

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14edespoc0234>

ASIGNACIÓN EFICIENTE DE UNIDADES DE GENERACIÓN EN REGIONES MÚLTIPLES APLICANDO OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO

EFFICIENT ALLOCATION OF GENERATION UNITS IN MULTIPLE REGIONS BY APPLYING MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

Tonato-Paucar Diana Gabriela ¹; Quinatoa-Caiza Carlos Iván ²;
Changoluisa-Criollo Luis Hernán ³;

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: diana.tonato0151@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6106-7755>

² Universidad Técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.

Correo: carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6369-7480>

³ Universidad Técnica de Cotopaxi. Sangolqui, Ecuador.

Correo: luis.changoluisa0557@utc.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8788-8867>

Resumen

El proceso de planificación económica para la generación de energía eléctrica, que se conoce como despacho económico, ha sido objeto de estudio y gestión a lo largo de la historia mediante diversas metodologías fundamentadas en modelos matemáticos, con el fin de reducir al mínimo los costos operativos totales del sistema energético, y garantizar que se satisfaga el consumo de la demanda de energía. Al presente, los sistemas de potencia han evolucionado para integrar una variedad de generadores tanto provenientes de fuentes de energía convencionales, como renovables, lo que no solo permite una generación de energía más efectiva, desempeña además un papel crucial en la reducción de emisiones contaminantes, que actualmente es un enfoque mundial. En este contexto este artículo presenta un modelo multiobjetivo de optimización para el problema de despacho, aplicable al abastecimiento de la demanda en diversas zonas y con la capacidad de integrar dos funciones objetivo siendo los costos y emisiones. La optimización resultante logra una reducción significativa del 27% en las emisiones de CO₂, lo que equivale a una disminución de 93.06 toneladas de CO₂ y un ahorro anual en los costos operativos de aproximadamente de 308 millones de dólares. El modelo sugerido, estructurado como un problema de programación no lineal, ha sido abordado mediante el uso de un software de alto nivel para el modelado matemático denominado GAMS, garantizando el cumplimiento de las restricciones técnicas y la optimización de las dos funciones objetivo establecidas.

Palabras clave: Despacho económico, fuentes de energía renovables, GEI, generación de energía, interconexión de redes eléctricas, optimización multiobjetivo.

Abstract

The economic planning process for the generation of electric power, known as economic dispatch, has been studied and managed throughout history using various methodologies based on mathematical models, in order to minimize the total operating costs of the energy system and ensure that the consumption of energy demand is met. At present, power systems have evolved to integrate a variety of generators from both conventional and renewable energy sources, which not only allows for more effective energy generation, but also plays a crucial role in reducing polluting emissions, which is currently a global focus. In this context, this article presents a multi-objective optimization model for the dispatch problem, applicable to supplying demand in various areas and with the ability to integrate two objective functions, namely costs and emissions. The resulting optimization achieves a significant reduction of 27% in CO₂ emissions, which is equivalent to a decrease of 93.06 tons of CO₂ and an annual saving in operating costs of approximately 308 million dollars. The suggested model, structured as a non-linear programming

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 15 de julio de 2024.

Fecha de aceptación: 05 de septiembre de 2024.

Fecha de publicación: 07 de octubre de 2024.



problem, has been addressed by using a high-level software for mathematical modeling called GAMS, ensuring compliance with the technical restrictions and the optimization of the two established objective functions..

Keywords: Economic dispatch, renewable energy sources, GHG, power generation, power grid interconnection, multi-objective optimization.

1. Introducción

A medida que la energía eléctrica se consolida como un factor clave para el progreso social, se han implementado diversas estrategias de generación, destacando la generación térmica a pesar de su impacto ambiental negativo predomina en el despacho en ciertas zonas geográficas [1]. Para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociados a este tipo de generación, se ha impulsado la búsqueda de alternativas más rentables destacándose el uso de energías renovables, lo que podría reducir la dependencia de tecnologías costosas y mejorar la eficiencia del sistema eléctrico [2],

Las fuentes generadoras de energía de carácter renovable son una alternativa relevante en la generación eléctrica debido a sus bajas emisiones y costos de producción bajos. Las variables e impredecibles características de

estas energías no convencionales, como el viento y la irradiación solar, complican la planificación y operación del sistema eléctrico [3]. Es crucial implementar estrategias de despacho energético que aborden esta variabilidad para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico.

El complejo problema de despacho pretende satisfacer la demanda en una región específica, pero en la práctica, los sistemas eléctricos están interconectados, lo que significa que en la búsqueda de una operación económicamente óptima debe considerar no solo la zona en cuestión, sino también la coordinación con las áreas adyacentes y los factores técnicos y económicos que estas conexiones implican. Esto significa que es fundamental tener en cuenta varios factores, como el flujo de potencia que se produce entre las distintas áreas, las pérdidas de energía que pueden ocurrir durante la

transmisión, así como la necesidad de optimizar de manera eficaz el uso de los recursos energéticos que están disponibles en cada una de estas zonas [4], [5].

El despacho económico multizona (DEM) representa un campo emergente de investigación en comparación con el despacho económico de unizona (DEU), el cual ha sido ampliamente estudiado. La creciente interconexión entre sistemas eléctricos de diferentes regiones, impulsada por la necesidad de optimizar recursos y reservas, ha puesto de relieve la importancia de desarrollar modelos que aborden los desafíos únicos del DEM. Estos modelos no solo deben considerar las restricciones técnicas y económicas inherentes a los sistemas eléctricos individuales, como lo hace el DEU, sino también adaptarse a las particularidades de los enlaces entre áreas, incluyendo las limitaciones de capacidad de transmisión, las pérdidas de energía en las líneas y la estabilidad del flujo de potencia. Además, el despacho multizona requiere tener en cuenta la variabilidad temporal de las cargas y los diferentes tipos de generación en cada área, tanto convencionales y no

convencionales, lo que añade complejidad a la operación y planificación [6], [7]. A nivel global, los mercados eléctricos buscan crear conexiones más eficientes entre sus redes para lograr un equilibrio óptimo entre la demanda y la generación, impulsando la cooperación internacional mediante tratados y convenios, favoreciendo el desarrollo de procedimientos avanzados de despacho y operación de sistemas interconectados [8].

En despachos multizona la integración de energías renovables no convencionales es clave, ya que su intermitencia genera incertidumbre en la planificación y operación eléctrica. La incertidumbre aumenta por las diferencias geográficas y ambientales que afectan la disponibilidad y eficiencia de las energías renovables, como solar y eólica. Es crucial crear modelos de despacho óptimos que reduzcan costos, mantengan la estabilidad operativa y gestionen la variabilidad de las energías renovables con reservas, almacenamiento y planificación efectiva. Además, los modelos deben ajustarse a las características técnicas de cada zona, incluyendo

capacidades de transmisión, pérdidas de energía y fluctuaciones de demanda, para asegurar una operación eficiente y confiable del sistema interconectado [9].

Los enfoques elaborados para tratar con estos complejos problemas de asignación y planificación pueden clasificarse como heurísticos o deterministas; sin embargo, en numerosas ocasiones, se emplea una combinación de ambos, dada la complejidad inherente y la variedad de características y variables que presenta el sistema y sus distintas implicaciones. Dado que el actual estudio centra su modelo en la asignación eficiente de unidades de generación en sistemas eléctricos multizona, con énfasis en la minimización de costos operativos y la reducción de emisiones de gases contaminantes, y se contempla la integración de diversas fuentes de energía y la gestión efectiva de las interconexiones y transferencias de energía entre las distintas regiones, tiene un enfoque determinista multiobjetivo que emplea programación lineal, ampliamente reconocida en la literatura [10], [11]. Este enfoque se combina con un método híbrido basado en lógica

difusa, complementado por el método de restricción ϵ , lo que permite la formulación y validación de un modelo de optimización multiobjetivo. Es pertinente señalar que este enfoque fue implementado por primera vez en la resolución de problemas multiobjetivo a gran escala, los cuales exhibían numerosas lagunas e imprecisiones. En este contexto, [12] sugirió que el tomador de decisiones podría poseer objetivos difusos para cada una de sus funciones objetivo. En líneas generales, se establece un objetivo como la función principal y los demás se convierten en restricciones con el fin de obtener el frente de Pareto, lo que transforma el problema de múltiples objetivos en uno de objetivo único [13], [14].

Por lo tanto, para cumplir con los objetivos económicos y ambientales planteados en este estudio, el modelo debe ser capaz de minimizar los costos operativos y las emisiones. Para ello, el modelo propuesto será aplicado a un sistema de prueba con múltiples regiones para evaluar su desempeño y validar su efectividad. Este estudio de caso permitirá identificar las ventajas y desventajas de diferentes

estrategias de asignación y optimización en un contexto realista. Además, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad para entender cómo las variaciones en los parámetros de entrada, como los costos de combustible y los patrones de demanda, afectan las soluciones obtenidas.

Finalmente, esta investigación no solo contribuirá al campo de la ingeniería eléctrica y la optimización, sino que también proporcionará información valiosa para los formuladores de políticas y operadores del sistema eléctrico. Los resultados pueden ayudar a desarrollar estrategias que promuevan un uso más eficiente y sostenible de los recursos energéticos, mejoren la confiabilidad del suministro eléctrico y reduzcan las emisiones de gases contaminantes, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y protección del medio ambiente.

2. Materiales y métodos

Gestión de sistema energético

La planificación eficiente de la operación y la garantía del suministro adecuado de la demanda

son componentes esenciales en la gestión de la energía eléctrica, ya que forman parte del despacho económico. Estas prácticas permiten optimizar los recursos disponibles y asegurar tanto la estabilidad como la sostenibilidad del sistema eléctrico [15], [16].

