

**DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO  
CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE  
LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO  
CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE  
LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN**

**AUTOR:  
CUSI QUISHPE SANTIAGO PATRICIO**

**TUTOR:  
JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO**

**Quito, agosto 2021**

Santiago Patricio Cusi Quishpe

**DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTI OBJETIVO  
CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE  
LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



**Santiago Patricio Cusi Quishpe** (Y'1995). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Salesiano “Don Bosco” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo de titulación consiste en realizar un análisis por medio de la técnica de eficiencia de Pareto para la determinación de costos operativos y ambientales en un despacho económico de generación considerando múltiples objetivos. [scusi@est.ups.edu.ec](mailto:scusi@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Jorge Paúl Muñoz Pilco** (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Quito –Ecuador, 2014, obteniendo el título de Ingeniero Eléctrico. Además, cursó estudios de posgrado como becario de Fundación Carolina en la Universidad Pública de Navarra, Pamplona –España, 2017, obteniendo el título de Máster en Energías Renovables: Generación Eléctrica. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. [jmunoz@ups.edu.ec](mailto:jmunoz@ups.edu.ec)

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**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN* realizado por Santiago Patricio Cusi Quishpe, 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., agosto de 2021



Jorge Paúl Muñoz Pilco.


C.C.: 1719006189

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Santiago Patricio Cusi Quishpe, con documento de identificación N° 1722953294, 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 ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN*, 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., agosto de 2021



Santiago Patricio Cusi Quishpe

C.C.: 1722953294

## 1. ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	2
2	MARCO TEÓRICO .....	5
2.1	Planificación y operación de los sistemas de energía .....	5
2.1.1	Planificación de largo plazo.....	6
2.1.2	Planificación de medio plazo.....	7
2.1.3	Planificación de corto plazo.....	7
2.1.4	Despacho económico de generación en los sistemas eléctricos .....	8
2.1.5	Despacho multiobjetivo (económico – ambiental).....	11
3	MODELADO MULTIOBJETIVO .....	13
3.1	Formulación del problema de optimización.....	13
3.1.1	Funciones objetivo .....	13
3.1.2	Restricción para abastecimiento de demanda horaria.....	14
3.1.3	Restricciones técnicas para los generadores .....	14
3.1.4	Restricción para establecer la energía base .....	16
4	ESTUDIO APLICADO .....	16
4.1	Unidades de generación.....	16
4.2	Curva de demanda.....	18
4.3	Frontera Pareto eficiente.....	18
4.4	Determinación del óptimo de Pareto .....	19
4.5	Metodología para solución.....	20
4.6	Casos de estudio .....	20
5	EVALUACIÓN DE RESULTADOS.....	21
5.1	Primer caso .....	21
5.2	Segundo caso.....	23
6	CONCLUSIONES .....	27
6.1	Trabajos futuros.....	28
7	REFERENCIAS .....	28
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	33
7.2	Resumen de Indicadores.....	39

## 2. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquematación del modelo de despacho multiobjetivo [autor].	4
Figura 2. Consideraciones en la planificación según el horizonte temporal.	6
Figura 3. Técnicas de control de contaminación ambiental.	10
Figura 4. Conjunto de soluciones óptimas de Pareto .	11
Figura 5. Maximización y minimización multiobjetivo frontera de Pareto .	12
Figura 6. Frontera de Pareto – Variación $\epsilon$ .	19
Figura 7. Curva de demanda y pérdidas.	20
Figura 8. Despacho por tipo de tecnología – 1er Caso.	21
Figura 9. Aporte energético por tipo de tecnología – 1er Caso .	22
Figura 10. Costos por tipo de tecnología – 1er Caso.	22
Figura 11. Emisiones por tipo de tecnología – 1er Caso .	22
Figura 12. Frente de Pareto.	23
Figura 13. Solución óptima del Frente de Pareto .	24
Figura 14. Despacho por tipo de tecnología – 2do Caso .	25
Figura 15. Aporte energético por tipo de tecnología – 2do Caso.	25
Figura 16. Costos por tipo de tecnología – 2do Caso.	26
Figura 17. Emisiones por tipo de tecnología – 2do Caso.	26
Figura 18. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	39
Figura 19. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	40
Figura 20. Indicador de solución - Estado del arte.	40

### 3. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorización de unidades de generación. ....	16
Tabla 2. Función de entrada – salida por generador térmico. ....	17
Tabla 3. Constantes para determinación de las FO de los generadores térmicos. ....	17
Tabla 4. Parámetros técnicos de las unidades térmicas.....	17
Tabla 5. Potencia y factor de planta de las unidades hidroeléctricas. ....	17
Tabla 6. Parámetros de las unidades hidroeléctricas.....	17
Tabla 7. Precio de venta de energía de las unidades hidroeléctricas. ....	18
Tabla 8. Curva de demanda.....	18
Tabla 9. Pérdidas en cada período.....	18
Tabla 10. Curva de demanda incluida pérdidas. ....	18
Tabla 11. Secuencia para solución. ....	20
Tabla 12. Despacho por tipo de tecnología – 1er Caso.....	21
Tabla 13. Porcentaje de aporte energético – 1er Caso. ....	22
Tabla 14. Costos por tipo de tecnología – 1er Caso.....	22
Tabla 15. Emisiones por tipo de tecnología – 1er Caso.....	22
Tabla 16. Método epsilon – Frente de Pareto. ....	23
Tabla 17. Máximo y Mínimo de Funciones. ....	23
Tabla 18. Funciones de pertinencia.....	23
Tabla 19. Mínimo de las funciones de pertinencia. ....	24
Tabla 20. Despacho por tipo de tecnología – 2do Caso.....	24
Tabla 21. Porcentaje de aporte energético – 2do Caso. ....	25
Tabla 22. Costos por tipo de tecnología – 2do Caso.....	25
Tabla 23. Emisiones por tipo de tecnología – 2do Caso. ....	26
Tabla 24. Comparativa de Costos y Emisiones.....	26
Tabla 25. Matriz de estado del arte .....	33

# DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

## Resumen

La resolución del problema de despacho económico ha sido una tarea relevante en el sector eléctrico, la cual se vuelve complicada cuando, a más de considerar los costos, se incluye un nuevo objetivo al problema de optimización, por tal razón, la presente investigación está enfocada en la planificación y operación del sector eléctrico a través del despacho económico evaluado en el corto plazo, tomando en cuenta la influencia de generadores hidroeléctricos y térmicos y la implicación de los costos operativos y las consideraciones ambientales en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero, proponiendo un modelo de optimización multiobjetivo que minimiza los costos asociados a la operación del sistema y el impacto ambiental para un período de tiempo de 24 horas, sujeto a las restricciones técnicas de las unidades de generación y de demanda.

Dado lo expuesto, la resolución del problema multiobjetivo de optimización será efectuada a través del software GAMS, y cuyo resultado determinará la solución óptima que garanticen el abastecimiento de la demanda.

**Palabras Clave:** Programación óptima, Optimización de Pareto, Generación de energía hidroeléctrica - térmica, Factores ambientales y Función de costo.

## Abstract

The resolution of the economic dispatch problem has been a relevant task in the electricity sector, which becomes complicated when, in addition to considering costs, a new objective is included to the optimization problem, for this reason, this research is focused on in the planning and operation of the electricity sector through the economic dispatch evaluated in the short term, taking into account the influence of hydroelectric and thermal generators and the implication of operating costs and environmental considerations in relation to greenhouse gas emissions, proposing a multi-objective optimization model that minimizes the costs associated with the operation of the system and the environmental impact for a period of 24 hours, subject to the technical restrictions of the generation and demand units.

Given the above, the resolution of the multiobjective optimization problem will be carried out through the GAMS software, and the result of which will determine the optimal solution that guarantees the supply of demand.

**Keywords:** Optimal scheduling, Pareto optimization, Hydroelectric - thermal power generation, Environmental factors and Cost function.

# 1 Introducción

La crisis energética mundial y el cambio climático mundial son dos preocupaciones crucialmente entrelazadas para lograr un desarrollo sostenible, y las crecientes demandas de energía plantean más desafíos ambientales [1]. La incorporación de recursos de energía renovable (ER), la mejora de la eficiencia en la utilización de la energía y la mitigación de las emisiones de CO<sub>2</sub> se consideran factibles para abordar estos desafíos [2].

Según el Acuerdo de París, el cual corresponde a un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante que entró en vigencia el 4 de noviembre de 2016, señala que el sector energético es de gran importancia para contener el cambio climático [3]. Al aumentar la penetración de las fuentes de energía renovable y acelerar la descarbonización de los sistemas energéticos, se espera que se reduzcan entre un 80% y un 95% las emisiones de gases de efecto invernadero [4]. Para alcanzar estos objetivos ambiciosos, la estructura energética global basada en combustibles fósiles debe transformarse para estar basada en fuentes de energía renovable. Para el 2050, se espera que la participación de las ER absorba hasta el 85% del sistema eléctrico, la mayor parte del cual corresponde a la generación de energía solar y eólica [5].

A medida que crece el uso de tecnologías renovables en todo el mundo, la generación de electricidad intermitente ha aumentado la incertidumbre y la variabilidad en los sistemas eléctricos, lo que lleva a desafíos más económicos y confiables [6]. En este escenario, es necesario abordar desafíos intensivos de planificación y operación para garantizar un sistema de suministro de energía confiable y estable, por tal razón, las unidades térmicas (por ejemplo, unidades

generadoras de carbón, diésel o gas natural) están integradas como unidades de respaldo flexibles en un sistema de energía basado en ER [7].

Además, el almacenamiento de energía está logrando un interés creciente por equilibrar la oferta y la demanda eléctricas [5]. Las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica son primordiales para la descarbonización en los sistemas energéticos, ya que representan una herramienta versátil para proporcionar flexibilidad a los sistemas eléctricos, mejorando así la economía de los sistemas de energía convencionales y mejorando la utilización de sistemas de energía renovable [8]. Sin embargo, los elevados costos de inversión han obstaculizado la adopción de diversas tecnologías de almacenamiento de energía [9].

Aparte de los fines económicos, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> es otra preocupación importante para la integración de la generación de energía no convencional en un sistema integrado, esto se debe a que los tomadores de decisiones pueden tener diversos objetivos bajo diversas restricciones [10]. Sin embargo, estos objetivos son generalmente interdependientes y se hace necesario optimizar las relaciones de compensación entre varios objetivos. En este contexto, la economía de la operación y la protección del ambiente son generalmente un par de objetivos en conflicto, por tanto, llegar a un equilibrio entre ambos objetivos producirá un método de operación y despacho ambiental del sistema de energía que actualmente presenta gran relevancia bajo los preceptos de preservación del ambiente [11].

Sobre la base del potencial “ahorro de energía” resultado del despacho económico, a nivel internacional se han implementado diversas políticas, entre la más importante se señala la adopción completa del uso de tecnologías de energía

limpia como la energía renovable y las fuentes de energía ubicadas en sistemas de distribución tales como la micro generación, la intervención de los vehículos eléctricos; y, explorar y desarrollar activamente modos de despacho relacionados con la “reducción de emisiones” [12].

Una tarea importante de la operación del sistema de energía eléctrica es llevar a cabo la combinación de unidades de generación a fin de abastecer de demanda pronosticada de forma horaria. En tal sentido, el despacho económico es un problema básico y fundamental en el funcionamiento del sistema eléctrico, que consiste en despachar a cada unidad bajo la premisa de satisfacer la carga del sistema eléctrico, de modo que el costo operativo total de generación de energía del sistema sea el más bajo, es decir, el consumo total de energía de generación de energía del sistema sea el más económico [13].

Considerando lo descrito, se puede señalar que la estructura del sistema de energía eléctrica existente, el modo de operación y la manera relevante del despacho, son aspectos que se han vuelto más complejos, lo que brinda nuevas oportunidades y desafíos para el desarrollo de nuevos modelos de despacho económico óptimo de los sistemas de energía, los cuales actualmente buscan los beneficios económicos como el único objetivo [14].

En la optimización de un sistema eléctrico convencional, los sistemas de gas natural se incorporan como restricciones de los sistemas eléctricos con fines económicos. Por ejemplo, en [15] se han considerado las limitaciones de la transmisión de gas natural en la optimización de la programación económica de los sistemas de energía eléctrica, lo que conlleva a obtener una restricción importante del recurso que impacta directamente en los contratos de

largo plazo para el abastecimiento de la demanda y que son de relevancia para el despacho económico. La investigación [16] propuso un modelo de flujo de potencia óptimo probabilístico integrado de múltiples períodos para minimizar los costos de energía y operativos de los sistemas integrados de electricidad y gas, lo que permite a la red operar bajo distintos escenarios, garantizando el abastecimiento de la demanda tomando en cuenta la esperanza y valores medios de probabilidad de operación de los elementos de la red, lo cual conlleva a que el operador tenga una perspectiva para operar el sistema y definir la actuación ante probabilidades de falla. Por su parte, en [17] se incluye el costo de generación de energía, el costo de reducción de la carga de energía, el costo de suministro de gas natural y el costo de reducción de la carga de gas, dentro de las restricciones operativas, adicionales a las del sistema de generación, lo que conlleva a tener límites para la producción de energía eléctrica de forma horaria y cuyas cotas garantizan que el abastecimiento a la demanda sea factible de manera económica y técnica.

Por otra parte, [18] presenta una metodología para la gestión óptima de Var / Volt de unidades de Generación Distribuida (DG) y FACTS en redes eléctricas. La metodología se basa en un algoritmo genético para lograr los requisitos de confiabilidad del sistema deseados teniendo en cuenta los límites de estabilidad de voltaje. Los resultados indican que la formulación propuesta podría utilizarse para determinar los puntos óptimos en los que la incorporación de unidades DG y la conexión de dispositivos FACTS permitiría mejorar la estabilidad de voltaje, minimizando, al mismo tiempo, las pérdidas reales de potencia y minimizando el costo de inversión de la Dispositivos FACTS.

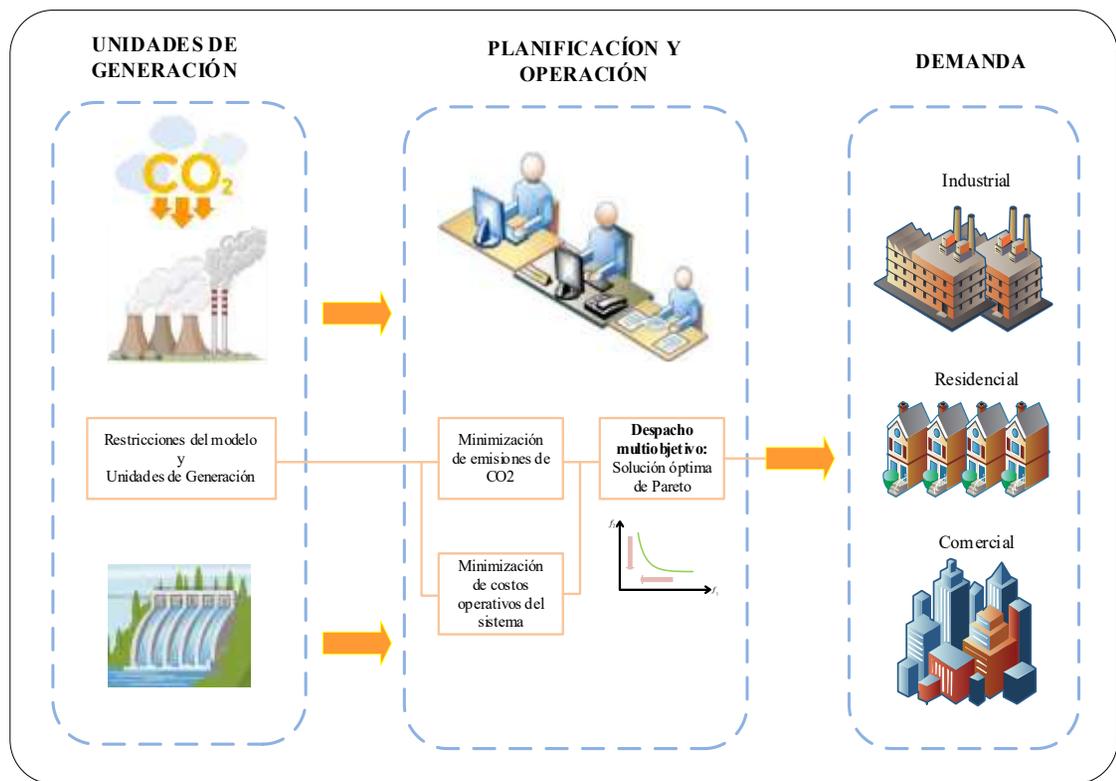


Figura 1. Esquemización del modelo de despacho multiobjetivo [autor].

