso de la mayoría de las fuentes de energía, tanto en el ámbito de la demanda como en la industria.

Tabla 22.

Datos obtenidos de combustibles para ambos escenarios desde 2022 hasta 2050.

Combustible	Esc. DEM 2022 [PJ]	Esc. DEM 2022 [PJ]	Esc. DEM 2050 [PJ]	Esc. DEM 2050 [PJ]	Total
Electricidad	366.651807	366.65180765888	665.95488746564	457.33684954737	1856.59535233078
Gas Natural	.22148702581	.22148702581	.59485971747	0.59713601543	1.63496978453
Carbón Bituminoso	13.13292320000	13.13292320000	22.86473718902	18.56609446521	67.69667805423
Madera	1.01158868542	1.01158868542	1.68781916480	0.98302693571	4.69402347135
Carbón	.02731605224	0.02731605224	.37518831428	0.02454135067	0.45436176943
Biomasa	.79704000000	0.79704000000	2.21400000000	1.25749925355	5.06557925355
Total	381.84216262237	381.84216262237	693.69149185121	478.76514756794	1936.14096466388

El consumo de electricidad domina de manera absoluta, con 366.65 PJ tanto en la demanda como en la industria para 2022, y proyectando un aumento considerable a 665.95 PJ y 457.33 PJ, respectivamente, para el 2050. Este crecimiento es un claro reflejo de la electrificación masiva que se espera en todos los sectores, impulsada por la modernización tecnológica, la automatización y el crecimiento económico. En total, la electricidad alcanzará un impresionante consumo acumulado de 1856.59 PJ, consolidándose como la fuente energética más relevante en el futuro próximo. En cuanto al gas natural, aunque su participación es modesta en 2022, con apenas 0.22148 PJ, su consumo casi se triplica para el año 2050, llegando a 0.59485 PJ en la demanda y 0.59713 PJ en la industria. Esto refleja una creciente adopción del gas natural como una opción relativamente limpia frente a los combustibles fósiles tradicionales, aunque su contribución general sigue siendo baja en comparación con otras fuentes energéticas. El uso de carbón bituminoso muestra una tendencia al alza en ambos sectores, con un consumo de 13.13 PJ en 2022, aumentando a 22.86 PJ en la demanda y 18.56 PJ en la industria para el año 2050. Este crecimiento, aunque modesto, sugiere que el carbón aún tendrá un papel importante en ciertos procesos industriales intensivos en energía, aunque su participación general disminuirá en favor de fuentes más limpias. El consumo de madera es limitado, con un incremento marginal de 1.01 PJ a 1.68 PJ en la demanda para 2050, y una reducción a 0.983 PJ en la industria. Esto podría deberse a un cambio hacia fuentes de energía más eficientes y menos contaminantes, ya que la madera es una fuente tradicional con baja eficiencia en términos energéticos.

El carbón vegetal tiene una presencia aún más modesta, con 0.02731 PJ en 2022, incrementando ligeramente a 0.375 PJ para 2050 en la demanda y 0.0245 PJ en la industria, lo que indica que, aunque su uso se mantendrá, no será una fuente significativa en el futuro energético, al menos en términos de consumo masivo. Finalmente, la biomasa, con un consumo inicial de 0.79704 PJ en 2022, experimenta un aumento considerable para el 2050, alcanzando 2.21 PJ en la demanda y 1.25 PJ en la industria. Esto sugiere un creciente interés en la biomasa como una alternativa sostenible, aprovechando residuos agrícolas y otros recursos renovables para generar energía de manera más limpia y eficiente.

Balance energético

El balance energético proyectado para la provincia de Cotopaxi en el año 2050, bajo un escenario de eficiencia energética en las industrias, refleja una producción total de 2.416,7 PJ, en la que predominan las fuentes renovables con 2.414,1 PJ, complementadas por una menor producción de biomasa (2,2 PJ) y energía hidroeléctrica (0,4 PJ). Este énfasis en las energías renovables indica una fuerte apuesta por la sostenibilidad en la matriz energética de la provincia, minimizando así la dependencia de combustibles fósiles. A pesar de esta alta producción interna de energía renovable, Cotopaxi necesitará realizar importaciones de 19,2 PJ, con combustibles sólidos (18,6 PJ) y gas natural (0,6 PJ) como principales componentes. Este requerimiento importador sugiere una pequeña pero importante dependencia de fuentes energéticas externas, especialmente para sectores industriales que requieren estos insumos para su operación. No se proyectan exportaciones de energía, lo que evidencia un enfoque en satisfacer la demanda local que se puede observar a continuación.