La planificación de un sistema eléctrico es un proceso multidisciplinario. Estas disciplinas son clave para una planificación óptima, abarcando ingeniería eléctrica, aspectos matemáticos, económicos y telecomunicaciones. Hoy en día, son clave para el monitoreo y control automatizado de sistemas eléctricos. Estas disciplinas garantizan la producción, transporte y entrega segura y económica de energía [17].

La planificación se fundamenta en la demanda. El sistema de potencia debe adaptarse constantemente al creciente consumo para seguir siendo eficiente. La planificación busca asegurar un suministro energético que mitigue riesgos de demanda, capacidad de transmisión, ubicación geográfica y gestión de recursos, además de anticipar riesgos económicos en el sistema

[18], [19]. El análisis del sistema eléctrico es complejo, lo que requiere que los operadores usen programas y equipos para facilitar decisiones en el proceso. El operador debe crear un sistema flexible que garantice confiabilidad y seguridad ante fallas internas y externas. La planificación del sistema de potencia requiere investigación constante para optimizar el funcionamiento de sus unidades. Estos modelos de optimización consideran condiciones y restricciones para un comportamiento realista [20].

La planificación se organiza en etapas según el horizonte temporal: corto, medio y largo plazo. Es necesario analizar la proyección a corto plazo para observar el intercambio de energía a nivel horario.

A. Operación energética de corto plazo

La planificación de la operación en los sistemas eléctricos tiene una distinción entre corto, mediano y largo plazo. Cada una de estas categorías tiene características y objetivos específicos que, en conjunto, proporcionan una visión integral de la gestión operativa del sistema eléctrico. La planificación a

corto plazo, que abarca desde unas pocas horas hasta un máximo de un año, es particularmente esencial en la optimización de la operación diaria, considerando factores como la respuesta a fallas en las unidades de generación, el despacho económico de energía, el flujo de potencia en la red y la interacción con el mercado diario de electricidad. Esta fase de planificación se enfoca en maximizar la eficiencia operativa, tomando decisiones que permiten la utilización óptima de los recursos disponibles, tanto renovables como no renovables [21], [22].

A diferencia de la planificación a largo plazo, que está orientada a la inversión en infraestructuras y tecnologías futuras, la planificación a corto plazo busca principalmente la optimización de los costos operativos en el contexto actual. Esta planificación debe considerar detalladamente las restricciones del sistema, como la disponibilidad de energía, el estado operativo de las plantas generadoras, la capacidad de transmisión y las condiciones del mercado. Además, la integración de fuentes de energía renovables, con sus variabilidades inherentes, requiere una atención especial en la

evaluación de la capacidad de respuesta del sistema [23]. Para ello, es fundamental que exista una retroalimentación constante entre la operación y la planificación, permitiendo ajustes en tiempo real que garanticen la estabilidad de la red y la minimización de los costos operativos. Así, la planificación a corto plazo asegura una operación eficiente y confiable, alineada con los objetivos económicos y ambientales del sistema eléctrico [24].

B. Despacho Energético Óptimo

El despacho económico busca satisfacer la demanda de energía al coste más bajo, coordinando las unidades generadoras para asegurar un suministro confiable [25]. Es crucial reducir los costos operativos respetando las condiciones del sistema eléctrico y las restricciones de la red. El despacho económico se modela mediante programación lineal y optimización, estableciendo políticas operativas para la gestión de unidades generadoras según costo y disponibilidad. El despacho energético óptimo es clave para la planificación y operación eléctrica,

asegurando la eficiencia económica en la producción y distribución de energía [26].

Un desafío clave en el despacho económico es gestionar las restricciones de cada unidad generadora, incluyendo costos, eficiencia de las energías renovables, pérdidas en transmisión y capacidad de las líneas. Es crucial aprovechar los recursos y ventajas geográficas de cada planta para optimizar el despacho. La coordinación debe extenderse más allá de los límites internos de una región y abarcar también las interacciones entre unidades situadas en diversas áreas geográficas, lo cual resulta particularmente significativo en el contexto de sistemas eléctricos interconectados que operan a lo largo de múltiples regiones o incluso a nivel internacional. Esta coordinación resulta fundamental para gestionar situaciones de escasez o sobreproducción de energía, optimizando las transacciones internacionales y fomentando un mercado eléctrico más dinámico y eficiente a través de técnicas de coproducción y conexión interregional [27], [28].

Dicho análisis del proceso de despacho de las centrales eléctricas implica que no solo se deben tomar en cuenta los diversos aspectos económicos, tales como la optimización y la reducción de costos operativos, sino que también es fundamental considerar las limitaciones técnicas y las condicionantes que el sistema en su conjunto impone [29]. Además de la tarea de buscar la combinación más efectiva y eficiente de diferentes unidades de generación de energía para poder satisfacer las crecientes demandas de energía de la población, es fundamental que un despacho óptimo también incluya la integración de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como uno de sus objetivos más importantes, considerando seriamente su significativo impacto negativo en el medio ambiente [30].

C. Despacho Energético Multizona

El despacho económico multizona representa una evolución importante respecto al despacho económico de simple, adaptándose a las necesidades del crecimiento de la demanda energética. Este

incremento en la demanda conlleva no solo la expansión del número de unidades de generación, sino también la expansión geográfica para satisfacer las demandas sociales e industriales de diferentes regiones. Como resultado, se generan variaciones en la operación tanto dentro de los sistemas eléctricos locales como entre ellos. Este contexto requiere el desarrollo de modelos avanzados de despacho multizona que prioricen no solo el intercambio eficiente de energía entre áreas, sino también la minimización de los costos operativos. Dichos modelos deben tener en cuenta las restricciones particulares de cada sistema y sus interconexiones, que incluyen factores técnicos y económicos específicos de cada región, como la disponibilidad de recursos renovables y la capacidad de las líneas de transmisión [31].

La operación económica entre múltiples zonas depende en gran medida de las condiciones operativas de cada región, tales como el uso de tecnologías renovables, los costos asociados a la generación térmica y la capacidad de las líneas de transmisión

interconectadas. Para garantizar una colaboración efectiva entre operadores y una gestión adecuada de los intercambios de energía, es esencial mantener una comunicación continua y un acceso transparente a la información técnica de cada área [32]. La planificación a corto plazo en un contexto multizona tiene como objetivo principal suavizar la curva de generación, minimizando las fluctuaciones en la producción energética, reduciendo los costos de arranque y regulación de unidades térmicas. Este enfoque no solo facilita la programación de la generación, sino que también optimiza los recursos para manejar la incertidumbre derivada de la demanda variable y la integración de energías renovables [33]. Además, el establecimiento de eventos de conexión casi óptimos entre áreas mejora la eficiencia de la transmisión y fortalece la resiliencia del sistema frente a la incertidumbre. Por lo tanto, el despacho económico multizona debe integrar no solo factores técnicos y económicos, sino también aspectos ambientales, sociales y regulatorios para asegurar una operación equilibrada y

sostenible de los sistemas eléctricos interconectados [34].

D. Optimización multiobjetivo del despacho: económico y ambiental integrado

Los modelos de optimización multiobjetivo se han diseñado principalmente para el balance financiero, la teoría de juegos y matemática avanzada. Los enfoques más comunes en este tipo de optimización incluyen la optimización vectorial y la escalarización, y dentro de estos enfoques, se han desarrollado métodos que se centran en la construcción del frente de Pareto, un concepto clave en la optimización multiobjetivo. Sin embargo, en el contexto del despacho económico y la optimización en sistemas eléctricos, este artículo adopta el método de satisfacción difusa, que ofrece una solución adecuada a problemas que involucran incertidumbres y criterios difusos. Este enfoque permite una gestión más flexible y adaptable, clave para sistemas complejos como los de generación de energía [35].

En la actualidad, se han desarrollado diversos modelos de optimización aplicados a varios campos de la

ingeniería, incluida la ingeniería eléctrica. En particular, se han implementado modelos que combinan la optimización económica con objetivos específicos del sector eléctrico, como la mejora de la eficiencia en la generación y distribución de energía. Estos modelos han demostrado ser altamente efectivos en la reducción de costos operativos y en la optimización de la utilización de recursos, lo cual es esencial en un sector donde la demanda es creciente y las restricciones ambientales son cada vez más estrictas [36]. Sin embargo, los modelos tradicionales de optimización se han centrado principalmente en la minimización de costos, dejando de lado otros aspectos importantes como la sostenibilidad ambiental y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que ha impulsado la transición hacia el concepto de despacho económico multiobjetivo [37].

El concepto de despacho económico multiobjetivo surge como una respuesta a la necesidad de optimizar no solo los costos, sino también otros objetivos como la

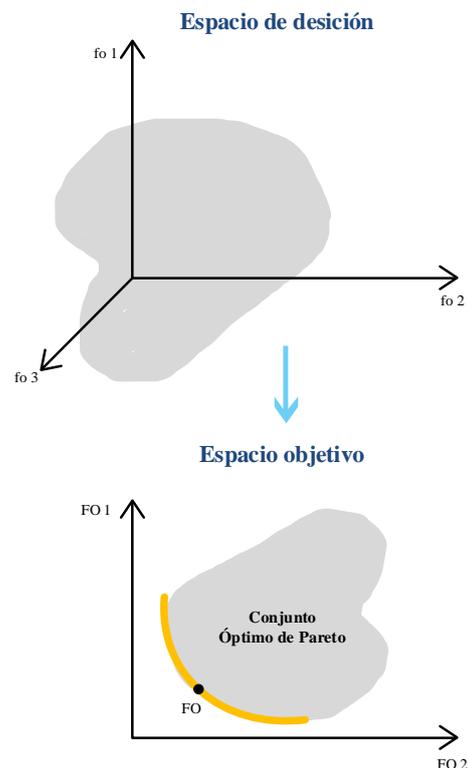
minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente a raíz de acuerdos internacionales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el protocolo de Kioto [38]. Estos acuerdos, firmados por más de 190 países, han establecido compromisos para reducir los GEI. En este marco, el enfoque multiobjetivo ha ganado relevancia, ya que no solo se enfoca en la eficiencia económica, sino también en la reducción de las emisiones contaminantes. Se han desarrollado técnicas específicas para abordar estos problemas económico-ambientales, clasificadas en tres categorías: emisiones como límite admisible, emisiones como objetivo independiente del costo, y el tratamiento simultáneo de costos y emisiones como objetivos competitivos. Estos enfoques son efectivos para garantizar que los sistemas eléctricos interconectados optimicen tanto sus rendimientos económicos como sus impactos ambientales [39].

