

**DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN  
DIFUSA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN  
DIFUSA**

**AUTOR:  
CRISTIAN DANIEL PASPUEL VALLE**

**TUTOR:  
LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA**

**Quito, enero 2022**

## Datos de Catalogación Bibliográfica

Cristian Daniel Paspuel Valle

DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN  
ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2022

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Cristian Daniel Paspuel Valle** (Y'1992-A'23). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio LatinoAmericano. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. El presente trabajo se desarrolla en dirección a los procesos de despacho económico en los sistemas eléctricos de potencia considerando diversas áreas en un modelo de optimización multiobjetivo que relaciona funciones objetivo referente a los costos y al impacto ambiental.

[cpaspuel@ups.edu.ec](mailto:cpaspuel@ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Luis Fernando Tipán Vergara** (Y'1982-J'21). Nació en Quito, Ecuador, el 21 de junio de 1982. Se graduó de la Facultad de Ingeniería Eléctrica Como Ingeniero en Electrónica en Control en la Escuela Politécnica Nacional. sus estudios de postgrado los hizo en la Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica, obteniendo el grado de Magister en Eficiencia Energética. La mayor parte de su vida profesional la dedico al sector industrial y petrolero.

Actualmente está involucrado en las áreas de Energías Alternativas y Eficiencia Energética en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus intereses de investigación incluyen los métodos de GD con Energías alternativas, el IoT basándose en controladores de bajo consumo. Electrónica de Potencia, entre otros.

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS  
©2022 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DESPACHO MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA* realizado por Cristian Daniel Paspuel Valle, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., enero de 2022



Ing. Luis Fernando Tipán Vergara, MSc.

C.C.: 1717329005

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Cristian Daniel Paspuel Valle, con documento de identificación N° 1724164742, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., enero de 2022



Cristian Daniel Paspuel Valle

C.C.: 1724164742

## ***ÍNDICE GENERAL***

INTRODUCCIÓN .....	2
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Control y cubrimiento de la demanda eléctrica.....	4
2.2 Planeamiento de la operación en un sistema eléctrico .....	5
2.3 Operación Económica .....	6
2.4 Frente de Pareto.....	9
MODELACIÓN.....	11
3.1 Modelado de funciones objetivo .....	12
3.2 Restricciones aplicables .....	13
3.3 Satisfacción difusa y $\xi$ -constraint.....	14
3.4 Pseudocódigo .....	15
APLICACIÓN DEL MODELO.....	16
4.1 Esquemático de las áreas a modelar .....	16
4.2 Parque generador.....	16
4.3 Demanda.....	19
4.4 Enlaces entre áreas .....	20
4.5 Estudios .....	20
4.6 Parámetros para los estudios .....	21
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	21
5.1 Estudio o caso 1.....	21
5.2 Estudio o caso 2.....	23
5.3 Estudio o caso 3.....	28
5.4 Análisis comparativo.....	34
CONCLUSIONES .....	36
6.1 Trabajos futuros.....	36
REFERENCIAS.....	37
7.1 Matriz de Estado del Arte.....	42
7.2 Resumen de Indicadores.....	47

## ***ÍNDICE DE FIGURAS***

Figura 1. Despacho económico de áreas múltiples. ....	3
Figura 2. Ejemplo Frente de Pareto.....	9
Figura 3. Diagrama de flujo del modelo general de optimización multiobjetivo. ....	11
Figura 4. Esquemas de áreas interconectadas. ....	16
Figura 5. Probabilidad del recurso solar. ....	19
Figura 6. Probabilidad del recurso eólico. ....	19
Figura 7. Demanda horaria – área. ....	20
Figura 8. Despacho autónomo – Área 1.....	21
Figura 9. Despacho autónomo – Área 2.....	22
Figura 10. Despacho autónomo – Área 3.....	22
Figura 11. Despacho autónomo – Área 4.....	22
Figura 12. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 1.....	22
Figura 13. Costos despacho autónomo – Caso 1.....	23
Figura 14. Emisiones por área– Caso 1.....	23
Figura 15. Despacho Área 1 – Caso 2.....	23
Figura 16. Despacho Área 2 – Caso 2.....	24
Figura 17. Despacho Área 3 – Caso 2.....	25
Figura 18. Despacho Área 4 – Caso 2.....	26
Figura 19. Despacho para abastecimiento global – Caso 2.....	26
Figura 20. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 2.....	27
Figura 21. Costos despacho autónomo – Caso 2.....	28
Figura 22. Emisiones por área– Caso 2.....	27
Figura 23. Frente de Pareto – Caso 3.....	29
Figura 24. Despacho Área 1- Caso 3. ....	29
Figura 25. Despacho Área 2 – Caso 3.....	30
Figura 26. Despacho Área 3 – Caso 3.....	31
Figura 27. Despacho Área 4 – Caso 3.....	32
Figura 28. Despacho para abastecimiento global – Caso 3.....	32
Figura 29. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 3.....	33
Figura 30. Costos despacho autónomo – Caso 3.....	33

Figura 31. Emisiones por área– Caso 3.....	34
Figura 33. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte. ....	47
Figura 34. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	48
Figura 35. Indicador de solución - Estado del arte.....	48

### ***ÍNDICE DE TABLAS***

Tabla 1. Nomenclatura para el modelado. ....	12
Tabla 2. Representación para resolución. ....	15
Tabla 3. Ubicación y tecnología del parque generador.....	16
Tabla 4. Parámetros del parque generador térmico.....	16
Tabla 5. Coeficientes de la función de costos del parque generador térmico .....	17
Tabla 6. Coeficientes energéticos de la función de emisiones del parque generador térmico.....	17
Tabla 7. Factor de conversión para determinar emisiones del parque generador térmico. .....	17
Tabla 8. Parámetros del parque generador que usa energías renovables .....	18
Tabla 9. Probabilidad de uso del recurso eólico. ....	18
Tabla 10. Probabilidad de uso del recurso fotovoltaico.....	18
Tabla 11. Demanda por área. ....	19
Tabla 12. Parámetros de los enlaces de interconexión.....	20
Tabla 13. Energía por tecnología y área – Caso 1.....	22
Tabla 14. Costo por tecnología y área – Caso 1.....	22
Tabla 15. Emisiones de CO <sub>2</sub> – Caso 1. ....	23
Tabla 16. Intercambios de energía del Área 1 – Caso 2.....	24
Tabla 17. Intercambio neto del Área 1– Caso 2.....	24
Tabla 18. Intercambios de energía del Área 2 – Caso 2.....	24
Tabla 19. Intercambio neto del Área 2– Caso 2.....	25
Tabla 20. Intercambios de energía del Área 3 – Caso 2.....	25
Tabla 21. Intercambio neto del Área 3– Caso 2.....	25
Tabla 22. Intercambios de energía del Área 4 – Caso 2.....	26
Tabla 23. Intercambio neto del Área 4– Caso 2.....	26

Tabla 24. Energía por tecnología y área – Caso 2.....	26
Tabla 25. Costo por tecnología y área – Caso 2.....	27
Tabla 26. Emisiones de CO <sub>2</sub> – Caso 2. ....	27
Tabla 27. Resultados $\xi$ -constraint – Caso 3. ....	28
Tabla 28. Funciones unitarias– Caso 3. ....	29
Tabla 29. Intercambios de energía del Área 1 – Caso 3.....	30
Tabla 30. Intercambio neto del Área 1– Caso 3.....	30
Tabla 31. Intercambios de energía del Área 2 – Caso 3.....	30
Tabla 32. Intercambio neto del Área 2– Caso 3.....	31
Tabla 33. Intercambios de energía del Área 3 – Caso 3.....	31
Tabla 34. Intercambio neto del Área 3– Caso 3.....	31
Tabla 35. Intercambios de energía del Área 4 – Caso 3.....	32
Tabla 36. Intercambio neto del Área 4– Caso 3.....	32
Tabla 37. Energía por tecnología y área – Caso 3.....	32
Tabla 38. Costo por tecnología y área – Caso 3.....	33
Tabla 39. Emisiones de CO <sub>2</sub> – Caso 3. ....	34
Tabla 40. Comparativo de parámetros energéticos. ....	34
Tabla 41. Comparativo de parámetros energéticos. ....	34
Tabla 42. Comparativo de parámetros económico.....	35
Tabla 43. Comparativo de emisiones. ....	35
Tabla 44. Matriz de estado del arte .....	42

# DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

## Resumen

Los modelos matemáticos para solventar el problema de despacho económico a nivel de generación clásicamente se encuentran conducente a minimizar el costo operativo global del sistema, satisfaciendo el abastecimiento de la demanda en varios espacios de tiempo. En el momento actual, los sistemas de potencia reúnen una serie de generadores de fuentes de energía convencionales y renovables lo cual a más de una producción de energía económica ayuda en la mitigación de los gases de efecto invernadero. Por lo expuesto, el problema del despacho económico de generación puede ampliar su aplicación para el abastecimiento de la demanda en diferentes regiones y adicional se puede incorporar varias funciones objetivo cuyo resultado optimizará los recursos energéticos menorando los costos, obteniendo superioridades de tipo económico y técnico. Por esta razón, el presente documento plantea un modelo de optimización que determinará la potencia horaria de las distintas unidades de generación ubicadas en diferentes áreas del sistema eléctrico, que permita la minimización de las dos funciones objetivo, cumpliendo las restricciones técnicas, cuyo modelo obedece a un problema de programación no lineal que será resuelto aplicando GAMS.

**Palabras Clave:** Despacho de generación, Fuentes de energía renovables, Fuentes de generación, Optimización de Pareto.

## Abstract

The mathematical models to solve the problem of economic dispatch at the generation level are classically conducive to minimizing the overall operating cost of the system, satisfying the supply of demand in various periods of time. At the present time, power systems bring together a series of generators from conventional and renewable energy sources which, in addition to economic energy production, helps in the mitigation of greenhouse gases. Therefore, the problem of the economic dispatch of generation can broaden its application to supply demand in different regions and, additionally, several objective functions can be incorporated, the result of which will optimize energy resources reducing costs, obtaining economic and technical superiorities. For this reason, this document proposes an optimization model that will determine the hourly power of the different generation units located in different areas of the electrical system, which allows the minimization of the two objective functions, complying with the technical restrictions, whose model obeys a nonlinear programming problem that will be solved by applying GAMS.

**Keywords:** Power generation dispatch, Renewable energy sources, Power supplies, Pareto optimization.

# 1 Introducción

Dos de los aspectos más importantes y que se encuentran directamente relacionados a la generación y transmisión de energía eléctrica es la planificación de la operación y el abastecimiento de la demanda, formando conjuntamente un despacho económico de energía, ya que de ellos depende el uso favorable de recursos, la confiabilidad y sustentabilidad del sistema, por lo que en este estudio se tomará muy en cuenta estos factores esenciales en el área de la ingeniería eléctrica [1], [2].

La energía eléctrica en la actualidad es primordial en el desarrollo de la sociedad, por lo que se han creado diferentes tipos de generación, lamentablemente uno de ellos es la producción térmica, la cual continúa siendo indispensable hoy en día, sin embargo, este tipo de generación tiene daños colaterales los cuales son la creación de gases de efecto invernadero [3]. Por tal motivo se han desarrollado diferentes mecanismos para reducir estas emisiones, uno de ellos es el tratamiento y saneamiento de estos gases utilizando medidas primarias o secundarias, las primarias son las que mejoran la eficiencia térmica, es decir las que optimizan la combustión mediante el uso de carburantes fósiles con bajo nivel de nitrógeno y contenido de azufre, o también la aplicación de aditivos químicos; y las medidas secundarias se basan en el tratamiento y transformación de los gases ya carburados en gases aptos para la atmósfera [4].

Si bien estos procesos mencionados son beneficiosos en la reducción y tratamiento de las emisiones, se puede asegurar que también son procesos que requieren altos costos de inversión, tanto en la implementación de equipos como en el uso de combustibles alternativos y compuestos químicos adicionales, también se tiene que tomar en cuenta el diseño, instalación y mantenimiento de estos, por lo que es indispensable la

búsqueda y perfeccionamiento de otras alternativas más económicas y factibles, que ayuden a la reducción del uso de centrales térmicas y sus consecuencias ambientales, tales como el uso de energías renovables no convencionales, la optimización de recursos primarios sujetos a la ubicación geográfica y al perfeccionamiento del despacho [5].

Las energías renovables no convencionales (ERNC) en los últimos años han tenido grandes cambios en cuanto a avances tecnológicos y cobran cada vez más importancia en la producción de energía eléctrica mundial, en gran parte por su casi nula emisión de contaminantes y también por sus costos de producción relativamente bajos en comparación con otros tipos de generación [6]. Sin embargo, debido a su carácter altamente variable e impredecible causado por diferentes factores como la densidad y velocidad del viento para las turbinas eólicas o la temperatura y las irradiancias directa, indirecta y albedo en el caso de los paneles fotovoltaicos, entre otros; es necesario crear y planificar la operación y despacho de energía óptimo de este tipo de generación para que, conjuntamente con otras, exista una reducción de costos y optimización de recursos para formar un sistema eléctrico robusto y confiable en el tiempo [7].

Teniendo en cuenta lo ya mencionado se percibe de forma clara, la necesidad de un análisis profundo en el despacho de las centrales, que considere todos los factores correspondientes tanto en lo económico como en lo técnico, es decir en las restricciones propias del sistema, y en la reducción de costos la cual, en sí, es una de las funciones objetivo a desarrollar [8].

Ciertamente en la mayoría de los análisis del despacho óptimo de generación, la disminución de gastos es la meta principal, pero un factor que debería ser igualmente relevante es la reducción de emisiones de gases de

efecto invernadero, puesto que como ya sabemos estos son perjudiciales para el planeta y sus habitantes; por lo que se tomará en cuenta esto como otra de las funciones objetivo de este estudio [9].

En base a lo mencionado podemos decir que el despacho económico se fundamenta en determinar la opción más adecuada de todas las unidades de generación existente para abastecer la demanda de una zona preestablecida, sin embargo en la vida real no se puede aislar un área y trabajar solo con ella puesto que la mayoría de sistemas eléctricos tienen diferentes áreas internas conectadas entre ellas, por lo que se puede decir que un despacho óptimo debe tener en consideración todas las áreas aledañas a su alrededor y también todos los factores técnicos y económicos que estas conexiones representan, como el patrón de carga y generación de cada zona [10].

Lo que se quiere expresar en lo anteriormente mencionado es que, el despacho económico de simple área (DESA) es un caso de estudio que ya lleva años siendo investigado mientras que el despacho económico de múltiples áreas (DEMA) es un campo relativamente nuevo que amerita tener mayor investigación, por lo que se ahondará en este, tomando varias áreas

con diferentes tipos de generación y de cargas variables en tiempo [11].

Los despachos económicos de múltiples áreas (DEMA) se han convertido también en casos de estudio relevantes porque se ha detectado la necesidad de crear un modelo que considere los mismos inconvenientes que un (DESA) pero que a su vez adapte las restricciones de los enlaces y sus particularidades técnicas y económicas pertinentes, ya que actualmente los diferentes mercados eléctricos mundiales, buscan crear estas conexiones para optimizar sus recursos y sus reservas para formar un balance entre demanda y generación y solucionar sus problemas de pérdidas, por lo tanto los (DEMA) también favorecen desarrollo de procedimientos de despacho y operación, y fomentan la creación de tratados y convenios internacionales [12], [13].

Un componente esencial que tomar en cuenta en los despachos multiárea (DEMA) son las energías renovables no convencionales (ERNC) puesto que se conoce su alto índice de incertidumbre, por lo tanto, hay que tener en consideración que cada área posee características ambientales distintas; esto crea la exigencia de desarrollar modelos de despacho óptimos que compensen este

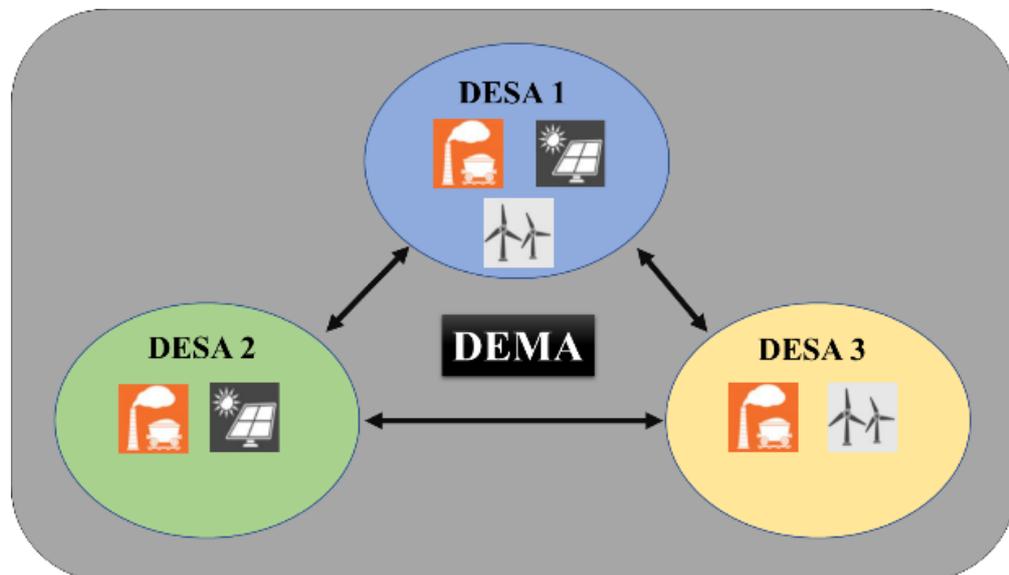


Figura 1. Despacho económico de áreas múltiples [autor].

inconveniente y puedan asegurar una operación confiable y eficiente del sistema regional o internacional tanto en el ámbito económico como técnico [14].

En consecuencia, a lo ya mencionado, los operadores de los sistemas eléctricos deben buscar métodos o mecanismos que predigan de la manera más exacta posible, las incertidumbres de despacho provocadas por la generación de energías renovables, en base a los cambios climáticos presentes y futuros y también teniendo en consideración el posible crecimiento de la demanda en cada área [7], [15]. Por ende, se puede resumir que todo sistema eléctrico debe buscar el óptimo despacho de energía, para abastecer a la demanda de forma segura y confiable y que a su vez optimice los recursos tanto económicos como ambientales; para esto debe existir una planificación de la operación del sistema a corto, mediano y largo plazo; esta planificación debe tomar en cuenta todas las restricciones posibles como el equilibrio de energía, los límites de generación y la capacidad de transmisión en las líneas de conexión, a su vez también debe considerar los cambios climáticos ya mencionados para reducir mediante modelos matemáticos la incertidumbre que generan las energías renovables [16].

Los métodos creados para resolver estos complejos problemas de despacho y planificación pueden ser heurísticos o deterministas y en muchos de los casos son híbridos debido a la gran cantidad de características y variables propias del sistema y sus ramificaciones. Existen varios modelos de cada tipo, como por ejemplo, en el método heurístico se encuentran el de la secante (SM) o también el de Colonia de Abejas Artificial (ABC) que es muy utilizado en la actualidad, mientras que en el método determinista la Programación Lineal (LP) y todas sus derivaciones es uno de los más conocidos, por otro lado en los métodos híbridos están la Programación

Evolutiva (EP), la célebre Optimización de Enjambre de Partículas (PSO), y también los de lógica difusa (FL), en el cual se centrará este artículo [17].

Debido a que el método aplicado en el presente estudio es el de lógica difusa, es necesario detallar que este fue utilizado para problemas multi objetivo por primera vez en 1978 por el ingeniero matemático H. J. Zimmermann, observando que los problemas de programación lineal multiobjetivo (LSMLP) a gran escala tenían muchos vacíos y eran inexactos, y definió que el tomador de decisiones (DM) puede tener una meta difusa para cada una de sus funciones objetivo. Estas funciones objetivas difusas (FOF) se pueden cuantificar mediante las funciones de pertenencia obtenidas por la interacción con el DM [18]. Esta técnica usa un método complementario como lo es el de restricción  $\varepsilon$  que concibe a grandes rasgos ya que, conserva un objetivo como función objetivo principal y transforma los demás objetivos en restricciones, convirtiendo el problema de multiobjetivo a uno de objetivo único [19]; y por tanto, con fin de cumplir los objetivos económicos y ambientales planteados en el presente trabajo, se usa este método híbrido de lógica difusa combinado con el de restricción  $\varepsilon$  para la obtención del frente de Pareto, permitirán determinar la solución óptima mediante la perspectiva de satisfacción difusa cumpliendo con el objetivo planteado.