Por su parte [19] indica que, al usar una o más funciones de objetivo que modelan aspectos adicionales a más de costo operativo, considerando varias condiciones o restricciones en la operación real, el modelo de despacho económico puede ser más preciso y luego su solución es más complicada, especialmente en sistemas robustos, en tal sentido, el modelado con varias funciones objetivo deben ser resueltas aplicando algoritmos complejos que observan las características del sistema y a su vez cumplen con los objetivos propuestos. Independientemente de lo indicado, [20] señala que, al considerar el uso de un modelo de despacho económico mejorado puede reducir el consumo total de energía del sistema y puede traer considerables beneficios económicos, es necesario estudiar un modelo de despacho

económico más preciso y su solución rápida y efectiva, el cual se adapte a las realidades y cambios que tiene el sector energético. En ese contexto, la investigación [21] propone algoritmos de solución directos que permiten una mejora en la operación de forma sencilla y garantiza que el despacho económico converja rápidamente, pero a su vez también propone algoritmos complejos para modelar sistemas robustos, lo que permite observar otros tipos de consideraciones de tipo económico y técnico, lo que ayuda a que el despacho sea más cercano a la realidad.

Por lo dicho, la investigación que a continuación se desarrolla se encaminará en establecer un modelo de optimización para el despacho de potencia en un parque generador tomando en consideración dos funciones objetivo relacionadas; la primera

a los costos de producción y la segunda a fin al impacto ambiental del sistema; mediante la metodología de la eficiencia de Pareto cumplir con las restricciones operativas del problema; en la Figura 1 se visualiza un esquema gráfico de lo descrito. El documento investigativo se encuentra segmentados en cinco partes, la primera muestra la vigilancia tecnológica sobre el despacho económico, implicación operativa de los tipos de generadores y modelos multiobjetivo; la segunda parte está asociada a la descripción o formulación matemática del problema multiobjetivo, la tercera parte describe los casos de estudio y la aplicación del modelo multiobjetivo, la penúltima parte refiere a la evaluación de los resultados de los casos de estudios y finalmente en la parte final se establece los aspectos concluyentes y posibles trabajos a ser desarrollados.

## **2 Marco Teórico**

Según [22]–[24], alrededor del mundo la inclusión de fuentes de generación de energía renovable principalmente solar, eólica e hidráulica crecen estratégicamente y se desarrollan tecnológicamente llegando a representar un 15% de aportación a la generación, pero estadísticamente hablando se espera que esta porcentualidad incremente de un 30% al 50 % según [25] la IRENA (International Renewable Energy Agency) entre el 2030 y 2050; cabe resaltar que en países como: China, Estados Unidos, Brasil, India, Alemania, Japón, Canadá, España, Francia y Rusia en este orden y de forma descendente son los diez países que cuentan con la mayor capacidad instalada de energía renovable convencional y no convencional para generación eléctrica lo que a su vez representa una mayor inversión económica y un elevado interés por reducir el impacto ambiental, según [26]. Estos motivos son los que impulsan a esta investigación para

conocer la relación óptima de los costos de producción y el impacto ambiental del sistema en el despacho de potencia cuando existe la participación fuentes de generación que usan combustibles fósiles que producen CO<sub>2</sub> y fuentes renovables.

Seguidamente se describe las temáticas en las que se fundamenta este trabajo de investigación para poder tener un acercamiento a conceptos importantes como el despacho económico multiobjetivo como parte de las técnicas para la optimización en la planificación de los sistemas eléctricos de potencia, considerando el despacho tradicional basado en costos y consecutivamente resaltando la importancia de la inclusión los aspectos medioambientales en el modelamiento para la planificación y operación del sistema.

### **2.1 Planificación y operación de los sistemas de energía**

La operación del sistema energético está expuesto a muchas incertidumbres desde la misma variación que tiene la carga por su naturaleza dinámica, hasta los cortes no planeados de las unidades de generación o de ciertos equipos indispensables en el sistema, estos eventos son manejados o controlados por medio de reservas de energía o mecanismos para salvaguardar la seguridad de la red y por tanto, brindar confiabilidad del suministro a los usuarios. Cada cambio que se produzca en el sistema ya sea en la generación, transmisión, distribución o en la demanda debe ser sobrellevado por un sistema que sea capaz de flexibilizarse para mantener su adecuado funcionamiento, todas las decisiones que se puedan tomar frente a contingencias o eventos dependen de una planificación que promueva la competencia y eficiencia operativa y económica [27].

Los estudios de planificación de los sistemas eléctricos constan de dos etapas importantes, la primera el diseño y la segunda la operación a corto, mediano y largo plazo, tienen un objetivo específico y actualizado periódicamente que es establecer acciones para lograr que todos los elementos del sistema tengan un adecuado funcionamiento y que dicha planificación efectuada cuidadosamente para la operación sea flexible ante fallas, variaciones súbitas de la carga y frente contingencias que ocurran en las etapas de generación, en la red o en la distribución; en base a la planeación se puede asegurar una correcta operación en los periodos de estudio establecidos desde hora a hora, días y años, y con esto cumplir con la responsabilidad de brindar un suministro continuo al mínimo costo posibles, cumpliendo niveles de calidad y seguridad energética para los usuarios [28].

La planificación representa un análisis continuo y una guía comprensiva que permite la evaluación de la operación del sistema y de la efectividad del diseño existente o medidas a considerarse si es necesaria la expansión, es decir estos estudios localizan y mitigan deficiencias posibles causadas por fallas, maniobras inadecuadas en la operación de los equipos y plantea medidas de corrección en los sistemas existentes, también para su posterior puesta en operación en la expansión; todos estos eventos pretenden optimizar el uso o ubicación de equipos y la minimización de costos en la operación [29]. En conclusión, un estudio de planificación del sistema de energía se define como un proceso de decisión sobre el sistema existente y futuro en lo referente a la actualización o agregación de elementos en función de la demanda actual y un pronóstico de la demanda futura, debido a la dependencia temporal se establece una clasificación según el horizonte de tiempo del modelo: a corto

plazo, mediano plazo y largo plazo [30]. En la Figura 2 se muestra un esquema que describe los detalles a considerar a nivel espacial, técnico y estacional con respecto a la operación, evaluación y planificación en el horizonte temporal [31].

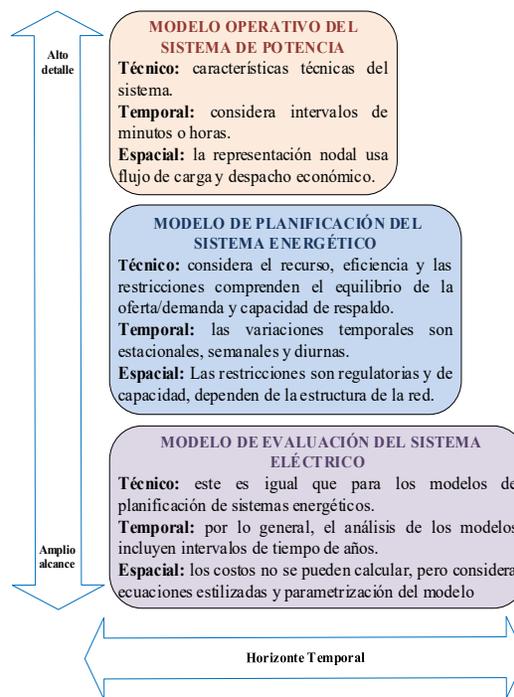


Figura 2. Consideraciones en la planificación según el horizonte temporal [31].

A partir del esquema descrito y lo mencionado anteriormente la planificación puede ser de corto plazo cuando se asocia con la operación diaria del sistema de energía, al mediano plazo se le otorga el mantenimiento de componentes del sistema y el largo plazo está relacionado con la expansión de capacidad.

### 2.1.1 Planificación de largo plazo

El desarrollo de modelos energéticos a largo plazo permite analizar todo el sistema en un ampliado horizonte temporal de años hasta varias décadas dependiendo del esquema regulatorio de cada país o del operador, esta etapa tiene como principal objetivo de estudio en la generación y transmisión planificar su expansión, así

también, las decisiones sobre la inversión y el desarrollo de políticas energéticas, es decir se tiene con este modelo una idea de los escenarios energéticos posibles pero los detalles de la operación son limitados y sus resultados muy simplificados por el horizonte temporal de la planificación. En la generación, transporte y distribución los estudios de planeación a largo plazo permiten [32]:

- Implementar nueva capacidad (en cantidad, tiempo, costos, ubicación y tipo) y con esto nuevas unidades de generación.
- Cubrir la demanda futura.
- El cumplimiento de objetivos políticos.
- La implementación de nueva tecnología.
- Mejorar la infraestructura existente.

El enfoque dinámico de la planeación tiene como objetivo específico evaluar una solución a largo plazo, en varios años divididos en múltiples etapas, describiendo de manera general la evolución del sistema energético considerando los aspectos nombrados. Las decisiones tomadas en esta planificación tienen ciertas limitaciones como no considerar las condiciones a corto plazo, los resultados son simplificados, la capacidad de las fuentes de energía puede ser sobrestimada y la flexibilidad de ciertos recursos puede ser subestimada [33].

### **2.1.2 Planificación de medio plazo**

La planificación con extensión temporal media reside entre la planificación de largo plazo y la planeación de corto plazo, las principales decisiones que involucran una planificación a mediano plazo son [34]:

- Crear programas para cubrir tareas de mantenimiento sobre los equipos de las etapas de transmisión y generación.

- Planeación para la adquisición de combustibles.
- Asignación de los recursos en general (económicos, energéticos, etc.).
- Manejo de la contratación de capacidad con otras empresas que operan los sistemas, es decir interconexiones regionales e internacionales.

En base, a las responsabilidades que corresponden a esta planificación se puede deducir que sus tareas están relacionadas solo con los recursos existentes y dichas decisiones son determinadas previamente al despacho de corto plazo, es diferente también a las decisiones de largo plazo que están relacionadas con la incorporación de capacidad nueva.

Además, su importancia radica en la administración de los activos del sistema enfocada primero en el mantenimiento adecuado de los equipos que brindan el suministro de energía para prevenir condiciones críticas de falla de carga, y segundo en el conocimiento de los activos del sistema y su disponibilidad temporal para que se pueda llevar a cabo a corto plazo la planificación operativa [35].

### **2.1.3 Planificación de corto plazo**

La planificación de corto plazo del sistema de energía esta caracterizado por establecer una programación para el despacho de unidades de generación diariamente considerando todas las restricciones que definen cada tecnología, por este motivo los operadores deben plantear un cronograma para una operación óptima con el propósito de cumplir con un servicio eléctrico confiable, entre las principales funciones de esta planeación están [28]:

- Programar la disponibilidad de las unidades de generación.
- Realizar el despacho económico.

- Estudios de flujos de potencia.
- Gestión del mercado eléctrico diario.
- Analizar todas las condiciones operativas de los generadores (límites de generación, tiempo de operación, tasas de fallas, rampas, etc.)
- Gestionar la conservación de una cantidad de capacidad de reserva de generación, tanto giratoria que es la capacidad adicional después del despacho, como la no giratoria que es aquella que no está conectada a la red, pero está lista para la operación.

Este estudio principalmente se centra en la operación del sistema considerando la seguridad y las acciones que se ejecutan frente a contingencias externas, en la generación u otros equipos en el horizonte temporal de hasta un año; los operadores tienen la función de analizar al sistema en diversos escenarios frente a contingentes de carga, capacidad de las unidades, y el despacho económico, una de las actividades más relevantes en los estudios, todos estos planteamientos son resueltos por medio de modelos de simulación para analizar eventos en función de aspectos técnicos y económicos [36]. A continuación, se describe en que consiste el despacho económico multiobjetivo debido a la inclusión de parámetros operativos ambientales y técnicos de las unidades de generación en los que se concentra el presente estudio.

#### ***2.1.4 Despacho económico de generación en los sistemas eléctricos***

El funcionamiento del sistema eléctrico de potencia se resume en el abastecimiento de la demanda con la entrega de un suministro de energía eléctrica que cumple niveles de calidad, seguridad y a un costo óptimo, para cumplir con esta meta son necesarios estudios por parte de los operadores del

sistema para la adecuada planificación del sistema integral [37]. Una de las partes más importantes de este estudio es el manejo de la generación disponible y cómo es entregada indirectamente a la demanda a través de redes de transmisión y distribución en paquetes energéticos basada en diversos aspectos (técnicos, económicos, ambientales, etc.). Este proceso se cumple por medio del despacho económico que forma parte de los estudios de planificación a corto plazo y su principal objetivo como se mencionó es aportar con estudios para la toma de decisiones sobre el sistema de energía, como la operación de unidades generadoras disponibles para cubrir óptimamente con una demanda asignada en un determinado periodo [38], [39]

El despacho económico se caracteriza por analizar los condicionamientos económicos que tienen las unidades responsables de la generación en su operación considerando restricciones y parámetros tanto del sistema como de operación, para definir la más óptima configuración de generadores disponibles para la entrega de energía en un tiempo determinado para un conjunto de cargas en particular al mínimo costo; el cálculo del despacho económico como se nombró requiere puntualmente de las siguientes consideraciones [33]:

- Pronóstico horario de la demanda de potencia.
- Costos fijos y variables de las unidades de generación disponibles que participa en el mercado eléctrico.
- Parámetros técnicos de las unidades de generación.
- Cronograma de mantenimiento de los sistemas participantes en el despacho.
- Proyección de interconexiones regionales e internacionales tanto para la importación y exportación.

- De acuerdo con los procedimientos de despacho se establece una reserva de generación por criterios de confiabilidad y seguridad; también otros aspectos particulares que deban ser considerados de acuerdo al análisis a desarrollarse.