En los problemas de optimización, una función objetivo busca una única solución óptima, lo que contrasta con los problemas multiobjetivo donde,

debido a la presencia de múltiples funciones, las soluciones se presentan como un conjunto no ordenado ni comparable entre sí. En este contexto, cada solución puede representar una mejora en uno de los objetivos, pero también puede perjudicar otros, lo que impide identificar una solución que sea óptima para todas las funciones simultáneamente. Para abordar esta complejidad, se recurre al concepto del frente de Pareto, donde las soluciones óptimas se encuentran en equilibrio entre las diferentes funciones, y se requiere una metodología adecuada para seleccionar la mejor opción dentro de este conjunto [40]. En el ámbito de la planificación energética, las soluciones multiobjetivo se obtienen de forma conjunta, y aunque cada una sea óptima en función de ciertos criterios, ninguna de ellas puede superar a las demás en términos absolutos. Esto implica que el operador del sistema eléctrico, al enfrentarse a un conjunto de soluciones óptimas, debe utilizar metodologías específicas que le permitan interpretar correctamente las necesidades del sistema de potencia y decidir la configuración

adecuada de unidades de generación, ya sea mediante ampliaciones o integraciones, para satisfacer de manera eficiente la demanda proyectada en el horizonte temporal correspondiente [41], [42].

Figura 1. Espacio de decisión y espacio objetivo del Frente de Pareto.



En la Figura 1 se ilustra cómo la optimalidad de Pareto se manifiesta en problemas multiobjetivo, donde el espacio de decisiones inicial se reduce a un conjunto más compacto, cumpliendo con la optimización según los criterios y restricciones predefinidos. La forma del frente de Pareto, ya sea cóncava o convexa, está determinada por los objetivos

específicos de la optimización, indicando si las funciones se deben maximizar o minimizar. Es importante destacar que todas las soluciones pertenecientes al frente de Pareto son óptimas y deben cumplir con una condición de consistencia: si una función se minimiza, las demás también deben seguir esta tendencia, garantizando así la coherencia en las soluciones [43], [44].

Crear un modelo de optimización multiobjetivo necesita métodos de resolución apropiados para los periodos de análisis. Hay metodologías numéricas (suma ponderada, restricción ϵ , métrica ponderada, satisfacción difusa, entre otras) para establecer la frontera de Pareto y resolver problemas multiobjetivo que se ajusten a las necesidades del tomador de decisiones. Sin embargo, estos métodos requieren muchos recursos computacionales por su complejidad y numerosas variables. Se usa GAMS para facilitar cálculos y resolver modelos [45].

Asignación de unidades de generación en regiones múltiples mediante multiobjetivo

Para resolver el problema de despacho multiobjetivo en sistemas eléctricos ubicados en varias zonas geográficas es necesario el uso de ecuaciones e inecuaciones que representan un problema de optimización no lineal.

A. Modelado de funciones objetivo

El modelo de optimización tiene dos funciones objetivo, la una asociada a minimizar costos de operación de generadores y la otra vinculada a minimizar emisiones. Dichas funciones se expresan de la siguiente manera:

FO 1: Costos operativos

$$\text{Costo}_{\text{Global}} = \sum_{z=1}^Z \sum_{n=1}^N \left[\sum_t \left(\alpha_{t,z} \cdot p_{t,z,n}^2 + \beta_{t,z} \cdot p_{t,z,n} + \gamma_{t,z} \right) + \sum_v^V (\theta_{v,z} \cdot p_{v,z,n}) + \sum_f^F (\mu_{f,z} \cdot p_{f,z,n}) \right] \quad (1)$$

FO2: Emisiones

$$Em = \sum_{z=1}^Z \sum_{n=1}^N \left[\sum_t \left(\pi_{t,z} \cdot p_{t,z,n}^2 + \sigma_{t,z} \cdot p_{t,z,n} + \delta_{t,z} \right) \right] \quad (2)$$

Donde Costo_Global corresponde a la sumatoria del costo operativo asociado a la generación térmica, el costo de producir con generación eólica y el costo que se incurre por el uso de generación fotovoltaica. Así mismo, $\alpha_{(t,z)}$, $\beta_{(t,z)}$, $\gamma_{(t,z)}$, corresponden a los factores de forma, desplazamiento y constante de la función cuadrática de costos de los generadores térmicos t ubicados en la zona z , respectivamente; mientras que $p_{(t,z,n)}$, $p_{(v,z,n)}$, $p_{(f,z,n)}$ son las variables de la potencia despachada por el generador térmico t , eólico v y fotovoltaico f , ubicados en la zona z en la hora n . Por su parte, el precio para la energía del generador eólico v y fotovoltaico f , ubicados en la zona z corresponde a $\theta_{(v,z)}$ y $\mu_{(f,z)}$ respectivamente. Por su parte, Em muestra las emisiones que producirían los generadores térmicos, para este caso $\pi_{(t,z)}$, $\sigma_{(t,z)}$ y $\delta_{(t,z)}$ corresponden a los factores de forma, desplazamiento y constante

de la función cuadrática de emisiones de los generadores térmicos t ubicados en la zona z , respectivamente.

B. Condiciones del modelado

El problema multiobjetivo establece el cumplimiento de ciertas condiciones, denominadas restricciones, mismas que son relacionadas a las características técnicas de las unidades de generación, los límites máximos de transferencia en los vínculos que interconectan las diversas zonas o áreas y el abastecimiento de la demanda, cuya formulación se muestra a continuación.

a) Suministro a la demanda: La limitación asegura que la generación de energía, incluidos los intercambios entre las zonas, satisfaga la demanda en cada área o zona y en cada hora.

$$\sum_t p_{t,z,n} + \sum_v p_{v,z,n} + \sum_f p_{f,z,n} = Dem_{z,n} + \sum_{j \neq z} F_{z,j,n} \quad (3)$$

Donde $Dem_{z,n}$ es la demanda de cada zona z para cada hora n , mientras que $F_{z,j,n}$ corresponde al flujo de potencia que circula de la zona z a la zona j en cada hora n .

b) Intercambio de flujo entre áreas: Para asegurar que el flujo entre las áreas no exceda los límites térmicos del vínculo que las conecta $Lim_{z,j}$, se establece la siguiente inecuación.

$$F_{z,j,n} \leq Lim_{z,j} \quad \forall s \neq j \quad (4)$$

c) Flujo bidireccional entre áreas: Se requieren formulaciones matemáticas para modelar el intercambio de energía entre las distintas zonas en una hora específica y su relación con la capacidad del vínculo, estableciendo las siguientes restricciones.

$$-Lim_{z,j} \leq F_{z,j,n} \quad \forall z \neq j \quad (5)$$

$$F_{z,j,n} = -F_{j,z,n} \quad \forall z \neq j \quad (6)$$

d) Limitación técnica de entrega de potencia: La potencia despachada depende de factores técnicos, por lo que los generadores térmicos operan dentro de su capacidad nominal máxima y mínima. Asimismo, los generadores de energías renovables deben respetar sus límites y considerar el impacto del uso del recurso; la modelación se presenta a continuación:

$$p_{t,z}^{min} \leq p_{t,z,n} \leq p_{t,z}^{max} \quad (7)$$

$$0 \leq p_{v,z,n} \leq p_{v,z}^{max} \cdot fu_{v,z} \quad (8)$$

$$0 \leq p_{f,z,n} \leq p_{f,z}^{max} \cdot fu_{f,z} \quad (9)$$

Donde $p_{t,z}^{max}$ y $p_{t,z}^{min}$ corresponden a los límites máximos y mínimos de los generadores térmicos t ubicados en la zona z , mientras que $p_{v,z}^{max}$ y $p_{f,z}^{max}$ corresponden a los límites máximos y mínimos de los generadores eólicos y fotovoltaicos v y f ubicados en la zona z , respectivamente, los cuales son ajustados en función del recurso $fu_{v,z}$ y $fu_{f,z}$.

e) Rampas de toma de potencia generada: Para ajustar la producción de energía de generadores térmicos, se deben considerar sus rampas técnicas, estableciendo las siguientes ecuaciones:

$$p_{t,z,n} - p_{t,z,n-1} \leq Rs_{t,z} \quad (10)$$

$$p_{t,z,n-1} - p_{t,z,n} \leq Rb_{t,z} \quad (11)$$

Donde $Rs_{t,z}$ y $Rb_{t,z}$, límite de entrega y reducción de energía del generador t ubicado en la zona z aplicable para cada una de los periodos de tiempo.

f) Reserva del sistema: Es imperativo asegurar el suministro de la demanda en cada zona, lo que

incluye la reserva de potencia correspondiente a cada área. La formulación aplicable a este respecto es la siguiente:

$$\sum_t^T p_{t,z}^{max} + \sum_v^V p_{v,z}^{max} \cdot fu_{v,z} + \sum_f^F p_{f,z}^{max} \cdot fu_{f,z} \geq (1 + r_s) \cdot Dem_z^{max} \quad (12)$$

Donde r_s corresponde al porcentaje de reserva de potencia en el zona z.