## **2 Marco teórico**

### **2.1 Control y cubrimiento de la demanda eléctrica**

El aumento de la demanda eléctrica es constante y aleatorio, ya que cada vez se integran nuevas tecnologías, industrias o también por el crecimiento urbano y rural en algunos sectores. Por lo que es necesario realizar estudios de planificación que permitan proyectar estos diferentes escenarios y que

predigan la producción de energía necesaria para suplirlos. El abastecimiento es principalmente crear un equilibrio entre la demanda y la oferta, para que no exista déficit de generación y en casos de sobreproducción comercializarla de forma rentable para cubrir los costos de inversión efectuados [20]. Por lo que la demanda dependerá de tres factores esenciales [21]:

- El balance energético es decir las pérdidas e ingresos.
- El plan de expansión, lo cual viene a ser tanto en generación, transmisión y distribución.
- La compra y venta de energía basada en pliegos tarifarios y el costo marginal.

## **2.2 Planeamiento de la operación en un sistema eléctrico**

La proyección o planificación de la operación de un sistema eléctrico es un proceso global el cual está conformado por varias disciplinas que dependen unas de otras para una óptima planificación, estas disciplinas observan varios puntos, desde lo técnico como la ingeniería eléctrica de potencia, lo matemático-económico y también las telecomunicaciones y redes informáticas que son de vital importancia hoy en día para el monitoreo y control automatizado sobre el sistema eléctrico; estas disciplinas favorecen en la planeación para que el recurso de energía sea producido, transportado y entregado a la demanda de forma segura, confiable y económicamente accesible [22].

La planificación se basa principalmente en la conducta de la demanda, por sus características de consumo variable y creciente el sistema de potencia se ve afectado y debe reestructurarse para ser idóneo en el bastecimiento a la carga en aumento; el fin del planeamiento entonces es buscar prever y mantener un suministro de energía seguro que así pueda atenuar o controlar riesgos como el crecimiento y la capacidad de líneas de

transmisión y subtransmisión, el aumento y la ubicación geográfica de la demanda, el manejo y utilización de recursos renovables y no renovables y también que prevenga los riesgos económicos inherentes a cada uno de los sectores que comprenden el sistema [23]. Debido la necesidad de adaptabilidad del sistema eléctrico a la carga su análisis es altamente complejo y obliga al operador a incorporar el uso de programas, procedimientos y equipos que faciliten la toma de decisiones y acciones sobre todas las etapas que lo componen ya que un buen operador establece un sistema flexible ante fallas propias y ajenas dando confiabilidad y seguridad al usuario. Es decir, la planificación para la operación del sistema de potencia este compuesto por un camino de investigación que continuamente está en la búsqueda de los métodos más adecuados para la optimización con modelos exactos para el funcionamiento de las unidades del sistema eléctrico; estos modelos consideran las condiciones y restricciones físicas y operativas para que su comportamiento sea real [24], [25].

Con el objetivo de que se cumplan estos supuestos dentro de la planificación se establecen etapas en función de la extensión del periodo de estudio siendo la planeación a corto, medio y largo plazo [26]; para el desarrollo del presente estudio es necesario profundizar la proyección de corto plazo que a continuación se detalla.

### **2.2.1 Proyección a corto plazo (PCP)**

La planificación de la operación principalmente se clasifica según el horizonte temporal del modelo a seguir como se indicó, por lo que existen planificaciones a corto, mediano y largo plazo, cada una con sus ventajas y desventajas pero que juntas forman una visión holística de la planificación [27].

Este artículo se centrará en la planificación a corto plazo la cual está

comprendida desde horas hasta un tiempo máximo de un año, esta es trascendental porque toma en cuenta factores como las posibles fallas en las unidades de generación, el despacho económico, el flujo de energía y el mercado diario [28].

La planificación a corto plazo permite la optimización de costos de operación, al contrario de la planificación a largo plazo que optimiza los costos de inversión, en otras palabras, la planificación a largo plazo instala las tecnologías y la planificación a corto plazo optimiza el uso de estas tecnologías [29].

Entonces la planificación a corto plazo debe tener en cuenta las restricciones propias actuales del sistema, como los costos de operación, el valor y disponibilidad de recursos renovables y no renovables, la disponibilidad de uso de las plantas generadoras y la capacidad de las líneas de transmisión; de manera precisa y con una retroalimentación constante y efectiva, de esta forma el operador toma las decisiones adecuadas que optimicen todos los recursos y gastos posibles [30].

### **2.3 Operación Económica**

A este problema también se lo conoce como despacho económico y principalmente se basa en el abastecimiento de la demanda al menor costo posible, es decir coordinar la producción de todas las unidades disponibles de tal forma que se pueda abastecer al usuario de manera ininterrumpida y a las pérdidas pero que a su vez se minimicen los costos de operación de forma óptima sujeto a las condiciones de la operación y la red, por lo tanto el encontrar una solución requiere del desarrollo modelos matemáticos con entradas y salidas que caractericen al sistema para obtener una política óptima operativa para la entrada de servicio de las unidades de generación y el resto del sistema y así beneficiar a la

demanda, este proceso para el servicio del suministro de energía se denomina "unit commitment" o despacho económico [31].

El principal dilema en despacho económico es prever todas las restricciones de cada una de las unidades de generación y otros elementos como pueden ser su costo de operación propio, el factor de uso en el caso de las energías renovables no convencionales (ERNC), las pérdidas en la generación y transmisión, la cargabilidad de las líneas entre otros. También tiene que saber aprovechar de la mejor manera las bondades y características de cada una de las plantas de generación como su ubicación geográfica y la disponibilidad que posean [32], [33].

Otro elemento importante en el despacho económico es la coordinación que debe existir no solo entre las unidades pertenecientes a una región sino y muy probablemente a las existentes entre múltiples áreas que pueden ser regiones de una misma localidad o país para tomar el nombre de sistema interconectado e ir más allá considerando los beneficios de la comercialización entre países conocidas como transacciones internacionales de energía, esto con el fin de optimizar el control de la escasez o sobreproducción de energía que pueda existir por motivos técnicos o ambientales, y también para dinamizar el mercado eléctrico con métodos y técnicas de coproducción y enlace [34].

#### **2.3.1 Despacho de áreas múltiples**

El despacho económico de múltiples áreas (DEMA) es una evolución al ya conocido despacho económico de simple área (DESA), este cambio está relacionado con el crecimiento de la demanda lo cual provoca de forma paralela el aumento en las unidades de generación y de manera inherente se extiende geográficamente debido a la necesidad creciente del desarrollo social e industrial, en consecuencia existen

variaciones en y entre los sistemas de potencia, frente a este planteamiento es requerida la creación de modelos de despacho multiarea que principalmente busquen el intercambio de energía y la minimización de costos, teniendo en cuenta las restricciones propias y ajenas a cada sistema y subsistema [11].

La operación económica que se produce entre múltiples áreas depende mucho de las restricciones que cada región posea, como puede ser: el factor de uso de las tecnologías renovables, el costo de producción de las centrales térmicas, la cargabilidad de las líneas que interconectan las áreas, entre otras. Por tal motivo los operadores que trabajan de forma coordinada para controlar los intercambios de energía deben tener una óptima comunicación y conocimiento de cada uno de estos factores o restricciones, es decir deben poseer de forma libre los datos, registros y características de todas las áreas involucradas [35].

Distintos estudios [36], [37] determinan que cuando existe discordancia entre la demanda y la capacidad de un área, es necesario ajustar la generación de forma repetitiva e inclusive de forma inversa con la variación de la carga, por tal motivo la planificación del despacho en múltiples áreas a corto plazo tiene como objetivo suavizar la curva de generación diaria, esto se obtiene minimizando la desviación estándar de las series de generación, ya que de esta manera el costo de puesta en marcha y el de regulación de las unidades térmicas se reduce, así el nivel de salida es constante e idealmente plano. Otro beneficio de la planificación a corto plazo para múltiples áreas ocurre al simplificarse la generación programada, así se liberan más recursos para regular la incertidumbre de la demanda y de las energías renovables incorporadas y presentes en los sistemas eléctricos de potencia, es indispensable como método

de transmisión plantear un evento casi óptimo de minutos u horas de conexión entre áreas, basándose en la condición nominal y de esta forma establecer el intervalo de generación para cada área para que sea inmune a la incertidumbre.

Según el estudio realizado en [38], en un problema de despacho económico de múltiples áreas, se pretende alcanzar una reducción de costos o rendimiento económico en la operación de los sistemas interconectados, pero la tarea no es tan simple debido a la necesidad de un acercamiento profundo a la operación real de los sistemas involucrados y a los objetivos de las regiones, por lo que es indispensable la incorporación no solo factores técnicos y económicos sino que también ambientales, tarifarios, sociales y regulatorios en función de las estrategias de las regiones. Los objetivos en el despacho económico de las áreas involucradas pueden ser compartidos como no pueden ser, lo que involucra que conjuntamente optimicen uno o varios objetivos para beneficiar a los sistemas implicados y a sus cargas, o que primordialmente velen por sus objetivos independientes y si les es necesario se correlacionan con otras regiones para solventar sus necesidades o fallas, estos métodos son válidos para cumplir con el fin de que los estudios dentro de la gestión de la planificación sean viables [39]. En base a lo mencionado consecutivamente se detalla las características de un despacho económico que considera varias funciones objetivo que es un tópico indispensable definir ya que se relaciona con la elaboración de este estudio.

### **2.3.2 Despacho económico multiobjetivo**

Los modelos de optimización multiobjetivo originalmente se crearon para satisfacer tres áreas, la del equilibrio económico, la teoría de juegos y la matemática pura, donde los principales enfoques multiobjetivo son los de

optimización vectorial y los de escalarización. Existen varios métodos pertenecientes a cada uno de estos enfoques, como por el ejemplo el de criterio global ponderado, el método lexicográfico, el de intersección de límites normales o el célebre Arbitraje de Nash y método de producto objetivo, guiados a la aplicación y formación del frente de Pareto; este artículo se basará en el método de satisfacción difusa [40].

En la actualidad se han desarrollado varios modelos aplicados a diferentes campos de la ingeniería, entre ellos la ingeniería eléctrica, principalmente hablando de modelos de optimización económica junto con objetivos propios del área eléctrica los cuales han obtenido resultados favorables en su uso [9].

La optimización del despacho por lo general siempre se ha centrado en la minimización de los costos, sin embargo, se podría decir que el despacho tiene que abarcar de forma más diligente el optimizar otros objetivos, como en el caso de este estudio, el de minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, es por eso que se crea el despacho económico multiobjetivo el cual optimiza de forma paralela varias funciones lo cual implica un análisis un poco más profundo para lograr encontrar el resultado convergente más óptimo [41].

Tomando en cuenta la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático llevada a cabo en el célebre protocolo de Kioto, donde más de 190 países acordaron disminuir la emisión de gases de efecto invernadero tales como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [42]; muchas naciones hicieron hincapié en la investigación y creación de sistemas y modelos de generación sustentables teniendo como principales exponentes las energías renovables no convencionales o energías limpias, sin embargo también se tenía que optimizar los otros tipos de

generaciones ya existentes para tratar de reducir las emisiones, es aquí donde los modelos multiobjetivo toman relevancia al preponderar no solo la clásica reducción de costos como principal función sino también la reducción de emisiones, esto se logra en gran parte con el control y óptimo uso de las centrales térmicas, ya que su generación está estrechamente ligada a los dos ámbitos a tomar en cuenta, el económico y el ambiental [43].

Existen varias técnicas para la solución de despachos multiobjetivo económico-ambientales, las cuales se pueden dividir en tres categorías [44]:

- La primera toma la emisión como un límite admisible.
- La segunda maneja las emisiones como un objetivo diferente al del costo del combustible y de operación.
- La tercera se ocupa tanto de los costos como de las emisiones de forma paralela, viendo las funciones como objetivos competitivos y complejos.

Si bien cada tipo de categoría tiene diferencias marcadas como el nivel de complejidad y análisis, todas han demostrado resultados favorables en la búsqueda de satisfacer el despacho multiobjetivo de áreas múltiples (DEMA) en referencia a los objetivos marcados el económico y el ambiental.

Por esta razón en el trabajo de investigación planteado se considera el tipo de operación económica que se relaciona no solo a un sistema eléctrico si no al compuesto por varias áreas o regiones convirtiéndolos en sistemas de potencia interconectados; el problema de despacho propuesto es complejo debido a las variables y restricciones (técnicas, económicas y ambientales) involucradas y que además se propone dentro del problema de despacho el alistamiento de múltiples objetivos que se relacionan

dentro del estudio con las cuatro áreas o regiones independientes planteadas a través de una metodología seleccionada en este caso el método de satisfacción difusa para hallar la optimalidad de Pareto basada en conceptos del despacho económico, que considera restricciones asociadas al abastecimiento global de las demandas, restricciones de reserva, restricciones de rampas de subida y bajada de potencia de cada generador y restricciones de capacidad del enlace entre las distintas áreas. Como resultado del problema de optimización multiobjetivo multiarea se garantiza el abastecimiento de la demanda en un periodo establecido, permitiendo evaluar compras y ventas potenciales en un entorno de sistema de energía de múltiples áreas, involucrándose a la vez los costos operativos del sistema y los asociados al impacto ambiental.

## 2.4 Frente de Pareto

Existen varios procedimientos para resolver problemas de optimización multiobjetivo como el método de programación por metas o el de suma ponderada, sin embargo, la estrategia de optimización de Pareto es uno de los más utilizados en la actualidad. El uso del frente de Pareto se da principalmente porque a diferencia de los modelos monoobjetivo que tienen una única solución y los modelos multiobjetivo tienen varias, por lo que tiene que existir un barrido que pueda definir de forma óptima el mejor resultado de todos los factibles encontrados [45].

Una solución es óptima siempre que no empeore o mejore algún objetivo sin descomponer otro de manera simultánea. La curva del frente de Pareto está conformada por los ejes que son las funciones objetivo principal y secundarias, los puntos son las respuestas factibles a las funciones objetivo y entre estos se encuentra la solución óptima. Se presenta un ejemplo de curva de Pareto en la Figura 2 [46]:

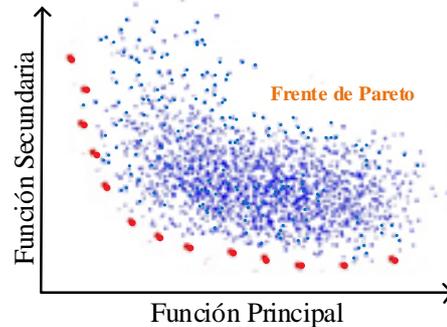


Figura 2. Ejemplo Frente de Pareto

### 2.4.1 Metodologías para la resolución de despachos multiobjetivo

Se han aplicado numerosos enfoques y metodologías de optimización como técnicas de programación matemática y algoritmos heurísticos para abordar y resolver problemas de optimización multiobjetivo, en el presente estudio son económico-ambientales, pero se incorporan un sin número de objetivos lo que incrementa la complejidad en la resolución.

#### 2.4.1.1 Optimización matemática convencional.

Los análisis de optimización matemática convencionales como la iteración lambda [47], Newton-Raphson [48], el método del punto interior [49] se ha implementado para abordar casos de operación económica multiarea DEMA.

Los métodos clásicos basados en el cálculo no pudieron determinar una solución óptima del frente de Pareto para los problemas de DEMA; en consecuencia, de su alto número de restricciones y características no lineales. Estos métodos convencionales convergen de forma prematura en un resultado local óptimo y son bastante susceptibles a los valores iniciales del sistema.

#### 2.4.1.2 Método de evolución diferencial

La Evolución Diferencial (ED) es una técnica poblacional relativamente reciente, fue propuesta originalmente por Storn y Price en 1995 como un método

heurístico para minimizar las funciones espaciales continuas no lineales y no diferenciables. El algoritmo ED se ha aplicado a varios campos de optimización de sistemas de energía [50].

La evaluación diferencial pertenece (ED) a la clase de algoritmos evolutivos que incluyen Estrategias de Evolución (EE) y algoritmos genéticos convencionales (AGC). La ED discierne de los algoritmos genéticos convencionales al utilizar vectores perturbadores, que son la diferencia entre dos vectores elegidos al azar. La evolución diferencial es un esquema mediante el cual genera los vectores de prueba a partir de un conjunto de poblaciones iniciales. En cada paso, los valores de los vectores mutan añadiéndoles diferenciales vectoriales aleatorios ponderados. Si los resultados del vector de prueba son mejores que los del vector objetivo, el vector de prueba reemplaza al vector objetivo en la siguiente iteración [51].

Según [52], al aplicarse la técnica de evolución diferencial en la resolución de DEMA y contrastar los resultados obtenidos con el mismo problema pero utilizando un método clásico convencional (Newton-Raphson) y un método heurístico clásico (Algoritmo Genético), se observan notables beneficios.

#### 2.4.1.3 Método de enjambre de partículas

La optimización de enjambre de partículas o por sus siglas en inglés (*PSO*), se ha desarrollado mediante la simulación de modelos sociales simplificados. Este algoritmo está motivado por el comportamiento de organismos encontrados en la naturaleza tales como bandadas de aves o cardúmenes y utiliza un procedimiento de búsqueda basado en la población. El algoritmo sondea en un espacio ajustando las trayectorias de vectores individuales, a los que se denomina

partículas, ya que se conceptualizan como puntos móviles en un espacio multidimensional. Las partículas individuales se dibujan estocásticamente hacia las posiciones de su mejor desempeño anterior y el mejor desempeño anterior de sus vecinas [53].

El método de enjambre se inicializa con un conjunto de partículas aleatorias y luego busca óptimos actualizando estados, cada partícula representa una solución factible al problema; en otras palabras, cada partícula representa un punto en el espacio de búsqueda multidimensional, en el que se va a determinar el punto óptimo. Cada partícula cambia de estado alrededor del espacio de búsqueda multidimensional hasta que se obtiene un estado relativamente inmutable o estado óptimo.

Utilizando PSO para la resolución de DEMA se puede ver que es de fácil implementación y diseño a comparación de los AGC, sin embargo, el número de iteraciones aumenta notablemente dependiendo de las variables [54].

#### 2.4.1.4 Restricción $\epsilon$

La restricción épsilon ( $\epsilon$ ) es una de las metodologías más usadas para resolver problemas multiobjetivo, fue propuesta en 1975 por, Lasdon, Wismer y Haines. Esta técnica consiste en transformar un modelo multiobjetivo en uno de objetivo simple, por medio de la selección de una función principal y con la conversión de las demás a restricciones que están asociadas a parámetros épsilon definidos por cada función objetivo secundaria [40].

$$\begin{aligned} \min & fp \\ \text{Sujeto a} & \left\{ \begin{array}{l} fs \leq \epsilon \\ \text{Restricciones} \\ \text{propias del sistema} \end{array} \right. \quad (1) \end{aligned}$$

Donde:

*fp* Función objetivo principal

*fs* Función objetivo secundaria

Por esta razón el problema multiobjetivo original puede resolverse al modificar el rango de valores de la condición de restricciones paso a paso. La restricción  $\varepsilon$  viene definida por la siguiente ecuación [19]:

$$\varepsilon = f_{s_{max}} - \frac{(f_{s_{max}} - f_{s_{min}})(c - 1)}{(c_{max} - 1)} \quad (2)$$

Donde:

c Ciclo

c\_max Número máximo de ciclos

### 2.4.1.5 Método de satisfacción difusa

Para lograr la coordinación del modelo multiobjetivo se aplica un enfoque de satisfacción difusa, el cual establece una compensación entre las funciones objetivo preestablecidas. Para esto en primer lugar se debe normalizar los valores objetivo en un sistema por unidad, luego se calcula el valor de la función de pertenencia de cada estrategia de operación del sistema y posteriormente se selecciona la mejor estrategia de todas las factibles encontradas. Este proceso viene representado en la Figura 3 [44].