Los modelos matemáticos que se desarrollen para la operación deben buscar alcanzar un rendimiento económico, pero la tarea es compleja debido a que a más de buscar dicha eficiencia económica se debe relacionar con la viabilidad técnica con el fin de minimizar costos de operación y asegurar la calidad de suministro respectivamente [34]. La gestión económica básicamente resultará compleja en base a la intervención de los aspectos que se pretendan considerar en el estudio, estos pueden ser: tarifarios, operacionales, ambientales, financieros, sociales o regulatorios [24]; en el presente trabajo de investigación se combina dichos aspectos que regirán la toma de decisiones sobre la generación en base a un despacho económico multiobjetivo, estos aspectos a considerar son económicos, técnicos y medioambientales, a continuación se describe como estos son incorporados en el análisis.

#### **2.1.4.1 Consideraciones ambientales en el despacho económico**

Actualmente en el sector energético se han ido implementando normativas que pretenden prevenir y aminorar la creciente afectación ambiental, principalmente en la generación de energía eléctrica ya que ciertos tipos de sistemas de producción se basan en la combustión usando como recurso los combustibles fósiles que consecuentemente producen gases contaminantes que afectan directamente a la atmósfera produciendo alteraciones en el clima, suelo y agua; por ende, perjudica a todos los seres vivos. Por estos motivos el

cuidado del medio ambiente ha ganado importancia dentro de la operación de los sistemas eléctricos aunque tradicionalmente se ejecuta un despacho de generación que prioriza el aspecto económico al minimizar costos totales, combinar unidades de generación y abastecer la demanda de energía, sin importar que tipo de generadora participa y el impacto ambiental que tendrá en su entorno, únicamente se basa en aspectos técnicos y económicos, aquí predominan las unidades térmicas que se despachan en horas de consumo pico e incluso en ocasiones llegan a formar parte de la energía base para el consumo de los usuarios [42], [43].

La mejor ejemplificación de una central contaminante es la termoeléctrica, es por esa razón que el estudio se centra en ella, estas centrales de generación convencional producen contaminación de las siguientes formas:

- Emisión de gases contaminantes:* por lo general se producen en las termoeléctricas debido a la combustión, los gases que mayor perjuicio causan se originan de la quema de combustibles fósiles (gas natural, diésel, bunker, etc.) y son: el dióxido y monóxido de carbono ( $CO - CO_2$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), el dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y otros igualmente perjudiciales como las partículas contaminantes, todos estos componentes causan cambio climático, corrosión, daños en la salud, etc.
- Depósitos de desechos sólidos:* son producto de un proceso de combustión o desechos que genera el propio combustible, estos residuos no son debidamente tratados o son expulsados deliberadamente.

c) *Vertederos de aguas*: el agua forma parte en la combustión como un medio de acondicionamiento, esto causa cambio en su temperatura y es devuelta a su origen junto con contaminantes causando un desequilibrio en el entorno ambiental.

Frente a esta problemática existen técnicas para el control de la contaminación considerando el origen de las emisiones y son esquematizadas en la Figura 3, entre las acciones que realizan estas técnicas se resumen las siguientes [44]:

- Incorporar equipos que depuren los contaminantes en base a diversos tratamientos.
- Cambio o incorporación de componentes a los combustibles para reducir la polución.
- Modificación del método de operación de la planta.

En base a la descripción acerca del despacho económico se nota que las consideraciones ambientales mencionadas son obviadas y generalmente estos análisis no consideran impacto de las emisiones de las centrales hacia la atmósfera, pero en el presente trabajo se incluirá dichas restricciones en el despacho económico convencional. Para cumplir con esta propuesta es necesario realizar un despacho económico multiobjetivo basado en métodos que permitan la inclusión ambiental, que se describirán posteriormente, se utiliza el método más adecuado para permitir evaluar las consecuencias de incluir restricciones ambientales de las termoeléctricas junto con las técnicas y económicas (despacho económico ambiental) [45].

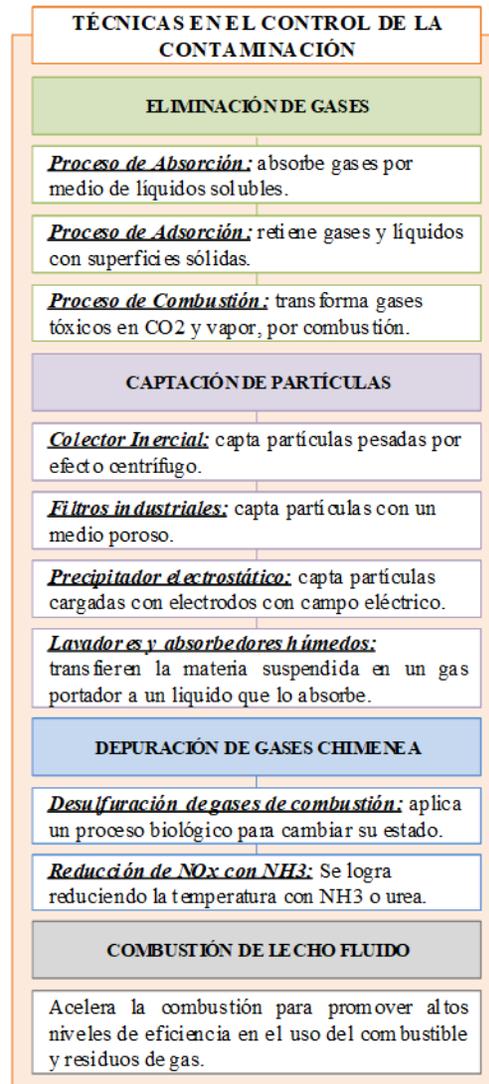


Figura 3. Técnicas de control de contaminación ambiental [42].

El despacho económico calcula un costo ponderado minimizado, y si se adiciona una o varias funciones objetivo que se relacionen con el impacto ambiental, el proceso de optimización también relacionará sus resultados con dichas funciones y es posible establecer las siguientes [21]:

- Minimización de emisiones atmosféricas
- Mínima emisión de gases contaminantes considerando costos como restricción.

- Minimización de costos considerando el control de emisiones como restricción
- Minimización de concentración de contaminación
- Minimización de costos considerando la concentración de emisiones como restricción.
- Minimización de costos y emisiones.

La combinación de estas funciones objetivo constituye un problema de optimización multiobjetivo, el presente trabajo se concentra en dar solución a un modelo matemático de despacho que tiene como funciones objetivo la minimización de costos y emisiones.

### 2.1.5 Despacho multiobjetivo (económico – ambiental)

Debido al planteamiento de incluir funciones objetivo al problema convencional de despacho convierte a dicho despacho en un problema de optimización multiobjetivo que requiere adicionalmente métodos de resolución, a continuación, se detalla en que consiste la optimización y los métodos para resolución de la problemática planteada.

Para comprender en que consiste una optimización multiobjetivo es necesario diferenciarla de una optimización simple que solo encuentra una solución óptima de una sola función objetivo, mientras que en la multiobjetivo o multicriterio existen varias funciones objetivo y a cada una de estas le corresponde una diferente solución óptima [46]. Por lo tanto, para este problema no existe una sola solución o una considerada con la mejor por lo contrario todas son óptimas y este conjunto de soluciones están comprometidas entre sí, en ciertos objetivos una es mejor que otra pero ninguna es la más óptima simultáneamente para todos los objetivos, este concepto se ilustra en la Figura 4; por este motivo complica comparar resultados entre métodos aplicados y solo al operador

le compete tomar la mejor decisión de un conjunto de soluciones óptimas, a quienes se les otorga un nombre especial como: soluciones óptimas de Pareto o frente óptimo de Pareto. Por lo tanto en el cálculo del despacho multiobjetivo se pretende optimizar para hallar una respuesta que otorgue valores a todas las funciones objetivas admisibles para el diseñador [47], [48].

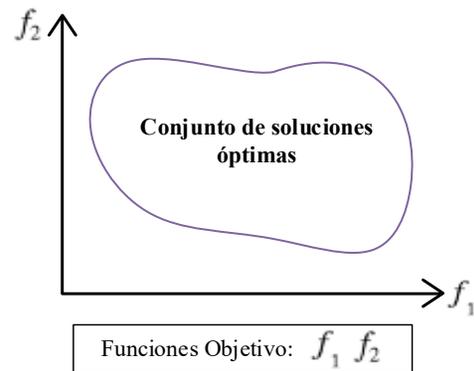


Figura 4. Conjunto de soluciones óptimas de Pareto [49].

Para la solución de una optimización multiobjetivo se requiere de métodos que permiten encontrar el conjunto de soluciones óptimas que formen la frontera de Pareto, en la Figura 5 se muestra la formación de dos frentes de Pareto dependientes de funciones biobjetivo donde a) corresponde a una minimización de dos funciones objetivo y b) donde la función biobjetivo es una maximización, estas dependen del modelo establecido. Habiendo mencionado el concepto de despacho multiobjetivo, las posibles funciones objetivo, restricciones, consideraciones económicas - medioambientales y el impacto de las mismas, esta investigación se enfoca en la importancia de llevar a cabo un estudio que considere restricciones ambientales al igual que los costos de producción e implementa un modelo de despacho de potencia multiobjetivo para obtener la más óptima selección de unidades en función

de la emisión de gases contaminantes y costos totales de operación, entre las unidades de generación seleccionadas para el análisis predominan las centrales térmicas por el elevado impacto ambiental causado por la combustión junto con las hidroeléctricas para connotar su impacto y como componente de emisión contaminante se considera al dióxido de carbono debido a que en la generación la termoeléctrica es intrínseco a su funcionamiento.

Estos aspectos son formulados matemáticamente e introducidos en un modelo de optimización multiobjetivo que usa el método de Optimalidad de Pareto, para minimizar una función objetivo que involucra costos y emisiones de carbono causadas por combustibles fósiles (bunker, gas y diésel).

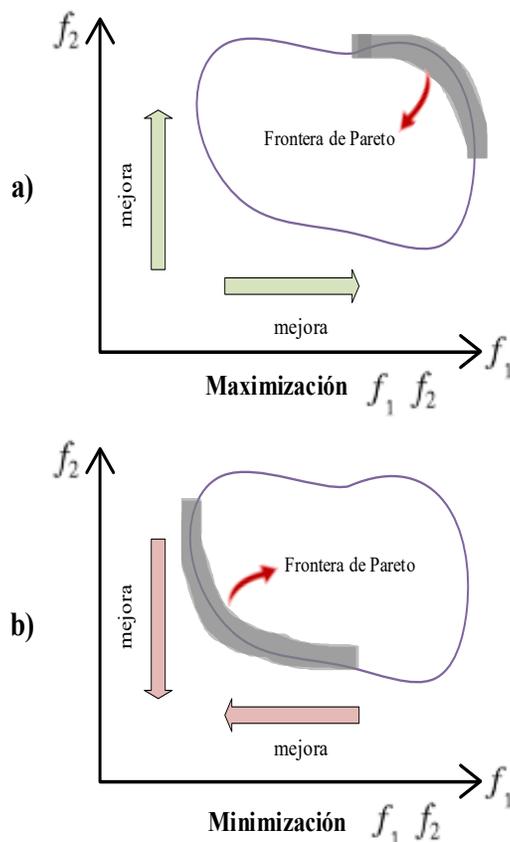


Figura 5. Maximización y minimización multiobjetivo considerando la frontera de Pareto [50].

### 2.1.5.1 Métodos de optimización multiobjetivo

Como se mencionó existen diferentes estrategias para la optimización multiobjetivo cuya formulación se diferencia en como tratan a las funciones objetivo, básicamente existen dos tipos de métodos: los clásicos que convierten las funciones objetivo nuevamente en un problema monoobjetivo; o los métodos no clásicos que mantienen los objetivos individuales en la optimización, pero los resuelven simultáneamente [50]. Dentro de los métodos clásicos se encuentran todos aquellos que convierten varios objetivos en uno solo a través de operaciones aritméticas o fijación de pesos, se convierten en un técnica simple pero igualmente usan recursos tecnológicos, y corren riesgo de incertidumbres por la supresión de funciones objetivo; entre los métodos tradicionales se resalta: el de Suma Ponderada, la técnica de Logro o Programación de Metas y el método de Punto Interno; los métodos no clásicos se dividen en: algoritmos evolutivos, estrategias evolutivas y algoritmos genéticos [47], [51].

Los métodos de optimización multiobjetivo más usados son dos el primero representan a las técnicas clásicas y el otro a las técnicas no clásicas, estos son:

- a) *Método de Suma Ponderada*: es un método clásico que transforma problemas de optimización de varios objetivos en uno de un solo objetivo mediante la aplicación de operadores o pesos que son multiplicados a la suma de los objetivos, esto da lugar a la combinación de las funciones objetivo. El peso o ponderación es otorgada por un seleccionador de decisiones que indica mayor o menor importancia a cada objetivo así da lugar a una combinación lineal. Sus desventajas es que no siempre son

aplicables debido a la falta de relación entre los objetivos, los valores de ponderación tienen complicación en su determinación, brinda una única solución sin compensaciones y no es flexible pese a las múltiples funciones iniciales [52].

- b) *Optimidad de Pareto*: pertenece a los métodos no clásicos y principalmente se caracteriza por considerar todas las funciones objetivo para obtener el conjunto de óptimas soluciones, su principio consiste en crear un espacio donde todos los puntos óptimos son solución de funciones objetivo, pero debe hallar puntos eficientes que formen la frontera de Pareto en función de las restricciones que intervienen y del objetivo del modelo ya sea al maximizar o minimizar las funciones objetivo; este método es flexible y requiere de un recurso tecnológico [53].

### 3 Modelado multiobjetivo

La descripción matemática del modelo de optimización se desglosa a continuación, cuya modelación corresponde a un modelado multiobjetivo que servirá como herramienta para los procesos de despacho económico, resultado del cual se obtendrá la selección de las unidades del parque generador para abastecer la demanda minimizando los costos asociados a la operación del sistema y la emisión de los gases de efecto invernadero.

Los resultados del modelo multiobjetivo mostrarán la potencia horaria a ser despachada por el parque generador para un período de 24 horas, satisfaciendo las dos funciones objetivo y cumpliendo las restricciones operativas. El detalle de la formulación matemática se muestra seguidamente.

### 3.1 Formulación del problema de optimización

El problema matemático multiobjetivo a desarrollarse toma en cuenta las unidades de generación, los parámetros de costos y emisiones de gases de efecto invernadero asociados, la demanda horaria, razón por lo que el problema multiobjetivo será es del tipo no lineal, el detalle se muestra en los siguientes numerales:

#### 3.1.1 Funciones objetivo

La representación matemática formará dos funciones objetivo, la primera asociada a la minimización del costo operativo del parque de generación y la segunda a la cantidad de emisiones de gases de efecto. Las ecuaciones relacionadas se describen a continuación:

$$Ob1 = \sum_{p=1}^{24} \left( \sum_{Th} a_{th} \cdot P g_{th,p}^2 + b_{th} \cdot P g_{th,p} + c_{th} + \sum_H P_h \cdot P g_{h,p} \right) \quad (1)$$

$$Ob2 = \sum_{p=1}^{24} \left( \sum_{Th} d_{th} \cdot P g_{th,p}^2 + e_{th} \cdot P g_{th,p} + f_{th} \right) \quad (2)$$

Donde:

p	Intervalo de tiempo analizado
th	Índice de cada una de las centrales termoeléctricas
Th	Conjunto de las centrales térmicas modeladas
h	Índice de cada una de las centrales hidroeléctricas
H	Conjunto de las centrales hidroeléctricas modeladas
$a_{Th}$	Coefficiente cuadrático para la valoración económica de la

	producción de un generador tipo térmico.
$b_{th}$	Coefficiente lineal para la valoración económica de la producción de un generador tipo térmico
$c_{th}$	Constante para la valoración económica de la producción de un generador tipo térmico
$Pg_{th,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en cada período de tiempo.
$P_h$	Precio para valorar económicamente la energía de cada generador hidroeléctrico
$Pg_{h,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en cada período de tiempo.
$d_{Th}$	Coefficiente para la valoración de la emisión de gases de efecto invernadero de un generador tipo térmico.
$e_{th}$	Coefficiente lineal para la valoración de la emisión de gases de efecto invernadero de un generador tipo térmico.
$f_{th}$	Constante para la valoración de la emisión de gases de efecto invernadero de un generador tipo térmico.