C. Satisfacción difusa y ξ - constraint

El método de satisfacción difusa se utiliza para problemas de optimización con múltiples objetivos, resolviendo el modelo matemático para cada función y obteniendo el frente de Pareto mediante la restricción ξ (ξ -constraint) [46]. Para minimizar las funciones objetivo en optimización multiobjetivo, se seguirán estos pasos:

1. Resolver el problema de optimización para cada función objetivo independientemente.
2. Determinar el valor mínimo para cada función objetivo en cada resolución.

3. Calcular una restricción (ξ - constraint) para cada función objetivo.

$$h_x \leq \varepsilon \quad (13)$$

4. Variar ε desde un h_x^{min} hasta h_x^{max} según el número de eventos a simular (n), maximizando h_x en cada evento, según la formulación presentada. [47].

$$\varepsilon_x = h_x^{max} + \frac{[(h_x^{min} - h_x^{max}) \cdot A_i]}{An} \quad (14)$$

Donde:

A_i : Valor correspondiente del contador para definir un punto del frente de Pareto

An : Total de los eventos evaluados en el contador.

Cada valor de los eventos con ξ -constraint es parte de la solución del modelo de optimización.

El frente de Pareto estará formado por la cantidad de valores obtenidos al usar ξ -constraint.

Tras definir la frontera de Pareto, se usará la metodología de satisfacción difusa para encontrar el valor óptimo que satisface equitativamente las funciones objetivo. La metodología utiliza una función de pertinencia que determina el grado de pertenencia

de cada elemento a un conjunto, detallada a continuación.

$$\sigma^{h_x(F_\gamma)} = \begin{cases} 0 \\ \frac{h_x^{max} - h_x(F_\gamma)}{h_x^{max} - h_x^{min}} \end{cases} \text{ si } h_x^{min} \leq h_x(F_\gamma) \leq h_x^{max}$$

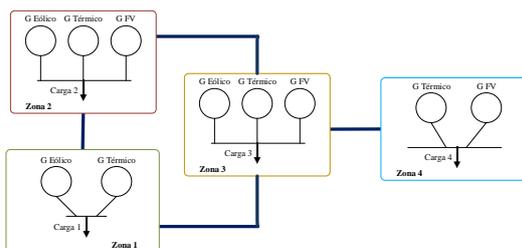
Finalmente, el método de satisfacción difusa maximizará la satisfacción mínima entre todas las funciones objetivos, lo que se expresa a través de la siguiente formulación:

$$\max(\min \sigma^{h_x(F_\gamma)}) \quad (16)$$

Evaluación del modelo

El modelo será evaluado con un sistema eléctrico de 4 áreas, que incluirán un parque generador diverso, una demanda horaria de 24 horas y conexiones entre ellas.

Figura 2. Esquemas de zonas interconectadas



A. Parque generador

La ubicación y la tecnología de los generadores a utilizar, cuya asignación en cada una de las cuatro áreas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación y tecnología del parque generador.

| Nombre | Tecnología | Ubicación |
|--------|--------------|-----------|
| T1 | Térmica | |
| T2 | Térmica | |
| T3 | Térmica | Zona 1 |
| T4 | Térmica | |
| V1 | Eólica | |
| T8 | Térmica | |
| T9 | Térmica | |
| T10 | Térmica | |
| T11 | Térmica | Zona 3 |
| V3 | Eólica | |
| V4 | Eólica | |
| F2 | Fotovoltaica | |
| T5 | Térmica | |
| T6 | Térmica | |
| T7 | Térmica | Zona 2 |
| V2 | Eólica | |
| F1 | Fotovoltaica | |
| T12 | Térmica | |
| T13 | Térmica | |
| T14 | Térmica | Zona 4 |
| T15 | Térmica | |
| F3 | Fotovoltaica | |
| F4 | Fotovoltaica | |

Los datos y parámetros del parque generador con tecnología térmica independiente del área donde se ubiquen, fueron obtenidos considerando [48] y [49] los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del parque generador térmico.

| | $\alpha_{t,z}$ | $\beta_{t,z}$ | $\gamma_{t,z}$ | $\pi_{t,z}$ | $\sigma_{t,z}$ | $\delta_{t,z}$ |
|-----|----------------------|---------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | USD/MWh ² | USD/MWh | USD | MBTU/MWh ² | MBTU/MWh | MBTU |
| T1 | 0.00415 | 13.243 | 445.95 | 0.0052 | 7.344 | 506.20 |
| T2 | 0.00585 | 16.862 | 355.93 | 0.0026 | 8.133 | 264.92 |
| T3 | 0.00519 | 17.712 | 349.49 | 0.0073 | 8.214 | 158.54 |
| T4 | 0.00319 | 16.007 | 710.10 | 0.0053 | 8.338 | 173.34 |
| T5 | 0.00727 | 17.229 | 529.24 | 0.0060 | 8.340 | 190.62 |
| T6 | 0.00688 | 14.966 | 348.24 | 0.0037 | 8.439 | 269.24 |
| T7 | 0.00481 | 16.090 | 778.31 | 0.0016 | 8.602 | 230.90 |
| T8 | 0.00367 | 17.756 | 488.73 | 0.0014 | 9.865 | 155.52 |
| T9 | 0.00298 | 15.907 | 462.41 | 0.0194 | 10.350 | 189.11 |
| T10 | 0.00161 | 12.620 | 384.24 | 0.0002 | 11.030 | 80.35 |
| T11 | 0.00428 | 13.659 | 459.96 | 0.0056 | 8.801 | 182.97 |
| T12 | 0.00627 | 18.072 | 381.46 | 0.0064 | 8.803 | 201.21 |
| T13 | 0.00556 | 18.982 | 374.56 | 0.0039 | 8.908 | 284.20 |
| T14 | 0.00341 | 17.155 | 761.03 | 0.0017 | 9.080 | 243.73 |
| T15 | 0.00755 | 17.902 | 549.93 | 0.0012 | 8.677 | 136.8 |

Para los generadores que usan energías renovables, los datos y parámetros de ámbito económico y técnico han sido los considerados de la U.S. Energy Information Administration [50], los cuales se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del parque generador que usa energías renovables

| | P (MW) | Precio (USD/MWh) | P (MW) | Precio (USD/MWh) | |
|----|--------|------------------|--------|------------------|----|
| E1 | 395 | 28 | F1 | 165 | 30 |
| E2 | 295 | 35 | F2 | 195 | 32 |
| E3 | 330 | 43 | F3 | 125 | 38 |
| E4 | 375 | 54 | F4 | 155 | 43 |

Adicional a lo descrito, para modelar la probabilidad del recurso energético de las energías renovables se ha usado lo descrito en [51], [52].

B. Demanda

En el presente acápite se procede a mostrar la demanda por cada

período de tiempo la cual deberá ser abastecida, cuyos valores son recopilados de [49], resultado de lo cual se obtiene la curva de demanda horaria ilustrada en la Fig 3.

Figura 3. Demanda horaria por zona.



C. Enlaces entre áreas

Las capacidades de los vínculos para la interconexión de las áreas se muestran en la Tabla 4 y cuyos valores son referenciados de conformidad a [53].

Tabla 4. Parámetros de los enlaces de interconexión.

| Enlace | Capacidad (MW) |
|-----------------|----------------|
| Área 1 - Área 2 | 250 |
| Área 1 - Área 3 | 420 |
| Área 2 - Área 3 | 580 |
| Área 4 - Área 3 | 400 |

D. Estudios

Para implementar el modelo de optimización multiobjetivo, se plantean dos tipos de estudios o escenarios que corresponde a:

1. Estudio Base: En este estudio se procede a realizar el despacho energético en cada una de las áreas, a fin de que los generadores ubicados en ellas abastezcan la demanda de forma autónoma e independiente, por tanto, no se modelará la interconexión de las áreas.

2. Estudio Multiobjetivo: El caso modelará el problema multiobjetivo y adicional se interconectarán las áreas, la interacción de estas premisas deben garantizar la demanda global e individual de cada área.

3. Resultados y discusión

A. Estudio o caso 1

Cada zona satisface su demanda de manera autónoma utilizando su propio parque de generación, siguiendo un despacho económico. Esto permite determinar los valores de las variables energéticas y económicas. A continuación, se muestran las ilustraciones del despacho por zona y tipo de tecnología.