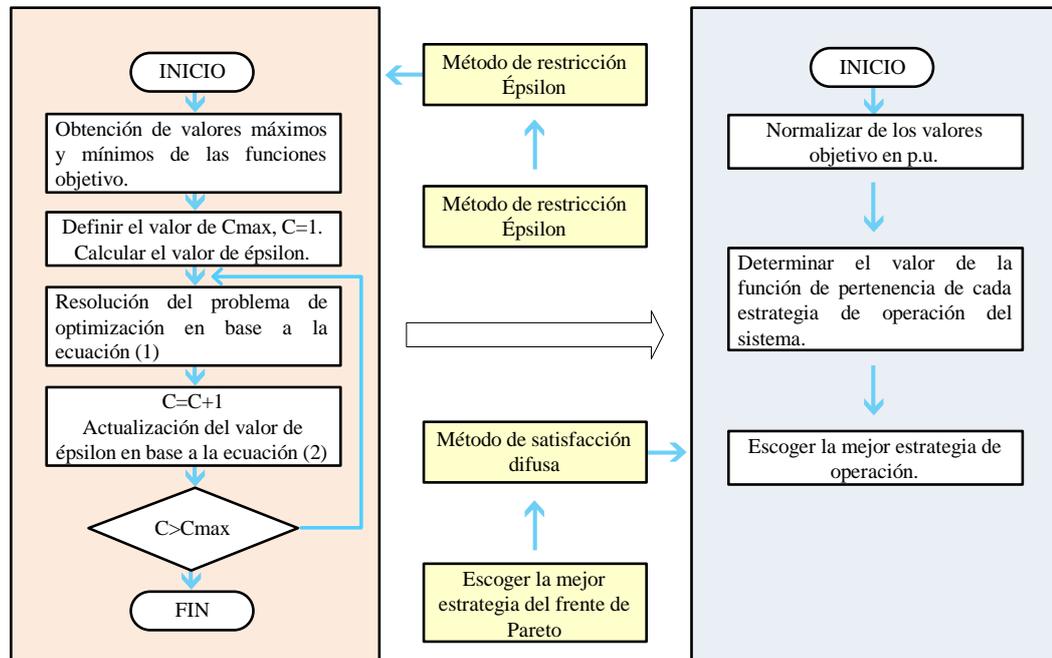


Figura 3. Diagrama de flujo del modelo general de optimización multiobjetivo.

El presente trabajo desarrollado usa el método híbrido de lógica difusa que se complementa con el de restricción épsilon, para la obtención del frente de Pareto y poder determinar la solución óptima cumpliendo con los objetivos económicos y ambientales planteados para regir la toma de decisiones sobre la generación en base a un despacho económico multiobjetivo para múltiples áreas.

## 3 Modelación

La formulación matemática a implementarse para resolver el problema de despacho multiobjetivo en sistemas de energía eléctrica en áreas múltiples conlleva a determinación de ecuaciones e inecuaciones que corresponden a un problema de optimización de programación no lineal, el resultado del modelo determinará la potencia horaria de las distintas unidades de generación

que se encuentran ubicados en diferentes áreas del sistema eléctrico cumpliendo las funciones objetivo, lo cual permitirá evaluar los aspectos técnicos y económicos en los sistemas eléctricos al aplicar modelos multiobjetivo en los intercambios de electricidad entre diversas áreas. La Tabla 1 describe la nomenclatura que se usará para el modelo matemático.

Tabla 1. Nomenclatura para el modelado.

$CO_T$	Costo operativo total del sistema.
$C_{gt}$	Costo total por la producción del parque generador térmico.
$C_W$	Costo total por la producción del parque generador eólico
$C_R$	Costo total por la producción del parque generador fotovoltaico
$S$	Índice de áreas modeladas
$P$	Índice de períodos de tiempo
$G$	Índice de generadores térmicos
$W$	Índice de generadores eólicos
$R$	Índice de generadores fotovoltaicos
$E$	Emisiones totales de CO <sub>2</sub>
$P_{g,s,p}$	Potencia generada por el generador térmico $g$ situado en el área $s$ en el período $p$
$A_{g,s}$	Factor de forma para la función polinómica de la función de costos del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$B_{g,s}$	Factor el desplazamiento para la función polinómica de la función de costos del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$C_{g,s}$	Constante para la función polinómica de la función de costos del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$P_{w,s,p}$	Potencia generada por el generador eólico $w$ situado en el área $s$ en el período $p$
$P_{r,s,p}$	Potencia generada por el generador fotovoltaico $r$ situado en el área $s$ en el período $p$
$\vartheta_{w,s}$	Precio de venta de energía del generador eólico $w$ situado en el área $s$ .
$\mu_{r,s}$	Precio de venta de energía del generador fotovoltaico $r$ situado en el área $s$ .
$d_{g,s}$	Factor de forma para la función polinómica de la función de

	emisiones del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$e_{g,s}$	Factor el desplazamiento para la función polinómica de la función de emisiones del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$f_{g,s}$	Constante para la función polinómica de la función de emisiones del generador térmico $g$ en el área $s$ .
$D_{s,p}$	Demanda en cada período $p$ por cada área $s$
$F_{s,j,p}$	Flujo intercambios entre el área $s$ y el área $j$ en cada período $p$
$LT_{s,j}$	Límite técnico o capacidad del enlace que interconecta el área $s$ con el área $j$ .
$p_{g,s}^{max}$	Límite máximo del generador $g$ ubicado en el área $s$ .
$p_{g,s}^{min}$	Límite mínimo del generador $g$ ubicado en el área $s$ .
$p_{w,s}^{max}$	Límite máximo del generador $w$ ubicado en el área $s$ .
$p_{r,s}^{max}$	Límite máximo del generador $r$ ubicado en el área $s$ .
$fu_{w,s}$	Ocurrencia del recurso del generador $w$ en el área $s$ .
$fu_{r,s}$	Ocurrencia del recurso del generador $r$ en el área $s$ .
$E_{g,s}$	Límite de entrega de energía del generador $g$ ubicado en el área $s$ para cada una de los periodos de tiempo
$T_{g,s}$	Límite de reducción de energía del generador $g$ ubicado en el área $s$ para cada una de los periodos de tiempo
$rv_s$	Porcentaje de reserva de potencia en el área $s$
$D_s^{max}$	Demanda máxima en el área $s$

### 3.1 Modelado de funciones objetivo

El modelo de optimización considera dos funciones objetivo, la primera asociada a la minimización de los costos asociados a operación de los generadores ubicados en cada área y la segunda relacionada con la minimización de emisiones, su formulación corresponde a la siguiente:

#### Función Objetivo: Costos operativos

$$CO_T = C_{gt} + C_W + C_R \quad (3)$$

$$C_{gt} = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_g^G A_{g,s} \cdot P_{g,s,p}^2 + B_{g,s} \cdot P_{g,s,p} + C_{g,s} \right] \quad (4)$$

$$C_W = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_w^W \vartheta_{w,s} \cdot P_{w,s,p} \right] \quad (5)$$

$$C_R = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_r^R \mu_{r,s} \cdot P_{r,s,p} \right] \quad (6)$$

### Función Objetivo: Emisiones

$$E = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_g^G d_{g,s} \cdot P_{g,s,p}^2 + e_{g,s} \cdot P_{g,s,p} + f_{g,s} \right] \quad (7)$$

## 3.2 Restricciones aplicables

El problema multiobjetivo establece restricciones asociadas a las características técnicas de las unidades de generación, los vínculos que interconectan las diversas áreas y el abastecimiento de la demanda, aspecto por el cual a continuación se detallan las restricciones con su descripción.

**a) Abastecimiento de la demanda:** La restricción garantiza que la producción de energía incluidos los aportes de los intercambios entre las áreas abastezcan la demanda en cada una de las áreas y por cada uno de los períodos de tiempo.

$$\sum_g^G P_{g,s,p} + \sum_w^W P_{w,s,p} + \sum_r^R P_{r,s,p} = D_{s,p} + \sum_{j \neq s}^S F_{s,j,p} \quad (8)$$

**b) Flujo intercambiado entre áreas:** A fin de garantizar que el flujo intercambiado entre las áreas no supere los límites técnicos del vínculo

que interconecta las áreas, se procede con el establecimiento de la siguiente inecuación.

$$F_{s,j,p} \leq LT_{s,j} \quad \forall s \neq j \quad (9)$$

**c) Bidireccionalidad de flujo entre áreas:** Con el objeto de modelar el intercambio de flujo entre áreas en pertinente establecer formulaciones matemáticas para modelar la bidireccionalidad del flujo de energía en una hora determinada y su relación con la capacidad del vínculo, para el efecto se desarrollan las siguientes restricciones.

$$-LT_{s,j} \leq F_{s,j,p} \quad \forall s \neq j \quad (10)$$

$$F_{s,j,p} = -F_{j,s,p} \quad \forall s \neq j \quad (11)$$

**d) Limitación técnica de producción de los generadores:** La potencia a ser despachada por parte de los generadores depende de factores técnicos asociados a la tecnología, es así que los generadores térmicos su producción se limitará a los límites máximos y mínimos de su capacidad nominal. De la misma forma, para los generadores que usan energías renovables a más de que su producción no debe sobre pasar sus límites técnicos, también debe observarse la afectación que tiene por el uso del recurso, la modelación para ambos casos se muestra en la siguiente formulación:

$$P_{g,s,p} \leq P_{g,s}^{max} \quad (12)$$

$$P_{g,s,p} \geq P_{g,s}^{min} \quad (13)$$

$$P_{w,s,p} \leq P_{w,s}^{max} \cdot fu_{w,s} \quad (14)$$

$$P_{r,s,p} \leq P_{r,s}^{max} \cdot fu_{r,s} \quad (15)$$

$$P_{w,s,p}, P_{r,s,p} \geq 0 \quad (16)$$

**e) Subida y bajada de potencia generada:** Los generadores con tecnología térmica para incrementar o

reducir su producción de energía en cada uno de los períodos horarios analizados se debe tener en cuenta sus limitaciones técnicas, para el efecto se establecen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} P_{g,s,p} - P_{g,s,p-1} \\ \leq E_{g,s} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P_{g,s,p-1} - P_{g,s,p} \\ \leq T_{g,a} \end{aligned} \quad (18)$$

**f) Reserva del sistema:** El abastecimiento de la demanda en cada área debe garantizarse incluyendo la reserva de potencia de cada área, cuya formulación corresponde a la siguiente:

$$\begin{aligned} \sum_g P_{g,s}^{max} + \sum_w P_{w,s}^{max} \cdot fu_{w,s} \\ + \sum_r P_{r,s}^{max} \cdot fu_{r,s} \geq (1 + rv_s) \cdot D_s^{max} \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.3 Satisfacción difusa y $\xi$ - constraint

El método de satisfacción difusa se aplica para resolver problemas de optimización con varias funciones objetivo, e tal sentido, el proceso de resolución comienza resolviendo el modelo problema matemático por cada una de las funciones objetivo, lo cual conlleva a la resolución en múltiples ocasiones del problema de optimización, cuyos resultados permitirán conseguir el frente de Pareto empleando la restricción  $\xi$  ( $\xi$  -constraint) [55]. Dado que el problema de optimización multiobjetivo tiende a minimizar las funciones objetivo, se empleará los siguientes pasos:

1. Resolver el problema de optimización de forma independiente por cada una de las funciones objetivo.

2. Establecer el valor mínimo de cada una de las funciones objetivo, por cada una de las resoluciones efectuadas.

3. Calcular una restricción ( $\xi$  -constraint); y para cada una de las funciones objetivo, se

$$h_x \leq \varepsilon \quad (20)$$

4. Variar  $\varepsilon$  desde un  $h_x^{min}$  hasta  $h_x^{max}$  tomando en cuenta la cantidad de eventos a simular ( $n$ ), maximizando en cada uno de los eventos la  $h_x$ , con base a la siguiente formulación que se presenta [56].

$$\varepsilon_x = h_x^{max} + \frac{[(h_x^{min} - h_x^{max}) \cdot A_i]}{An} \quad (21)$$

Donde:

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

An: Total de los eventos evaluados en el contador.

5. Cada valor obtenido al resolver cada evento usando  $\xi$ -constraint pertenece a una solución del modelo de optimización

6. El frente de Pareto estará formado por la cantidad de valores obtenidos al usar  $\xi$ -constraint.

Una vez determinada la frontera de Pareto, se empleará la metodología de satisfacción difusa, la cual establecerá el valor óptimo que de manera ecuánime satisface a las funciones objetivos. En tal sentido la metodología considera el uso de una función de pertinencia la cual indica el grado en que cada elemento de un universo dado, pertenece a dicho conjunto, su formulación de carácter general se describe a continuación.

$$\sigma^{h_x(F_\gamma)} = \begin{cases} 0 & \\ \frac{h_x^{max} - h_x(F_\gamma)}{h_x^{max} - h_x^{min}} & \text{si } h_x^{min} \leq h_x(F_\gamma) \leq h_x^{max} \end{cases} \quad (22)$$

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

$$\max(\min \sigma^{h_x(F_\gamma)}) \quad (23)$$

### 3.4 Pseudocódigo

Para aplicar el modelo matemático y obtener su resolución se deberán seguir algunas fases de forma secuencial, los cuales se describen en la Tabla 2. La aplicación de las fases es extrapolable independientemente de la escalabilidad del problema a resolver.

Tabla 2. Representación para resolución.

<b>Fase 1:</b>	- Determinación de las áreas y la curva carga a ser modelada 1. Períodos de demanda 2. Datos de demanda por área
<b>Fase 2:</b>	- Ingreso de datos de entrada de generadores 1. Capacidad de los generadores 2. Datos técnicos 3. Probabilidad del recurso renovable 4. Factores de emisión de CO <sub>2</sub> 5. Costos asociados a la producción
<b>Fase 3:</b>	- Ingreso de datos de los enlaces 1. Capacidad de los vínculos 2. Interconexión entre áreas
<b>Fase 4:</b>	Modelo de optimización Set conjunto de datos - Fase 1 - Fase 2 - Fase 3 Set Variables $F_{s,j,p}, P_{g,s,p}, P_{w,s,p}, P_{r,s,p}, CO_T, E$  Función Objetivo 1 $CO_T = C_{gt} + C_W + C_R$ $C_{gt} = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_g^G A_{g,s} \cdot P_{g,s,p}^2 + B_{g,s} \cdot P_{g,s,p} + C_{g,s} \right]$

$$C_W = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_w^W \vartheta_{w,s} \cdot P_{w,s,p} \right]$$

$$C_R = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_r^R \mu_{r,s} \cdot P_{r,s,p} \right]$$

Función Objetivo 2

$$E = \sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^p \left[ \sum_g^G d_{g,s} \cdot P_{g,s,p}^2 + e_{g,s} \cdot P_{g,s,p} + f_{g,s} \right]$$

Restricciones

$$\sum_g^G P_{g,s,p} + \sum_w^W P_{w,s,p} + \sum_r^R P_{r,s,p} = D_{s,p} + \sum_{j \neq s}^S F_{s,j,p}$$

$$F_{s,j,p} \leq LT_{s,j} \quad \forall s \neq j$$

$$-LT_{s,j} \leq F_{s,j,p} \quad \forall s \neq j$$

$$P_{g,s,p} \leq P_{g,s}^{max}$$

$$P_{g,s,p} \geq P_{g,s}^{min}$$

$$P_{w,s,p} \leq P_{w,s}^{max} \cdot fu_{w,s}$$

$$P_{r,s,p} \leq P_{r,s}^{max} \cdot fu_{r,s}$$

$$P_{w,s,p}, P_{r,s,p} \geq 0$$

$$P_{g,s,p} - P_{g,s,p-1} \leq E_{g,s}$$

$$P_{g,s,p-1} - P_{g,s,p} \leq T_{g,a}$$

$$\sum_g^G P_{g,s}^{max} + \sum_w^W P_{w,s}^{max} \cdot fu_{w,s} +$$

$$\sum_r^R P_{r,s}^{max} \cdot fu_{r,s} \geq (1 + rv_s) \cdot D_s^{max}$$

**Fase 5:** Ejecución del modelo en casos prácticos

**Fase 6:** Aplicación del  $\xi$ -constraint

**Fase 7:** Ejecución método de satisfacción difusa

**Fase 8:** Óptimo de Pareto

**Fase 9:** Fin

## 4 Aplicación del modelo

La formulación matemática será aplicada a un sistema cuyo detalle de los parámetros se desagrega a continuación.

### 4.1 Esquemático de las áreas a modelar

La cantidad de áreas a modelar ascenderá a una cantidad de cuatro, las cuales contendrán un parque generador con diversas tecnologías, una demanda horaria para un periodo de 24 horas y adicionalmente estas estarán interconectadas según lo mostrado en la Figura 4

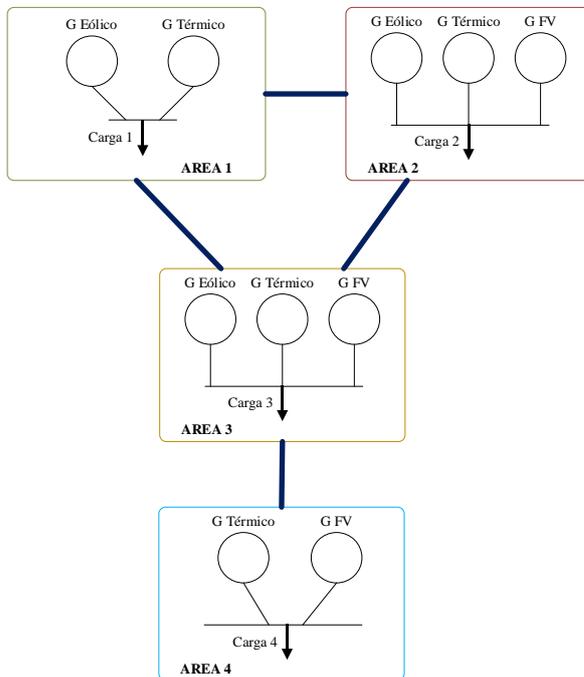


Figura 4. Esquemas de áreas interconectadas.

El detalle de los parámetros técnicos de los generadores, la carga y los vínculos se detallan en los siguientes numerales.

### 4.2 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 3.

Tabla 3. Ubicación y tecnología del parque generador.

Nombre	Tecnología	Ubicación
T1	Térmica	Área 1
T2	Térmica	
T3	Térmica	
T4	Térmica	
W1	Eólica	
T5	Térmica	Área 2
T6	Térmica	
T7	Térmica	
W2	Eólica	
FV1	Fotovoltaica	Área 3
T8	Térmica	
T9	Térmica	
T10	Térmica	
T11	Térmica	
W3	Eólica	
W4	Eólica	
FV2	Fotovoltaica	
T12	Térmica	
T13	Térmica	
T14	Térmica	Área 4
T15	Térmica	
FV3	Fotovoltaica	
FV4	Fotovoltaica	

Los datos y parámetros del parque generador con tecnología térmica independiente del área donde se ubiquen, fueron obtenidos considerando [57] y [58] los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros del parque generador térmico.

	$P_g^{min}$	$P_g^{max}$	$E_g$	$T_g$
	[MW]	[MW]	[MW/h]	[MW/h]
T1	20	150	45	45
T2	35	140	90	90
T3	30	230	100	100
T4	30	350	110	110
T5	10	130	35	35
T6	20	250	70	70

<b>T7</b>	35	250	100	100
<b>T8</b>	30	100	50	50
<b>T9</b>	60	200	75	75
<b>T10</b>	25	100	55	55
<b>T11</b>	40	250	100	100
<b>T12</b>	10	130	55	55
<b>T13</b>	20	250	100	100
<b>T14</b>	35	200	80	80
<b>T15</b>	30	100	50	50

Los coeficientes de la función de costos fueron obtenidos según lo establecido en [57], mientras que el factor asociado a las emisiones se obtienen usando los factores que consideran a la unidad de energía British thermal unit BTU según lo descrito en [59]. Los coeficientes para los costos y emisiones son los puntualizados en la Tabla 5 y Tabla 6, respectivamente.