Tabla 23.

Balance energético obtenido a través de LEAP.

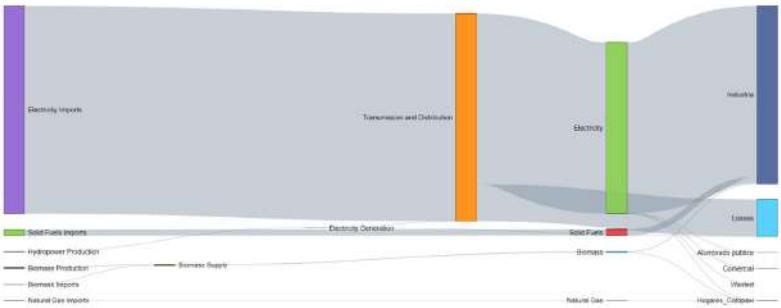
	Solid Fuels	Natural Gas	Hydropower	Renewables	Biomass	Electricity	Total
Production	-	-	0,4	2.414,1	2,2	-	2.416,7
Imports	18,6	0,6	-	-	0,0	-	19,2
Exports	-	-	-	-	-	-	-
Total Primary Supply	18,6	0,6	0,4	2.414,1	2,3	-	2.435,9
Electricity Generation	-	-	-0,4	-2.414,1	-	555,6	-1.858,9
Transmission and Distribution	-	-	-	-	-	-98,3	-98,3
Total Transformation	-	-	-0,4	-2.414,1	-	457,3	-1.957,2
Hogares_Cotopaxi	-	0,6	-	-	0,2	0,1	0,9
Alumbrado publico	-	-	-	-	-	0,0	0,0
Industria	18,6	-	-	-	2,1	457,0	477,7
Comercial	-	-	-	-	-	0,2	0,2
Total Demand	18,6	0,6	-	-	2,3	457,3	478,8
Unmet Requirements	-	-	-	-	-	-	-

El suministro primario total asciende a 2.435,9 PJ, compuesto principalmente por la energía renovable producida localmente y las importaciones mencionadas. A nivel de generación eléctrica, se observa una significativa transformación de energía renovable en electricidad, lo que da lugar a un valor neto de -1.858,9 PJ, reflejando una generación eléctrica que supera las necesidades internas y, por lo tanto, produce un balance negativo al considerar el total de transformación y pérdidas del sistema. En términos de transformación energética, el balance muestra una conversión neta negativa de -1.957,2 PJ, destacando las pérdidas asociadas al proceso de conversión de fuentes primarias a electricidad y la distribución de la misma, que es común en sistemas energéticos con alta penetración de renovables. El consumo final total de energía en Cotopaxi para 2050 se estima en 478,8 PJ, de los cuales el sector industrial es, con diferencia, el mayor consumidor, con 477,7 PJ destinados principalmente a procesos productivos y operaciones de manufactura. Esto resalta la importancia de la industria en la demanda energética de la provincia, que ha visto un crecimiento significativo en este sector. Por otro lado, el consumo en hogares es bastante bajo, con solo 0,9 PJ, reflejando una eficiencia energética elevada en los usos residenciales, mientras que el comercio consume una cantidad marginal de 0,2 PJ. Es importante notar que el alumbrado público no representa un consumo significativo, lo que sugiere que se han implementado tecnologías de iluminación altamente eficientes o que su demanda está ya cubierta por otras fuentes o métodos de optimización.

Proyecciones de modelo Sankey

Figura 41.

Diagrama de Sankey para el escenario Deman_p con su base 2022.



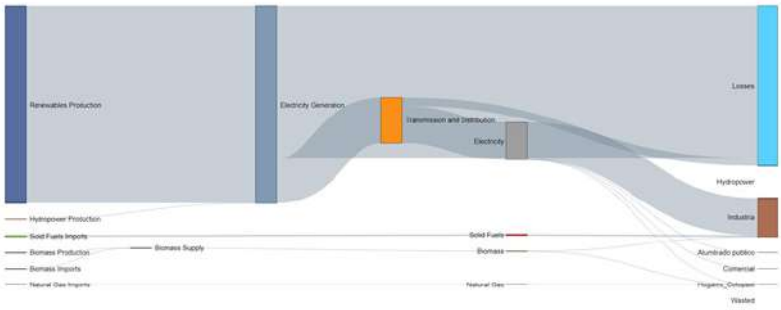
El acelerado crecimiento de la población, la urbanización y la mejora de los estándares de vida en Cotopaxi prevén un significativo aumento en el