Figura 4. Despacho autónomo – Zona 1

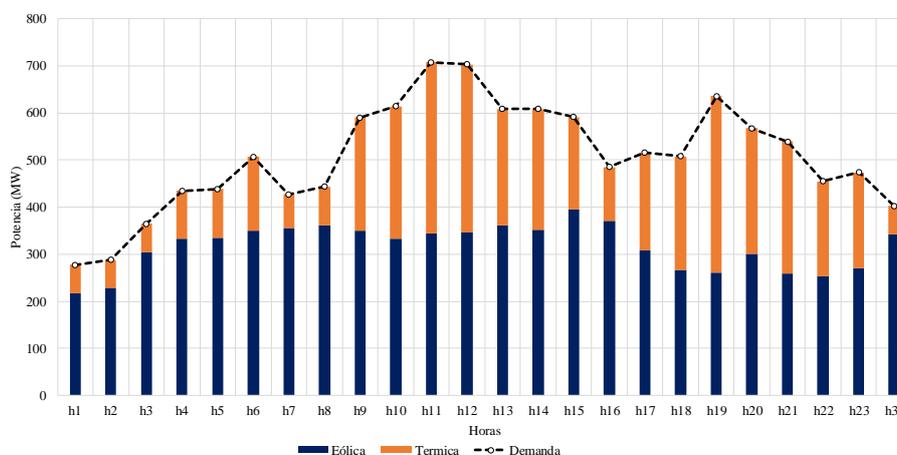


Figura 5. Despacho autónomo – Zona 2

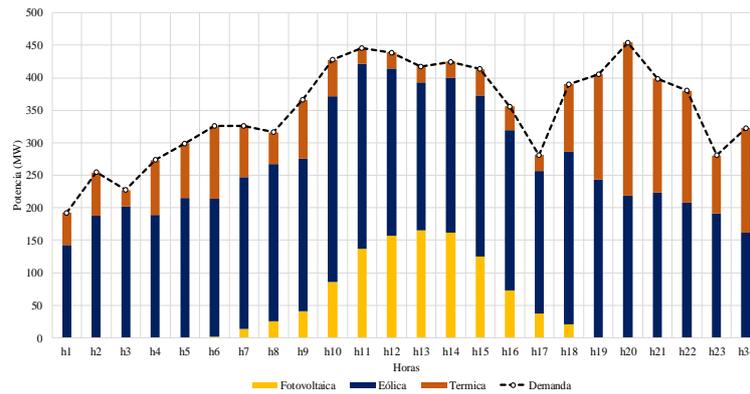


Figura 6. Despacho autónomo – Zona 3

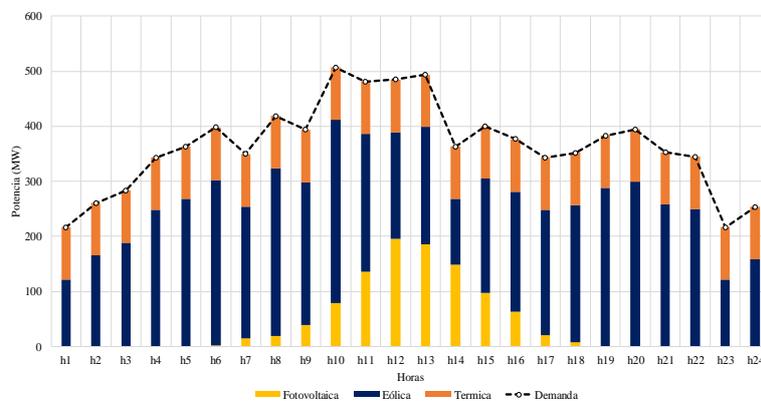
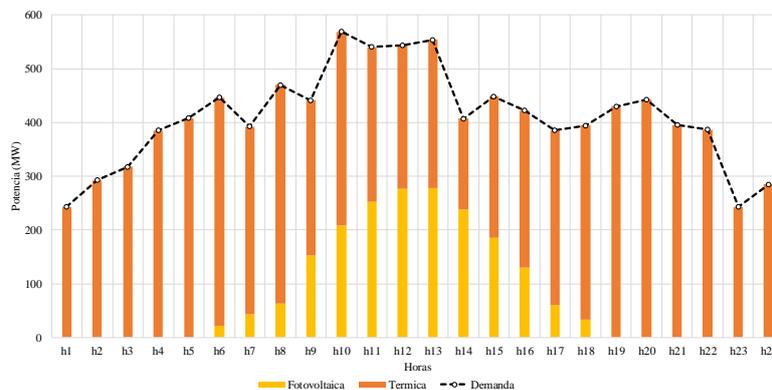


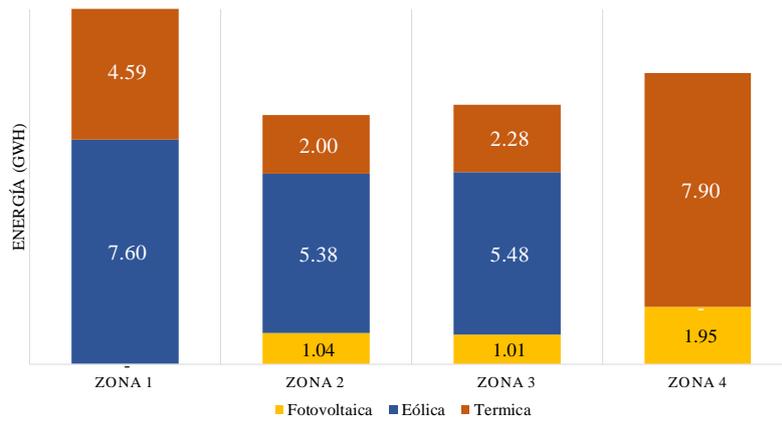
Figura 7. Despacho autónomo – Zona 4



Como se observa en las figuras anteriores, el parque generador de cada área produce energía de manera económica, asegurando así el abastecimiento autónomo de la demanda. Del total de energía, la

energía fotovoltaica representa el 10.2%, la energía eólica equivale al 47.1% y la energía de los generadores térmicos asciende a 42.7%. La ilustración por bloque de energía, por zona y por tecnología se muestra a continuación.

Figura 8. Bloques de energía por área y tecnología – Autónomo



De la producción de energía resultante del despacho para el abastecimiento autónomo, se procede a evaluar los valores económicos que se desprenden de la producción de energía asociados por área y tecnología. El 78.7% del costo total corresponde a la generación de tipo térmico, mientras que el 17.5% corresponde al costo de generación eólico y el 3.9% es el

porcentaje del costo de la generación fotovoltaica. Los valores de los costos por tecnología y zona se muestran en la Figura 9. Finalmente, se evalúa las emisiones de CO2 derivadas de la producción de la energía de los generadores térmicos, resultado de lo cual, por cada área se muestran la cantidad de emisiones.

Figura 9. Costos despacho autónomo – Caso 1.

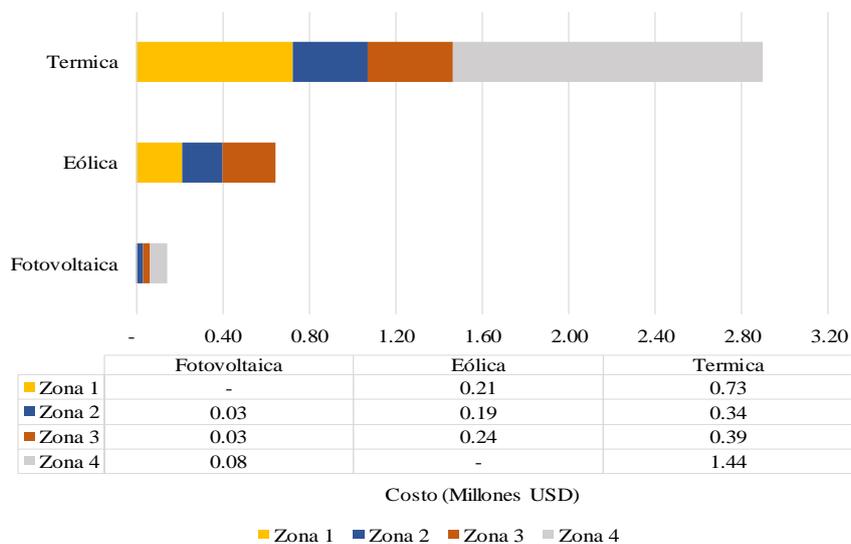
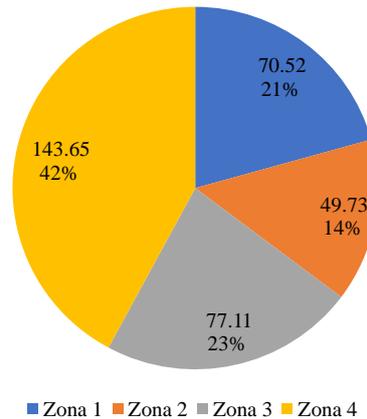


Figura 10. Emisiones por área- Caso 1.



Se observa que el mayor porcentaje de emisiones ascienden al 42% y se producen en área 4; y, siendo el área 2 la que menos produce emisiones con un porcentaje del 14%. Los porcentajes son calculados con respecto a la cantidad total que corresponde a 341.00 toneladas de CO₂.

B. Estudio 2

Este estudio emplea un modelo de optimización multiobjetivo con el método ξ -constraint. Se han creado 20 eventos para resolver problemas de optimización multiobjetivo. Los valores de las funciones objetivo definen el frente de Pareto. Se muestran los resultados de estos 20 eventos.

Tabla 5. Resultados ξ -constraint – Caso 2.

| | CT MMUSD | EM Ton | | CT MMUSD | EM Ton |
|------|-------------|-----------|------|-------------|-----------|
| Ev1 | 2.8117 | 274.83 | Ev11 | 2.8252 | 255.62 |
| Ev2 | 2.8119 | 272.91 | Ev12 | 2.8285 | 253.70 |
| Ev3 | 2.8125 | 270.99 | Ev13 | 2.8322 | 251.78 |
| Ev4 | 2.8132 | 269.06 | Ev14 | 2.8364 | 249.86 |
| Ev5 | 2.8138 | 267.14 | Ev15 | 2.8418 | 247.94 |
| Ev6 | 2.8145 | 265.22 | Ev16 | 2.8482 | 246.02 |
| Ev7 | 2.8157 | 263.30 | Ev17 | 2.8556 | 244.10 |
| Ev8 | 2.8173 | 261.38 | Ev18 | 2.8644 | 242.18 |
| Ev9 | 2.8192 | 259.46 | Ev19 | 2.8787 | 240.26 |
| Ev10 | 2.8220 | 257.54 | Ev20 | 2.9242 | 238.34 |

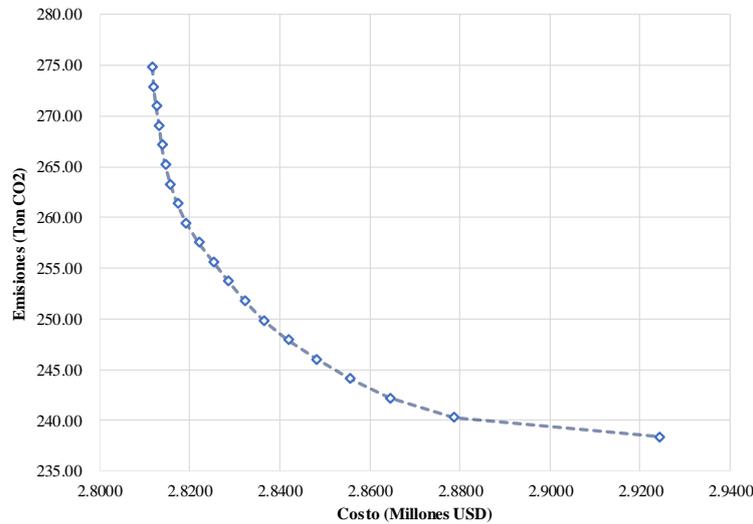
Utilizando el frente de Pareto presentado en la Figura 10, se aplica la metodología de satisfacción

difusa. Esto implica usar funciones de pertenencia o unitarias, considerando los valores máximos y mínimos de cada función objetivo. El

evento que maximiza la satisfacción mínima entre las dos funciones objetivo, identificado como el evento 15, se considera el óptimo de Pareto.