Tabla 5. Coeficientes de la función de costos del parque generador térmico

	$A_g$	$B_g$	$C_g$
	[USD/MWh <sup>2</sup> ]	[cts/kWh]	[USD]
<b>T1</b>	0.00519	16.554	557.43
<b>T2</b>	0.00732	21.078	444.92
<b>T3</b>	0.00648	22.140	436.86
<b>T4</b>	0.00398	20.009	887.62
<b>T5</b>	0.00908	21.536	661.56
<b>T6</b>	0.00860	18.708	435.30
<b>T7</b>	0.00602	20.113	972.88
<b>T8</b>	0.00459	22.195	610.92
<b>T9</b>	0.00372	19.883	578.02
<b>T10</b>	0.00201	15.775	480.31
<b>T11</b>	0.00535	17.074	574.94
<b>T12</b>	0.00784	22.590	476.83
<b>T13</b>	0.00695	23.728	468.20
<b>T14</b>	0.00427	21.444	951.29
<b>T15</b>	0.00944	22.378	687.41

Tabla 6. Coeficientes energéticos de la función de emisiones del parque generador térmico.

	$F1_g$	$F2_g$	$F3_g$
	MBTU/MWh <sup>2</sup>	MBTU/kWh	MBTU
<b>T1</b>	0.0043	6.120	421.83
<b>T2</b>	0.0021	6.778	220.77

<b>T3</b>	0.0061	6.845	132.12
<b>T4</b>	0.0044	6.948	144.45
<b>T5</b>	0.0050	6.950	158.85
<b>T6</b>	0.0031	7.033	224.37
<b>T7</b>	0.0013	7.169	192.42
<b>T8</b>	0.0012	8.221	129.60
<b>T9</b>	0.0161	8.625	157.59
<b>T10</b>	0.0002	9.192	66.96
<b>T11</b>	0.0046	7.334	152.48
<b>T12</b>	0.0053	7.336	167.68
<b>T13</b>	0.0032	7.423	236.84
<b>T14</b>	0.0014	7.567	203.11
<b>T15</b>	0.0012	8.677	136.80

Con base a lo descrito en la Tabla 6 se procede a usar el factor de conversión  $\gamma_g$  obtenido según [59], el cual permite determinar los coeficientes de emisiones, el factor de conversión se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7. Factor de conversión para determinar emisiones del parque generador térmico.

	$\gamma_g$
	lb/MBTU
<b>T1</b>	1.577
<b>T2</b>	1.568
<b>T3</b>	2.860
<b>T4</b>	2.698
<b>T5</b>	2.328
<b>T6</b>	2.622
<b>T7</b>	2.964
<b>T8</b>	4.133
<b>T9</b>	3.781
<b>T10</b>	4.627
<b>T11</b>	2.860
<b>T12</b>	2.698
<b>T13</b>	2.328
<b>T14</b>	2.622
<b>T15</b>	2.964

Por parte, 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 [60], los cuales se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros del parque generador que usa energías renovables

	<b>Pnom</b>	<b>Tarifa</b>
	[MW]	[cts/kWh]
<b>W1</b>	380	6.5
<b>W2</b>	270	6.4
<b>W3</b>	300	7.3
<b>W4</b>	330	8.2
<b>FV1</b>	150	5.5
<b>FV2</b>	180	5.7
<b>FV3</b>	100	4.4
<b>FV4</b>	140	7.1

Adicional a lo descrito, a continuación, se tabula la probabilidad del recurso energético de las energías renovables a ser modeladas según lo descrito [61], [62], los cuales que se encuentran descritos en Tabla 9 y la Tabla 10, en función del tipo de tecnología.

Tabla 9. Probabilidad de uso del recurso eólico.

	<b>W1</b>	<b>W2</b>	<b>W3</b>	<b>W4</b>
<b>h1</b>	0.909	0.490	0.680	0.352
<b>h2</b>	0.858	0.644	0.619	0.533
<b>h3</b>	0.841	0.711	0.639	0.616
<b>h4</b>	0.855	0.649	0.555	0.661
<b>h5</b>	0.858	0.739	0.556	0.671
<b>h6</b>	0.896	0.731	0.745	0.631
<b>h7</b>	0.915	0.804	0.796	0.669
<b>h8</b>	0.926	0.831	0.760	0.656
<b>h9</b>	0.901	0.808	0.928	0.675
<b>h10</b>	0.855	0.985	1.000	0.852
<b>h11</b>	0.884	1.000	0.977	0.870
<b>h12</b>	0.888	0.988	0.866	0.895
<b>h13</b>	0.927	0.914	0.794	0.946
<b>h14</b>	0.904	0.905	0.773	0.912
<b>h15</b>	1.000	0.852	0.760	0.937
<b>h16</b>	0.954	0.848	0.785	0.973
<b>h17</b>	0.792	0.945	0.713	1.000

<b>h18</b>	0.684	0.912	0.681	0.981
<b>h19</b>	0.669	0.838	0.649	0.918
<b>h20</b>	0.772	0.752	0.576	0.853
<b>h21</b>	0.663	0.768	0.524	0.643
<b>h22</b>	0.651	0.714	0.546	0.582
<b>h23</b>	0.694	0.657	0.542	0.572
<b>h24</b>	0.892	0.556	0.629	0.653

Tabla 10. Probabilidad de uso del recurso fotovoltaico.

	<b>FV1</b>	<b>FV2</b>	<b>FV3</b>	<b>FV4</b>
<b>h1</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h2</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h3</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h4</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h5</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h6</b>	0.0120	0.0110	0.1013	0.0593
<b>h7</b>	0.0820	0.0780	0.2080	0.1038
<b>h8</b>	0.1520	0.0980	0.2474	0.2025
<b>h9</b>	0.2440	0.1980	0.5967	0.4847
<b>h10</b>	0.5080	0.3960	0.7928	0.6769
<b>h11</b>	0.8140	0.6860	0.8958	0.8779
<b>h12</b>	0.9320	1.0000	1.0000	0.9800
<b>h13</b>	1.0000	0.9300	0.9810	1.0000
<b>h14</b>	0.9640	0.7500	0.9051	0.7787
<b>h15</b>	0.7430	0.4900	0.7007	0.6087
<b>h16</b>	0.4320	0.3210	0.5190	0.4087
<b>h17</b>	0.2210	0.1030	0.2144	0.2101
<b>h18</b>	0.1230	0.0390	0.1193	0.1169
<b>h19</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h20</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h21</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h22</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h23</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>h24</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

De la Tabla 9 se procede a mostrar las tendencias de la probabilidad del uso del recurso energético eólico, lo cual se muestra en la Figura 5. Similar a lo indicado con el recurso eólico, en la Figura 6 se muestra la tendencia del recurso fotovoltaico.

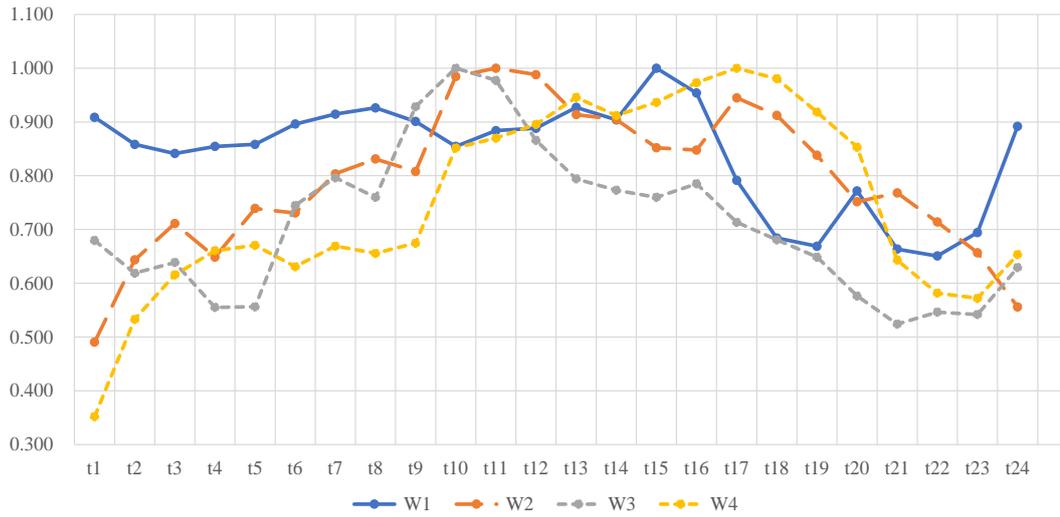


Figura 5. Probabilidad del recurso eólico.

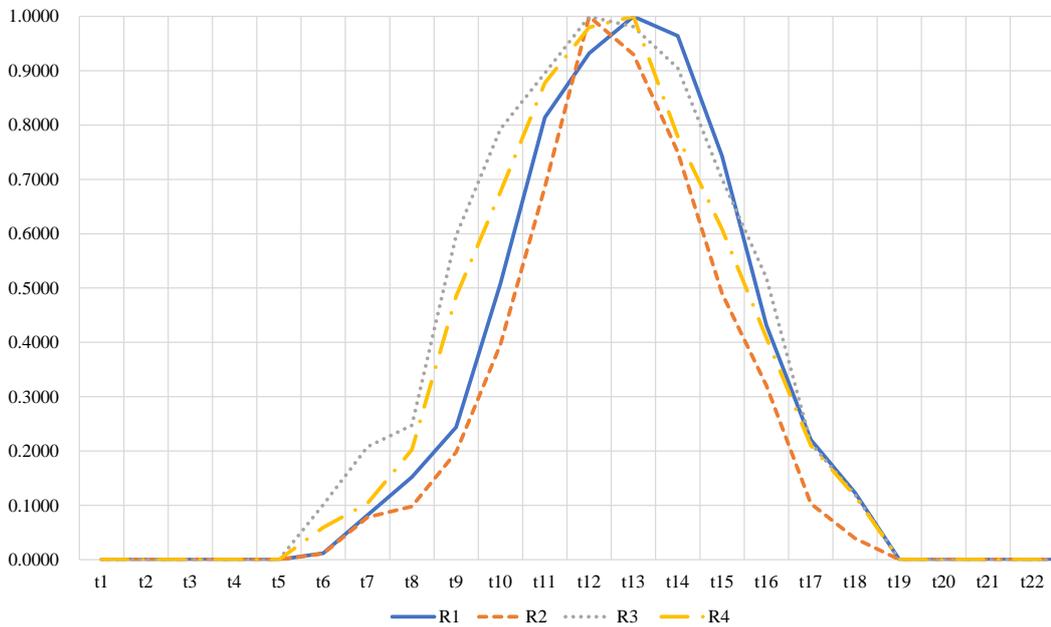


Figura 6. Probabilidad del recurso solar.

### 4.3 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 [58], resultado de lo cual se obtienen la Tabla 11.

Tabla 11. Demanda por área.

	Demanda (MW)			
	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
<b>h1</b>	271.04	187.79	211.71	237.53
<b>h2</b>	281.11	248.97	255.05	286.15
<b>h3</b>	356.19	222.23	276.75	310.50
<b>h4</b>	425.46	267.59	335.40	376.31
<b>h5</b>	428.61	292.09	355.29	398.62

<b>h6</b>	495.34	318.42	388.89	436.32
<b>h7</b>	417.84	319.20	341.54	383.19
<b>h8</b>	433.69	309.12	409.15	459.04
<b>h9</b>	577.26	357.87	384.87	431.80
<b>h10</b>	600.03	417.84	495.77	556.23
<b>h11</b>	691.78	436.15	470.71	528.11
<b>h12</b>	687.67	429.27	473.55	531.30
<b>h13</b>	595.06	408.38	482.38	541.20
<b>h14</b>	595.08	415.38	354.73	397.99
<b>h15</b>	578.15	404.27	390.89	438.56
<b>h16</b>	474.37	348.19	368.01	412.89
<b>h17</b>	504.25	275.19	335.36	376.26
<b>h18</b>	496.77	381.38	343.97	385.92
<b>h19</b>	621.62	396.88	374.54	420.21
<b>h20</b>	554.48	444.26	385.90	432.96
<b>h21</b>	527.36	389.97	344.57	386.59
<b>h22</b>	444.99	371.91	336.77	377.84
<b>h23</b>	462.96	274.27	211.81	237.64
<b>h24</b>	393.09	315.69	247.97	278.21

Considerando la Tabla 11, la curva de demanda horaria acumulada se ilustra en la Figura 7.

#### 4.4 Enlaces entre áreas

La Figura 4 describe es esquema general del sistema a modelar, de lo cual se muestra la interconexión de áreas, para la modelación es necesario conocer las capacidades de los vínculos, lo cual se

muestra en la Tabla 12 y cuyos valores son referenciados de conformidad a [63].

Tabla 12. Parámetros de los enlaces de interconexión.

Enlace	Capacidad (MW)
Área 1 - Área 2	200
Área 1 - Área 3	400
Área 2 - Área 3	600
Área 4 - Área 3	300

#### 4.5 Estudios

Con el fin de poder aplicar el modelo de optimización multiobjetivo se proponen tres tipos de estudios o casos, los cuales permitirán establecer resultados factibles de tipo técnico y económico en relación a la solución del problema matemático.

- ✓ **Estudio o caso 1:** 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. Los valores de las variables resultantes de este estudio serán comparados con respecto a los dos

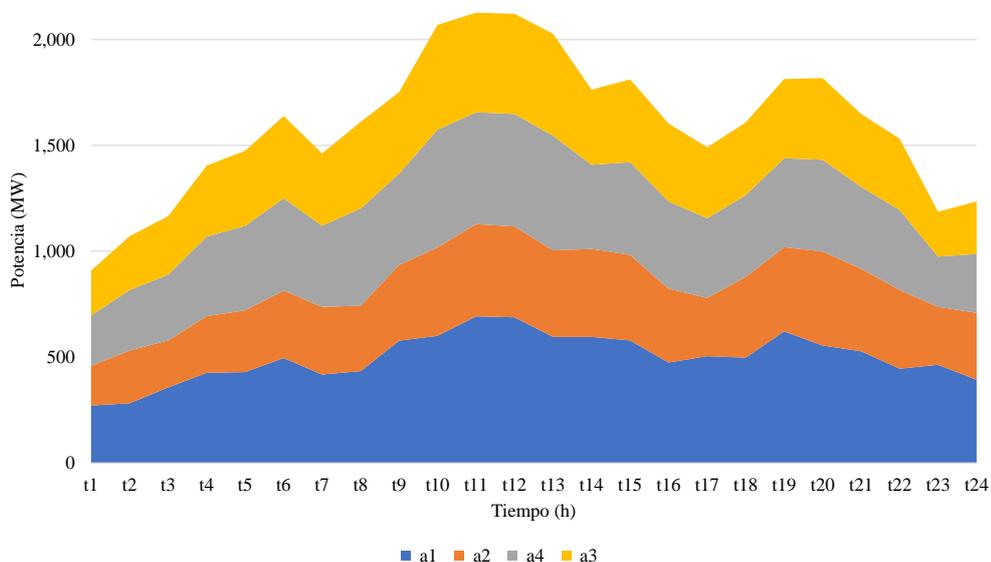


Figura 7. Demanda horaria – área.

estudios restantes para avalar los parámetros de tipo económico y técnico. En este estudio no se considera el modelamiento multiobjetivo.

- ✓ **Estudio o caso 2:** En este caso se modelará la interconexión de las distintas áreas propuestas, lo cual permitirá conocer la interacción de los generadores para el abastecimiento de la demanda en cada área. En este estudio no se considera el modelamiento multiobjetivo. Los resultados económicos y energéticos serán analizados y evaluados con el caso 1 y 3, lo que servirá para cuantificar variables técnicas y económicas.
- ✓ **Estudio o caso 3:** 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. Los resultados obtenidos serán examinados y comparados con los obtenidos en el caso 1 y 2.

#### 4.6 Parámetros para los estudios

Los estudios descritos en el numeral anterior deber considerar los siguientes parámetros:

- El área 1 está formada por cuatro generadores de tipo térmico con una capacidad total de 870 MW, una unidad eólica de una capacidad igual 380 MW, que se encuentra interconectada con el área 2 y 3.
- El área 2 está conformada por tres generadores de tipo térmicas cuya capacidad total corresponde a 630 MW, un generador fotovoltaico de una capacidad igual a 150 MW y un generador eólico de una capacidad igual a 270 MW, dicha área se interconecta con el área 1 y área 3.

- El área 3 tiene un parque generador de cuatro generadores térmicos con una capacidad total corresponde a 650 MW, dos unidades eólicas con una capacidad de 300 y 330 MW respectivamente y una unidad fotovoltaica de 180 MW, esta área se interconecta con las tres áreas restantes.
- El área 4 tiene un parque generador de 680 MW con tecnología térmica y dos generadores fotovoltaicos de 100 y 140 MW, la mencionada área se interconecta únicamente con el área 3.

## 5 Análisis de resultados

En el presente numeral se procederá a realizar el análisis de los resultados por cada uno de los estudios planteados, de los cuales se obtendrán los resultados de las variables de tipo energético y económico, el detalle se muestra a continuación.

### 5.1 Estudio o caso 1

El abastecimiento de la demanda por cada una de las áreas de forma autónoma por su propio parque de generación en función al despacho económico, conllevan a la determinación de los valores de las variables energéticas y económicas. Por lo tanto, en las siguientes ilustraciones se presentan el despacho por cada área y por tipo de tecnología.

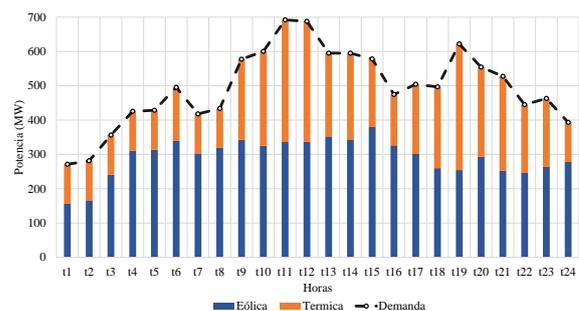


Figura 8. Despacho autónomo – Área 1

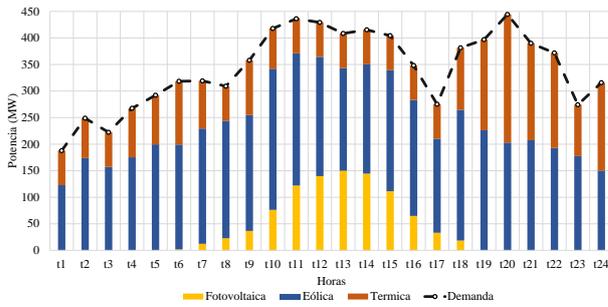


Figura 9. Despacho autónomo – Área 2

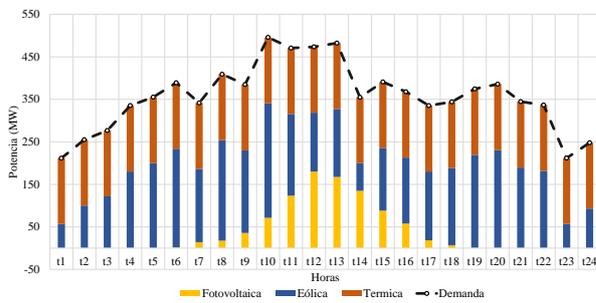


Figura 10. Despacho autónomo – Área 3

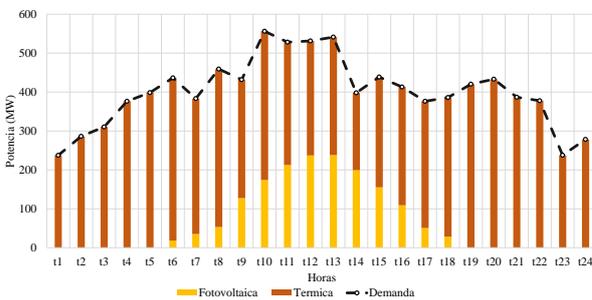


Figura 11. Despacho autónomo – Área 4

Como se muestra en las Figuras anteriores, la producción de energía del parque generador en cada área se despacha de forma económica y a su vez garantiza el abastecimiento de la demanda de forma autónoma. La Tabla 13 muestra los bloques energéticos por cada área y tecnología para el abastecimiento de la demanda autónoma.