La función de costos es obtenida al multiplicar la función de entrada y salida de cada generador térmico  $H_{th}$  (MBtu/h) por una constante que describe la razón del costo con respecto a la energía medida en unidades térmicas (USD/MBtu). Así mismo, la función de emisiones es obtenida del producto de la función de entrada y salida de cada generador térmico  $H_{th}$  (MBtu/h) por una constante que muestra la cantidad de emisiones por tipo de combustible en relación a la energía medida en unidades térmicas (ton/MBtu).

### 3.1.2 Restricción para abastecimiento de demanda horaria

Esta formulación matemática responde a que la producción de energía que pueda entregar los generadores térmicos e hidroeléctricos abastezca la demanda en cada una de las horas del período de análisis incluyendo un porcentaje de pérdidas, bajo esta parametrización la ecuación matemática corresponde a la siguiente:

$$\sum_{Th} Pg_{th,p} + \sum_H Pg_{h,p} = Carga_p + PL_p \quad (3)$$

Donde:

$Pg_{th,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en cada período de tiempo.
$Pg_{h,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en cada período de tiempo.
$Carga_p$	Demanda en cada período de análisis
$PL_p$	Pérdidas de potencia activa del sistema, calculadas como un porcentaje de la demanda en cada periodo de análisis.

### 3.1.3 Restricciones técnicas para los generadores

La constitución física los generadores imponen restricciones técnicas, por tal razón, la primera restricción a incluir será la modelación de los límites de generación de potencia activa, la formulación es la siguiente.

$$Pgl_{o_{th}} \leq Pg_{th,p} \leq Pgu_{p_{th}} \quad (4)$$

$$Pgl_{o_h} \leq Pg_{h,p} \leq Pgu_{p_h} \quad (5)$$

Donde:

$Pg_{th,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en el período de tiempo.
$Pg_{h,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en el período de tiempo.
$Pglo_{th}$	Límite inferior de la potencia que puede ser usada para el abastecimiento de la demanda en cualquier período de tiempo por parte de los generadores térmicos
$Pglo_h$	Límite inferior de la potencia que puede ser usada para el abastecimiento de la demanda en cualquier período de tiempo por parte de los generadores hidroeléctricos.
$Pgup_{th}$	Límite máximo de la potencia que puede ser usada para el abastecimiento de la demanda en cualquier período de tiempo por parte de los generadores térmicos
$Pgup_h$	Límite máximo de la potencia que puede ser usada para el abastecimiento de la demanda en cualquier período de tiempo por parte de los generadores hidroeléctricos.

La segunda restricción a modelar será la cantidad de potencia que puede entregar o reducir el parque generador entre períodos de tiempo tomando en cuenta la optimización de la operación del sistema de generación, cuya modelación se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$Pg_{th,p+1} - Pg_{th,p} \leq Pup_{th} \quad (6)$$

$$Pg_{th,p-1} - Pg_{th,p} \leq Pdown_{th} \quad (7)$$

$$Pg_{h,p+1} - Pg_{h,p} \leq Pup_h \quad (8)$$

$$Pg_{h,p-1} - Pg_{h,p} \leq Pdown_h \quad (9)$$

Donde:

$Pg_{th,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en el período de tiempo.
$Pg_{th,p+1}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en el período de tiempo subsiguiente.
$Pg_{th,p-1}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en el período de tiempo anterior.
$Pg_{h,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en el período de tiempo.
$Pg_{h,p+1}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en el período de tiempo subsiguiente.
$Pg_{h,p-1}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en el período de tiempo anterior.
$Pg_{th,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador térmico en cada período de tiempo.
$Pg_{h,p}$	Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en cada período de tiempo.
$Pup_{th}$	Pendiente para entrega de potencia de los generadores térmicos
$Pup_h$	Pendiente para entrega de potencia de los generadores hidráulicos
$Pdown_{th}$	Pendiente para la reducción de potencia de los generadores térmicos

$P_{down_h}$  Pendiente para la reducción de potencia de los generadores hidroeléctricos

### 3.1.4 Restricción para establecer la energía base

Esta restricción permitirá establecer la cantidad de energía que los generadores hidroeléctricos entregarán en el período de análisis, esta característica resulta de la planificación de la operación del sistema, por lo tanto, en el caso de tener un escenario lluvioso la cantidad de energía base es alta, mientras que, en un escenario seco, dicha energía es mínima, para el estudio se modelará un escenario medio con un factor de planta equivalente a 60% porcentaje tomada de [54].

$$\sum_{p=1}^{24} \sum_h^H P_{g_{h,p}} \leq FP_{eq} \cdot P \cdot \sum_h^H P_{gup_h} \quad (10)$$

Donde:

$P_{g_{h,p}}$  Variable de la Potencia activa a ser despachada por cada generador hidroeléctrico en el período de tiempo.  
 $h$  Índice de cada una de las centrales hidroeléctricas  
 $H$  Conjunto de las centrales hidroeléctricas modeladas  
 $P$  Período de tiempo analizado, en este estudio es de 24 horas  
 $p$  Intervalo de tiempo analizado, para el caso equivale a una hora  
 $FP_{eq}$  Factor de planta equivalente de las centrales hidroeléctricas.  
 $P_{gup_h}$  Límite máximo de la potencia de los generadores hidroeléctricos.

## 4 Estudio aplicado

A fin de aplicar el modelo de optimización multiobjetivo se procederá a usar de 13 generadores, 10 del tipo térmico y 3 de tipo hidráulico, así mismo el modelo usará una curva de demanda diaria, el detalle se muestra a continuación.

### 4.1 Unidades de generación

Las unidades de generación se dividen en dos tecnologías, la primera térmica y la segunda hidráulica. Las unidades de tipo térmico además se subdividen en tres categorías por el tipo de combustible que utilizan, el detalle de esta categorización se muestra seguidamente en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorización de unidades de generación.

<i>Unidad</i>	<i>Categoría</i>
<i>Gen 1</i>	Gas
<i>Gen 2</i>	Gas
<i>Gen 3</i>	Bunker
<i>Gen 4</i>	Bunker
<i>Gen 5</i>	Térmica Bunker
<i>Gen 6</i>	Bunker
<i>Gen 7</i>	Bunker
<i>Gen 8</i>	Diesel
<i>Gen 9</i>	Diesel
<i>Gen 10</i>	Diesel
<i>Gen 11</i>	Pasada
<i>Gen 12</i>	Hidráulica Pasada
<i>Gen 13</i>	Pasada

Con base a la categorización efectuada, a continuación, se describen los parámetros de entrada y salida de cada generador térmico  $H_{th}$  (MBtu/h), así como sus constantes para determinar las funciones de costos y de emisiones, para el efecto se usará los datos planteados en [20], [21], es necesario señalar que la constante beta valora únicamente la cantidad de emisiones de CO2.

Tabla 2. Función de entrada – salida por generador térmico.

<i>Unidad</i>	<i>H<sub>th</sub></i>		
	<i>MBtu/MW<sup>2</sup></i>	<i>MBtu/MW</i>	<i>MBtu</i>
	<i>Fac_1</i>	<i>Fac_2</i>	<i>Fac_3</i>
<i>Gen 1</i>	0.004773	6.8	468.7
<i>Gen 2</i>	0.002385	7.531	245.3
<i>Gen 3</i>	0.006788	7.606	146.8
<i>Gen 4</i>	0.004879	7.72	160.5
<i>Gen 5</i>	0.005573	7.722	176.5
<i>Gen 6</i>	0.003408	7.814	249.3
<i>Gen 7</i>	0.001464	7.965	213.8
<i>Gen 8</i>	0.001308	9.134	144
<i>Gen 9</i>	0.017923	9.583	175.1
<i>Gen 10</i>	0.000202	10.213	74.4

Tabla 3. Constantes para determinación de las funciones objetivos de los generadores térmicos.

<i>Unidad</i>	<i>Alfa</i> <i>(USD/MBtu)</i>	<i>Beta</i> <i>(lb/MBtu)</i>
<i>Gen 1</i>	1.4	1.66
<i>Gen 2</i>	1.4	1.65
<i>Gen 3</i>	1.6	3.01
<i>Gen 4</i>	1.6	2.84
<i>Gen 5</i>	1.6	2.45
<i>Gen 6</i>	1.6	2.76
<i>Gen 7</i>	1.6	3.12
<i>Gen 8</i>	1.8	4.35
<i>Gen 9</i>	1.8	3.98
<i>Gen 10</i>	1.8	4.87

Adicional, este tipo de generadores, por su constitución física, tienen restricciones asociadas a los límites de potencia, así como sus rampas de toma o retiro de carga, los datos asociados a estos atributos fueron tomados de [20], [21] y se describen a continuación.

Tabla 4. Parámetros técnicos de las unidades térmicas.

	<i>P<sub>gup</sub></i> <i>(MW)</i>	<i>P<sub>glo</sub></i> <i>(MW)</i>	<i>P<sub>up</sub></i> <i>(MW/h)</i>	<i>P<sub>down</sub></i> <i>(MW/h)</i>
<i>g1</i>	320	150	100	100
<i>g2</i>	190	100	55	55
<i>g3</i>	300	100	100	100

<i>g4</i>	500	100	100	100
<i>g5</i>	500	85	150	150
<i>g6</i>	600	50	150	150
<i>g7</i>	250	100	85	85
<i>g8</i>	400	100	100	100
<i>g9</i>	800	100	150	150
<i>g10</i>	200	100	50	50

Por su parte, las unidades de tipo hidroeléctrico tienen características asociadas a sus límites de potencia, sus rampas de toma o retiro de carga y su precio de venta de energía al sistema, los datos manejados para estas características son los descritos en [54] y corresponden a los que se muestran a continuación.

Tabla 5. Potencia y factor de planta de las unidades hidroeléctricas.

	<i>P<sub>nom</sub></i> <i>(MW)</i>	<i>Factor de planta</i>
<i>Gen 11</i>	250	0.6
<i>Gen 12</i>	200	0.6
<i>Gen 13</i>	250	0.6

Aplicando el factor de planta a la potencia nominal, se obtiene la potencia máxima de las unidades de generación, la tabulación se describe seguidamente en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de las unidades hidroeléctricas.

	<i>P<sub>gup</sub></i> <i>(MW)</i>	<i>P<sub>glo</sub></i> <i>(MW)</i>	<i>P<sub>up</sub></i> <i>(MW/h)</i>	<i>P<sub>down</sub></i> <i>(MW/h)</i>
<i>Gen 11</i>	150	0	50	50
<i>Gen 12</i>	120	0	60	60
<i>Gen 13</i>	150	0	30	30

Finalmente, en la Tabla 7 se describen los precios de venta de la energía hidroeléctrica, los cuales han sido tomado de [54].

Tabla 7. Precio de venta de energía de las unidades hidroeléctricas.

	<b>Precio (USD/MWh)</b>
<i>Gen 11</i>	35
<i>Gen 12</i>	46
<i>Gen 13</i>	28

## 4.2 Curva de demanda

Para determinar la curva de demanda se usaron los datos descritos en [55] y se adecuo la misma con el objeto de que sea aplicable al presente trabajo investigativo, los valores se muestran a continuación.

Tabla 8. Curva de demanda.

<b>Demanda (MW)</b>			
<i>Per 1</i>	1936.64	<i>Per 13</i>	2863.48
<i>Per 2</i>	2012.8	<i>Per 14</i>	2849.54
<i>Per 3</i>	1959.42	<i>Per 15</i>	2948.82
<i>Per 4</i>	1936.64	<i>Per 16</i>	3216.74
<i>Per 5</i>	1955.68	<i>Per 17</i>	3306.16
<i>Per 6</i>	2187.56	<i>Per 18</i>	3340.84
<i>Per 7</i>	2453.44	<i>Per 19</i>	3400
<i>Per 8</i>	2605.08	<i>Per 20</i>	3332.34
<i>Per 9</i>	2756.72	<i>Per 21</i>	3131.4
<i>Per 10</i>	2787.32	<i>Per 22</i>	2799.22
<i>Per 11</i>	2840.7	<i>Per 23</i>	2582.3
<i>Per 12</i>	2886.26	<i>Per 24</i>	2430.32

Como se había descrito en la modelación, en el abastecimiento de la demanda se debe incluir un porcentaje de pérdidas, el cual según [55] asciende a un valor aproximado del 3% de la demanda en cada período de tiempo, por tal razón a continuación se presenta las pérdidas a ser incluidas en el abastecimiento de la demanda.

Tabla 9. Pérdidas en cada período

<b>Pérdidas (MW)</b>			
<i>Per 1</i>	58.10	<i>Per 13</i>	85.90
<i>Per 2</i>	60.38	<i>Per 14</i>	85.49
<i>Per 3</i>	58.78	<i>Per 15</i>	88.46
<i>Per 4</i>	58.10	<i>Per 16</i>	96.50
<i>Per 5</i>	58.67	<i>Per 17</i>	99.18
<i>Per 6</i>	65.63	<i>Per 18</i>	100.23
<i>Per 7</i>	73.60	<i>Per 19</i>	102.00
<i>Per 8</i>	78.15	<i>Per 20</i>	99.97
<i>Per 9</i>	82.70	<i>Per 21</i>	93.94
<i>Per 10</i>	83.62	<i>Per 22</i>	83.98
<i>Per 11</i>	85.22	<i>Per 23</i>	77.47
<i>Per 12</i>	86.59	<i>Per 24</i>	72.91

En la Tabla 10 se describe la demanda total a ser abastecida, la cual contempla la demanda horaria incluida las pérdidas.

Tabla 10. Curva de demanda incluida pérdidas.