A partir de aquí, se procede a analizar los resultados obtenidos en dicho evento.

Figura 11. Frente de Pareto – Caso 2.



Para el evento 15 se procede a evaluar la generación despachada y los intercambios entre áreas, lo que permitirá conocer la producción de energía del parque generador de una

otra área que desplazará generación costosa, en tal razón, el despacho efectuado en cada una de las áreas se muestra en las ilustraciones subsiguientes.

Figura 12. Despacho Zona 1- Caso 2.

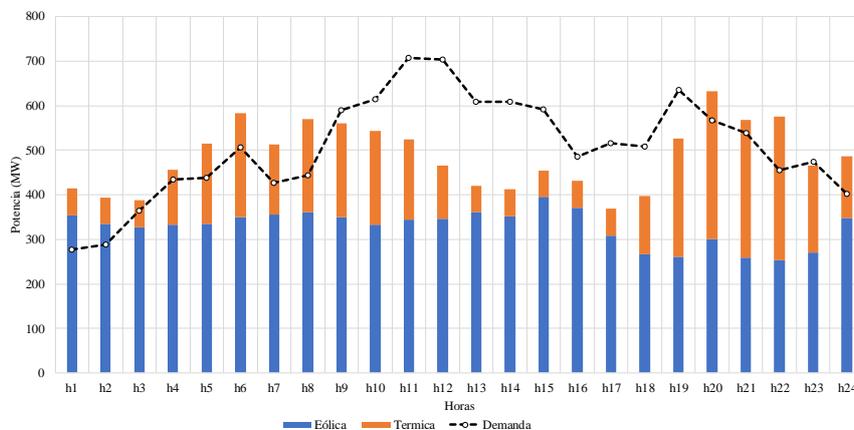


Figura 13. Despacho Zona 2 – Caso 2.

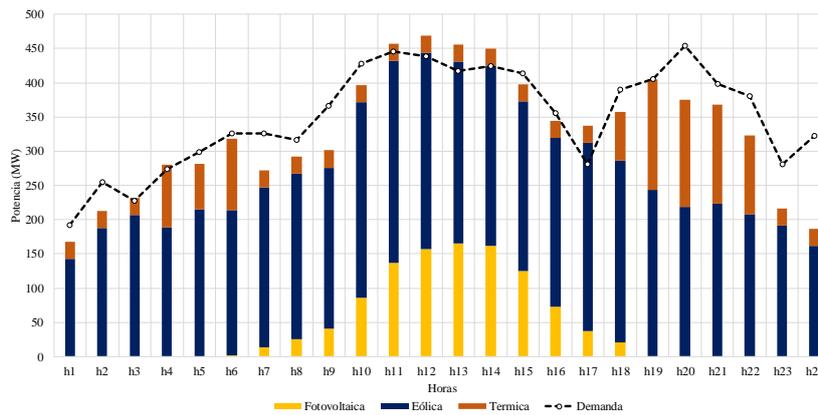


Figura 14. Despacho Zona 3 – Caso 2

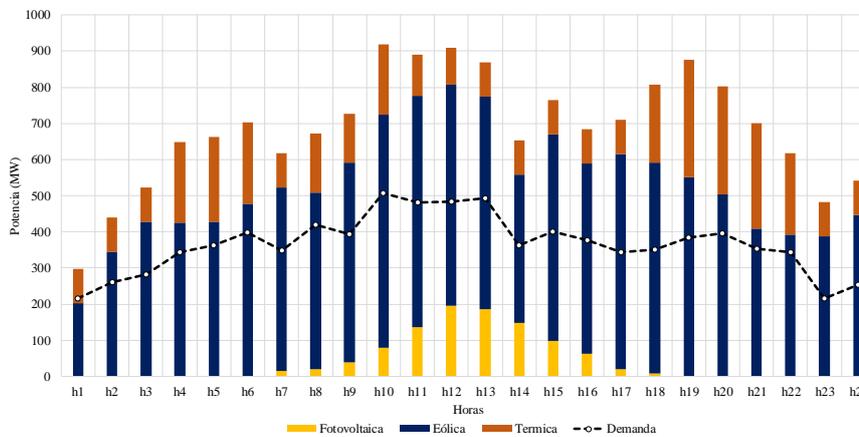
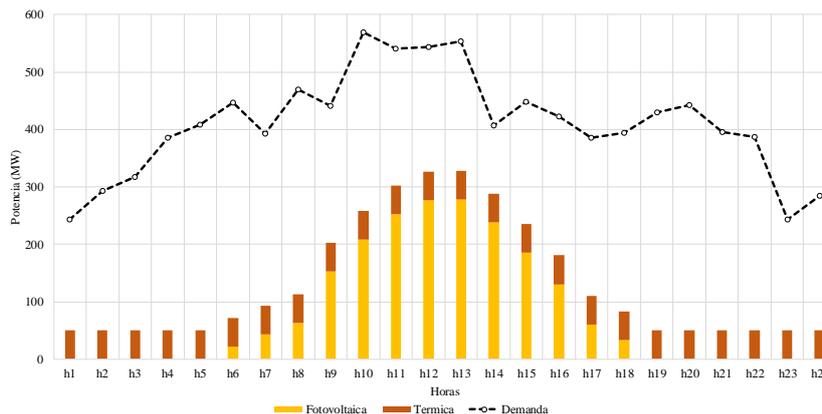


Figura 15. Despacho Zona 4 – Caso 2



De las figuras se observa que la generación propia de la zona 1 y zona 4 a comparación del caso 1 se ve reducida en la mayor parte del tiempo dado el abastecimiento de la

demanda proviene de las áreas interconectadas. De los valores netos se colige que el área 1 recibe 522.13 MWh, la zona 2 recibe 525.25MWh y la zona 4 recibe

6,695,82 MWh, mientras que la zona 3 funge como exportador de energía entregando a todas las zonas un

total de 7743 MWh. Los intercambios se presentan en la siguiente tabla.

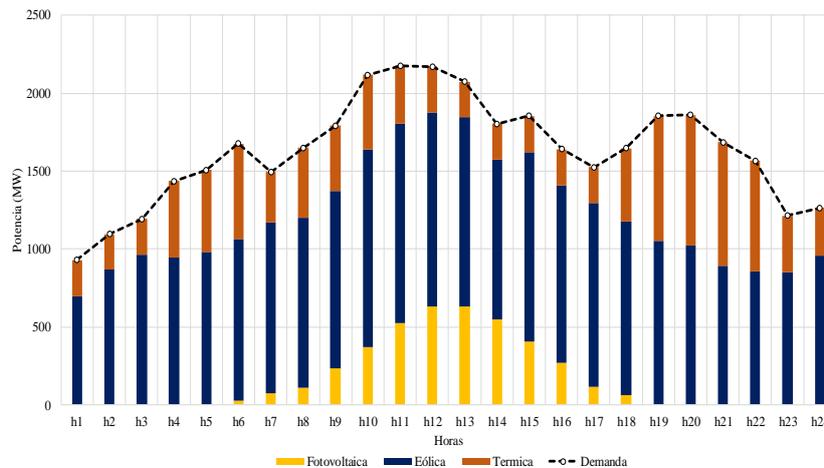
Tabla 6. Intercambio entre zonas– Caso 2.

| | | Zonas de Recepción (MWh) | | | | |
|------------------------|-------|--------------------------|---------------|------------------|-----------------|-------------|
| | | A1 | A2 | A3 | A4 | Total |
| Zonas de Entrega (MWh) | A1 | | -61.75 | -460.38 | | -522.13 |
| | A2 | 61.75 | | -587.00 | | -525.25 |
| | A3 | 460.38 | 587.00 | | 6,695.82 | 7,743.20 |
| | A4 | | | -6,695.82 | | -6,695.82 |
| | Total | 522.13 | 525.25 | -7,743.20 | 6,695.82 | 0.00 |

Después de haber efectuado el análisis individual por área, es necesario ilustrar el abastecimiento

global en la cual se incluyen los intercambios de energía entre áreas, lo que se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Despacho para abastecimiento global – Caso 2.



De la Figura 16 se muestra que efectivamente el despacho multizona y multiobjetivo se cumple y se abastece la demanda global. A continuación, por cada área se presentará los bloques de energía por tipo de tecnología.