Tabla 13. Energía por tecnología y área – Caso 1.

	Energía (GWh)			
	FV	E	T	Total
Área 1	-	7.04	4.87	11.91
Área 2	0.93	4.85	2.45	8.23
Área 3	0.92	3.94	3.72	8.58
Área 4	1.64	-	7.98	9.62
<b>Total</b>	<b>3.49</b>	<b>15.83</b>	<b>19.02</b>	<b>38.34</b>

Donde:  
FV: Fotovoltaico  
E: Eólico  
T: Térmico

De la Tabla 13 se observa que, del total de energía, la energía fotovoltaica representa el 9.1%, la energía eólica equivale al 41.3% y la energía de los generadores térmicos asciende a 49.6%. La ilustración por bloque de energía, por área y por tecnología se muestran en la Figura 12.

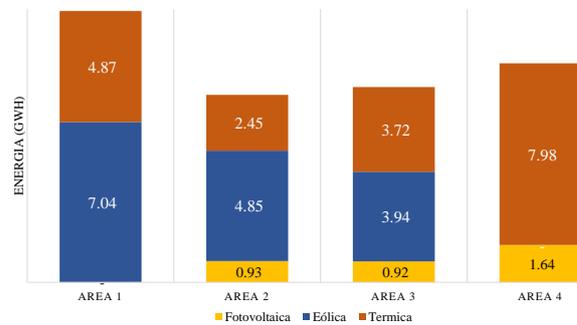


Figura 12. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 1.

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.

Tabla 14. Costo por tecnología y área – Caso 1.

	Costo (Millones USD)			
	FV	E	T	Total
Área 1	-	0.458	0.988	<b>1.446</b>
Área 2	0.051	0.310	0.528	<b>0.890</b>
Área 3	0.052	0.289	0.759	<b>1.101</b>
Área 4	0.097	-	1.821	<b>1.918</b>
<b>Total</b>	<b>0.200</b>	<b>1.057</b>	<b>4.097</b>	<b>5.354</b>

Donde:  
FV: Fotovoltaico  
E: Eólico  
T: Térmico

De la Tabla 14 el 76.5% del costo total corresponde a la generación de tipo térmico, mientras que el 19.7% corresponde al costo de generación eólico y el 3.7% es el porcentaje del costo de la generación fotovoltaica. Los valores de los costos por tecnología y área se muestran en la Figura 13.

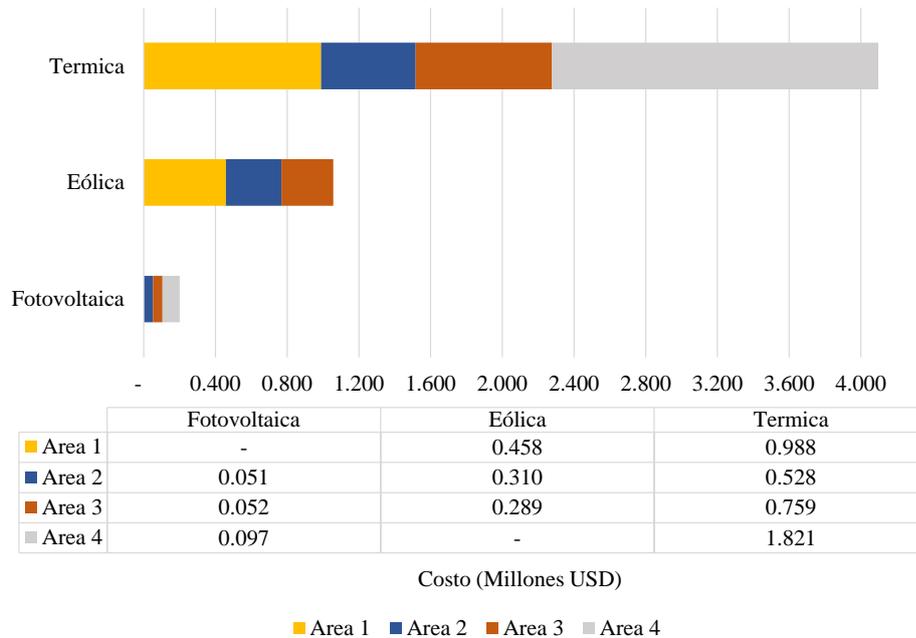


Figura 13. Costos despacho autónomo – Caso 1.

Finalmente, se evalúa las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la producción de la energía de los generadores térmicos, resultado de lo cual, por cada área se muestran la cantidad de emisiones en la Tabla 15 y su ilustración en la Figura 14.

Tabla 15. Emisiones de CO<sub>2</sub> – Caso 1.

Emisiones (Toneladas CO <sub>2</sub> )	
Área 1	6,711.35
Área 2	4,721.48
Área 3	11,730.99
Área 4	16,850.79
<b>Total</b>	<b>40,014.60</b>

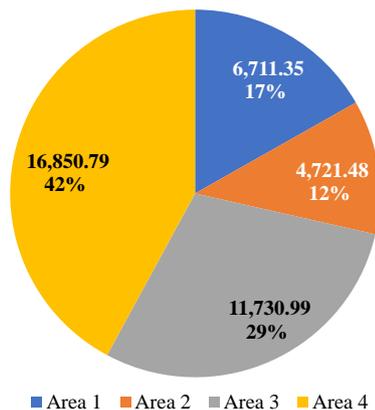


Figura 14. Emisiones por área– Caso 1.

De la Figura 14, 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 12%. Los porcentajes son calculados con respecto a la cantidad total que corresponde a 40014.00 toneladas de CO<sub>2</sub>.

## 5.2 Estudio o caso 2

En este estudio se procede a la interconexión de las cuatro áreas modeladas y se procederá con el despacho económico. Como resultado de esta modelación se obtendrá, a más de la generación despachada, los intercambios entre áreas a fin de desplazar una producción de generación costosa, en tal razón, el despacho efectuado en cada una de las áreas se muestra en la ilustración subsiguiente.

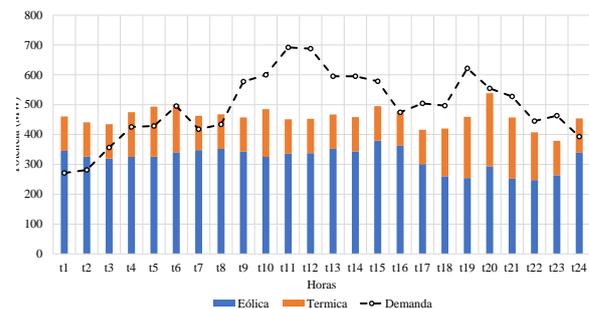


Figura 15. Despacho Área 1 – Caso 2.

La Figura 15 muestra que la generación propia del área 1 se ve reducida en la mayor parte del tiempo dado el abastecimiento de la demanda proviene de las áreas interconectadas, sin embargo, en horas de la mañana se deduce que la producción del parque generador 1 entrega energía a las áreas interconectadas, el intercambio energético se presenta en la Tabla 16.

Tabla 16. Intercambios de energía del Área 1– Caso 2.

	Intercambio Área 1 (MWh)	
	Área 2	Área 3
h1	-13.83	203.21
h2	53.26	106.67
h3	-200.00	278.39
h4	20.90	28.54
h5	200.00	-135.38
h6	3.32	1.82
h7	19.75	25.11
h8	-9.97	43.95
h9	-200.00	80.12
h10	14.75	-129.88
h11	-115.86	-125.00
h12	164.77	-400.00
h13	-200.00	72.20
h14	-58.05	-78.51
h15	-200.00	116.85
h16	-200.00	203.15
h17	-200.00	111.71
h18	21.46	-98.31
h19	200.00	-362.40
h20	200.00	-216.12
h21	68.83	-139.25
h22	-95.59	57.98
h23	-78.63	-5.61
h24	66.84	-5.97

De la Tabla 16 se procede a determinar los valores netos en la entrega o recepción de energía con respecto a área 1, cuyos resultados se presentan en la Tabla 17, de lo cual se observa que existe en el neteo el área 1 recibe 904,78 MWh en el período de análisis.

Tabla 17. Intercambio neto del Área 1– Caso 2.

	Energía (MWh)		
	Área 2	Área 3	Total
Entrega	1033.89	1329.70	2363.58
Recepción	-1571.94	-1696.43	-3268.36
Neteo	-538.05	-366.73	-904.78

Así mismo, se procede al análisis con respecto al área 2, resultado de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 16.

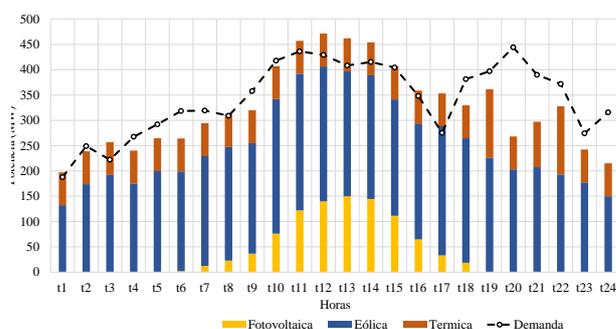


Figura 16. Despacho Área 2 – Caso 2.

De la Figura 16 se puede indicar que, en el período de la demanda máxima, el área 2 toma energía de las áreas interconectadas, mientras que, en períodos de demanda media, el área 2 entrega energía a las demás áreas, el intercambio de energía, se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18. Intercambios de energía del Área 2– Caso 2.

	Intercambio Área 2 (MWh)	
	Área 1	Área 3
h1	-4.32	13.83
h2	43.17	-53.26
h3	-165.26	200.00
h4	-6.46	-20.90
h5	172.44	-200.00
h6	-50.93	-3.32
h7	-5.07	-19.75
h8	-6.92	9.97
h9	-238.11	200.00
h10	4.06	-14.75
h11	-94.91	115.86
h12	207.06	-164.77

<b>h13</b>	-146.60	200.00
<b>h14</b>	-19.48	58.05
<b>h15</b>	-197.78	200.00
<b>h16</b>	-189.43	200.00
<b>h17</b>	-121.89	200.00
<b>h18</b>	-30.23	-21.46
<b>h19</b>	164.38	-200.00
<b>h20</b>	23.78	-200.00
<b>h21</b>	-23.98	-68.83
<b>h22</b>	-139.72	95.59
<b>h23</b>	-110.51	78.63
<b>h24</b>	-33.73	-66.84

De la Tabla 18 se puede señalar que el neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía recibida, la Tabla 19 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 19. Intercambio neto del Área 2– Caso 2.

	Energía (MWh)		
	Área 2	Área 3	Total
<b>Entrega</b>	614.89	1571.94	2186.83
<b>Recepción</b>	-1585.33	-1033.89	-2619.22
<b>Neteo</b>	-970.44	538.05	-432.39

De forma similar se procede a realizar el análisis del área 3, de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 17.

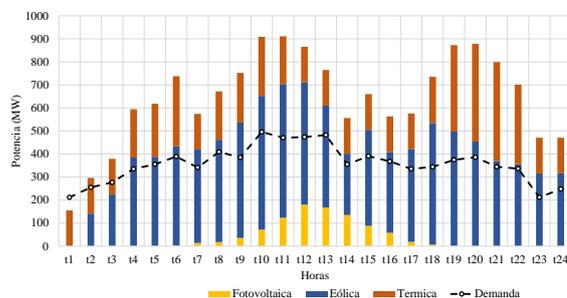


Figura 17. Despacho Área 3 – Caso 2.

De la Figura 17 se puede citar que esta área es la que exporta gran parte de energía a las cuatro áreas, ya que la mayor parte de la energía producida corresponde a energía económica, a fin de establecer los intercambios de energía a las demás

áreas, se describe sus valores en la Tabla 20.

Tabla 20. Intercambios de energía del Área 3 – Caso 2

	Intercambio Área 3 (MW)		
	Área 2	Área 1	Área 4
<b>h1</b>	4.32	-203.21	142.53
<b>h2</b>	-43.17	-106.67	191.15
<b>h3</b>	165.26	-278.39	215.50
<b>h4</b>	6.46	-28.54	281.31
<b>h5</b>	-172.44	135.38	300.00
<b>h6</b>	50.93	-1.82	300.00
<b>h7</b>	5.07	-25.11	252.86
<b>h8</b>	6.92	-43.95	300.00
<b>h9</b>	238.11	-80.12	209.27
<b>h10</b>	-4.06	129.88	287.18
<b>h11</b>	94.91	125.00	220.62
<b>h12</b>	-207.06	400.00	199.10
<b>h13</b>	146.60	-72.20	208.10
<b>h14</b>	19.48	78.51	103.46
<b>h15</b>	197.78	-116.85	188.27
<b>h16</b>	189.43	-203.15	208.77
<b>h17</b>	121.89	-111.71	230.41
<b>h18</b>	30.23	98.31	262.62
<b>h19</b>	-164.38	362.40	300.00
<b>h20</b>	-23.78	216.12	300.00
<b>h21</b>	23.98	139.25	291.59
<b>h22</b>	139.72	-57.98	282.84
<b>h23</b>	110.51	5.61	142.64
<b>h24</b>	33.73	5.97	183.21

De la Tabla 20 se observa que, si bien el área 3 recibe energía de forma esporádica, la gran parte del período de análisis entrega energía sobre todo al área 4, el valor neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía entregada, la Tabla 21 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 21. Intercambio neto del Área 3– Caso 2.

	Energía (MWh)			
	Área 1	Área 2	Área 4	Total
<b>Entrega</b>	1585.33	1696.43	5601.44	<b>8883.20</b>
<b>Recepción</b>	-614.89	-1329.70	0.00	<b>-1944.5</b>
<b>Neteo</b>	<b>970.44</b>	<b>366.73</b>	<b>5601.44</b>	<b>6938.61</b>

De forma similar se procede a realizar el análisis del área 4, de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 18.

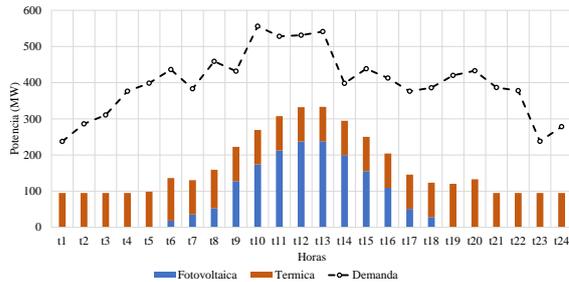


Figura 18. Despacho Área 4 – Caso 2.

De la Figura 18 se puede citar que esta área es la que importa gran parte de energía del área 3, ya que la mayor parte de la energía producida corresponde a energía económica, a fin de establecer los intercambios de energía a las demás áreas, se describe sus valores en la Tabla 22.

Tabla 22. Intercambios de energía del Área 4 –Caso 2.

Intercambio Área 4 (MW)	
	Área 3
h1	-142.53
h2	-191.15
h3	-215.50
h4	-281.31
h5	-300.00
h6	-300.00
h7	-252.86
h8	-300.00
h9	-209.27
h10	-287.18
h11	-220.62
h12	-199.10
h13	-208.10
h14	-103.46
h15	-188.27
h16	-208.77
h17	-230.41
h18	-262.62
h19	-300.00
h20	-300.00
h21	-291.59
h22	-282.84
h23	-142.64
h24	-183.21

De la Tabla 22 se observa que, existe una importante importación del área 3, el valor neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía recibida, la Tabla 23 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 23. Intercambio neto del Área 4– Caso 2.

Energía (MWh)		
	Área 4	Total
Entrega	0.00	0.00
Recepción	-5601.44	-5601.44
Neteo	-5601.44	-5601.44

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 19.

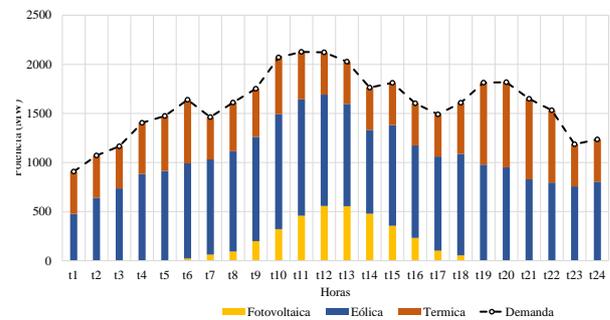


Figura 19. Despacho para abastecimiento global – Caso 2

De la Figura 19 se muestra que efectivamente el despacho multiarea se cumple y se abastece la demanda global. A continuación, por cada área se presentará los bloques de energía por tipo de tecnología.

Tabla 24. Energía por tecnología y área – Caso 2.

Energía (GWh)				
	FV	E	T	Total
Área 1	-	7.67	3.34	11.01
Área 2	0.93	5.14	1.72	7.80
Área 3	0.92	9.33	5.27	15.51
Área 4	1.64	-	2.38	4.02
<b>Total</b>	<b>3.49</b>	<b>22.14</b>	<b>12.71</b>	<b>38.34</b>

Donde:  
 FV: Fotovoltaico  
 E: Eólico  
 T: Térmico

De la Tabla 24 se observa que, del total de energía, la energía fotovoltaica representa el 9.1%, la energía eólica equivale al 57.7% y la energía de los generadores térmicos asciende a 33.2%. La ilustración por bloque de energía, por área y por tecnología se muestran en la Figura 20.

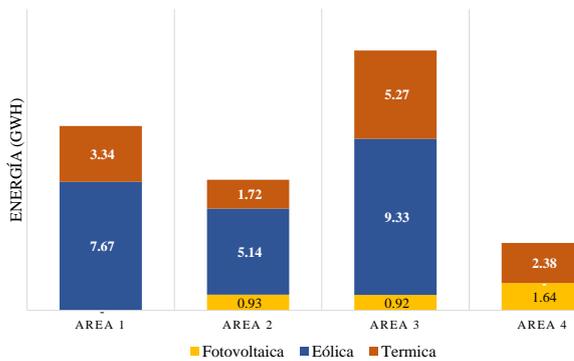


Figura 20. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 2.

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 25. Costo por tecnología y área – Caso 2.

	Costo (Millones USD)			
	FV	E	T	Total
Área 1	-	0.499	0.712	<b>1.211</b>
Área 2	0.051	0.329	0.391	<b>0.772</b>
Área 3	0.052	0.721	1.017	<b>1.790</b>
Área 4	0.097	-	0.593	<b>0.690</b>
<b>Total</b>	<b>0.200</b>	<b>1.549</b>	<b>2.714</b>	<b>4.463</b>

Donde:  
 FV: Fotovoltaico  
 E: Eólico  
 T: Térmico

De la Tabla 25 el 60.8% del costo total corresponde a la generación de tipo térmico, mientras que el 34.7% corresponde al costo de generación eólico y el 4.5% es el porcentaje del costo de la generación fotovoltaica. Los valores de los costos por tecnología y área se muestran en la Figura 21.

Finalmente, se evalúa la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten por la producción de energía mediante los generadores térmicos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 26 y se ilustran en la Figura 22.

Tabla 26. Emisiones de CO<sub>2</sub> – Caso 2.

Emisiones (Toneladas CO <sub>2</sub> )	
Área 1	4,692.98
Área 2	3,379.07
Área 3	16,612.67
Área 4	5,043.79
<b>Total</b>	<b>29,728.50</b>

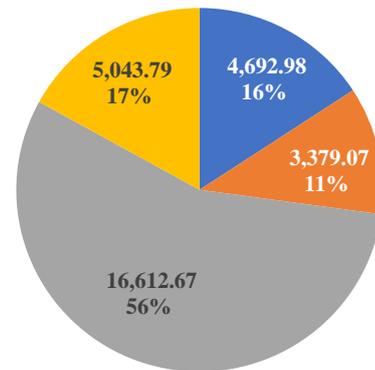


Figura 21. Emisiones por área – Caso 2.