consumo de energía en los sectores doméstico e industrial en el futuro. Este incremento impactará directamente el consumo total de energía y el sistema energético desde 2010, como se ilustra en la figura 7, y se proyecta en un escenario adicional en la figura 8. Los diagramas de Sankey detallan los flujos de energía desde la generación hasta el consumo final, cubriendo transmisión y distribución. En la Figura 7 del escenario de referencia "Demand_p", las importaciones de electricidad hacia transmisión y distribución son de 445.1 PJ. De estos, 366.5 PJ se convierten en electricidad, con 366.4 PJ destinados a las industrias, aunque 78.8 PJ se pierden en el proceso. Las importaciones de combustibles sólidos a la industria alcanzan 13.1 PJ, sin cambios en su valor inicial, lo que sugiere un uso eficiente pero limitado de estos combustibles.

En la Figura 42, que representa un escenario alternativo en el diagrama de Sankey, se destaca la incorporación de la producción de energía renovable, que aporta 3512.3 PJ a la generación eléctrica. En este escenario, las pérdidas desde la generación son de 2.847 PJ. Desde la generación hacia la transmisión y distribución, se transfieren 808.2 PJ, y la electricidad destinada a la industria y se reduce a 665.1 PJ.

Figura 42.

Escenario alternativo donde se encuentra los incrementos a la generación eléctrica y las perdidas.



Discusión

La proyección del consumo energético en la provincia de Cotopaxi hasta el año 2050, presentada en este estudio, ofrece una visión integral de los desafíos y oportunidades que enfrenta la región en términos de sostenibilidad y eficiencia energética. Este estudio exploratorio intenta proporcionar una descripción juiciosa de un posible estado futuro de la situación de la oferta y demanda de electricidad en Cotopaxi (El-Sayed et al., 2023). El análisis detallado de los escenarios de referencia y eficiencia energética, junto con la diferenciación entre áreas urbanas y rurales, proporciona una base sólida para la formulación de políticas energéticas informadas y efectivas.

El escenario de referencia Demand_p, indica un incremento significativo en el consumo energético, alcanzando los 693.6914 PJ en 2050, partiendo de 381.842 PJ en 2022, con una tasa de crecimiento anual del 2%. El análisis diferenciado entre áreas urbanas y rurales destaca importantes disparidades en la demanda energética, reflejando las características socioeconómicas de la provincia, predominantemente agrícola. La economía rural, basada en actividades agrícolas e industrias derivadas, tiende a requerir un consumo energético elevado debido a la necesidad de maquinaria, procesamiento de productos agrícolas y otras actividades intensivas en energía. Esta demanda creciente en áreas rurales contrasta con el menor crecimiento en áreas urbanas, donde la infraestructura energética está más desarrollada y las políticas de eficiencia energética pueden ser implementadas con mayor eficacia. Este escenario, fundamentado en datos históricos y tendencias actuales, subraya la necesidad imperativa de una planificación energética robusta para evitar sobrecargas y asegurar la estabilidad del sistema energético. La tasa de crecimiento proyectada, aunque precisa según los estudios revisados, plantea importantes retos en términos de infraestructura y recursos.

La demanda energética alcanzará su pico antes de 2050 en todos los escenarios para el caso de Wang (2020), para nuestro caso se alcanzó en el primer escenario ya que en el segundo se implementa una eficiencia energética. Emodi et al. (2017), nos habla de que para complementar esto, se deben introducir cocinas de GLP y solares en la mezcla de energía rural y urbana. Por otro lado, el escenario de eficiencia energética revela el impacto transformador de las políticas de eficiencia en la reducción del consumo. Aquí, se proyecta una disminución del consumo energético a una tasa del 2% anual, alcanzando 478.76 PJ en 2050 desde 381.842 PJ en 2022.

Este escenario demuestra que la implementación de medidas de eficiencia energética en las industrias puede tener un efecto significativo en la sostenibilidad del sistema energético, reduciendo no solo el consumo total sino también las emisiones asociadas y los costos operativos. La distinción entre las demandas energéticas urbanas y rurales en el escenario "Demand_p" destaca diferencias cruciales. En 2022, la demanda en áreas rurales era significativamente mayor (76.9%) en comparación con las áreas urbanas (23.1%). Aunque se anticipa un ligero cambio para 2050, con un aumento en la demanda urbana al 26.8% y una reducción en la rural al 73.2%, la disparidad sigue siendo notable. Estos hallazgos sugieren la necesidad de mejorar la infraestructura y el acceso a la electricidad en las áreas rurales, no solo para equilibrar la demanda sino también para promover un desarrollo económico y social más equitativo. El análisis del consumo energético por fuente revela una creciente dependencia de la electricidad, que representa la mayor parte del consumo energético en ambos escenarios.