<b>Demanda + Pérdidas (MW)</b>			
<i>Per 1</i>	1,994.74	<i>Per 13</i>	2,949.38
<i>Per 2</i>	2,073.18	<i>Per 14</i>	2,935.03
<i>Per 3</i>	2,018.20	<i>Per 15</i>	3,037.28
<i>Per 4</i>	1,994.74	<i>Per 16</i>	3,313.24
<i>Per 5</i>	2,014.35	<i>Per 17</i>	3,405.34
<i>Per 6</i>	2,253.19	<i>Per 18</i>	3,441.07
<i>Per 7</i>	2,527.04	<i>Per 19</i>	3,502.00
<i>Per 8</i>	2,683.23	<i>Per 20</i>	3,432.31
<i>Per 9</i>	2,839.42	<i>Per 21</i>	3,225.34
<i>Per 10</i>	2,870.94	<i>Per 22</i>	2,883.20
<i>Per 11</i>	2,925.92	<i>Per 23</i>	2,659.77
<i>Per 12</i>	2,972.85	<i>Per 24</i>	2,503.23

## 4.3 Frontera Pareto eficiente

Según lo descrito en el marco teórico, el enfoque clásico para encontrar el conjunto óptimo de Pareto es el método basado en preferencias en el que se utiliza un vector de preferencia relativa para ponderar los objetivos y convertirlos en un valor escalar. Al convertir un problema de

optimización multiobjetivo en uno de un solo objetivo, solo se puede lograr una solución óptima que es muy sensible a los pesos o preferencias dadas. Bajo este contexto, es necesario señalar que la estructura del software GAMS solo puede resolver una función objetivo a la vez, por lo cual es necesario resolver el problema multiobjetivo varias veces para obtener el frente óptimo de Pareto usando la variación épsilon [18]. Dado que la formulación conlleva a la minimización de dos funciones objetivo simultáneamente, se realizará los siguientes pasos:

1. Resolver el problema de optimización de forma independiente para cada función objetivo, encontrando de esta forma el mínimo de cada una de ellas.
2. Los valores obtenidos son almacenados.
3. Con los resultados obtenidos, se procede a agregar a una de las funciones objetivo una restricción de la siguiente manera:
$$f_2 \leq \varepsilon$$
4. El valor de  $\varepsilon$  variará de  $f_2^{min}$  a  $f_2^{max}$  en función de la cantidad de casos a ser evaluados, maximizando en cada caso la  $f_1$ .
5. La  $f_1$  corresponde a la función de costos y la  $f_2$  es la función de emisiones.
6. El  $\varepsilon$  corresponde a la variación de la cantidad de emisiones y se calcula de la siguiente forma:

$$\varepsilon_i = f_2^{max} + \frac{[(f_2^{min} - f_2^{max}) \cdot c_i]}{Cn}$$

Donde:

$c_i$ : Corresponde a un contador que permite establecer la cantidad de puntos del frente de Pareto

$Cn$ : Corresponde al valor total del contador.

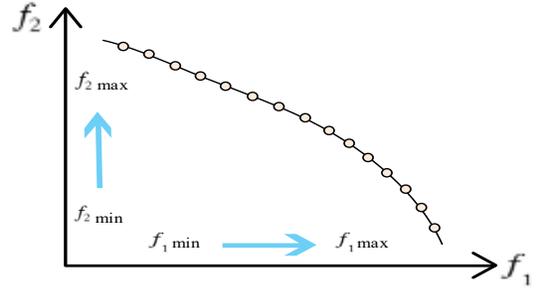


Figura 6. Frontera de Pareto – Variación épsilon [18].

Bajo este método se determina la frontera de Pareto, es importante señalar que cada uno de los puntos corresponde a la resolución del problema de optimización bajo la filosofía antes descrita.

#### 4.4 Determinación del óptimo de Pareto

Con las soluciones obtenidas es necesario seleccionar una dentro del conjunto óptimo que brinde las mejores características. Del conjunto de soluciones óptimas algunas de estas soluciones favorecen más ciertos aspectos de evaluación con respecto a los otros. Por esta razón, es necesario evaluar las soluciones y seleccionar aquella que ajusta de manera equitativa a todos los objetivos. Para este trabajo se emplea las de funciones de afinidad o de pertenencia para los objetivos [18].

$$u^{f_k(X_c)} = \begin{cases} 0 & \\ \frac{f_k^{max} - f_k(X_c)}{f_k^{max} - f_k^{min}} & \text{si } f_k^{min} \leq f_k(X_c) \leq f_k^{max} \end{cases} \quad (11)$$

Según [18], un tomador de decisiones conservador intenta maximizar la satisfacción mínima entre todos objetivos o minimizar la máxima insatisfacción, en tal sentido, la solución final puede entonces ser encontrado como:

$$\max(\min u^{f_k(X_c)}) \quad (12)$$

## 4.5 Metodología para solución

El esquema para la resolución del problema de optimización multiobjetivo conlleva una serie de operaciones comenzando por la toma de datos de las unidades de generación y la demanda, para luego ejecutar el modelo de optimización, con los resultados se obtiene el frente de Pareto de acuerdo a lo antes descrito para finalmente determinar el óptimo de Pareto, el detalle de la secuencia se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Secuencia para solución.

<b>Act. 1:</b>	Ingreso de datos técnicos de las unidades de generación térmica
<b>Act. 2:</b>	Ingreso de datos económicos y de emisiones de las unidades de generación térmica
<b>Act. 3:</b>	Ingreso de datos técnicos y económicos de las unidades hidroeléctricas. Determinación de la demanda horaria a ser abastecida, la cual incluye las pérdidas
<b>Act. 4:</b>	Problema de optimización Determinación de Variables continuas

$$Pg_{th,p}, Pg_{h,p}, Costo, Emisiones$$

Objetivos

$$Ob1 = \sum_p \left( \sum_{Th} a_{th} \cdot Pg_{th,p}^2 + b_{th} \cdot Pg_{th,p} + c_{th} + \sum_H P_h \cdot Pg_{h,p} \right)$$

$$Ob2 = \sum_p \left( \sum_{Th} d_{th} \cdot Pg_{th,p}^2 + e_{th} \cdot Pg_{th,p} + f_{th} \right)$$

Restricciones

$$\sum_{Th} Pg_{th,p} + \sum_H Pg_{h,p} = Carga_p + PL_p$$

$$P_{glo_{th}} \leq Pg_{th,p} \leq P_{gup_{th}}$$

$$P_{glo_h} \leq Pg_{h,p} \leq P_{gup_h}$$

$$\begin{aligned} Pg_{th,p+1} - Pg_{th,p} &\leq P_{up_{th}} \\ Pg_{th,p-1} - Pg_{th,p} &\leq P_{down_{th}} \\ Pg_{h,p+1} - Pg_{h,p} &\leq P_{up_h} \\ Pg_{h,p-1} - Pg_{h,p} &\leq P_{down_h} \\ \sum_p \sum_h Pg_{h,p} &\leq FP_{eq} \cdot P \cdot \sum_h P_{gup_h} \end{aligned}$$

<b>Act. 6</b>	Definición de casos de análisis
<b>Act. 7</b>	Resolución modelo multiobjetivo por método épsilon
<b>Act. 8</b>	Determinación del frente de Pareto
<b>Act. 9</b>	Análisis Post Pareto
<b>Act. 10</b>	Evaluación de resultados
<b>Act. 11</b>	Fin

## 4.6 Casos de estudio

Para validar el modelo multiobjetivo descrito, se procede al análisis de dos casos de estudio. El primero resolverá el problema del despacho económico tomando en cuenta únicamente las funciones de costos de las unidades de generación térmicas e hidráulicas para satisfacer la demanda en cada período de tiempo. El segundo caso de estudio resolverá el despacho económico mediante el modelo multiobjetivo, con los resultados obtenidos se procede a realizar el análisis de las variables técnicas, económicas y ambientales. Para ambos casos, la demanda a abastecer idéntica, la cual incluye las pérdidas del sistema conforme lo descrito.

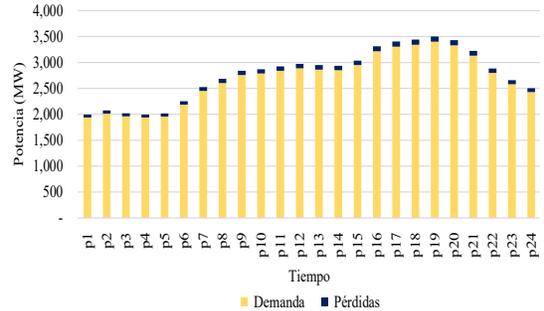


Figura 7. Curva de demanda y pérdidas.

## 5 Evaluación de resultados

Con los casos de estudio resueltos, se evalúa y analiza cada uno de los casos de estudio, cuyo detalle se muestra en los siguientes numeral y abarca los aspectos técnicos, económicos y ambientales.

### 5.1 Primer caso

Dado que el primer caso resuelve el despacho económico bajo la premisa de minimizar los costos, el modelo de optimización no considera la segunda función objetivo asociada a la cantidad de emisiones, los resultados del despacho por tipo de tecnología y por tipo de combustible se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Despacho por tipo de tecnología – 1er Caso.

<i>Período</i>	<i>Hidroeléctrica</i>	<i>Gas</i>	<i>Bunker</i>	<i>Diesel</i>
<i>p1</i>	420	510	764.74	300.00
<i>p2</i>	420	510	843.18	300.00
<i>p3</i>	420	510	788.20	300.00
<i>p4</i>	420	510	764.74	300.00
<i>p5</i>	420	510	784.35	300.00
<i>p6</i>	420	510	1,023.19	300.00

<i>p7</i>	420	510	1,297.04	300.00
<i>p8</i>	420	510	1,438.35	314.88
<i>p9</i>	420	510	1,524.00	385.42
<i>p10</i>	420	510	1,541.28	399.66
<i>p11</i>	420	510	1,571.43	424.49
<i>p12</i>	420	510	1,597.16	445.68
<i>p13</i>	420	510	1,584.30	435.09
<i>p14</i>	420	510	1,576.42	428.60
<i>p15</i>	420	510	1,620.18	487.10
<i>p16</i>	420	510	1,796.14	587.10
<i>p17</i>	420	510	1,827.41	647.94
<i>p18</i>	420	510	1,833.05	678.02
<i>p19</i>	420	510	1,872.00	700.00
<i>p20</i>	420	510	1,852.31	650.00
<i>p21</i>	420	510	1,772.28	523.07
<i>p22</i>	420	510	1,530.13	423.07
<i>p23</i>	420	510	1,406.70	323.07
<i>p24</i>	420	510	1,273.23	300.00

Como se muestra en la

Figura 8 las unidades hidráulicas y las térmicas de gas son despachadas como unidades de base, siendo las unidades térmicas de bunker y diésel quienes varían su producción para satisfacer la demanda incluida las pérdidas.

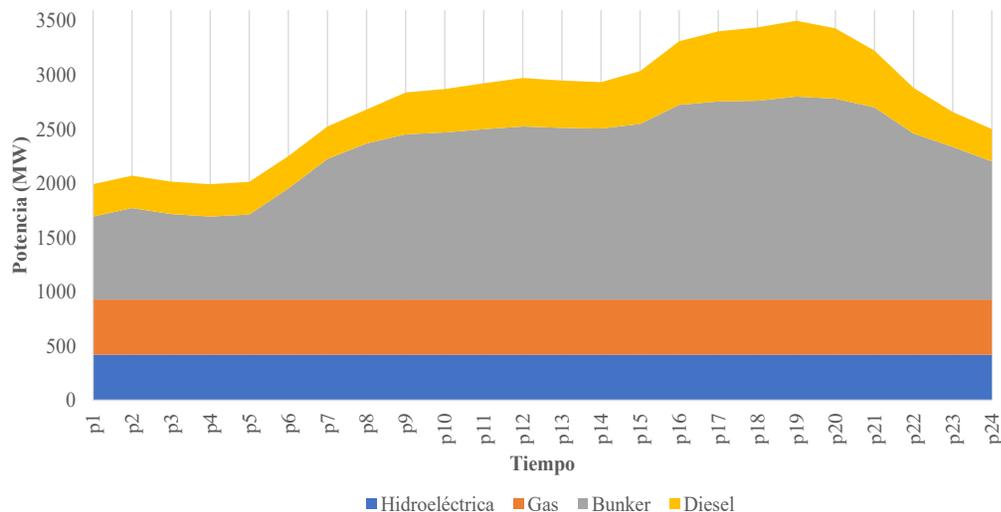


Figura 8. Despacho por tipo de tecnología – 1er Caso.

El aporte energético por tipo de tecnología se muestra en la Figura 9 y la Tabla 13.

Tabla 13. Porcentaje de aporte energético – 1er Caso.

	<i>Energía (MWh)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Bunker</i>	33,881.82	51%
<i>Diesel</i>	10,253.19	15%
<i>Gas</i>	12,240.00	18%
<i>Hidroeléctrica</i>	10,080.00	15%
<b>Total</b>	<b>66,455.00</b>	

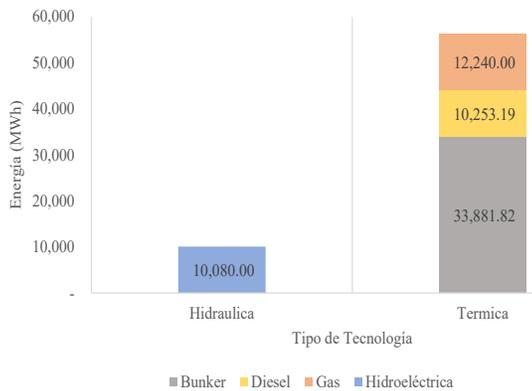


Figura 9. Aporte energético por tipo de tecnología – 1er Caso

Del análisis a los valores ilustrados en la Figura 9 y en la Tabla 13, se puede señalar que el aporte energético mayoritario es de las unidades térmicas que usan bunker, representando el 51%, mientras el resto de las centrales térmicas es del 34% para que finalmente las unidades hidroeléctricas aportan el 15%. Por su parte, los costos por tipo de tecnología se presentan en la Figura 10 y la Tabla 14.

Tabla 14. Costos por tipo de tecnología – 1er Caso

	<i>Costo (USD)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Hidroeléctrica</i>	359,280.00	4%
<i>Gas</i>	1644969.883	18%
<i>Bunker</i>	5306285.823	57%
<i>Diesel</i>	2039288.583	22%
<b>Total</b>	<b>9,349,824.29</b>	

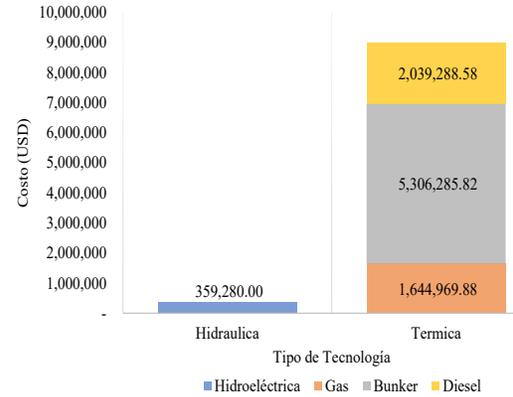


Figura 10. Costos por tipo de tecnología – 1er Caso.

De la Tabla 14 se señala que la gran parte del costo corresponde a las unidades térmicas que usan bunker con un 57%, mientras que la energía de las centrales hidroeléctricas representa apenas el 4%. Así mismo, los resultados de la evaluación de la cantidad de emisiones se muestran en la Tabla 15 y Figura 11.

Tabla 15. Emisiones por tipo de tecnología – 1er Caso.