De la Figura 22 se observa que a comparación del Estudio 1 el valor de emisiones totales se resta minimizan en un 26% obteniéndose un valor total de 29728.50 toneladas de CO<sub>2</sub>. El 56% de ese valor corresponde a las emisiones emanadas del área 3, mientras que el área 2 produce el mínimo de cantidad de emisiones el cual asciende al 11%.

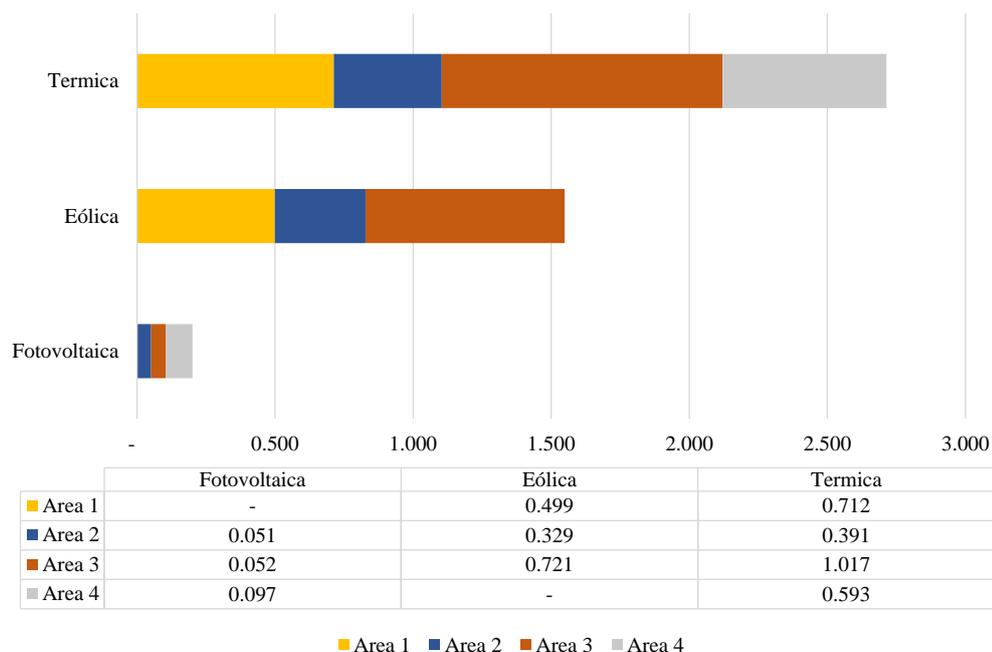


Figura 22. Costos despacho autónomo – Caso 2.

### 5.3 Estudio o caso 3

En este estudio se procede a usar el modelo de optimización multiobjetivo, en tal sentido, se procede a emplear el método  $\xi$ -constraint, para el efecto se procede a establecer 20 eventos, por cada evento se resolverá un problema de optimización multiobjetivo, obteniendo como resultado los valores de las funciones objetivo, las cuales determinarán el frente de Pareto, por lo tanto, una vez resueltos los 20 eventos, sus resultados se muestran tabulados en la Tabla 27

<b>Ev9</b>	28.49	4.47	28.49
<b>Ev10</b>	28.34	4.47	28.34
<b>Ev11</b>	28.18	4.47	28.18
<b>Ev12</b>	28.03	4.47	28.03
<b>Ev13</b>	27.87	4.48	27.87
<b>Ev14</b>	27.72	4.48	27.72
<b>Ev15</b>	27.56	4.48	27.56
<b>Ev16</b>	27.41	4.49	27.41
<b>Ev17</b>	27.25	4.49	27.25
<b>Ev18</b>	27.10	4.50	27.10
<b>Ev19</b>	26.94	4.51	26.94
<b>Ev20</b>	26.79	4.54	26.79

Tabla 27. Resultados  $\xi$ -constraint – Caso 3.

	$\xi$ Mil Ton	CT MMUSD	EM Mil Ton
<b>Ev1</b>	29.73	4.46	29.73
<b>Ev2</b>	29.57	4.46	29.57
<b>Ev3</b>	29.42	4.46	29.42
<b>Ev4</b>	29.26	4.46	29.26
<b>Ev5</b>	29.11	4.46	29.11
<b>Ev6</b>	28.95	4.46	28.95
<b>Ev7</b>	28.80	4.47	28.80
<b>Ev8</b>	28.65	4.47	28.65

Con los resultados de la Tabla 27 se obtiene el frente de Pareto, el cual se ilustra en la Figura 23.

Con el frente de Pareto obtenido, se procede a aplicar la metodología de satisfacción, en tal sentido se procede a hallar las funciones de pertenencia o funciones unitarias tomando en cuenta los máximos y mínimos de los valores

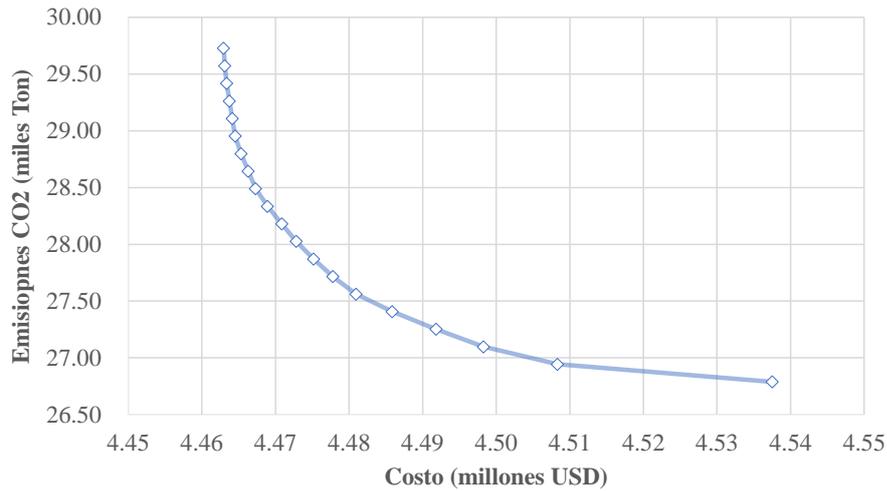


Figura 23. Frente de Pareto – Caso 3.

obtenidos para cada función objetivo, obteniéndose la Tabla 28.

Tabla 28. Funciones unitarias– Caso 3.

	$g_c$	$g_{Em}$	$Min$ ( $g_c; g_{Em}$ )
Ev1	1.0000	0.000	0.000
Ev2	0.9978	0.053	0.053
Ev3	0.9945	0.105	0.105
Ev4	0.9894	0.158	0.158
Ev5	0.9842	0.211	0.211
Ev6	0.9789	0.263	0.263
Ev7	0.9682	0.316	0.316
Ev8	0.9552	0.368	0.368
Ev9	0.9418	0.421	0.421
Ev10	0.9199	0.474	0.474
Ev11	0.8940	0.526	0.526
Ev12	0.8677	0.579	0.579
Ev13	0.8361	0.632	0.632
Ev14	0.8009	0.684	0.684
Ev15	0.7587	0.737	0.737
Ev16	0.6927	0.789	0.693
Ev17	0.6128	0.842	0.613
Ev18	0.5263	0.895	0.526
Ev19	0.3918	0.947	0.392
Ev20	-	1.000	0.000

De la Tabla 28, se procede a encontrar el evento que maximiza la satisfacción mínima entre las dos funciones objetivo, cuyo resultado corresponde al valor de 0,737 el cual corresponde al **evento 15**, en ese contexto este evento es

denominado el óptimo de Pareto. Por lo descrito, se procede a analizar los resultados obtenidos en el evento 15 (óptimo de Pareto).

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.

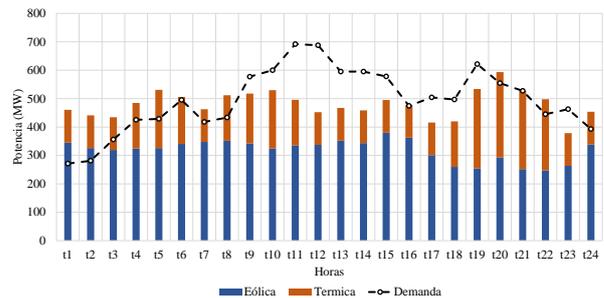


Figura 24. Despacho Área 1- Caso 3.

La Figura 24 muestra que la generación propia del área 1 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, así mismo se observa que a comparación del caso 2, existe un incremento de generación en demanda media y punta, el intercambio energético se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Intercambios de energía del Área 1– Caso 3.

	Intercambio Área 1 (MWh)	
	Área 2	Área 3
h1	-13.83	203.21
h2	53.26	106.67
h3	-200.00	278.39
h4	20.96	38.48
h5	200.00	-97.57
h6	8.54	1.91
h7	19.75	25.11
h8	-9.45	87.64
h9	-200.00	140.46
h10	14.75	-84.88
h11	-91.42	-104.44
h12	164.77	-400.00
h13	-200.00	72.20
h14	-58.05	-78.51
h15	-200.00	116.85
h16	-200.00	203.15
h17	-200.00	111.71
h18	21.46	-98.31
h19	200.00	-287.56
h20	126.84	-88.00
h21	-3.43	3.97
h22	-61.03	113.91
h23	-78.63	-5.61
h24	66.84	-5.97

De la Tabla 29 se procede a determinar los valores netos en la entrega o recepción de energía con respecto a área 1, cuyos resultados se presentan en la Tabla 30, de lo cual se observa que existe en el neteo el área 1 recibe 365.86 MWh en el período de análisis, lo cual es coherente dado que se produce un incremento de producción en dicha área a comparación del caso 2.

Tabla 30. Intercambio neto del Área 1– Caso 3.

	Energía (MWh)		
	Área 2	Área 3	Total
<b>Entrega</b>	893.74	1499.69	2393.42
<b>Recepción</b>	-1512.41	-1246.87	-2759.28
<b>Neteo</b>	-618.67	252.81	-365.86

Así mismo, se procede al análisis con respecto al área 2, resultado de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 25.

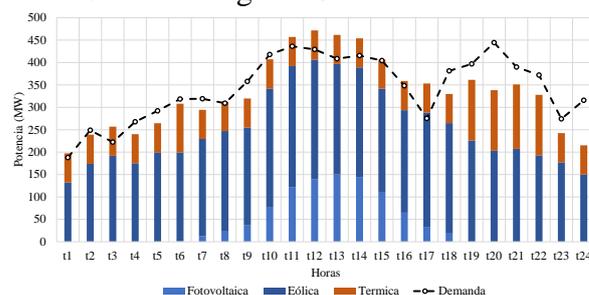


Figura 25. Despacho Área 2 – Caso 3.

De la Figura 25 se puede indicar que, en el período de la demanda máxima, el área 2 entrega de las áreas interconectadas a comparación del caso 2, el intercambio de energía, se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Intercambios de energía del Área 2– Caso 3.

	Intercambio Área 2 (MWh)	
	Área 1	Área 3
h1	-4.32	13.83
h2	43.17	-53.26
h3	-165.26	200.00
h4	-6.40	-20.96
h5	172.44	-200.00
h6	-1.73	-8.54
h7	-5.07	-19.75
h8	-6.40	9.45
h9	-238.11	200.00
h10	4.06	-14.75
h11	-70.47	91.42
h12	207.06	-164.77
h13	-146.60	200.00
h14	-19.48	58.05
h15	-197.78	200.00
h16	-189.43	200.00
h17	-121.89	200.00
h18	-30.23	-21.46
h19	164.38	-200.00
h20	20.95	-126.84
h21	-42.21	3.43
h22	-105.16	61.03
h23	-110.51	78.63
h24	-33.73	-66.84

De la Tabla 31 se puede señalar que el neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía recibida menor que la del caso 2, la Tabla 32 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 32. Intercambio neto del Área 2– Caso 3.

	Energía (MWh)		
	Área 2	Área 3	Total
<b>Entrega</b>	612.06	1512.41	2124.47
<b>Recepción</b>	-1494.77	-893.74	-2388.51
<b>Neteo</b>	-882.71	618.67	-264.04

De forma similar se procede a realizar el análisis del área 3, de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 26.

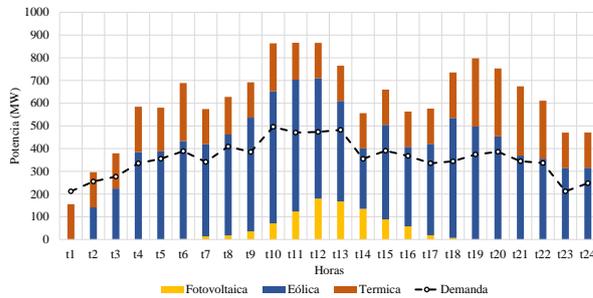


Figura 26. Despacho Área 3 – Caso 3.

De la Figura 26 se puede citar que esta área sigue siendo es la que exporta gran parte de energía a las cuatro áreas, ya que la mayor parte de la energía producida corresponde a energía económica, a fin de establecer los intercambios de energía a las demás áreas, se describe sus valores en la Tabla 33.

Tabla 33. Intercambios de energía del Área 3– Caso 3.

	Intercambio Área 3 (MW)		
	Área 2	Área 1	Área 4
h1	4.32	-203.21	142.53
h2	-43.17	-106.67	191.15
h3	165.26	-278.39	215.50
h4	6.40	-38.48	281.31

h5	-172.44	97.57	300.00
h6	1.73	-1.91	300.00
h7	5.07	-25.11	252.86
h8	6.40	-87.64	300.00
h9	238.11	-140.46	209.27
h10	-4.06	84.88	287.18
h11	70.47	104.44	220.62
h12	-207.06	400.00	199.10
h13	146.60	-72.20	208.10
h14	19.48	78.51	103.46
h15	197.78	-116.85	188.27
h16	189.43	-203.15	208.77
h17	121.89	-111.71	230.41
h18	30.23	98.31	262.62
h19	-164.38	287.56	300.00
h20	-20.95	88.00	300.00
h21	42.21	-3.97	291.59
h22	105.16	-113.91	282.84
h23	110.51	5.61	142.64
h24	33.73	5.97	183.21

De la Tabla 33 se observa que, si bien el área 3 recibe energía de forma ocasional, la gran parte del período de análisis entrega energía sobre todo al área 4, el valor neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía entregada, a pesar de que sea un poco inferior comparada al caso 2, sigue predominando la entrega de energía de esta área a las demás, la Tabla 34 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 34. Intercambio neto del Área 3– Caso 3.

	Energía (MWh)			
	Área 1	Área 2	Área 4	Total
<b>Entrega</b>	1494.77	1246.87	5601.44	8343.09
<b>Recepción</b>	-612.06	-1499.69	0.00	-2111.75
<b>Neteo</b>	882.71	-252.81	5601.44	6231.35

De forma similar se procede a realizar el análisis del área 4, de lo cual se obtiene el despacho económico que se muestra en la Figura 27.

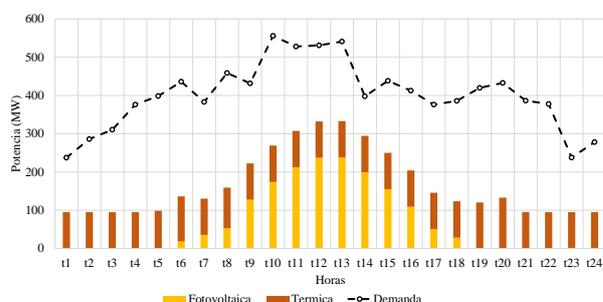


Figura 27. Despacho Área 4 – Caso 3.

De la Figura 27 se puede citar que esta área sigue siendo la que recibe gran parte de energía del área 3, ya que la mayor parte de la energía producida y receptada por esta área corresponde a energía económica, a fin de establecer los intercambios de energía a las demás áreas, se describe sus valores en la Tabla 35.

Tabla 35. Intercambios de energía del Área 4– Caso 3.

Intercambio Área 4 (MW)	
	Área 3
h1	-142.53
h2	-191.15
h3	-215.50
h4	-281.31
h5	-300.00
h6	-300.00
h7	-252.86
h8	-300.00
h9	-209.27
h10	-287.18
h11	-220.62
h12	-199.10
h13	-208.10
h14	-103.46
h15	-188.27
h16	-208.77
h17	-230.41
h18	-262.62
h19	-300.00
h20	-300.00
h21	-291.59
h22	-282.84
h23	-142.64
h24	-183.21

De la Tabla 35 se observa que, existe una importante importación del área 3, el valor neto entre la energía recibida y entregada corresponde a un valor de energía recibida igual al del caso 2, la Tabla 36 muestra el detalle de lo citado.

Tabla 36. Intercambio neto del Área 4– Caso 3.

Energía (MWh)		
	Área 4	Total
Entrega	0.00	0.00
Recepción	-5601.44	-5601.44
Neteo	-5601.44	-5601.44

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 28.

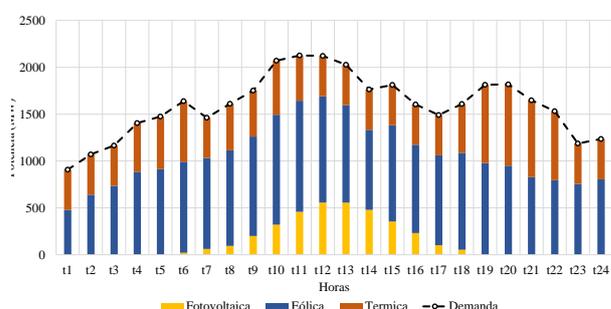


Figura 28. Despacho para abastecimiento global – Caso 3.

De la Figura 28 se muestra que efectivamente el despacho multiarea 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 37. Energía por tecnología y área – Caso 3.

Energía (GWh)				
	FV	E	T	Total
Área 1	-	7.67	3.88	11.55
Área 2	0.93	5.14	1.89	7.97
Área 3	0.92	9.33	4.56	14.81
Área 4	1.64	-	2.38	4.02
<b>Total</b>	<b>3.49</b>	<b>22.14</b>	<b>12.71</b>	<b>38.34</b>

Donde:  
 FV: Fotovoltaico  
 E: Eólico  
 T: Térmico

De la Tabla 37 se observa que, del total de energía, la energía fotovoltaica representa el 9.1%, la energía eólica equivale al 57.7% y la energía de los generadores térmicos asciende a 33.2%. De lo que se concluye que, el uso de las energías renovables es permanente y se aprovecha su recurso, sin embargo, hay una reasignación de la producción térmica a comparación del caso 2 a fin de minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>. La ilustración por bloque de energía, por área y por tecnología se muestran en la Figura 29.

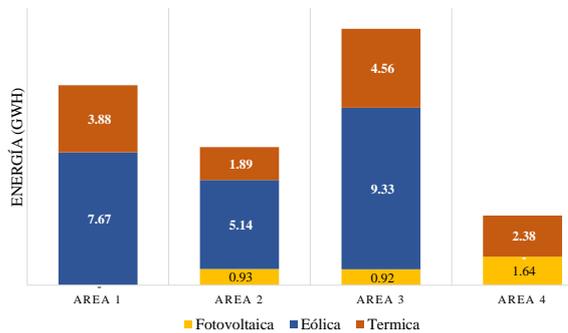


Figura 29. Bloques de energía por área y tecnología – Caso 3.

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 38. Costo por tecnología y área – Caso 3.

	Costo (Millones USD)			
	FV	E	T	Total
Área 1	-	0.499	0.815	1.314
Área 2	0.051	0.329	0.423	0.803
Área 3	0.052	0.721	0.904	1.677
Área 4	0.097	-	0.593	0.690
<b>Total</b>	<b>0.200</b>	<b>1.549</b>	<b>2.735</b>	<b>4.485</b>

Donde:  
 FV: Fotovoltaico  
 E: Eólico  
 T: Térmico

De la Tabla 38 el 61% del costo total corresponde a la generación de tipo térmico, mientras que el 34.5% corresponde al costo de generación eólica y el 4.5% es el porcentaje del costo de la generación fotovoltaica. Los valores de los costos por tecnología y área se ven en la Figura 30.