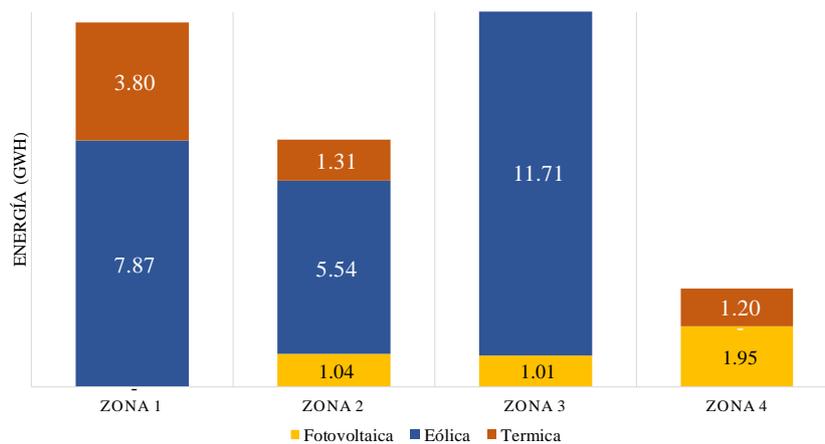
Tabla 7. Energía por tecnología y área – Caso 2.

| | Energía (GWh) | | | Total |
|--------|---------------|-------|-------|-------|
| | FV | E | T | |
| Área 1 | - | 7.87 | 3.80 | 11.67 |
| Área 2 | 1.04 | 5.54 | 1.31 | 7.90 |
| Área 3 | 1.01 | 11.71 | 3.79 | 16.52 |
| Área 4 | 1.95 | - | 1.20 | 3.15 |
| Total | 4.00 | 25.12 | 10.10 | 39.23 |

De la Tabla 7 se observa que, del total de energía, la energía fotovoltaica representa el 10.2%, la energía eólica equivale al 64% y la energía de los generadores térmicos asciende a 25.8%. De lo que se

concluye que, el uso de las energías renovables es permanente y se aprovecha su recurso. La ilustración por bloque de energía, por área y por tecnología se muestran en la Figura 17.

Figura 17. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 2.

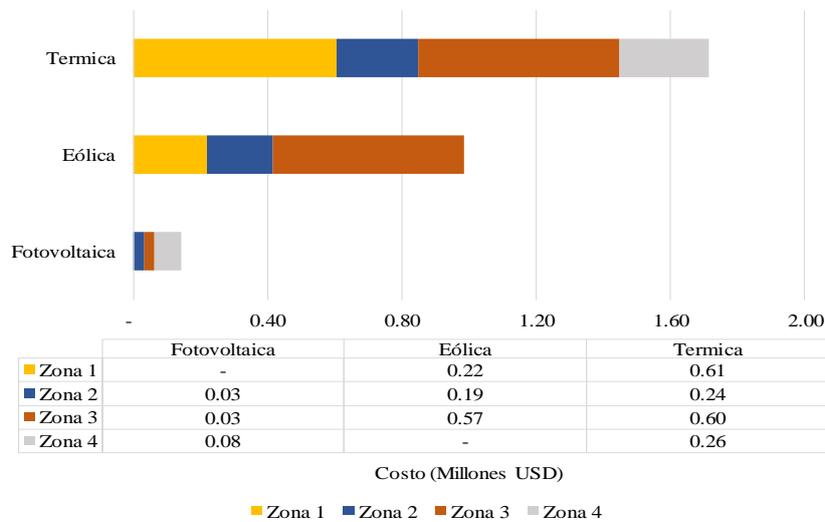
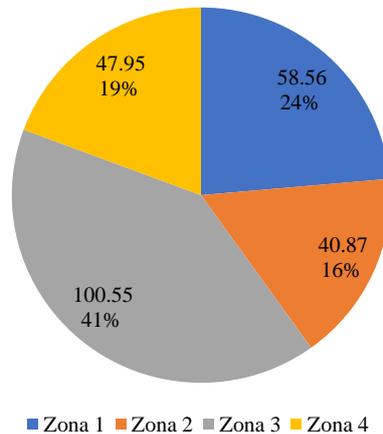


De la producción de energía resultante del despacho para el abastecimiento interconectado, se procede a evaluar los valores económicos que se desprenden de la producción de energía asociados por área y tecnología.

Tabla 8. Costo por tecnología y área – Caso 2.

| | Costo (Millones USD) | | | Total |
|--------------|----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | F | E | T | |
| Área 1 | - | 0.22 | 0.61 | 0.83 |
| Área 2 | 0.03 | 0.19 | 0.24 | 0.47 |
| Área 3 | 0.03 | 0.57 | 0.60 | 1.21 |
| Área 4 | 0.08 | - | 0.26 | 0.34 |
| Total | 0.14 | 0.99 | 1.71 | 2.84 |

El 60.3% del costo total corresponde a la generación de tipo térmico, mientras que el 34.7% corresponde al costo de generación eólico y el 5% es el porcentaje del costo de la generación fotovoltaica. Finalmente, se evalúa la cantidad de emisiones de CO₂ que se emiten por la producción de energía mediante los generadores térmicos, cuyos resultados se muestran a continuación.

Figura 18. Costos despacho– Caso 2.**Figura 19. Emisiones por área– Caso 2.**

C. Comparativo

De los resultados económicos y energéticos evaluados en cada

estudio, se procede a realizar un análisis comparativo, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 9. Comparativo de parámetros energéticos y económicos.

| Costo (USD) | | | | |
|----------------------|--------------|------------|---------------|--------------|
| Escenario | Fotovoltaica | Eólica | Térmica | Total |
| Autónomo | 142,770.51 | 643,807.17 | 2,899,560.03 | 3,686,137.71 |
| Optimizado | 142,770.51 | 985,662.31 | 1,713,415.80 | 2,841,848.62 |
| Variación | - | 341,855.14 | -1,186,144.23 | -844,289.09 |
| Energía (GWh) | | | | |
| Escenario | Fotovoltaica | Eólica | Térmica | Total |
| Autónomo | 4.00 | 18.46 | 16.77 | 39.23 |
| Optimizado | 4.00 | 25.12 | 10.10 | 39.23 |
| Variación | - | 6.66 | -6.66 | 0.00 |

Al realizar el análisis se observa que la generación térmica se reduce en 6.66 GWh, la cual es suplida por una reasignación del parque eólico. Con respecto al análisis de costos, se señala que, el estudio 1 es el más costoso a comparación de del estudio 2, lo cual es correcto dado que no se optimizan los recursos de todas las áreas lo que conlleva a una reducción de costos en 844 mil dólares diarios, lo cual corresponde a un ahorro anual de aproximadamente de 308 millones de dólares. La Tabla 14 muestra un comparativo de las emisiones de CO₂.

Tabla 10. Comparativo de emisiones.

| Emisiones (toneladas CO ₂) | | |
|--|--------|--------|
| | Est 1 | Est 2 |
| Zona 1 | 70.52 | 58.56 |
| Zona 2 | 49.73 | 40.87 |
| Zona 3 | 77.11 | 100.55 |
| Zona 4 | 143.65 | 47.95 |
| Total | 341.00 | 247.94 |

De la Tabla 10 se muestra que el caso 1 tiene el valor más alto de emisión de CO₂ ascendiendo a 341 toneladas, pero al interconectar las áreas las emisiones en su global se reducen un 27% a comparación del caso 1 que corresponden a 93.06 toneladas de CO₂, lo cual valida que el modelo multiobjetivo cumple con

fin con el que fue desarrollado, en este sentido.

4. Conclusiones

El modelo de optimización multiobjetivo desarrollado ha demostrado ser eficaz en la determinación de la potencia horaria a despachar por las unidades generadoras, logrando un equilibrio entre la minimización de los costos operativos del sistema y la reducción de las emisiones de CO₂. Esto sugiere que es posible alcanzar un despacho económico más sostenible, alineado con los objetivos ambientales sin comprometer la eficiencia económica.

Al comparar los resultados de los dos estudios, se observa que la interconexión de las áreas permite una reducción significativa del 27% en las emisiones de CO₂, lo que equivale a una disminución de 93.06 toneladas de CO₂. Esto valida la efectividad del modelo multiobjetivo para optimizar tanto la eficiencia energética como la sostenibilidad ambiental.

El análisis económico revela que el despacho interconectado y multiárea del segundo estudio resulta en un

ahorro de 844 mil dólares diarios, lo cual corresponde a un ahorro anual de aproximadamente de 308 millones de dólares, en comparación con el estudio de despacho autónomo. Esto demuestra que la optimización de recursos a través de la interconexión reduce los costos operativos, destacando la importancia de una planificación energética integrada.

La reasignación de la generación eólica en el estudio 2 permite una reducción de 6.66 GWh en la generación térmica, con el Área 3 exportando la mayor parte de esta energía hacia el Área 4. Este cambio no solo reduce la dependencia de fuentes térmicas, sino que también mejora la eficiencia general del sistema, favoreciendo el uso de energías renovables.

El análisis comparativo muestra que, aunque la generación autónoma garantiza el suministro en cada área, es menos eficiente en términos de costos y emisiones. La generación interconectada permite una mejor utilización de los recursos disponibles, disminuyendo los costos de producción y las emisiones de CO₂, lo que hace de esta

estrategia una opción más sostenible y económica.