	<i>Emisiones (Ton CO2)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Gas</i>	88.28	12%
<i>Bunker</i>	423.97	57%
<i>Diesel</i>	225.14	31%
<b>Total</b>	<b>737.39</b>	

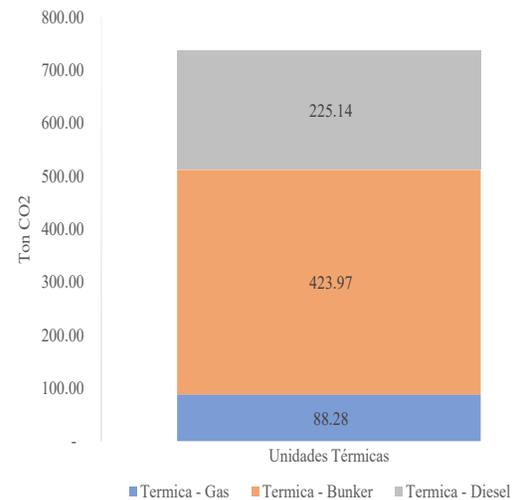


Figura 11. Emisiones por tipo de tecnología – 1er Caso

Tabla 15 se observa que la gran cantidad de emisiones son producidas por las unidades térmicas que usan bunker con un

57%. Es importante indicar que, a pesar de que la energía entregada por las unidades de diésel representa un 15%, las emisiones representan un 31%, dato importante que se evaluará al analizar el 2do caso de estudio.

## 5.2 Segundo caso

El segundo caso aplicará el modelo de optimización multiobjetivo, en tal sentido, se aplicará el método  $\epsilon$ -Pareto, por lo que se ha establecido un contador equivalente a 16 eventos diferentes, los que permitirán formar el frente de Pareto. Es necesario señalar que, para cada evento, se realizará un despacho económico considerando las dos funciones objetivas. En tal razón, se ha obtenido la Tabla 16.

Tabla 16. Método  $\epsilon$ -Pareto – Frente de Pareto.

	<i>Eps</i>	<i>Costo (USD)</i>	<i>Emisiones (tonCO2)</i>
Evento 1	737.39	9,349,824.29	737.39
Evento 2	736.23	9,349,913.26	736.23
Evento 3	735.06	9,350,155.42	735.06
Evento 4	733.90	9,350,551.45	733.90
Evento 5	732.74	9,351,189.55	732.74
Evento 6	731.58	9,352,121.14	731.58
Evento 7	730.41	9,353,373.32	730.41
Evento 8	729.25	9,354,982.83	729.25
Evento 9	728.09	9,356,981.12	728.09
Evento 10	726.93	9,359,431.81	726.93
Evento 11	725.76	9,362,446.10	725.76
Evento 12	724.60	9,366,457.58	724.60
Evento 13	723.44	9,371,807.30	723.44
Evento 14	722.28	9,378,881.21	722.28
Evento 15	721.11	9,388,605.59	721.11
Evento 16	719.95	9,424,426.43	719.95

De la Tabla 16, se puede indicar que para el Evento 1, el valor del costo y las emisiones corresponde a los obtenidos en el primer caso de análisis. Adicional y dados los resultados obtenidos para los demás eventos, se obtiene la Figura 12 que corresponde al frente de Pareto.

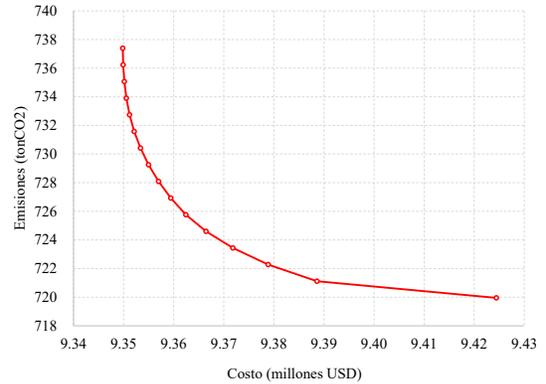


Figura 12. Frente de Pareto.

Una vez obtenido el frente de Pareto se procede a realizar el análisis posterior para seleccionar aquella solución que ajusta de manera equitativa a todos los objetivos, para lograr lo indicado se aplicará las funciones de pertenencia, para lo cual se procederá de la siguiente manera:

1. De la Tabla 17 se determina el valor máximo y mínimo para cada una de las funciones de Costos y Emisiones

Tabla 17. Máximo y Mínimo de Funciones.

	<i>Costo (USD)</i>	<i>Emisiones (tonCO2)</i>
<i>máx.</i>	9,424,426.43	737.39
<i>min</i>	9,349,824.29	719.95

2. Se procede al cálculo de la función de pertenencia para cada una de las funciones objetivo aplicando (10), obteniéndose la Tabla 18.

Tabla 18. Funciones de pertinencia.

$\mu^f_{costos}$	$\mu^f_{emisiones}$
1.0000	0.000
0.9988	0.067
0.9956	0.133
0.9903	0.200
0.9817	0.267
0.9692	0.333
0.9524	0.400
0.9309	0.467
0.9041	0.533
0.8712	0.600
0.8308	0.667

0.7770	0.733
0.7053	0.800
0.6105	0.867
0.4802	0.933

3. De conformidad con (12), se procede a encontrar el mínimo de los valores de la Tabla 18. De lo cual se obtiene la Tabla 19.

Tabla 19. Mínimo de las funciones de pertinencia.

	<b>Min</b> <b>(<math>u^f_{emisiones}, u^f_{costos}</math>)</b>
Evento 1	0.000
Evento 2	0.067
Evento 3	0.133
Evento 4	0.200
Evento 5	0.267
Evento 6	0.333
Evento 7	0.400
Evento 8	0.467
Evento 9	0.533
Evento 10	0.600
Evento 11	0.667
Evento 12	0.733
Evento 13	0.705
Evento 14	0.611
Evento 15	0.480

4. Finalmente se encuentra el máximo valor de la Tabla 19, consiguiéndose de esta forma el punto óptimo u óptimo de Pareto, para el caso corresponde al Evento 12 con un valor de 0.733.

Por lo expuesto, el punto óptimo alcanzado corresponde al despacho efectuado en el Evento 12, el cual corresponde a un costo de 9,366,457.58 y un total de emisiones de 724.60 ton CO<sub>2</sub>, razón por la cual se procederá a realizar el análisis correspondiente a ese evento.

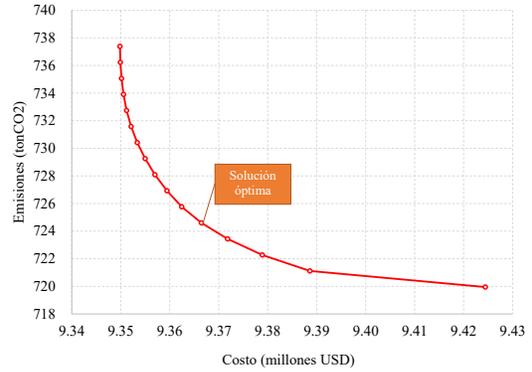


Figura 13. Solución óptima del Frente de Pareto

El despacho obtenido para el evento 12 por tipo de tecnología y por tipo de combustible se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Despacho por tipo de tecnología – 2do Caso

Periodo	Hidro-eléctrica	Gas	Bunker	Diesel
p1	420	510	764.74	300
p2	420	510	843.18	300
p3	420	510	788.20	300
p4	420	510	764.74	300
p5	420	510	784.35	300
p6	420	510	1,023.19	300
p7	420	510	1,297.04	300
p8	420	510	1,453.23	300
p9	420	510	1,609.42	300
p10	420	510	1,640.94	300
p11	420	510	1,695.92	300
p12	420	510	1,742.85	300
p13	420	510	1,719.38	300
p14	420	510	1,705.03	300
p15	420	510	1,807.28	300
p16	420	510	1,983.24	400
p17	420	510	2,011.87	463.47
p18	420	510	2,025.61	485.46
p19	420	510	2,049.04	522.96
p20	420	510	2,026.72	475.59
p21	420	510	1,919.75	375.59
p22	420	510	1,653.20	300.00
p23	420	510	1,429.77	300.00
p24	420	510	1,273.23	300.00

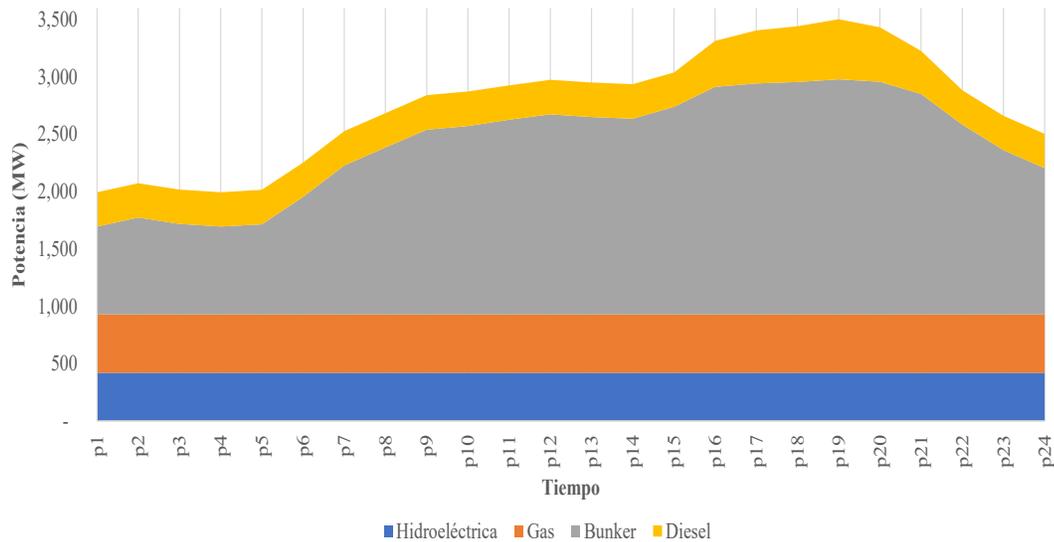


Figura 14. Despacho por tipo de tecnología – 2do Caso

Como se muestra en la Figura 14, al igual que en el primer caso las unidades hidráulicas y las térmicas de gas son despachadas como unidades de base, siendo las unidades térmicas de bunker y diésel quienes varían su producción para satisfacer la demanda incluida las pérdidas. El aporte energético por tipo de tecnología se muestra en la Figura 15 y la Tabla 21.

Tabla 21. Porcentaje de aporte energético – 2do Caso.

	<i>Energía (MWh)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Bunker</i>	36,011.93	54%
<i>Diesel</i>	8,123.07	12%
<i>Gas</i>	12,240.00	18%
<i>Hidroeléctrica</i>	10,080.00	15%
<b>Total</b>	<b>66,455.00</b>	

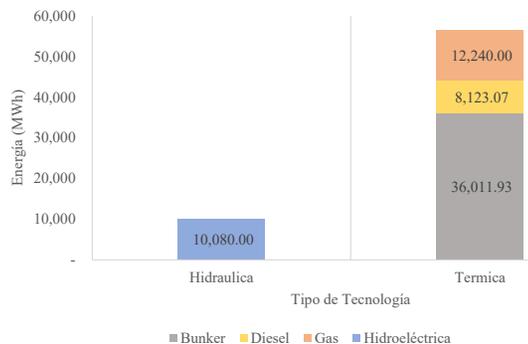


Figura 15. Aporte energético por tipo de tecnología – 2do Caso.

De la Tabla 21, se puede señalar que el aporte energético mayoritario corresponde a las unidades térmicas que usan bunker, representando el 54%, 3% adicional al primer caso, mientras que el aporte energético de las unidades que usan diésel es del 12% a comparación del 15% del primer caso, reduciéndose 3%, finalmente las unidades hidroeléctricas aportan el 15%. Por otra parte, los costos por tipo de tecnología se presentan en la Figura 16 y la Tabla 22.

Tabla 22. Costos por tipo de tecnología – 2do Caso.

	<i>Costo (USD)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Hidroeléctrica</i>	359,280.00	4%
<i>Gas</i>	1,644,969.88	18%
<i>Bunker</i>	5,698,673.57	61%
<i>Diesel</i>	1,663,534.13	18%
<b>Total</b>	<b>9,366,457.58</b>	

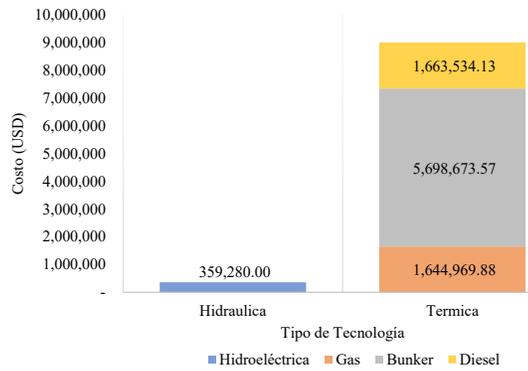


Figura 16. Costos por tipo de tecnología – 2do Caso

De la Tabla 22 se señala que el costo de las unidades térmicas que usan bunker se ha incrementado un 4% a comparación del primer caso, mientras que el costo de las unidades que usan diésel se ha reducido en 3% a comparación del primer caso.

En el análisis de las emisiones, arrojan los resultados que se muestran en la Tabla 23 y se ilustran en la Figura 17.

Tabla 23. Emisiones por tipo de tecnología – 2do Caso.

	<i>Emisiones (Ton CO2)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Gas</i>	88.28	12%
<i>Bunker</i>	453.04	61%
<i>Diesel</i>	183.28	25%
<b>Total</b>	<b>724.60</b>	

La Tabla 23 muestra que las unidades térmicas que usan bunker incrementan 4% con respecto al primer caso, pero a su vez las emisiones producidas por las unidades térmicas que usan diésel se reducen 6% lo que sobrelleva a una reducción global de las emisiones.

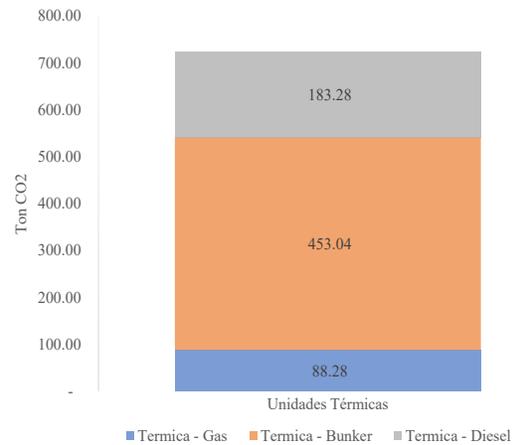


Figura 17. Emisiones por tipo de tecnología – 2do Caso.

Finalmente se analiza una comparativa de los costos totales y la cantidad de emisiones entre los dos casos de estudio.

Tabla 24. Comparativa de Costos y Emisiones.

	<i>Emisiones (Ton CO2)</i>	<i>Costo (USD)</i>
<i>1re Caso</i>	737.39	9,349,824.29
<i>2do Caso</i>	724.60	9,366,457.58
<i>Variación</i>	-12.79	16,633.29
<b>%Variación</b>	<b>-1.7%</b>	<b>0.2%</b>

De la Tabla 24 se puede señalar que el modelo multiobjetivo produce un nuevo despacho, el cual si bien incrementa el costo en un 0.2% con respecto al despacho clásico, este cambio obliga a un decremento de casi el 2% de las emisiones, es decir, que ese leve incremento del costo afecta 10 veces en la disminución de la cantidad de emisiones a ser liberadas al ambiente. Este análisis se vuelve más relevante cuando existe un incremento en las unidades hidráulicas y aún más cuando ingresan energías renovables.

## 6 Conclusiones

Los análisis permiten indicar que, la modelación matemática realizada en el presente documento establece un modelado multiobjetivo. Para su resolución se usó el método épsilon que determino el frente de Pareto y utilizando las funciones de pertenencia se determinó la solución óptima. En este contexto, se logró la minimización de dos funciones objetivos, la primera relacionada con los costos operativos del sistema y la segunda asociada con la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> emitidos al ambiente, resultado de lo cual se deduce el despacho económico para satisfacer la demanda en los diferentes períodos de tiempo, cumpliendo con las restricciones impuestas.