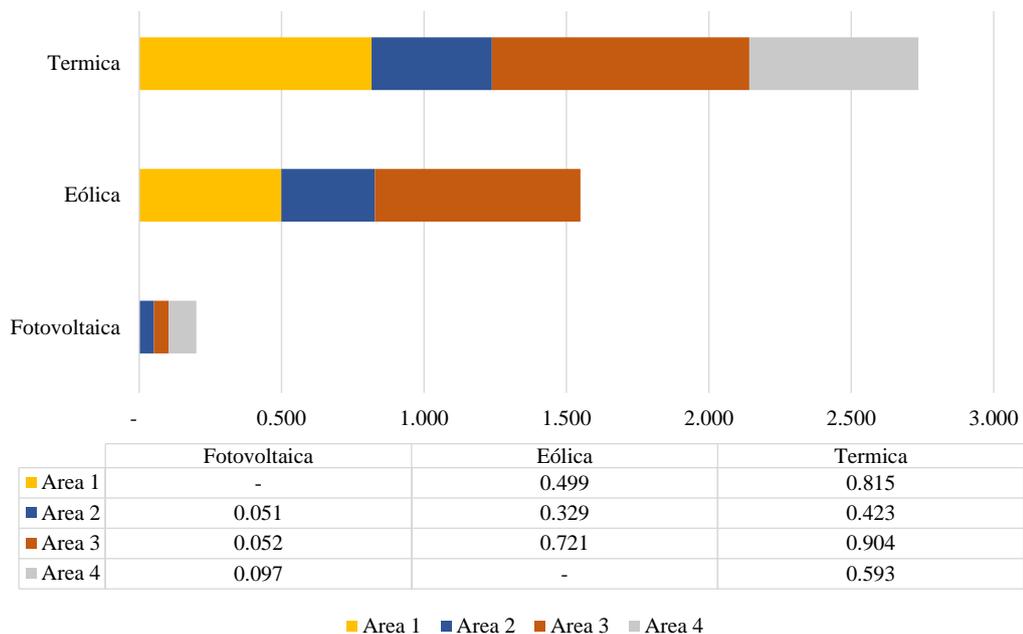


Figura 30. Costos despacho autónomo – Caso 3.

Finalmente, se evalúa la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten por la producción de energía mediante los generadores térmicos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 39 y se ilustran en la Figura 31.

Tabla 39. Emisiones de CO<sub>2</sub> – Caso 3.

Emisiones (Toneladas CO <sub>2</sub> )	
Área 1	5,160.04
Área 2	3,618.27
Área 3	13,739.67
Área 4	5,043.79
<b>Total</b>	<b>27,561.77</b>

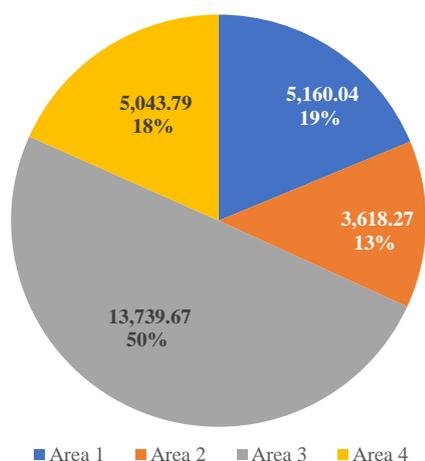


Figura 31. Emisiones por área– Caso 3.

De la Figura 31, se observa que a comparación del Estudio 2 existe una variación a la baja de la emisión de CO<sub>2</sub> obteniéndose un valor total de 27561.77 toneladas de CO<sub>2</sub>. El 50% de ese valor corresponde a las emisiones emanadas del área 3, mientras que el área 2 produce el mínimo de cantidad de emisiones el cual asciende al 13%.

#### 5.4 Análisis comparativo

De los resultados económicos y energéticos evaluados en cada estudio, se procede a realizar un análisis comparativo. En primera instancia se analiza las variables de tipo técnico, para efecto se tabula los valores en la Tabla 40.

Tabla 40. Comparativo de parámetros energéticos.

	Tg	Energía (GWh)				Total
		Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	
Est 1	FV	-	0.93	0.92	1.64	3.49
	E	7.04	4.85	3.94	-	15.83
	T	4.87	2.45	3.72	7.98	19.02
	<b>Tot</b>	<b>11.91</b>	<b>8.23</b>	<b>8.58</b>	<b>9.62</b>	<b>38.34</b>
Est 2	FV	-	0.93	0.92	1.64	3.49
	E	7.67	5.14	9.33	-	22.14
	T	3.34	1.72	5.27	2.38	12.71
	<b>Tot</b>	<b>11.01</b>	<b>7.80</b>	<b>15.51</b>	<b>4.02</b>	<b>38.34</b>
Est 3	FV	-	0.93	0.92	1.64	3.49
	E	7.67	5.14	9.33	-	22.14
	T	3.88	1.89	4.56	2.38	12.71
	<b>Tot</b>	<b>11.55</b>	<b>7.97</b>	<b>14.81</b>	<b>4.02</b>	<b>38.34</b>

Donde:

FV: Fotovoltaico

E: Eólico

T: Térmico

Est: Estudio o caso

Tg: Tecnología

De la Tabla 40 se puede observar que los totales en cualquiera de los estudios son idénticos dado que se requiere abastecer la demanda energéticamente, sin embargo, dependiendo del estudio a analizar existe variaciones importantes en la asignación energética, para el efecto se muestra la Tabla 41, misma que muestra las variaciones de del caso 2 y 3 con respecto al caso 1.

Tabla 41. Comparativo de parámetros energéticos.

	Tg	Energía (GWh)				Total
		Área 1	Área 2	Área 3	Área 4	
Est 2	FV	-	-	-	-	-
	E	0.63	0.29	5.39	-	6.31
	T	-1.53	-0.73	1.55	-5.60	-6.31
	<b>Tot</b>	<b>-0.90</b>	<b>-0.43</b>	<b>6.94</b>	<b>-5.60</b>	<b>-</b>
Est3	FV	-	-	-	-	-
	E	0.63	0.29	5.39	-	6.31
	T	-1.00	-0.56	0.84	-5.60	-6.31
	<b>Tot</b>	<b>-0.37</b>	<b>-0.26</b>	<b>6.23</b>	<b>-5.60</b>	<b>-</b>

De la Tabla 41 se puede observar que las variaciones de energía resultante de las centrales fotovoltaicas del caso 2 y 3 a

comparación del caso 1, existen variaciones significativas siendo las más relevante la ocurrida en el área 3 la cual entrega un incremental de 5.39 GWh a las distintas áreas. Por su parte, la producción de energía de las centrales térmicas de los estudios 2 y 3 a comparación del estudio 1 varían sustancialmente en todas las áreas, lo cual es adecuado dado que el modelo optimiza el costo y la energía de las centrales más eficientes, de lo cual, en el área 4 se reduce considerablemente unos 5.6 GWh, lo cual garantizará implícitamente un menor costo a nivel global.

Por otra parte, la precitada Tabla 41 muestra, entre el caso 2 y caso 3, variaciones energéticas importantes en la generación térmica lo cual es correcto ya que dicha variación obedece al cumplimiento del modelo multiobjetivo a fin de reducir la emisión de CO<sub>2</sub>, aspecto por el cual se reasigna la producción con el fin de cumplir con el objeto del modelo. Seguidamente se procede a realizar un análisis de tipo económico con el objeto de evaluar los costos obtenidos de la producción de energía obtenida del despacho, cuyos resultados se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Comparativo de parámetros económico.

Costo (Millones de USD)					
		Fotovoltaica	Eólica	Térmica	Total
Est 1	Área 1	-	0.458	0.988	1.446
	Área 2	0.051	0.310	0.528	0.890
	Área 3	0.052	0.289	0.759	1.101
	Área 4	0.097	-	1.821	1.918
	<b>TOTAL</b>	<b>0.200</b>	<b>1.057</b>	<b>4.097</b>	<b>5.354</b>
Est 2	Área 1	-	0.499	0.712	1.211
	Área 2	0.051	0.329	0.391	0.772
	Área 3	0.052	0.721	1.017	1.790
	Área 4	0.097	-	0.593	0.690
	<b>TOTAL</b>	<b>0.200</b>	<b>1.549</b>	<b>2.714</b>	<b>4.463</b>
Est 3	Área 1	-	0.499	0.815	1.314
	Área 2	0.051	0.329	0.423	0.803
	Área 3	0.052	0.721	0.904	1.677
	Área 4	0.097	-	0.593	0.690
	<b>TOTAL</b>	<b>0.200</b>	<b>1.549</b>	<b>2.735</b>	<b>4.485</b>

De la Tabla 42 se señala que, el estudio 1 es el más costoso a comparación de los dos estudios restantes, lo cual es correcto dado que no se optimizan los recursos de todas las áreas lo que conlleva a una reducción de costos globales, lo citado se muestra al analizar el costo obtenido en el estudio 2 y 3, lo cual genera un ahorro en el costo con respecto al estudio de 0.89 y 0.87 millones de dólares, respectivamente. El caso 2 muestra un menor costo de los casos analizados, lo cual es correcto dado que su resultado es concordante con el modelo resuelto que prioriza la minimización de costos en un sistema que se interconectan las áreas. Por otra parte, el caso tres tiene un valor de 0.02 millones de dólares más costoso que el obtenido en el caso 2, lo cual es adecuado ya que el modelo en el caso 3 resuelve un modelo multiobjetivo donde satisface las funciones objetivo. A fin de poder observar el impacto ambiental, la Tabla 43 muestra un comparativo de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tabla 43. Comparativo de emisiones.

Emisiones (toneladas CO <sub>2</sub> )			
	Est 1	Est 2	Est 3
<b>Área 1</b>	6,711.35	4,692.98	5,160.04
<b>Área 2</b>	4,721.48	3,379.07	3,618.27
<b>Área 3</b>	11,730.99	16,612.67	13,739.67
<b>Área 4</b>	16,850.79	5,043.79	5,043.79
<b>Total</b>	<b>40,014.60</b>	<b>29,728.50</b>	<b>27,561.77</b>

De la Tabla 43 se muestra que el caso 1 tiene el valor más alto de emisión de CO<sub>2</sub> ascendiendo a 40 mil toneladas, pero al interconectar las áreas las emisiones en su global se reducen un 26% al comparar el caso 1 y el caso 2, generándose una disminución de 10 mil toneladas de CO<sub>2</sub>. Con respecto al caso 3, la disminución es más significativa representando un valor del 31% de reducción a comparación del caso 1 que corresponden a 12 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, lo cual valida que el modelo multiobjetivo cumple con fin con el que fue desarrollado, en este sentido, al

comparar los estudios 2 y 3 la cantidad de emisiones de diferencia asciende a 2 mil toneladas de CO<sub>2</sub> lo cual al valorarlas con el precio de los bonos de carbono según [64] se obtiene un ingreso de aproximadamente 170 mil dólares, los cuales corresponden a ingresos extras al sistema, lo cual a su vez compensa con el leve incremento del costo operativo que se obtiene en el estudio 3.

## 6 Conclusiones

Del trabajo realizado se puede concluir lo siguiente:

- El modelo de optimización multiobjetivo que ha sido resuelto utilizando programación no lineal y su resultado ha permitido determinar la potencia horaria a ser despachada por el parque generador con el fin de minimizar los costos asociados a la operación del sistema y el impacto ambiental
  - Con los resultados relacionados al despacho de las unidades de generación situadas en las cuatro diferentes áreas se puede señalar que, al interconectar las mismas, el modelo de matemática optimiza la generación observando los costos y la capacidad de los enlaces de interconexión, lo que permite minimizar costos y a la vez minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub>.
  - Conforme a lo indicado en la conclusión anterior y considerando la comparación del estudio 1 con el estudio 2 y 3 se obtiene un ahorro de aproximadamente 900 mil dólares en un lapso de 24 horas, lo cual en el año corresponderá a un valor de aproximadamente 325 millones de dólares, aspecto que valida que el modelo al realizar una optimización de los recursos de generación en todas las áreas se reduce el costo y se crea un ahorro importante, lo cual permite incluso en realizar inversiones a fin de mejorar el sistema de forma integral.
- Complementario a lo indicado, y al analizar los montos energéticos resultantes e intercambiados, se puede indicar que el modelo permite garantizar la demanda horaria y adicional se señala que el sistema puede economizar aún más cuando se liberan la capacidad de los vínculos, por lo que los ahorros que se obtienen al interconectar las áreas pueden ser reinvertido en la ampliación de la capacidad de los vínculos.
  - Al analizar el modelo multiobjetivo y los resultados del estudio 3, se puede señalar que, el modelo satisface de forma adecuada las dos funciones objetivo, sin embargo, el costo obtenido en el estudio 3 y el estudio 2 representa un incremento de 200 mil lo que puede ser compensado con el ingreso que se obtenga por la venta por bonos de carbono, lo cual recupera un valor aproximado de 170 mil dólares, pero adicional se obtienen una reasignación en el despacho garantizando el uso del recurso energético.
  - Del análisis efectuado, se puede indicar también que el modelo multiobjetivo permite además satisfacer las funciones objetivo propuestas, también garantizar que el intercambio de energía obedezca a una optimización del recurso tanto de tipo térmico como de las energías renovables que tienen una incertidumbre en el recurso primario.

### 6.1 Trabajos futuros

Debido a los conceptos introducidos en el estudio se puede proponer los siguientes estudios:

- ✓ Despacho de generación para emisiones económicas de gases de efecto invernadero utilizando el

algoritmo de optimización grasshopper.

- ✓ Despacho económico dinámico multiarea del sistema de energía que incorpora almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo.
- ✓ Evolución de las reglas de despacho mediante programación genética para resolver problemas de despacho de generación con múltiples objetivos.
- ✓ Efectos económicos y ambientales del envío prioritario de energía renovable considerando la producción de energía fluctuante de las unidades de carbón.
- ✓ Optimización de la expansión de los sistemas de transmisión basada en la incorporación de variadores de fase bajo la figura de maximizar la confiabilidad.

## 7 Referencias

- [1] 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," *Electric Power Systems Research*, vol. 175. Elsevier Ltd, p. 105883, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.105883.
- [2] 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.
- [3] R. B. Finkelman, A. Wolfe, and M. S. Hendryx, "The future environmental and health impacts of coal," *Energy Geosci.*, vol. 2, no. 2, pp. 99–112, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.engeos.2020.11.001.
- [4] A. Emilio, H. Barreto, M. María, J. Correa, A. Ortiz Muñoz, and C. Montes De Correa, "Cement plant gaseous pollutant emission reduction technologies," 2008.
- [5] Y. Wu, X. Chen, J. Ma, Y. Wu, D. Liu, and W. Xie, "System integration optimization for coal-fired power plant with CO<sub>2</sub> capture by Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dry sorbents," *Energy*, vol. 211, p. 118554, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118554.
- [6] 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," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119. Elsevier Ltd, p. 109418, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109418.
- [7] 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," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, p. 109232, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.039.
- [8] 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*, Oct. 2014, vol. 2014-October, no. October, doi: 10.1109/PESGM.2014.6939073.
- [9] G. Celli, S. Mocci, F. Pilo, and S. G. G., "A Multi-Objective Approach for the Optimal Distributed Generation Allocation with Environmental Constraints," *IEEE*, May 2008.
- [10] H. Narimani *et al.*, "A multi-objective framework for multi-area economic emission dispatch," *Energy*, vol. 154, pp. 126–142, Jul. 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.080.

- [11] A. Azizivahed, S. Ghavidel, M. J. Ghadi, L. Li, and J. Zhang, “Multi-area economic emission dispatch considering load uncertainty,” Oct. 2017, doi: 10.1109/ICEMS.2017.8056132.
- [12] 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.
- [13] J. Morris *et al.*, “Representing the costs of low-carbon power generation in multi-region multi-sector energy-economic models,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 87, pp. 170–187, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ijggc.2019.05.016.
- [14] M. Basu, “Multi-area dynamic economic emission dispatch of hydro-wind-thermal power system,” *Reinf. Plast.*, vol. 28, no. March, pp. 11–35, 2019, doi: 10.1016/j.ref.2018.09.007.
- [15] K. Solaun and E. Cerdá, “Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116. Elsevier Ltd, p. 109415, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109415.
- [16] Y. Lei *et al.*, “Multi-objective stochastic expansion planning based on multi-dimensional correlation scenario generation method for regional integrated energy system integrated renewable energy,” *Appl. Energy*, vol. 276, no. April, p. 115395, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115395.
- [17] A. Vidal, M. Carpenente, and B. Casas, “Algoritmos heurísticos en optimización,” Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, 2013.
- [18] 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*, 1995, vol. 5, pp. 4045–4050, doi: 10.1109/icsmc.1995.538423.
- [19] Y. Huang *et al.*, “Multi-objective optimal operation for steam power scheduling based on economic and exergetic analysis,” *Energies*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13081886.
- [20] M. Khanna and N. D. Rao, “Supply and Demand of Electricity in the Developing World,” *Annu. Rev. Resour. Econ.*, vol. 1, no. 1, pp. 567–596, Oct. 2009, doi: 10.1146/annurev.resource.050708.144230.
- [21] J. Jiang and H. Chen, “Supply and demand conflict in supply chain based on principal-agent theory,” in *2009 2nd International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation, ICICTA 2009*, 2009, vol. 4, pp. 11–14, doi: 10.1109/ICICTA.2009.719.
- [22] S. Osaka, Y. Kono, R. Fujiwara, and A. Yamanishi, “Development of the expert system for operation planning of power system,” 1988, pp. 545–550, doi: 10.1109/aiia.1988.13345.
- [23] M. Armendáriz, M. Heleno, G. Cardoso, S. Mashayekh, M. Stadler, and L. Nordström, “Coordinated microgrid investment and planning process considering the system operator,” *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 132–140, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.076.
- [24] J. Wu *et al.*, “Study on medium and long-term generation expansion planning method considering the requirements of

- green low-carbon development,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2018-October, pp. 689–694, 2018, doi: 10.1109/APPEEC.2018.8566580.
- [25] K. Dyre, O. J. Olesen, and W. Bergström, “New Concepts In Power System Applications,” in *IFAC Symposia Series*, A. J. B. T.-P. S. M. and C. A. CALVAER, Ed. Oxford: Pergamon, 1989, pp. 415–421.
- [26] A. Ayub, “Planeación de la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 1999.
- [27] R. Navarro, “Short and Medium Term Operation Planning in Electric Power Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–8, 2009.
- [28] A. S. Gaur, P. Das, A. Jain, R. Bhakar, and J. Mathur, “Long-term energy system planning considering short-term operational constraints,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, p. 100383, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100383>.
- [29] A. Khodaei, M. Shahidehpour, L. Wu, and Z. Li, “Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 2242–2250, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2192507.
- [30] 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.
- [31] C.-H. Chen and Y.-P. Chen, “Real-Coded ECGA for Economic Dispatch,” 2007.
- [32] X. Cui and Y. Yan, “Economic dispatching problem with group and resource considerations,” in *Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2012*, 2012, pp. 4114–4117, doi: 10.1109/CCDC.2012.6244658.
- [33] F. R. Pazheri and M. F. Othman, “Environmental and Economic Power Dispatch for Hybrid Power System with Distributed Energy Storage,” *Ieee Symp. Ind. Electron. Appl.*, pp. 117–121, 2013.
- [34] A. Carrillo-Galvez, F. Flores-Bazan, and E. L. Parra, “An Analytical Approach to the Environmental/Economic Dispatch Problem,” Nov. 2019, doi: 10.1109/CHILECON47746.2019.8987495.
- [35] M. Basu, “Multi-region dynamic economic dispatch of solar–wind–hydro–thermal power system incorporating pumped hydro energy storage,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 86, pp. 182–196, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.engappai.2019.09.001.
- [36] Y. Chen, J. Hou, J. Chen, X. Zheng, H. Chen, and Z. Liang, “A Novel Approach for Multi-Area Power System Day-ahead Scheduling under Uncertainties,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2018-Augus, Dec. 2018, doi: 10.1109/PESGM.2018.8586306.
- [37] L. He, Z. Lu, J. Zhang, L. Geng, Y. Cai, and X. Li, “Economic dispatch of multi-area integrated electricity and natural gas systems considering emission and hourly spinning reserve constraints,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 132, p. 107177, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.IJEPES.2021.107177.
- [38] H. Zhang, S. Zhang, H. Cheng, and C. Zhang, “Joint Generation, Transmission and Energy Storage Systems Expansion Planning in Multi-area Power Systems