Conclusiones

El estudio realizado con el modelo LEAP ha permitido una proyección precisa y detallada de la demanda energética en la provincia de Cotopaxi, evidenciando un aumento significativo en el consumo energético desde 381.842 PJ en 2022 hasta 693.691 PJ en 2050, con una tasa de crecimiento anual del 2%. Este crecimiento está impulsado en gran medida por el sector industrial, que se espera sea el principal consumidor de energía, con un incremento proyectado de 381.18 PJ en 2022 a 691.79 PJ en 2050, destacando la relevancia de subsectores como el de cemento, que duplicará su consumo. Sin embargo, la particularidad de Cotopaxi radica en que la mayor parte de la demanda energética proviene de las áreas rurales, que representan el 76.9% del consumo en 2022, proyectándose una ligera reducción al 73.2% en 2050. Este predominio rural refleja la naturaleza agrícola de la provincia, donde la electrificación de las actividades productivas es crucial para el desarrollo económico.

El análisis de subramas tecnológicas muestra que la demanda en áreas rurales electrificadas pasará de 0.365 PJ en 2022 a 0.838 PJ en 2050, un crecimiento que exige una infraestructura energética robusta y eficiente para evitar sobrecargas en el sistema. En contraste, el área urbana, que consumía el 23.1% de la energía en 2022, incrementará su participación al 26.8% en 2050, debido a la modernización tecnológica y el crecimiento poblacional. Además, el consumo energético relacionado con el alumbrado público y la fuerza motriz en fábricas aumentará significativamente, impulsado por la automatización y

el uso de tecnologías más eficientes. En el escenario de eficiencia energética, la implementación de tecnologías sostenibles, como sistemas fotovoltaicos y mejoras en la eficiencia industrial, permitirá una reducción anual del 2% en la demanda energética, alcanzando 478.765 PJ en 2050.

Esto resalta la importancia de adoptar políticas públicas que incentiven el uso de fuentes renovables y la eficiencia energética, especialmente en las áreas rurales, donde el uso de la biomasa y tecnologías de baja emisión pueden reducir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad. La proyección de la demanda en Cotopaxi evidencia la necesidad de una planificación energética integral que considere la predominancia rural, la modernización de infraestructuras y la implementación de políticas de eficiencia energética. Estos factores serán claves para garantizar un suministro energético adecuado que apoye el desarrollo económico de la provincia y minimice los impactos ambientales, asegurando así un futuro sostenible.

Referencias Bibliográficas

Agencia de regulación y control de energía y recursos no renovables. (2022). *SISDATBI*. https://sisdatbi.controlrecursosyenergia.gob.ec/index.php

Benito, A. O., & Arena, A. P. (2020). Distribuidos de Energía Eléctrica en Sistemas Energéticos Regionales: análisis con el modelo LEAP. *AJEA*, *5*. https://doi.org/10.33414/ajea.5.696.2020

Cai, L., Guo, J., & Zhu, L. (2013). China's Future Power Structure Analysis Based on LEAP. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *35*(22), 2113–2122. https://doi.org/10.1080/15567036.2013.764361

David, I., Tamayo, H., Msc, S., Tania, A., & Aguayo, A. M. (n.d.). *Challenging inequalities: a socio-cultural analysis of Cotopaxi province*. https://doi.org/10.24133/recihys.v2i1.3487

Edgar M. Zapata, & Alvaro S. Mullo Q. (n.d.). *PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE LOS RECURSOSENERGÉTICOS DE UNA MICRO-GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN EL CANTÓN PUCAYACU COMO RED ELÉCTRICA ALTERNA*. Retrieved July 11, 2024, from https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/675/941

Fontalvo, J., Ramírez, P., & Constante, J. (2018). Prospectiva de Autogeneración en el Ecuador mediante uso de Modelo LEAP. *Revista Técnica "Energía," 15*(1). https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v15.n1.2018.323

Guaman, J., & Bravo, S. (2021). *PDYOT COTOPAXI*. https://www.cotopaxi.gob.ec/images/Documentos/2021/PDYOT/PDYOT%20COTOPAXI%202021%20-%202025

Heaps, C. G. (2022). *LEAP: The Low Emissions Analysis Platform.* Stockholm Environment Institute.