Así mismo, los resultados presentados en el segundo caso indican que la optimización multiobjetivo depende sustancialmente de los parámetros con los que se conforman las funciones objetivo, razón por la que es necesario que en el sector de generación que usan combustibles fósiles se determinen acertadamente las funciones de entrada y salida de sus unidades. Adicional, se comprueba que el establecimiento de factores para evaluar las cantidades de emisiones a nivel nacional es de gran utilidad en la modelación realizada y adicional brindan información importante para conocer qué tipo de gas de efecto invernadero debe ser tasado acertadamente.

Al analizar los resultados del segundo caso a comparación del primer caso, se observa que existe un incremento de aproximadamente 16000 USD que corresponde a un valor porcentual del 0.2% respecto del costo inicial, de manera complementaria, la cantidad de emisiones se reduce en 13 toneladas de CO<sub>2</sub>, lo que representa una disminución del 2%. Dado las unidades modeladas, se puede citar que

el efecto antes descrito será más notorio con la implementación de generación renovable no convencional y la incorporación de generación térmica eficiente.

De forma similar al realizar un análisis comparativo en relación con las emisiones, se indica que, el modelo multiobjetivo realiza una asignación de la potencia despachada considerando los aspectos económicos y ambientales, permitiendo que las unidades térmicas que usan bunker incrementen sus emisiones un 4% con respecto al primer caso, pero a su vez las emisiones producidas por las unidades térmicas que usan diésel se reducen 6% lo que sobrelleva a una reducción global de las emisiones.

De los casos analizados, se puede señalar que el modelo multiobjetivo de despacho con respecto al modelo de despacho económico clásico provee una herramienta importante para que los operadores de los sistemas eléctricos puedan tomar decisiones viables evaluando, a más de la economía del sistema eléctrico, el impacto al ambiente por la producción de gases de efecto invernadero por parte de las centrales de generación.

Por último, se observa que la modelación multiobjetivo permite una disminución en las emisiones de CO<sub>2</sub>, sin embargo, también conlleva un incremento en el costo del sistema, razón por la cual para mitigar este efecto se puede estudiar alternativas como créditos de carbono o alguna disposición de ámbito político que viabilice un mecanismo de compensación que solvente el mencionado incremento de costo.

## 6.1 Trabajos futuros

La temática expuesta puede generar diversas investigaciones, entre las más importantes se puede citar:

- Efectos económicos y ambientales del despacho prioritario de energía renovable considerando la producción de energía fluctuante de las unidades de generación de gas.
- Optimización híbrida no lineal de enjambre de partículas para resolver un problema de despacho económico ambiental.
- Despacho económico ambiental de microrred mediante la aplicación de lógica difusa.
- Despacho económico ambiental dinámico de sistemas híbridos de energía renovable basados en certificados verdes negociables.
- Despacho ambiental económico del sistema de energía solar, eólica e hidrotérmico.
- Despacho de energía multiobjetivo económico ambiental con análisis estocástico de energía eólica, solar y pequeña hidroeléctrica.
- Despacho económico ambiental del sistema energético regional integrado considerando la respuesta integrada a la demanda.

## 7 Referencias

- [1] C. Li, “Sustainable Computing: Informatics and Systems Multi-objective optimization of space adaptive division for environmental economic dispatch,” *Sustain. Comput. Informatics Syst.*, vol. 30, no. December 2020, p. 100500, 2021, doi: 10.1016/j.suscom.2020.100500.
- [2] X. Song, Y. Wang, Z. Zhang, C. Shen, and F. Peña-mora, “Economic-environmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems,” *Appl. Energy*, vol. 281, no. October 2020, p. 116142, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116142.
- [3] M. Hermans, K. Bruninx, and E. Delarue, “Impact of CCGT Start-Up Flexibility and Cycling Costs Toward Renewables Integration,” in *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2019, p. 1, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973589.
- [4] Q. Tan, Y. Ding, Q. Ye, S. Mei, Y. Zhang, and Y. Wei, “Optimization and evaluation of a dispatch model for an integrated wind-photovoltaic-thermal power system based on dynamic carbon emissions trading,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 253, no. January, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113598.
- [5] L. Abaali *et al.*, “Solution of Economic and Environmental Power Dispatch Problem of an Electrical Power System using BFGS-AL Algorithm,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 170, no. 2019, pp. 857–862, 2020, doi: 10.1016/j.procs.2020.03.144.
- [6] J. Niquepa, “Metodología de Toma de Decisiones En Energización de Zonas no Interconectadas Considerando Fuentes Renovables Solar Fotovoltaica y Eólica,” *Tesis*, 2018.
- [7] A. Carrillo-galvez, E. López, F. De Ciencias, M. Departamento, D. I. Matemática, and U. De Concepción, “A duality theory approach to the environmental / economic dispatch problem,” *Electr. Power Syst. Res.*,

- vol. 184, no. March, p. 106285, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106285.
- [8] A. Goudarzi, Y. Li, and J. Xiang, “A hybrid non-linear time-varying double-weighted particle swarm optimization for solving non-convex combined environmental economic dispatch problem,” *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 86, no. x, p. 105894, 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105894.
- [9] Z. Xin-gang, Z. Ze-qi, X. Yi-min, and M. Jin, “Economic-environmental dispatch of microgrid based on improved quantum particle swarm optimization,” *Energy*, vol. 195, p. 117014, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117014.
- [10] E. Gonçalves, A. Roberto, D. Nunes, L. Nepomuceno, E. Cássia, and E. Martins, “Electrical Power and Energy Systems Deterministic approach for solving multi-objective non-smooth Environmental and Economic dispatch problem,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 104, no. June 2018, pp. 880–897, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.07.056.
- [11] X. Li, W. Wang, H. Wang, J. Wu, X. Fan, and Q. Xu, “Dynamic environmental economic dispatch of hybrid renewable energy systems based on tradable green certificates,” *Energy*, vol. 193, p. 116699, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116699.
- [12] J. Neumann *et al.*, “An empirical analysis of constraint handling on evolutionary multi-objective algorithms for the Environmental / Economic Load Dispatch problem,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 165, p. 113774, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2020.113774.
- [13] M. Basu, “Economic environmental dispatch of solar-wind-hydro-thermal power system,” *Reinf. Plast.*, vol. 30, no. September, pp. 107–122, 2019, doi: 10.1016/j.ref.2019.04.002.
- [14] P. M. Joshi and H. K. Verma, “An improved TLBO based economic dispatch of power generation through distributed energy resources considering environmental constraints,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 18, p. 100207, 2019, doi: 10.1016/j.segan.2019.100207.
- [15] W. Wei, F. Liu, J. Wang, L. Chen, S. Mei, and T. Yuan, “Robust environmental-economic dispatch incorporating wind power generation and carbon capture plants,” *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 674–684, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.013.
- [16] L. He, Z. Lu, L. Geng, J. Zhang, X. Li, and X. Guo, “Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 116, no. May 2019, p. 105525, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105525.
- [17] M. Octubre, “Guía para el Cálculo de la huella de Carbono y para la Elaboración de un Plan De Mejora de una Organización,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2016.
- [18] Alonso, M., Amarís, H., & Chindris, M. (2012). A multiobjective Var/Volt Management System in Smartgrids. *Energy Procedia*, 14, 1490–1495..
- [19] A. De, M. De, and C. Marco, “Factor Anual de Emisión de CO 2 Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador , Sobre

- el Cambio Climático UNFCCC , para el Periodo 2009-2014 Annual CO 2 Emission Factor Produced by the Generating Plants of National Inte,” *J. Clean. Prod.*, vol. 37, no. 1, 2016.
- [20] L. Bayón, J. M. Grau, M. M. Ruiz, and P. M. Suárez, “The Exact Solution of the Environmental / Economic Dispatch Problem,” *IEEE Trans. Power Syst.*, no. October 2014, 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2179952.
- [21] L. Sepúlveda, “Despacho económico ambiental en sistemas eléctricos,” *Acad. Manag. Rev.*, 1998.
- [22] L. Fanglei, W. Fan, Y. Jiaming, X. Guoyi, and B. Tianshu, “Estimating Maximum Penetration Level of Renewable Energy Based on Frequency Stability Constrains in Power Grid,” in *2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2020, pp. 607–611, doi: 10.1109/ACPEE48638.2020.9136471.
- [23] C. Liang, K. Yu, and J. Xie, “A Consensus-based Distributed Environmental-Economic Multi-objective Dispatch Strategy for Combined Heat and Power Generation Systems,” in *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2019, pp. 1631–1636, doi: 10.1109/EI247390.2019.9062072.
- [24] C. D. González, “Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis,” *tesis*, 2017.
- [25] IRENA, “Rankings de países según su capacidad de energía renovable o generación de electricidad,” *Renewable Energy*, 2020. <https://www.irena.org/Statistics/Vie>
- w-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Country-Rankings (accessed Jul. 23, 2021).
- [26] IRENA, “Tendencias regionales-descripción general global de la capacidad instalada de energía renovable y la electricidad generada en todas las regiones.,” *Renewable Energy*, 2020. <https://www.irena.org/Statistics/Vie>
- w-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Regional-Trends (accessed Jul. 23, 2021).
- [27] M. Emmanuel, K. Doubleday, B. Cakir, M. Markovi, and B. Hodge, “A review of power system planning and operational models for flexibility assessment in high solar energy penetration scenarios,” vol. 210, no. July, pp. 169–180, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.07.017.
- [28] A. Ayub, “Planeación de la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 1999.
- [29] A. Pina, C. A. Silva, and P. Ferrão, “High-resolution modeling framework for planning electricity systems with high penetration of renewables,” *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 215–223, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.05.074.
- [30] A. Singh, P. Das, A. Jain, R. Bhakar, and J. Mathur, “Long-term energy system planning considering short-term operational constraints,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 26, no. October 2018, p. 100383, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.100383.
- [31] K. Poncelet, E. Delarue, D. Six, J. Duerinck, and D. William, “Impact of the level of temporal and operational detail in energy-system planning models,” *Appl. Energy*, vol. 162, pp. 631–643, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.100.
- [32] A. Pina, C. Silva, and P. Ferrão,

- “Modeling hourly electricity dynamics for policy making in long-term scenarios,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 9, pp. 4692–4702, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.062>.
- [33] A. Flores-quiroz, R. Palma-behnke, G. Zakeri, and R. Moreno, “A column generation approach for solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 136, pp. 232–241, 2016, doi: [10.1016/j.epsr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.02.011).
- [34] G. Haydt, V. Leal, A. Pina, and C. A. Silva, “The relevance of the energy resource dynamics in the mid/long-term energy planning models,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3068–3074, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.028>.
- [35] C. Vrionis, V. Tsalavoutis, and A. Tolis, “A Generation Expansion Planning model for integrating high shares of renewable energy: A Meta-Model Assisted Evolutionary Algorithm approach,” *Appl. Energy*, vol. 259, no. May 2019, p. 114085, 2020, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.114085](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114085).
- [36] P. Das, J. Mathur, R. Bhakar, and A. Kanudia, “Implications of short-term renewable energy resource intermittency in long-term power system planning,” *Energy Strateg. Rev.*, vol. 22, no. July, pp. 1–15, 2018, doi: [10.1016/j.esr.2018.06.005](https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.06.005).
- [37] N. Redondo, “Estructura y representacion de Sistemas eléctricos de potencia,” *Acad. Manag. Rev.*, 2021.
- [38] A. Nuñez, “Mercado y transporte de energia eléctrica -Despachos economicos,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol. IAEA*, pp. 1–12, 2013.
- [39] D. Sun *et al.*, “Integrated Generation-Grid-Load Economic Dispatch Considering Demand Response,” in *2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, 2020, pp. 375–379, doi: [10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208351](https://doi.org/10.1109/ICPSAsia48933.2020.9208351).
- [40] J. Yu and X. Huang, “Environmental Economic Dispatch Based on Sub-area Coordinated Optimization,” in *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2010, pp. 3710–3713, doi: [10.1109/iCECE.2010.905](https://doi.org/10.1109/iCECE.2010.905).
- [41] “Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2010.
- [42] P. Peralta and E. Silva, “Despacho Económico con Restricciones Ambientales en Sistemas Térmicos,” *Tesis*, pp. 1–64, 2011.
- [43] M. M. Salama and S. M. Abdel Maksoud, “Economic dispatch of thermal generation,” *Model. Meas. Control D*, vol. 12, no. 2, pp. 53–63, 1995.
- [44] R. Das *et al.*, “Multi-objective techno-economic-environmental optimisation of electric vehicle for energy services,” *Appl. Energy*, vol. 257, no. October 2019, p. 113965, 2020, doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113965](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113965).
- [45] F. Hu, K. J. Hughes, D. B. Ingham, L. Ma, and M. Pourkashanian, “Dynamic economic and emission dispatch model considering wind power under Energy Market Reform: A case study,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 110, no. March, pp. 184–196, 2019, doi: [10.1016/j.ijepes.2019.03.004](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.03.004).
- [46] 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. scieloccl, pp. 155–168, 2015.
- [47] M. Cruz and G. Winter, "Optimización de costes y emisiones en sistemas eléctricos de potencia," *Acad. Manag. Rev.*, 2015.
- [48] D. Li, S. Das, A. Pahwa, and K. Deb, "Expert Systems with Applications A multi-objective evolutionary approach for generator scheduling," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 18, pp. 7647–7655, 2013, doi: 10.1016/j.eswa.2013.06.020.
- [49] D. R. P. Toledo and C. A. B. Singaña, "Optimización multiobjetivo en sistemas de puesta a tierra para subestaciones de potencia considerando la longitud de conductor," 2019.
- [50] C. Roman and W. Rosehart, "Evenly distributed pareto points in multi-objective optimal power flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 1011–1012, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.873010.
- [51] E. Galeano and V. Montoya, "Optimización Multiobjetivo de la Operación en Sistemas Automatizados de Distribución de Energía Eléctrica," *Tesis*, no. May, 2008.
- [52] Y. Jin, M. Olhofer, and B. Sendhoff, *Dynamic weighted aggregation for evolutionary multi-objective optimization: Why does it work and how?* 2001.
- [53] T. G. Hlalele, R. M. Naidoo, R. C. Bansal, and J. Zhang, "Multi-objective stochastic economic dispatch with maximal renewable penetration under renewable obligation," *Appl. Energy*, vol. 270, no. May, p. 115120, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115120.
- [54] International Energy Agency, "Hydropower Special Market Report Analysis and forecast to 2030," *Book*, 2019.
- [55] MERNNR, "Plan Maestro de Electricidad 2019-2027," *Minist. Energía y Recur. No Renov.*, p. 390, 2019, [Online]. Available: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.
- [56] L. A. T. D. E. Decisiones, A. En, M. Difusos, G. Jaime, and C. Henao, "Aproximaciones metodológicas para la toma de decisiones, apoyadas en modelos difusos," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2004

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 25. Matriz de estado del arte

DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN																						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CTAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA		
				Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotérmicos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes períodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación
1	2021	Sustainable Computing: Informatics and Systems Multi-objective optimization of space adaptive division for environmental economic dispatch	1	☒				☒		☒			☒	☒			☒			☒		
2	2021	Economic-environmental equilibrium-based bi-level dispatch strategy towards integrated electricity and natural gas systems	1	☒		☒			☒				☒		☒	☒		☒	☒			☒
3	2018	Impact of CCGT Start-Up Flexibility and Cycling Costs Toward Renewables Integration	27		☒				☒				☒								☒	
4	2019	Optimization and evaluation of a dispatch model for an integrated wind- photovoltaic-thermal power system based on dynamic carbon emissions trading	9	☒				☒	☒	☒						☒						☒
5	2020	Solution of Economic and Environmental Power Dispatch Problem of an Electrical Power System using BFGS-AL Algorithm	3		☒				☒	☒	☒				☒	☒					☒	
6	2013	Metodología de Toma de Decisiones En Energización de Zonas no Interconectadas Considerando Fuentes Renovables Solar Fotovoltaica y Eólica	1	☒	☒							☒			☒	☒				☒		☒
7	2020	A duality theory approach to the environmental / economic dispatch problem	1						☒	☒				☒							☒	
8	2020	A hybrid non-linear time-varying double-weighted particle swarm optimization for solving non-convex combined environmental economic dispatch problem	21		☒								☒									

## DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CTTAS	TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA				
				Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotérmicos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales
9	2020	Economic-environmental dispatch of microgrid based on improved quantum particle swarm optimization	24	☒							☒											☒	
10	2019	Electrical Power and Energy Systems Deterministic approach for solving multi-objective non-smooth Environmental and Economic dispatch problem	13					☒		☒	☒				☒							☒	
11	2020	Dynamic environmental economic dispatch of hybrid renewable energy systems based on tradable green certificates	19	☒		☒				☒			☒	☒	☒							☒	
12	2021	An empirical analysis of constraint handling on evolutionary multi-objective algorithms for the Environmental / Economic Load Dispatch problem	7	☒	☒				☒		☒			☒			☒	☒					
13	2019	Economic environmental dispatch of solar-wind-hydro-thermal power system	10					☒		☒	☒					☒							☒
14	2019	An improved TLBO based economic dispatch of power generation through distributed energy resources considering environmental constraints	12			☒	☒				☒			☒	☒						☒		
15	2016	Robust environmental-economic dispatch incorporating wind power generation and carbon capture plants	30	☒		☒	☒			☒	☒			☒	☒							☒	☒
16	2020	Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response	27			☒			☒				☒	☒								☒	
17	2017	Guía para el Cálculo de la huella de Carbono y para la Elaboración de un Plan De Mejora de una Organización	5					☒	☒					☒								☒	
18	2004	Aproximaciones metodológicas para la toma de decisiones, apoyadas en modelos difusos	2	☒							☒										☒		

## DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotermos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
19	2016	Factor Anual de Emisión de CO <sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador	26				☒	☒		☒	☒								☒	☒	☒			
20	2012	The Exact Solution of the Environmental / Economic Dispatch Problem	65	☒		☒			☒			☒	☒	☒								☒		
21	1998	Despacho económico ambiental en sistemas eléctricos	5					☒	☒			☒												
22	2020	A review of power system planning and operational models for flexibility assessment in high solar energy penetration scenarios	5				☒			☒	☒				☒			☒		☒				
23	1999	Planeación de la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia	1		☒						☒			☒			☒	☒	☒					☒
24	2013	High-resolution modeling framework for planning electricity systems with high penetration of renewables	161													☒								
25	2019	Long-term energy system planning considering short-term operational constraints	6							☒		☒			☒	☒								☒
26	2016	Impact of the level of temporal and operational detail in energy-system planning models	223	☒			☒	☒			☒				☒									
27	2011	Modeling hourly electricity dynamics for policy making in long-term scenarios	109					☒														☒		☒
28	2016	A column generation approach for solving generation expansion planning problems with high renewable energy penetration	88		☒								☒									☒	☒	

## DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotermos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
29	2011	The relevance of the energy resource dynamics in the mid/long-term energy planning models	104				☒	☒			☒					☒								
30	2020	A Generation Expansion Planning model for integrating high shares of renewable energy : A Meta-Model Assisted Evolutionary Algorithm approach	7	☒					☒			☒		☒			☒		☒	☒				☒
31	2018	Implications of short-term renewable energy resource intermittency in long-term power system planning	24					☒	☒				☒			☒		☒					☒	
32	2021	Estructura y representación de Sistemas eléctricos de potencia	0	☒							☒			☒		☒	☒					☒		
33	2013	Mercado y transporte de energía eléctrica -Despachos economicos	18	☒	☒									☒										☒
34	2020	Integrated Generation-Grid-Load Economic Dispatch Considering Demand Response	2			☒		☒	☒	☒			☒	☒							☒			
35	2010	Environmental Economic Dispatch Based on Sub-area Coordinated Optimization	18			☒		☒	☒				☒											
36	2010	Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia	0	☒															☒					☒
37	2017	Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis	2	☒	☒					☒				☒								☒		
38	2011	Despacho Económico con Restricciones Ambientales en Sistemas Térmicos	0					☒		☒			☒	☒										☒

## DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotermos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
39	1995	Economic dispatch of thermal generation,	573						☒															☒
40	2020	Multi-objective techno-economic-environmental optimisation of electric vehicle for energy services	50	☒			☒	☒	☒	☒									☒	☒		☒		
41	2019	Dynamic economic and emission dispatch model considering wind power under Energy Market Reform: A case study	25	☒				☒											☒					☒
42	2015	Implementación del Algoritmo Evolutivo Multi-Objetivo de Frente de Pareto (SPEA) para la Planeación de Sistemas Eléctricos de Distribución incluyendo Huecos de Voltaje	10	☒					☒						☒							☒	☒	
43	2015	Optimización de costes y emisiones en sistemas eléctricos de potencia	0	☒			☒	☒								☒								
44	2013	Expert Systems with Applications A multi-objective evolutionary approach for generator scheduling	12		☒					☒			☒		☒			☒		☒	☒	☒		☒
45	2019	Optimización multiobjetivo en sistemas de puesta a tierra para subestaciones de potencia considerando la longitud de conductor	0					☒																
46	2006	Evenly distributed pareto points in multi-objective optimal power flow	85		☒				☒	☒			☒								☒		☒	
47	2008	Optimización Multiobjetivo de la Operación en Sistemas Automatizados de Distribución de Energía Eléctrica	2				☒			☒						☒								
48	2001	Dynamic weighted aggregation for evolutionary multi-objective optimization: Why does it work and how	291			☒					☒		☒		☒	☒			☒	☒				

## DESPACHO ECONÓMICO DE GENERACIÓN MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO EFICIENCIA DE PARETO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS AMBIENTALES Y DE PRODUCCIÓN

ITEM	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA				
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico ambiental	Sistemas de generación hidrotermos	Costos operativos del sistema	Emissiones de gases de efecto invernadero	Frontera Pareto eficiente	Implementación del modelo multiobjetivo para el despacho económico ambiental	Reducción de costos operativos en el abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación considerando el efecto de los GEI	Evaluación de las variables para satisfacer la demanda	Restricciones operativas del parque generador	Abastecimiento de la demanda en diferentes periodos de tiempo	Factores de emisiones	Disponibilidad de energía para el abastecimiento	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Minimización de la cantidad de emisiones	Determinación de la frontera de Pareto	Selección de solución óptima a través funciones de pertenencia	Modelo de optimización multiobjetivo para despacho económico ambiental	Despacho de las unidades de generación	Determinación de parámetros técnicos, económicos y ambientales	Evaluación de los parámetros y su impacto en el abastecimiento de la demanda
49	2020	Multi-objective stochastic economic dispatch with maximal renewable penetration under renewable obligation	7	☒	☒				☒	☒			☒							☒		☒		
50	2019	Hydropower Special Market Report Analysis and forecast to 2030	0	☒						☒	☒			☒			☒		☒	☒				
51	2019	Plan Maestro de Electricidad 2019-2027	7										☒			☒						☒		
CANTIDAD:				8	9	5	6	10	8	8	8	4	3	12	8	4	10	4	3	8	9	6	7	10

## 7.2 Resumen de Indicadores

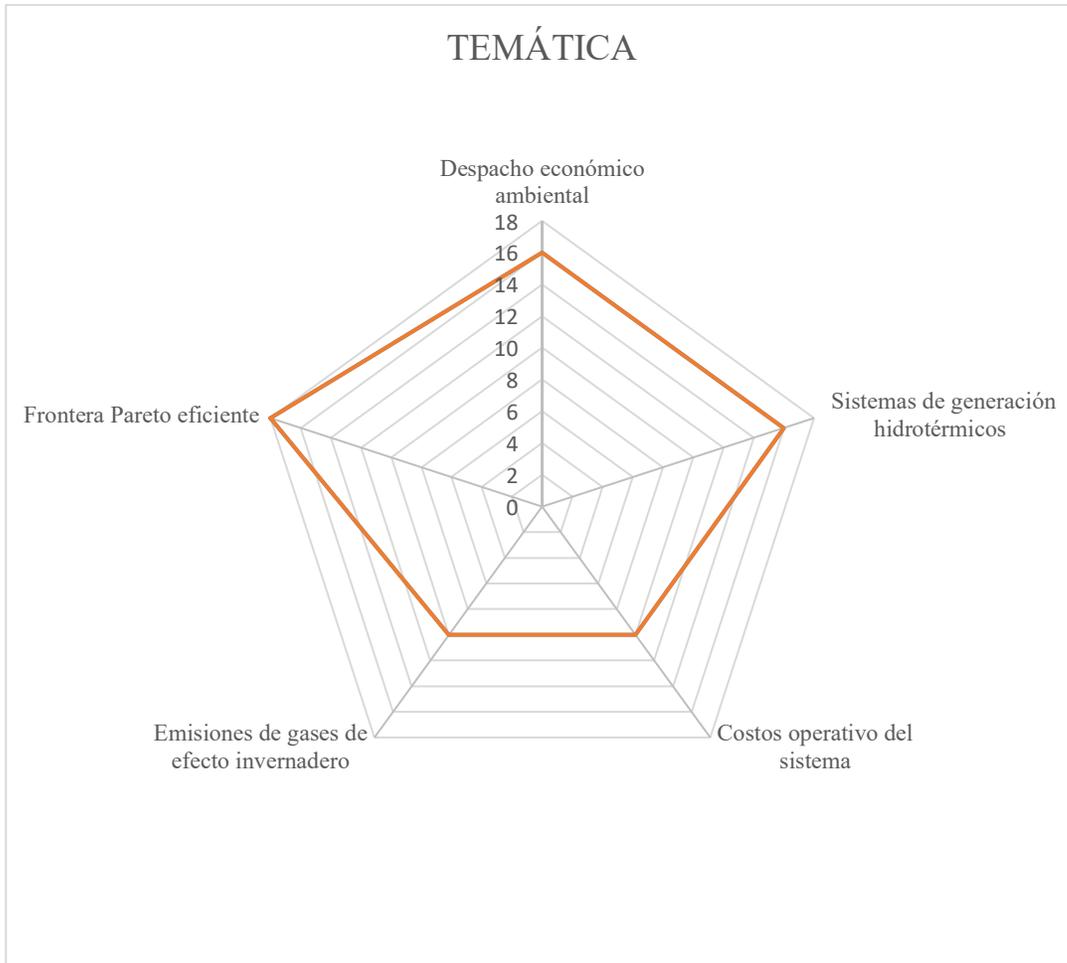


Figura 18. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

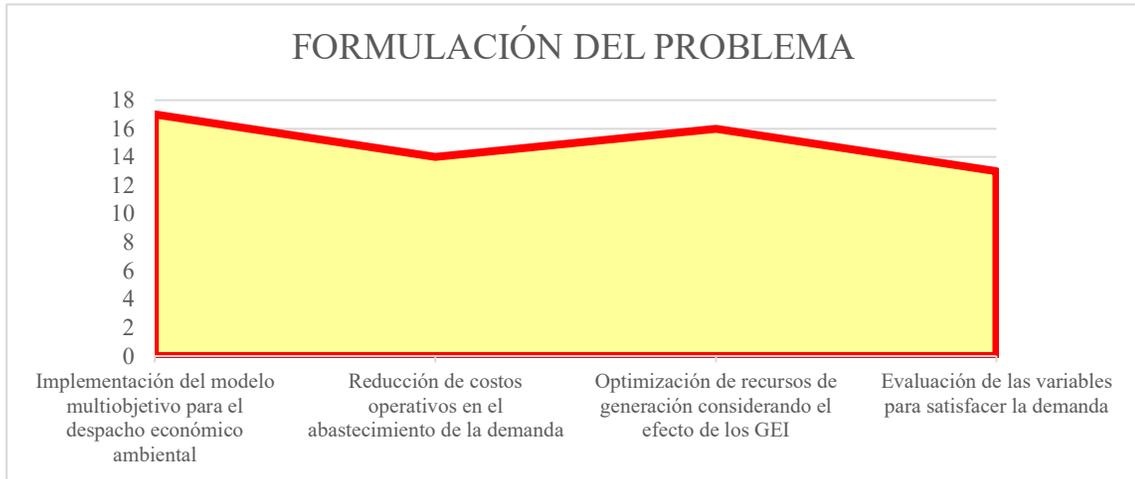


Figura 19. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

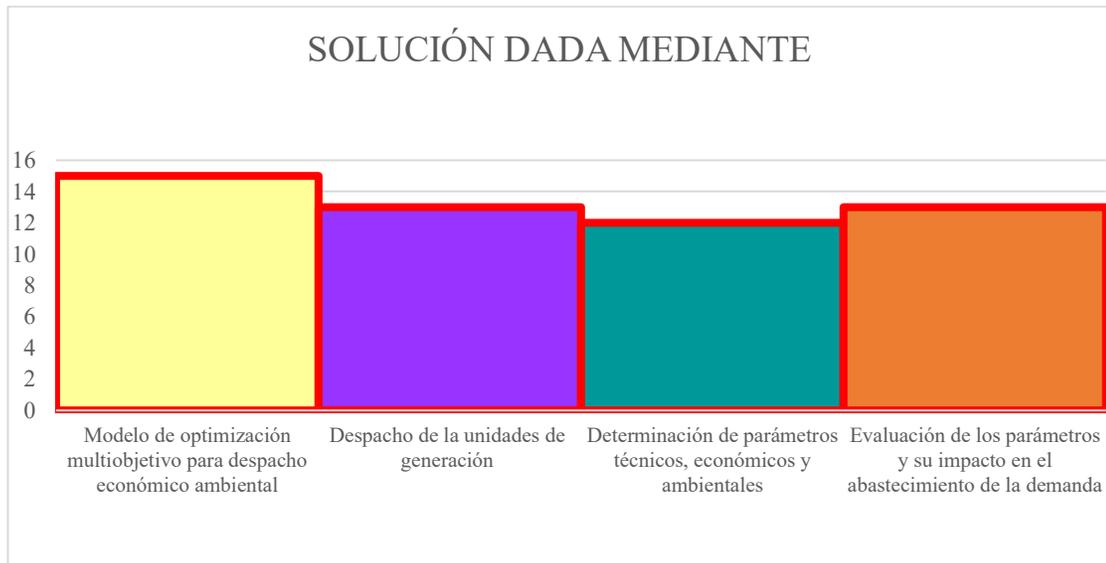


Figura 20. Indicador de solución - Estado del arte.