- Considering Detailed Modeling of Tie lines,” *2020 IEEE/IAS Ind. Commer. Power Syst. Asia, I CPS Asia 2020*, pp. 720–726, Jul. 2020, doi: 10.1109/ICPSASIA48933.2020.9208401.
- [39] S. P. Cusi Quishpe, “Despacho económico de generación multiobjetivo considerando eficiencia de Pareto en la determinación de los costos ambientales y de producción,” Universidad Politécnica Salesiana, 2021.
- [40] R. Marler and J. Arora, “Survey of multi-objective optimization methods for engineering,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 26, no. 6. Springer, pp. 369–395, Apr. 2004, doi: 10.1007/s00158-003-0368-6.
- [41] X. Wang, X. Shi, H. Zhang, and F. Wang, “Multi-objective optimal dispatch of wind-integrated power system based on distributed energy storage,” in *Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dec. 2017, vol. 2017-Janua, pp. 2788–2792, doi: 10.1109/IECON.2017.8216470.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] M. A. Abido, “Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 7, pp. 1105–1113, Jul. 2009, doi: 10.1016/J.EPSR.2009.02.005.
- [45] C. A. García, E. García, and F. Villada, “Implementación del Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la Planeación de Sistemas Eléctricos de Distribución incluyendo Huecos de Voltaje,” *Información tecnológica*, vol. 26. scielocl, pp. 155–168, 2015.
- [46] E. Zitzler and L. Thiele, “Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 3, no. 4, pp. 257–271, Nov. 1999, doi: 10.1109/4235.797969.
- [47] J. P. Zhan, Q. H. Wu, C. X. Guo, and X. X. Zhou, “Fast lambda-iteration method for economic dispatch with prohibited operating zones,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 990–991, Mar. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2287995.
- [48] S. Der Chen and J. F. Chen, “A direct Newton–Raphson economic emission dispatch,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 25, no. 5, pp. 411–417, Jun. 2003, doi: 10.1016/S0142-0615(02)00075-3.
- [49] H. Bishe, A. Kian, and M. Esfahani, “A primal-dual interior point method for solving environmental/economic power dispatch problem,” *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 1463–1473, 2011.
- [50] R. Storn and K. Price, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces,” *J. Glob. Optim.*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1995, doi:

- 10.1023/A:1008202821328.
- [51] J. Lampinen, “A constraint handling approach for the differential evolution algorithm,” in *Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, CEC 2002*, 2002, vol. 2, pp. 1468–1473, doi: 10.1109/CEC.2002.1004459.
- [52] K. K. Mandal and N. Chakraborty, “Differential evolution based environmentally constrained economic dispatch,” *Proc. INDICON 2008 IEEE Conf. Exhib. Control. Commun. Autom.*, vol. 2, pp. 471–476, 2008, doi: 10.1109/INDICON.2008.4768769.
- [53] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” *Proc. ICNN’95 - Int. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 1942–1948, 1995, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [54] T. Thakur, K. Sem, S. Saini, and S. Sharma, “A Particle swarm optimization solution to NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub> emissions for environmentally constrained economic dispatch problem,” *2006 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. TDC’06*, 2006, doi: 10.1109/TDCLA.2006.311399.
- [55] 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.
- [56] H. Ishii and S. Koike, “On  $\epsilon$  - 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.
- [57] 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.
- [58] B. Mohammadi-ivatloo and M. Nazari-Heris, *Robust optimal planning and operation of electrical energy systems*. Springer, 2019.
- [59] Ministerio del Ambiente, “Factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema Nacional Interconectado del Ecuador,” *Minist. del Ambient.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013, [Online]. Available: [www.ambiente.gob.ec](http://www.ambiente.gob.ec).
- [60] U.S. Energy Information Administration, “U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2021 (AEO2021),” *EIA. Annu. Energy Outlook 2021*, vol. 2021, 2021.
- [61] G. D. Price, *Power Systems and Renewable Energy: Design, Operation, and Systems Analysis*. Momentum Press, 2014.
- [62] MERNNR, “Plan Maestro de Electricidad 2019-2027,” *Minist. Energía y Recur. No Renov.*, p. 390, 2019, [Online]. Available: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.
- [63] Z. Jizhong and IEEE, “Optimization of Power System Operation,” 2015. <https://www.wiley.com/en-us/Optimization+of+Power+System+Operation%2C+2nd+Edition-p-9781118854150> (accessed May 27, 2021).
- [64] M. C. Díaz-Cruz, “Bonos de carbono: un instrumento en el sistema financiero internacional,” *Libr. Empres.*, vol. 13, no. 1, pp. 11–33, 2016, doi: 10.18041/libemp.2016.v13n1.25106.



## DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Despacho económico multiobjetivo y multiarea	Frontera Pareto eficiente	Costos operativos del sistema de generación	Emissiones de gases de efecto invernadero	Sistemas de generación	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho multiarea	Minimización de costos asociados al abastecimiento de la demanda y de las emisiones	Optimización del parque generador considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables técnicas y económicas para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo y en diferentes áreas	Factores de emisiones	Intercambio entre distintas áreas	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Aplicación de epsilon constante	Determinación del óptimo de Pareto	Modelo de optimización multiobjetivo para múltiples áreas	Despacho de las unidades de generación por cada área
9	2008	A Multi-Objective Approach for the Optimal Distributed Generation Allocation with Environmental Constraints	39	☒		☒								☒					☒		☒	
10	2018	A multi-objective framework for multi-area economic emission dispatch	41															☒				
11	2017	Multi-area economic emission dispatch considering load uncertainty	3							☒	☒								☒		☒	
12	2017	Adding value to EU energy policy analysis using a multi-model approach with an EU-28 electricity dispatch model	64	☒				☒														☒
13	2019	Representing the costs of low-carbon power generation in multi-region multi-sector energy-economic models	16		☒																	
14	2019	Multi-area dynamic economic emission dispatch of hydro-wind-thermal power system	17	☒				☒	☒				☒									☒
15	2019	Climate change impacts on renewable energy generation. A review of quantitative projections	89		☒			☒											☒	☒		
16	2020	Multi-objective stochastic expansion planning based on multi-dimensional correlation scenario generation method for regional integrated energy system integrated renewable energy	17					☒														☒
17	2003	Algoritmos heuristicos en optimizacion	23						☒	☒				☒								☒
18	1995	An Interactive fuzzy satisfying method for multiobjective structured linear programs and its application	3		☒																	
19	2020	Multi-objective optimal operation for steam power scheduling based on economic and exergetic analysis	2		☒																	☒

## DESPACHO MULTIOBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico multiobjetivo y multiarea	Frontera Pareto eficiente	Costos operativos del sistema de generación	Emissiones de gases de efecto invernadero	Sistemas de generación	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho multiarea	Minimización de costos asociados al abastecimiento de la demanda y de las emisiones	Optimización del parque generador considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables técnicas y económicas para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes períodos de tiempo y en diferentes áreas	Factores de emisiones	Intercambio entre distintas áreas	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Aplicación de epsilon constante	Determinación del óptimo de Pareto	Modelo de optimización multiobjetivo para múltiples áreas	Despacho de las unidades de generación por cada área	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
20	2009	Supply and Demand of Electricity in the Developing World	72				☒			☒			☒	☒								☒	☒	
21	2009	Supply and demand conflict in supply chain based on principal-agent theory	2				☒							☒		☒								
22	1988	Development of the expert system for operation planning of power system	12		☒			☒		☒					☒			☒	☒			☒		
23	2017	Coordinated microgrid investment and planning process considering the system operator	29					☒		☒	☒							☒						☒
24	2018	Study on medium and long-term generation expansion planning method considering the requirements of green low-carbon development	9		☒					☒					☒						☒			
25	2017	New Concepts In Power System Applications	586		☒		☒			☒	☒				☒									
26	2009	Short and Medium Term Operation Planning in Electric Power Systems	10												☒						☒			
27	2019	Long-term energy system planning considering short-term operational constraints	13		☒					☒					☒		☒							
28	2012	Coordination of short-term operation constraints in multi-area expansion planning	104		☒		☒			☒					☒							☒		☒
29	2021	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	0					☒		☒							☒				☒	☒		
30	2007	Real-Coded ECGA for Economic Dispatch	17		☒		☒			☒				☒		☒								☒
31	2012	Economic dispatching problem with group and resource considerations	0	☒		☒			☒								☒		☒	☒				

## DESPACHO MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

DATOS		TEMÁTICA	FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA													
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico multiobjetivo y multiarea	Frontera Pareto eficiente	Costos operativos del sistema de generación	Emissiones de gases de efecto invernadero	Sistemas de generación	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho multiarea	Minimización de costos asociados al abastecimiento de la demanda y de las emisiones	Optimización del parque generador considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables técnicas y económicas para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes períodos de tiempo y en diferentes áreas	Factores de emisiones	Intercambio entre distintas áreas	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Aplicación de épsilon constante	Determinación del óptimo de Pareto	Modelo de optimización multiobjetivo para múltiples áreas	Despacho de las unidades de generación por cada área	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda		
32	2013	Environmental and Economic Power Dispatch for Hybrid Power System with Distributed Energy Storage	7					☒				☒						☒			☒					
33	2019	An Analytical Approach to the Environmental/Economic Dispatch Problem	0		☒					☒		☒			☒							☒				
34	2019	Multi-region dynamic economic dispatch of solar-wind-hydro-thermal power system incorporating pumped hydro energy storage	7							☒														☒	☒	
35	2018	A Novel Approach for Multi-Area Power System Day-ahead Scheduling under Uncertainties	1			☒								☒	☒											
36	2021	Economic dispatch of multi-area integrated electricity and natural gas systems considering emission and hourly spinning reserve constraints	2					☒	☒					☒									☒			
37	2020	Joint Generation, Transmission and Energy Storage Systems Expansion Planning in Multi-area Power Systems Considering Detailed Modeling of Tie lines	1				☒				☒										☒	☒				☒
38	2021	Despacho económico de generación multiobjetivo considerando eficiencia de Pareto en la determinación de los costos ambientales y de producción	0	☒			☒	☒															☒			☒
39	2004	Survey of multi-objective optimization methods for engineering	4698	☒		☒			☒		☒	☒		☒		☒	☒					☒				
40	2017	Multi-objective optimal dispatch of wind-integrated power system based on distributed energy storage	5		☒					☒				☒										☒		
41	2006	Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto	64				☒				☒							☒								☒

## DESPACHO MULTI OBJETIVO EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN ÁREAS MÚLTIPLES MEDIANTE EL MÉTODO DE SATISFACCIÓN DIFUSA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN			SOLUCIÓN PROPUESTA						
				Despacho económico multiobjetivo y multiárea	Frontera Pareto eficiente	Costos operativos del sistema de generación	Emissiones de gases de efecto invernadero	Sistemas de generación	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho multiárea	Minimización de costos asociados al abastecimiento de la demanda y de las emisiones	Optimización del parque generador considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables técnicas y económicas para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo y en diferentes áreas	Factores de emisiones	Intercambio entre distintas áreas	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Aplicación de epsilon constante	Determinación del óptimo de Pareto	Modelo de optimización multiobjetivo para múltiples áreas	Despacho de las unidades de generación por cada área	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
42	2021	Combined economic and emission power dispatch problems through multi-objective squirrel search algorithm	8	☒		☒			☒	☒			☒		☒					☒	☒			
43	2009	Multiobjective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem	426	☒		☒				☒				☒										
44	2015	Implementación del Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la Planeación de Sistemas Eléctricos de Distribución incluyendo Huecos de Voltaje	11					☒	☒															
45	1999	Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach	8734	☒			☒			☒							☒		☒			☒		
46	2013	Fast lambda-iteration method for economic dispatch with prohibited operating zones	74	☒													☒		☒					
47	2003	A direct Newton–Raphson economic emission dispatch	91		☒				☒				☒								☒			
48	2009	A primal-dual interior point method for solving environmental/economic power dispatch problem	11				☒			☒				☒										
49	1997	Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces	27840		☒				☒				☒				☒	☒	☒					
50	2002	A constraint handling approach for the differential evolution algorithm	329	☒			☒		☒					☒		☒								
51	2008	Differential evolution based environmentally constrained economic dispatch	12		☒				☒															
52	1995	Particle swarm optimization	68530	☒		☒			☒					☒			☒					☒		
53	2006	A Particle swarm optimization solution to NO2 and SO2 emissions for environmentally constrained economic dispatch problem	45	☒		☒		☒	☒				☒		☒		☒	☒	☒					
CANTIDAD:				19	17	10	11	11	15	14	15	13	5	12	12	9	10	6	5	10	16	15	12	13

## 7.2 Resumen de Indicadores

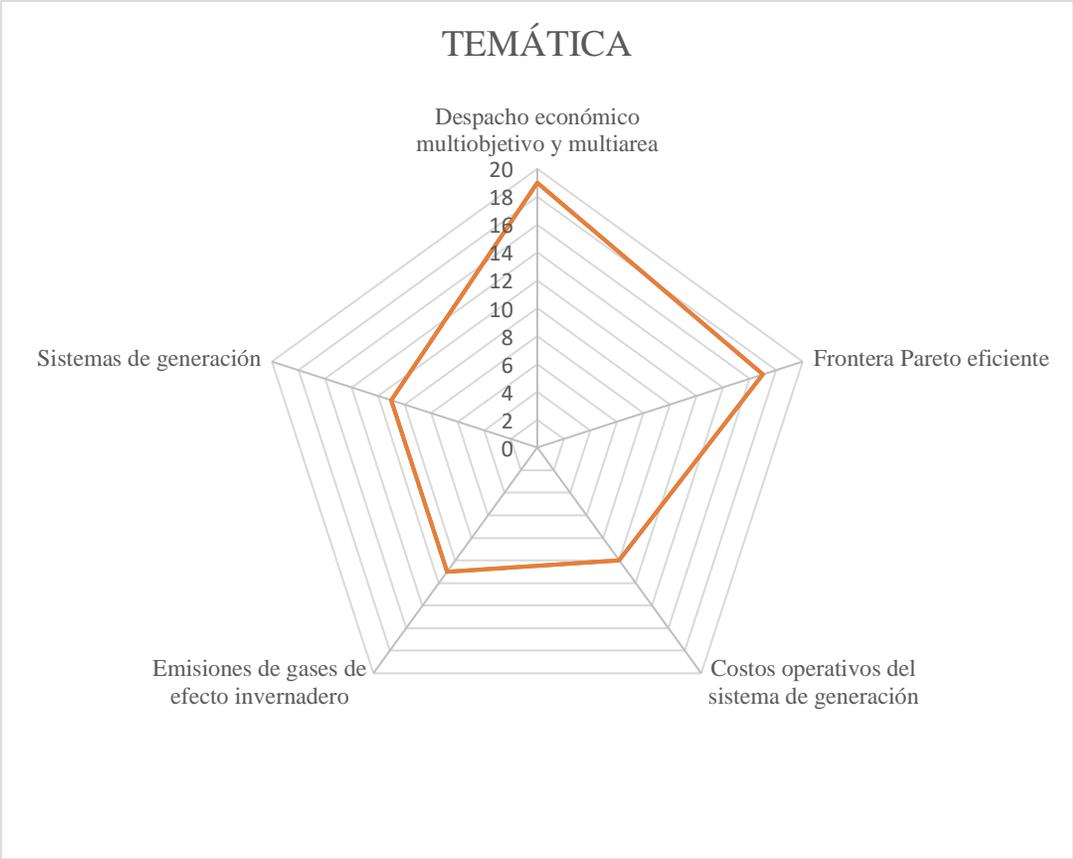


Figura 32. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

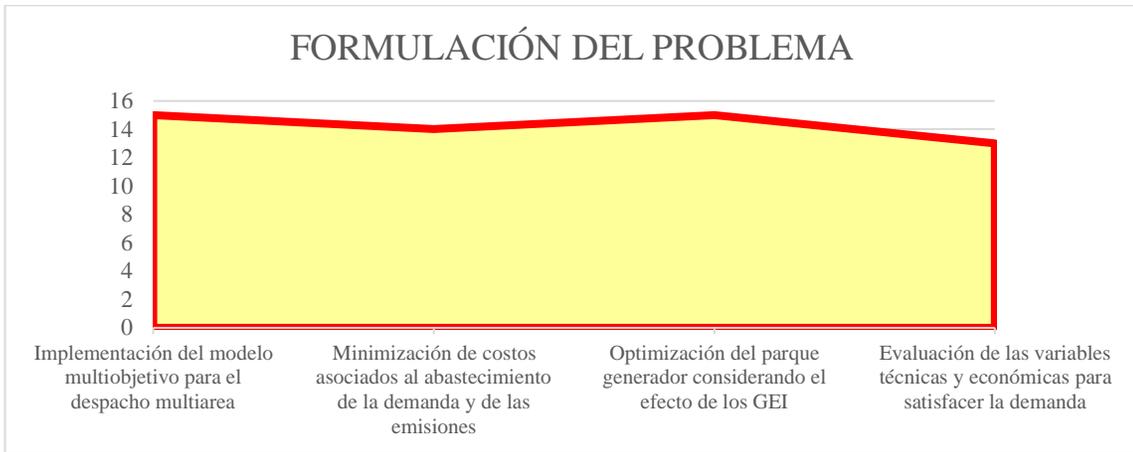


Figura 33. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

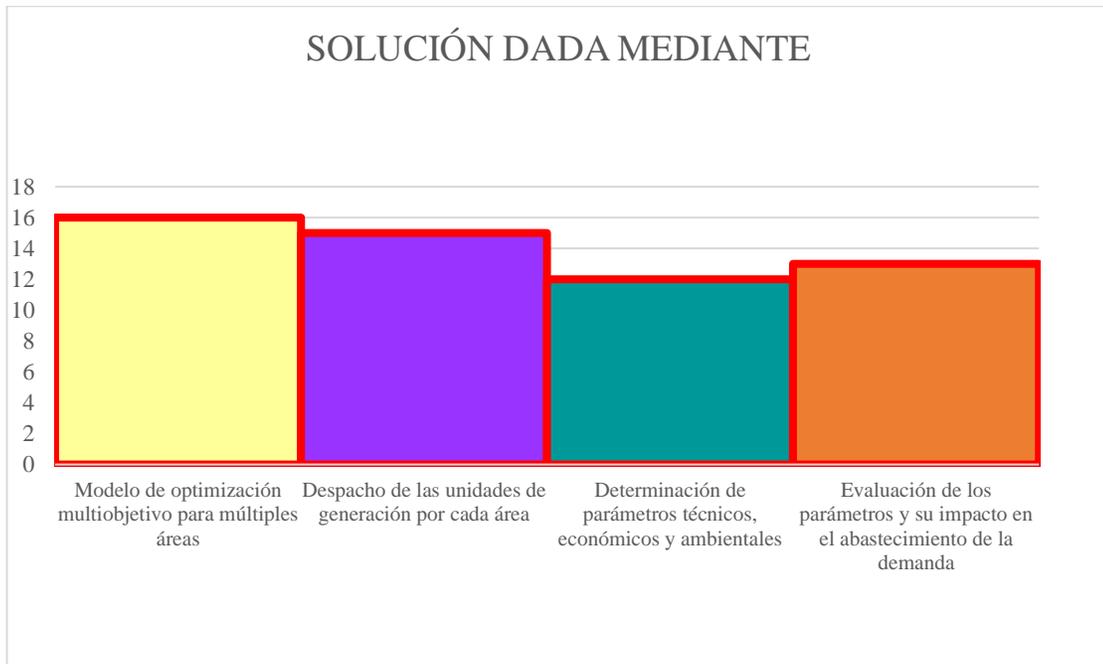


Figura 34. Indicador de solución - Estado del arte.