Jha, S. K., & Puppala, H. (2017). Prospects of renewable energy sources in India: Prioritization of alternative sources in terms of Energy Index. *Energy*, *127*, 116–127. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.110

Labein Tecnalia. (2007). *Guía básica de la generación distribuida*.

Meza Segura, J. N., & Luyo-Kuong, J. (2020). Metodología de Pronóstico de la Demanda Residencial para el Planeamiento Energético de Largo Plazo en el Perú. *TECNIA*, *30*(2), 33–45. https://doi.org/10.21754/tecnia.v30i2.862

Mirjat, N. H., Uqaili, M. A., Harijan, K., Walasai, G. Das, Mondal, M. A. H., & Sahin, H. (2018). Long-term electricity demand forecast and supply side scenarios for Pakistan (2015–2050): A LEAP model application for policy analysis. ***Energy***, ***165***, 512–526. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.10.012

Pazmiño Ordóñez, I., Pico Mera, H., & Abril Chafla, A. (2019). Metodología para proyección de la demanda eléctrica en zonas con un desarrollo cercano a la saturación demográfica. ***Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721***, ***4***(1), 52. https://doi.org/10.33936/riemat.v4i1.1946

S E I. (2005). ***Long-range Energy Alternatives Planning System User Guide for LEAP 2005***. http://forums.seib.org/leap

Salazar, G., & Panchi, B. (2014). Análisis de la Evolución de la Demanda Eléctrica en el Ecuador Considerando el Ingreso de Proyectos de Eficiencia Energética. ***Revista EPN***, ***33***.

Sepulveda, A., Zeghal, M., Kutter, B. L., Manzari, M. T., Abdoun, T., Escoffier, S., Haigh, S. K., Hung, W.-Y., Korre, E., Madabhushi, G. S. P., Manandhar, S., Okamura, M., Tobita, T., Ueda, K., & Zhou, Y.-G. (2024). Correlation of CPT measurements and relative density of LEAP-2017 and LEAP-2020 centrifuge models. ***Soil Dynamics and Earthquake Engineering***, ***181***, 108639. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108639

Sreekanth, K. J. (2016). Review on integrated strategies for energy policy planning and evaluation of GHG mitigation alternatives. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, ***64***, 837–850. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.086

Conclusión

Los estudios presentados ofrecen una visión integral de los desafíos y oportunidades en la gestión de la energía eléctrica, desde la planificación a largo plazo de la demanda hasta la optimización de sistemas de distribución a nivel local. Se evidencia la importancia de aplicar herramientas de optimización matemática y simulación para mejorar la eficiencia, la confiabilidad y la sostenibilidad de los sistemas energéticos.

En cuanto a la proyección de la demanda eléctrica, los resultados obtenidos resaltan la necesidad de una planificación energética a largo plazo que considere las particularidades de cada región y los factores que influyen en el crecimiento de la demanda. La implementación de políticas de eficiencia energética y la promoción de fuentes de energía renovable son fundamentales para garantizar un suministro energético sostenible.

Por otro lado, los estudios sobre optimización de sistemas de distribución demuestran la eficacia de los algoritmos metaheurísticos y las técnicas de programación matemática para minimizar pérdidas, mejorar la estabilidad del sistema y facilitar la integración de fuentes de energía renovable. La aplicación de estas técnicas permite una planificación más eficiente de las redes eléctricas, reduciendo costos y mejorando la calidad del servicio.

En el ámbito de la agricultura, la automatización de invernaderos y la aplicación de técnicas de control avanzadas permiten optimizar la producción y reducir costos. Los sistemas de control basados en lógica difusa y redes neuronales demuestran ser herramientas efectivas para garantizar las condiciones óptimas de cultivo.

En resumen, los estudios presentados en esta compilación contribuyen al avance del conocimiento en el campo de la gestión energética y ofrecen una serie de recomendaciones para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas eléctricos. La aplicación de tecnologías avanzadas, la optimización de los recursos energéticos y la planificación a largo plazo son claves para enfrentar los desafíos actuales y futuros en el sector energético.

El furor de la energía
desafíos y soluciones

Publicado en Ecuador
Diciembre 2024

Edición realizada desde el mes de Octubre del 2024 hasta Diciembre del año 2024, en los talleres Editoriales de MAWIL publicaciones impresas y digitales de la ciudad de Quito.

Quito – Ecuador

Tiraje 30, Ejemplares, A5, 4 colores; Offset MBO
Tipografía: Helvetica LT Std; Bebas Neue; Times New Roman.
Portada: Collage de figuras representadas y citadas en el libro.