Bibliografía

- [1] Y. Wu, X. Chen, J. Ma, Y. Wu, D. Liu, and W. Xie, "System integration optimization for coal-fired power plant with CO₂ capture by Na₂CO₃ dry sorbents," *Energy*, vol. 211, p. 118554, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118554.
- [2] R. B. Finkelman, A. Wolfe, and M. S. Hendryx, "The future environmental and health impacts of coal," *Energy Geoscience*, vol. 2, no. 2, pp. 99–112, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.engeos.2020.11.001.
- [3] C. Viviescas et al., "Contribution of Variable Renewable Energy to increase energy security in Latin America: Complementarity and climate change impacts on wind and solar resources," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109232, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.039.
- [4] X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy

- infrastructures," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2302–2311, 2015.
- [5] F. Kienzle and G. Andersson, "A greenfield approach to the future supply of multiple energy carriers," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, 2009, pp. 1–8.
- [6] S. Collins, J. P. Deane, and B. Ó Gallachóir, "Adding value to EU energy policy analysis using a multi-model approach with an EU-28 electricity dispatch model," *Energy*, vol. 130, pp. 433–447, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.010.
- [7] J. Morris et al., "Representing the costs of low-carbon power generation in multi-region multi-sector energy-economic models," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 87, pp. 170–187, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijggc.2019.05.016.
- [8] H. Son, J. Kim, I. Bae, and T. T. C. M. Thermal, "Evaluation of Optimal Transfer Capability in Power system interconnection," *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 3, pp. 1–5, 2009.
- [9] M. J. Mokarram, M. Gitizadeh, T. Niknam, and S. Niknam, "Robust and effective parallel process to coordinate multi-area economic dispatch (MAED) problems in the presence of uncertainty," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 4197–4205, 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2019.0319.
- [10] U. G. W. Knight, "The logical design of electrical networks using linear programming methods," *Proceedings of the IEE Part A: Power Engineering*, vol. 107, no. 33, p. 306, 1960, doi: 10.1049/pia.1960.0063.
- [11] M. Erfanian and M. Pirayesh, "Integration aggregate production planning and maintenance using mixed integer linear programming," in *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, pp. 927–930. doi: 10.1109/IEEM.2016.7798013.
- [12] M. Sakawa and K. Kato, "An Interactive fuzzy satisfying method for multiobjective structured linear programs and its application," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, IEEE, 1995, pp. 4045–4050. doi: 10.1109/icsmc.1995.538423.

- [13] L. A. T. D. E. Decisiones, A. En, M. Difusos, G. Jaime, and C. Henao, "Aproximaciones metodológicas para la toma de decisiones, apoyadas en modelos difusos," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2004.
- [14] J. Jaramillo and D. Jaramillo, "Óptima Ubicación de Generación Distribuida para Minimización de Pérdidas en un Sistema de Distribución Utilizando Lógica Difusa," *Universidad Politécnica Salesiana*, 2021.
- [15] A. M. Prostejovsky, C. Brosinsky, K. Heussen, D. Westermann, J. Kreusel, and M. Marinelli, "The future role of human operators in highly automated electric power systems," Oct. 2019, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.epsr.2019.105883.
- [16] K. Tong, A. Ramaswami, and R. Feiock, "Environmentally sustainable transitions of US district energy systems: Perspectives from infrastructure operators/designers through the co-evolutionary lens," *J Clean Prod*, vol. 268, p. 121894, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121894.
- [17] K. Vinothkumar and M. P. Selvan, "Fuzzy embedded genetic algorithm method for distributed generation planning," *Electric Power Components and Systems*, vol. 39, no. 4, pp. 346–366, 2011.
- [18] B. Mohammadi-ivatloo and M. Nazari-Heris, *Robust optimal planning and operation of electrical energy systems*. Springer, 2019.
- [19] F. Careri et al., "Generation Expansion Planning in the Age of Green Economy," 2011 IEEE Trondheim PowerTech, p. 1, 2011, doi: 10.1109/PTC.2011.6019441.
- [20] A. Papaemmanouil and G. Andersson, "Sustainability based optimal power flow a new planning tool," in 2009 IEEE Bucharest PowerTech, 2009, pp. 1–6. doi: 10.1109/PTC.2009.5282163.
- [21] P. Lajda, "Short-Term Operation Planning in Electric Power Systems," *J Oper Res Soc*, vol. 32, no. 8, p. 675, Aug. 1981, doi: 10.2307/2580946.
- [22] P. Lajda, "Short-term Operation Planning in Electric Power Systems," *Journal of the Operational Research Society* 1981 32:8, vol. 32, no. 8, pp. 675–682, Aug. 1981, doi: 10.1057/JORS.1981.134.
- [23] A. Wyrwa, W. Suwała, M. Pluta, M. Raczyński, J. Zyśk, and S. Tokarski, "A new

- approach for coupling the short- and long-term planning models to design a pathway to carbon neutrality in a coal-based power system," *Energy*, p. 122438, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.122438.
- [24] R. Navarro, "Short and Medium Term Operation Planning in Electric Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1–8, 2009.
- [25] J. Zhu et al., "Two stage approach for economic power dispatch," *IEEE Power and Energy Society 2018 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES*, vol. 1, 2018, doi: 10.1109/PES.2008.4596846.
- [26] F. D. Galiana, A. L. Motto, A. J. Conejo, and M. Huneault, "Decentralized Nodal-Price Self-Dispatch and Unit Commitment," *The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models*, pp. 271–292, Dec. 2002, doi: 10.1007/0-306-47663-0_15.
- [27] M. Ahlstrom et al., "The Evolution of the Market: Designing a Market for High Levels of Variable Generation," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 13, no. 6, pp. 60–66, Nov. 2015, doi: 10.1109/MPE.2015.2458755.
- [28] J. Hu, R. Harmsen, W. Crijns-Graus, E. Worrell, and M. van den Broek, "Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into the electricity market: A literature review of market design," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2181–2195, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.028>.
- [29] F. Cheng, M. Yang, X. Han, and J. Liang, "Real-time dispatch based on effective steady-state security regions of power systems," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting, IEEE Computer Society*, Oct. 2014, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939073.
- [30] K. Moustakas, M. Loizidou, M. Rehan, and A. S. Nizami, "A review of recent developments in renewable and sustainable energy systems: Key challenges and future perspective," Mar. 2020, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2019.109418.
- [31] U. Fragomeni, "Direct Method to Multi-Area Economic Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 4, pp. 1–5, 2012.
- [32] A. Azizivahed, S. Ghavidel, M. J. Ghadi, L. Li, and J. Zhang,

- “Multi-area economic emission dispatch considering load uncertainty,” in 2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2017, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2017. doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056132.
- [33] G. I. Samorodov, T. G. Krasilnikova, R. A. Yatsenko, and S. M. Zilberman, “An Analytical Method for Reliability Evaluation of Two Interconnected Power Systems,” *IEEE Conferences*, pp. 9–14, 2006.
- [34] M. Basu, “Teaching–learning–based optimization algorithm for multi-area economic dispatch,” *Energy*, vol. 68, pp. 21–28, 2014.
- [35] R. Marler and J. Arora, “Survey of multi-objective optimization methods for engineering,” *Apr.* 2004, Springer. doi: 10.1007/s00158-003-0368-6.
- [36] L. Bay and P. M. Su, “The Exact Solution of the Environmental / Economic Dispatch Problem,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 723–732, 2012.
- [37] V. P. Sakthivel, M. Suman, and P. D. Sathya, “Combined economic and emission power dispatch problems through multi-objective squirrel search algorithm,” *Appl Soft Comput*, vol. 100, p. 106950, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.ASOC.2020.106950.
- [38] F. Ballester, J. Díaz, and J. M. Moreno, “Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto,” *Gac Sanit*, vol. 20, no. SUPPL. 1, pp. 160–174, Mar. 2006, doi: 10.1157/13086040.
- [39] M. A. Abido, “Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem,” *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 7, pp. 1105–1113, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.EPSR.2009.02.005.
- [40] P. Ngatchou, A. Zarei, and M. A. El-Sharkawi, “Pareto multi objective optimization,” *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, ISAP’05*, vol. 2005, pp. 84–91, 2005, doi: 10.1109/ISAP.2005.1599245.
- [41] T. Blanchet, J. Fournier, and T. Piketty, “Generalized Pareto Curves: Theory and Applications,” *Review of Income and Wealth*, vol. 68, no. 1, pp. 263–288, Mar.

- 2022, doi:
10.1111/ROIW.12510.
- [42] C. Roman and W. Rosehart, "Evenly distributed pareto points in multi-objective optimal power flow," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 1011–1012, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873010.
- [43] W. Feng, D. Gong, and Z. Yu, "Multi-objective evolutionary optimization based on online perceiving Pareto front characteristics," *Inf Sci (N Y)*, vol. 581, pp. 912–931, 2021, doi: 10.1016/j.ins.2021.10.007.
- [44] T. Tusar and B. Filipic, "Visualization of Pareto Front Approximations in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Critical Review and the Prosection Method," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 19, no. 2, pp. 225–245, Apr. 2015, doi: 10.1109/TEVC.2014.2313407.
- [45] S. K. Injeti, "A Pareto optimal approach for allocation of distributed generators in radial distribution systems using improved differential search algorithm," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 908–927, 2018, doi: 10.1016/j.jesit.2016.12.006.
- [46] V. Beresnev and A. Melnikov, "E-Constraint method for bi-objective competitive facility location problem with uncertain demand scenario," *Eur J Oper Res*, pp. 33–59, 2020.
- [47] H. Ishii and S. Koike, "On ε -optimal controls for state constraint problems," *Ann. Inst. Henri Poincaré*, vol. 17, no. 4, pp. 473–502, 2000, doi: 10.1016/S0294-1449(00)00114-1.
- [48] P. Lombardi and F. Schwabe, "Sharing economy as a new business model for energy storage systems," *Appl Energy*, vol. 188, pp. 485–496, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.016.
- [49] B. Mohammadi-ivatloo and M. Nazari-Heris, *Robust optimal planning and operation of electrical energy systems*. Springer, 2019.
- [50] U.S. Energy Information Administration, "U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021)," EIA. Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021), vol. 2021, 2021.
- [51] G. D. Price, *Power Systems and Renewable Energy: Design, Operation, and*

Systems Analysis. Momentum Press, 2014.

- [52] MERNNR, "Plan Maestro de Electricidad 2019-2027," Ministerio de Energía y Recursos No Renovables, p. 390, 2019.

- [53] Z. Jizhong and IEEE, "Optimization of Power System Operation." Accessed: May 27, 2021. [Online]. Available: <https://www.wiley.com/en-us/Optimization+of+Power+System+Operation%2C+2nd+Edition-p-9781118854150>